

Introducción

a los Materiales Utilizados en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica



Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar, Mgs.

Ing. Eduardo Francisco García Cabezas, Mgs.

Ing. Jhonny Marcelo Orozco Ramos, Mgs.

Ing. Marcelo Esteban Calispa Aguilár, MPhil.

INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES
UTILIZADOS EN LA INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA



Introducción a los Materiales Utilizados en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Primera Edición

Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar, Mgs.
Ing. Eduardo Francisco García Cabezas, Mgs.
Ing. Jhonny Marcelo Orozco Ramos, Mgs.
Ing. Marcelo Esteban Calispa Aguilar, MPhil.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE) o Autores.

DERECHOS RESERVADOS. Copyright © 2018.
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador. Cdla. Martina
Mz. 8 V. 4 - Guayaquil, Ecuador. Tel.: 00593 4 2037524
[http. :/www.cidecuador.com](http://www.cidecuador.com)

Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego.
(*peer review*).

ISBN: 978-9942-759-88-7

Impreso y hecho en Ecuador

Diseño y Tipografía: Lic. Pedro Naranjo Bazaña

Corrección: Departamento de Publicaciones CIDE

Fecha de Publicación: Octubre 2018

Catalogación en la Fuente

CDD 620

Introducción a los materiales utilizados en la ingeniería mecánica y eléctrica. – Guayaquil: CIDE, 2018

216 p.: incluye tablas e ilustraciones, 21x 29,5cm

Incluye Bibliografía

ISBN: 978-9942-759-88-7

1. Ingeniería mecánica – materiales
2. Ingeniería eléctrica – materiales



Guayaquil – Ecuador

CONTENIDO

Prólogo	18
Capítulo I	
Estructura atómica de los materiales	20
1.1. Introducción	20
1.2. Estructura del átomo	20
1.3. Modelos atómicos	21
1.3.1. Modelo atómico de Rutherford (1911)	21
1.3.2. Modelo atómico de Bohr (1913)	21
1.3.3. Modelo atómico de la mecánica ondulatoria (Heisenberg/Schrödinger, 1926)	23
1.4. Estructura electrónica del átomo	24
1.4.1. Números cuánticos	24
1.4.2. Configuración electrónica	25
1.4.3. Estabilidad atómica y electronegatividad	26
1.5. Enlaces atómicos	26
1.5.1. Enlaces primarios	26
1.5.1.1. Enlace covalente	26
1.5.1.2. Enlace iónico	29
1.5.1.3. Enlace metálico	31
1.5.2. Enlace secundario	33
1.5.2.1. Enlace de dipolos inducidos	34
1.5.2.2. Enlace de dipolos permanente	34
1.5.3. Enlaces mixtos	35
1.5.3.1. Enlace mixto iónico-covalente	35
1.5.3.2. Enlace mixto metálico-covalente	36
1.5.3.3. Enlace mixto metálico-iónico	36
1.5.4. Relación de los enlaces	36
1.6. Fuerzas interiónicas	36
1.7. Energías interiónicas	38
1.8. Tabla periódica de los elementos	39
Capítulo II	
Estructura física de los materiales	42
2.1. Introducción	42
2.2. Ordenamiento atómico	42
2.3. Redes espaciales y celdas unitarias	43
2.3.1. Red espacial	43
2.3.2. Celda unitaria	44
2.3.3. Parámetros de red	44
2.3.4. Átomos por celda unitaria	44
2.3.5. Factor de empaquetamiento	46
2.3.6. Celdas unitarias cúbicas	48
2.3.6.1. Ordenamiento atómico en celdas unitarias cúbicas.....	48

2.3.6.2.	Índices de dirección en celdas unitarias cúbicas	49
2.3.6.3.	Índices de Miller en celdas unitarias cúbicas	49
2.3.6.4.	Distancia entre planos	50
2.4.	Celdas unitarias hexagonales	51
2.4.1.	Índices de dirección en celdas unitarias hexagonales	51
2.4.2.	Índices de Miller-Bravais en celdas unitarias hexagonales	52
2.4.3.	Isotropía y anisotropía	52
2.4.4.	Comparación entre estructuras FCC, BCC y HCP	53
2.4.5.	Polimorfismo y alotropía	53
2.4.6.	Análisis de estructuras cristalinas	54
2.4.7.	Proceso de difracción	56
2.4.8.	Condiciones de difracción	57
2.4.9.	Interpretación de resultados experimentales de estructuras cristalinas cúbicas.....	57
2.5.	Estructura de los materiales cerámicos	59
2.5.1.	Tipos principales de intersticios en los cerámicos	60
2.5.2.	Estructura del cloruro sódico	61
2.5.3.	Estructura del cloruro de cesio	62
2.5.4.	Estructuras cristalinas del tipo AmXp	64
2.5.4.1.	Estructura cristalina tipo fluorita AX ₂	64
2.5.4.2.	Estructura cristalina tipo antiferrofluorita A ₂ X	65
2.5.5.	Estructura de los cerámicos cristalinos	65
2.5.6.	Estructura Perovskite	65
2.5.7.	Estructura del corindón	66
2.5.8.	Estructura de espinel	66
2.5.9.	Grafito	67
2.5.10.	Estructura de los silicatos cristalinos	67
2.5.11.	Compuestos de silicatos	68
2.5.12.	Estructura de anillo y cadena	68
2.5.13.	Estructuras laminares (arcillas)	68
2.5.14.	Sílice	70
2.6.	Polímeros	72
2.6.1.	Termoplásticos	72
2.6.2.	Estructura de los polímeros lineales no cristalinos	73
2.6.3.	Estructura de los polímeros lineales no cristalinos	74
2.6.4.	Homopolímeros y copolímeros	75
 Capítulo III		
	Solidificación e imperfecciones cristalinas	78
3.1.	Introducción	78
3.2.	Solidificación en metales	78
3.3.	Proceso de solidificación	78
3.4.	Formación de núcleos estables	80
3.4.1.	Nucleación homogénea o espontánea	80
3.4.2.	Proceso de nucleación homogénea	80
3.4.3.	Energías que participan en la nucleación homogénea	80
3.4.4.	Embrión y núcleo crítico	82
3.4.5.	Tasa de nucleación	84
3.4.6.	Nucleación heterogénea	84
3.5.	Crecimiento	86
3.5.1.	Estructura de grano	86
3.5.2.	Granos equiaxiales	87
3.5.3.	Granos columnares	87

3.5.4.	Estructuras en solidificación	88
3.5.5.	Soluciones sólidas metálicas	89
3.5.6.	Solución sólida sustitucional	89
3.5.7.	Soluciones sólidas	90
3.6.	Imperfecciones cristalinas	91
3.6.1.	Introducción	91
3.6.2.	Imperfecciones en los sólidos	92
3.6.3.	Diferencia entre defecto y falla	93
3.6.4.	Clasificación de los defectos	93
3.6.4.1.	Defectos puntuales	93
3.6.4.2.	Vacantes	94
3.6.4.3.	Agregados intersticiales	95
3.6.4.4.	Desorden de Frenkel	96
3.6.4.5.	Defecto Schottky	96
3.6.4.6.	Defecto sustitutivo	96
3.6.4.7.	Phonon	96
3.6.4.8.	Desorden anti estructural	96
3.6.5.	Defectos de línea o dislocaciones	97
3.6.5.1.	Dislocación de arista	98
3.6.5.2.	Dislocación de hélice	99
3.6.5.3.	Dislocaciones mixtas	100
3.6.6.	Defectos superficiales	100
3.6.6.1.	Superficie	100
3.6.6.2.	Bordes de grano	101
3.6.6.3.	Límites de inclinación	102
3.6.6.4.	Límites gemelos	102
3.6.6.5.	Faltas acumuladas	103
3.6.7.	Defectos en volumen	103
3.6.7.1.	Poros y grietas	104
3.6.7.2.	Inclusiones	105
3.6.7.3.	Segregaciones	105
3.6.7.4.	Precipitados	106
3.6.8.	Rechupes	106
3.6.8.1.	Rechupes por solidificación	106
3.6.8.2.	Rechupes internos	107

Capítulo IV

Difusión	109	
4.1.	Introducción	109
4.2.	Modelos para difusión	110
4.3.	Los dos modelos básicos	111
4.4.	Coefficientes de difusión en gases	112
4.5.	Gas a altas presiones	114
4.6.	Los coeficientes de difusión en líquidos	115
4.7.	Difusión de vacantes	115
4.8.	Difusión intersticial	116
4.9.	Difusión en sólidos	116
4.10.	Difusión en estado estacionario	117
4.10.1.	Efecto de la temperatura en la difusión en los sólidos	119
Ejercicios	119	
4.11.	Difusión en estado no estacionario	121
Ejercicios	123	

Capítulo V

Procesamiento y propiedades de los materiales	128
5.1. Procesamiento	128
5.1.1. Colado	128
5.1.1.1. Proceso de colada	128
5.1.1.2. Tipos de colada	128
5.1.2. Laminación	130
5.1.2.1. Laminación en caliente	130
5.1.2.2. Laminación en frío	131
5.1.3. Forja	132
5.1.3.1. Forja de matriz abierta	132
5.1.3.2. Forja de matriz cerrada	132
5.1.4. Extrucción	132
5.1.5. Embutición	133
5.1.6. Trabajo o conformado según la temperatura	133
5.1.6.1. Trabajo en caliente	133
5.1.7. Trabajo en frío	135
5.1.7.1. Propósitos del trabajo en frío	136
5.1.7.2. Ventajas del trabajo en frío	136
5.1.7.3. Desventajas del trabajo en frío	136
5.1.8. Recristalización	137
5.1.8.1. Temperatura de recristalización	137
5.1.9. Recocido de recristalización	137
5.1.9.1. Recuperación	137
5.1.9.2. Leyes de recristalización	138
5.1.9.3. Nucleación del grano	139
5.1.9.4. Crecimiento de granos primarios	140
5.1.10. Trefilado	140
5.1.11. Soldadura	140
5.1.11.1. Métodos de unión de metales	140
5.1.11.2. Definición de soldadura	141
5.1.11.3. Algunas definiciones de soldadura	141
5.1.11.4. Formación de una junta soldada	141
5.1.11.5. Procesos de soldadura	143
5.2. Propiedades mecánicas	144
5.2.1. Introducción	144
5.2.2. Concepto de esfuerzo y deformación	144
5.2.3. Ensayos de tracción	145
5.2.4. Ensayos de compresión	147
5.2.5. Deformación elástica	148
5.2.5.1. Comportamiento bajo cargas uniaxiales	148
5.2.5.2. Inelasticidad	149
5.2.6. Resistencia a la tracción	150
5.2.6.1. Ductilidad	150
5.2.7. Resiliencia	151
5.2.8. Tenacidad	152
5.2.9. Dureza	152
5.2.9.1. Ensayos de dureza Rockwell	153
5.2.9.2. Ensayos de dureza Brinell	154
5.2.9.3. Ensayos de microdureza Vickers y Knoop	155
5.2.10. Ejercicios de aplicación en resistencia de materiales	156
5.2.10.1. Introducción	156

5.2.10.2	Equilibrio de cuerpos deformables	156
5.2.10.3	Esfuerzos axiales	161
5.2.10.4	Esfuerzo cortante	170
5.2.10.5	Esfuerzos permisibles	176
5.2.10.6	Deformación total y unitaria	182
5.2.10.7	Ensayo de tensión	183
5.2.10.8	Regiones elásticas y plásticas	184
5.2.10.9	Esfuerzos de temperatura	192
5.3.	Propiedades eléctricas	196
5.3.1.	Introducción	196
5.3.2.	Ley de OHM	196
5.3.2.1.	Resistividad eléctrica	197
5.3.2.2.	Conductividad eléctrica	197
5.3.2.3.	Capacitancia eléctrica	198
5.3.3.	Portadores de carga y conducción	199
5.3.4.	Clasificación de los materiales según su conductividad	199
5.3.4.1.	Conductores	199
5.3.4.2.	Aislantes	199
5.3.4.3.	Semiconductores	200
5.3.4.4.	Semiconductores intrínsecos	200
5.3.4.5.	Semiconductores extrínsecos	201
5.3.4.6.	Semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo)	201
5.3.4.7.	Semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo)	201
5.3.4.8.	Materiales superconductores	202
5.3.4.9.	Modelo de bandas de energía para aislantes	203
5.3.4.10	Banda de Valencia	203
5.3.4.11	Banda de conducción	203
5.3.4.12	Dispositivos semiconductores	203
5.3.4.13	Diodo rectificador	203
5.3.4.14	Polarización inversa	204
5.3.4.15	Polarización directa	204
5.3.4.16	Transistor de unión bipolar	204
5.4.	Propiedades magnéticas	206
5.4.1.	Introducción	206
5.4.2.	Materiales magnéticamente blandos	206
5.4.3.	Materiales magnéticamente duros	207
5.4.4.	Permeabilidad magnética	207
5.4.4.1	Permeabilidad relativa (μ_r)	208
5.4.4.2	Susceptibilidad (K)	209
5.4.5.	Fundamentos magnéticos	209
5.4.5.1.	Diamagnetismo	209
5.4.5.2.	Paramagnetismo	210
5.4.5.3.	Ferromagnetismo	210
	Referencias	212

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura	1.	Modelo del átomo similar a un planeta de Rutherford	21
Figura	2.	El modelo del átomo de Bohr	22
Figura	3.	Modelo atómico de Bohr. Los niveles de energía de las órbitas para diferentes valores del número cuántico principal n. ($1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$)	22
Figura	4.	Comparación del modelo atómico de (a) Bohr y (b) el modelo atómico de la mecánica ondulatoria en términos de la distribución de un electrón	23
Figura	5.	Estructura atómica del sodio, número atómico 11, mostrando los electrones de las capas cuánticas K, L y M	24
Figura	6.	Electronegatividad de algunos elementos	26
Figura	7.	El enlace covalente en el caso del silicio	27
Figura	8.	Imagen conceptual del enlace covalente considerando a las personas como núcleo y a los perros como electrones	27
Figura	9.	Enlace covalente en una molécula de metano	29
Figura	10.	Unión de moléculas de compuestos covalentes	29
Figura	11.	Enlace iónico de la sal	30
Figura	12.	Enlace iónico	30
Figura	13.	Ilustración conceptual del enlace iónico considerando a la chica como núcleo más débil que el núcleo del chico y a los perros como electrones	31
Figura	14.	Enlace metálico	32
Figura	15.	Cuando se aplica voltaje a un metal, los electrones del mar de electrones se pueden mover fácilmente y conducir la corriente	32
Figura	16.	El sistema de electrones libres en el enlace metálico en un metal monovalente ..	33
Figura	17.	Ilustración esquemática de la vinculación de Van Der Waals entre dos dipolos	34
Figura	18.	Representaciones esquemáticas de (a) un átomo eléctricamente simétrico y (b) un dipolo atómico inducido	34
Figura	19.	Representación esquemática de enlaces de hidrógeno en fluoruro de hidrógeno (HF)	35
Figura	20.	Relación de los diferentes tipos de enlace para los materiales	36
Figura	21.	Fuerza vs separación interatómica	37
Figura	22.	Energía potencial vs separación interiónicas	38
Figura	23.	La tabla periódica de los elementos. Los números entre paréntesis son los pesos atómicos de los isótopos más estables o comunes	39
Figura	24.	Niveles de arreglo atómico en los materiales	42
Figura	25.	Representación de una estructura cristalina	43
Figura	26.	a) Red espacial de un sólido cristalino y b) Celda unitaria mostrando sus constantes de red	43
Figura	27.	Estructuras espaciales con sus átomos	45
Figura	28.	Principales estructuras cristalinas en los metales a) BCC, b) FCC y c) HCP	45
Figura	29.	Representación estructura BCC a) Posiciones atómicas, b) Esferas rígidas y c) Aislada	46
Figura	30.	Relación arista – radio atómico estructura BCC	46

Figura	31.	Representación estructura FCC a) Posiciones atómicas, b) Esferas rígidas y c) Aislada	47
Figura	32.	Relación arista – radio atómico estructura FCC	47
Figura	33.	Representación estructura HCP a) Posiciones atómicas, b) Esferas rígidas y c) Aislada	47
Figura	34.	a) Ejes cartesianos y b) Posiciones atómicas en una celda cúbica	48
Figura	35.	Representaciones de varios índices de dirección	49
Figura	36.	Varias representaciones de índices de Miller	50
Figura	37.	Planos paralelos con índices de Miller (122) (Tilley, 2006)	51
Figura	38.	Varios ejemplos de índices de dirección en estructura HCP	51
Figura	39.	Representación estructura HCP	52
Figura	40.	Apilamiento atómico FCC y HCP	53
Figura	41.	Plano (110) de BCC con sus diagonales	53
Figura	42.	Patrón de difracción de tungsteno	55
Figura	43.	Reflexión de Rayos X para un cristal a) ángulo de incidencia arbitrario b) ángulo de fase y refuerzo c) representación en b) sin la representación de la onda	56
Figura	44.	Proceso de difracción	56
Figura	45.	Ejemplo de un patrón experimental de difracción de rayos X. Grabado para policristalino, muestra en polvo de PbTiO ₃ (tetragonal) usando radiación Cu K α 1	58
Figura	46.	Huecos octaédricos (Estructura FCC)	60
Figura	47.	Huecos tetraédricos (Estructura FCC)	61
Figura	48.	Estructura cristalina del cloruro de sodio, ClNa	62
Figura	49.	Celdilla unidad de la estructura cristalina del cloruro de cesio (CsCl)	62
Figura	50.	Estructura cristalina de la blenda o esfalerita (ZnS)	63
Figura	51.	Estructura cristalina de la wurtzita (ZnS)	64
Figura	52.	Estructura fluorita. Los cationes tienen coordinación 8 mientras que los aniones tienen coordinación 4 (tetraédrica)	64
Figura	53.	Estructura de α -Ag ₂ Te. Ag = Esferas negras, Te = Esferas blancas	65
Figura	54.	Celda unitaria Perovskite	65
Figura	55.	Celda unitaria corindón	66
Figura	56.	Celda unitaria corindón	66
Figura	57.	Estructura del grafito	67
Figura	58.	Estructura cristalina de cristobalita una de las formas del SiO ₂	67
Figura	59.	Disposición de los tetraedros de sílice: a) isla de orto silicato, b) isla de piro silicato, c) cadena, d) anillo. Los iones positivos son atraídos hacia los grupos silicatos	68
Figura	60.	Los tetraedros de sílice producen estructuras laminares en forma hexagonal, que son la base de las arcillas y otros minerales	69
Figura	61.	Caolinita estructura laminar de los silicatos	69
Figura	62.	Montmorillonita estructura laminar de los silicatos	70
Figura	63.	Diagrama de fase de presión-temperatura para el SiO ₂	70
Figura	64.	Expansión del cuarzo	71
Figura	65.	Enlace covalente en la molécula de etileno ilustrado por a) electrón punto (los puntos representan los electrones de valencia), y b) notación de línea recta	73
Figura	66.	Estructura molecular de una cadena de polietileno de corta longitud	73
Figura	67.	Representación esquemática de un polímero. Las esferas representan las unidades que se repiten en la cadena del polímero, y no a átomos específicos	74
Figura	68.	Reacción general para la polimerización de los polímeros de vinilo	74
Figura	69.	Fórmulas estructurales de algunos polímeros de vinilo	75
Figura	70.	Fórmulas estructurales de algunos polímeros de vinilideno	75

Figura	71.	Copolímero en el que las unidades diferentes están dispuestas aleatoriamente a lo largo de la cadena	76
Figura	72.	Copolímero en el que las unidades se alternan regularmente	76
Figura	73.	Copolímero de bloque	76
Figura	74.	Copolímero injertado	76
Figura	75.	Proceso de solidificación	78
Figura	76.	Proceso de solidificación en un cuerpo	79
Figura	77.	Dibujo de la estructura de lingote que se obtiene durante la solidificación. En ella se señalan las características de las piezas vaciadas	79
Figura	78.	El proceso y el cambio de energía de la nucleación espontánea (homogénea nucleación)	81
Figura	79.	Radio crítico de los núcleos de cobre en comparación con el grado de subenfriamiento	83
Figura	80.	El modelo de lente para la nucleación de la interfaz (nucleación heterogénea). (a) núcleo crítico de nucleación de la interfaz. (b) energía del núcleo crítico. (c) cambio en la energía libre de acuerdo con la nucleación	85
Figura	81.	Nucleación heterogénea de un sólido en un agente de nucleación. na = agente de nucleación, SL = sólido-líquido, S = sólido, L = líquido; θ = ángulo de contacto.	85
Figura	82.	Tamaños de grano	86
Figura	83.	Tipos de grano	87
Figura	84.	Granos equiaxiales	87
Figura	85.	Granos columnares	87
Figura	86.	Estructura en solidificación	88
Figura	87.	Granos en un recipiente	88
Figura	88.	a) Estructura cristalina característica de un metal puro. b) estructura cristalina característica de una fundición para aleación, mostrando la segregación hacia el centro de los componentes de la aleación. c) figura de un metal con un molde calentado	89
Figura	89.	Soluciones sólidas	91
Figura	90.	Diagrama limite elástico vs porcentaje del elemento aleante	91
Figura	91.	Defectos de punto en una red cristalina	94
Figura	92.	Desorden anti estructural	96
Figura	93.	Dislocaciones en una lámina de acero inoxidable	97
Figura	94.	Esquemas de (a) dislocación del borde (b) deslocalización del tornillo	98
Figura	95.	Dislocación del borde causada por un plano parcial adicional de átomos en el cristal	98
Figura	96.	Determinación del vector Burgers (BA)	99
Figura	97.	Esquema de la distorsión de tornillo	99
Figura	98.	Dislocación mixta	100
Figura	99.	Defectos superficiales externos	101
Figura	100.	Esquemas de (a) angulo alto y (b) límites de ángulo bajo	101
Figura	101.	Área de desorden en los límites de grano	102
Figura	102.	Límites de inclinación	102
Figura	103.	Límites gemelos	103
Figura	104.	Fallo en la secuencia de apilamiento de un cristal FCC	103
Figura	105.	Poros en lingote y gancho de anclaje	104
Figura	106.	Grietas en un lingote	105
Figura	107.	Inclusiones	105

Figura	108.	Esquema de segregación de un lingote tradicional solidificado y una losa delgada segregación de una losa fina de colada continua (losa de CSP)	106
Figura	109.	Precipitados	106
Figura	110.	Distintas formas en que ocurren los rechupes o cavidades de contracción en función del metal que se está trabajando	107
Figura	111.	(a) una pareja de difusión de cobre y níquel antes de un tratamiento térmico a alta temperatura. (b) representaciones esquemáticas de Cu (rojo círculos) y Ni (círculos azules) ubicaciones de átomos dentro la pareja de difusión. (c) concentraciones de cobre y níquel como una función de la posición a través de la pareja F	109
Figura	112.	(a) Una pareja de difusión de cobre y níquel después de un tratamiento térmico a alta temperatura, mostrando la zona de difusión aleada. (b) representaciones esquemáticas de átomos de cu (círculos rojos) y ni (círculos azules) lugares dentro de la pareja. (c) concentraciones de cobre y níquel como una función de posición a través la pareja	110
Figura	113.	Un experimento de difusión simple. Dos bulbos que inicialmente contienen diferentes gases son conectados con un capilar largo y delgado. El cambio de concentración en cada foco es una medida de difusión y puede analizarse de dos maneras diferentes	111
Figura	114.	Representación esquemática de (a) difusión de vacantes (b) difusión intersticial	116
Figura	115.	Difusión en estado estacionario (a) sin depender del tiempo (b) comportamiento de la curva	118
Figura	116.	Comportamiento de las curvas de difusión dependiendo del tiempo	121
Figura	117.	Perfil de concentración para difusión de estado no programado; concentración los parámetros se relacionan con la ecuación de la segunda ley de Fick	123
Figura	118.	Calderos o cucharas de colada	128
Figura	119.	Desescoridado, desnatadora	128
Figura	120.	Colada horizontal	129
Figura	121.	Colada vertical	129
Figura	122.	Molde superpuesto	129
Figura	123.	Los planchones perfectamente conformados se cortan a la longitud requerida mediante una llamada de oxicorte	131
Figura	124.	Chapa de acero laminada en frío	131
Figura	125.	Formas básicas de matrices abiertas	132
Figura	126.	Conjunto de matrices cerradas utilizado en la producción de bielas de automóvil	132
Figura	127.	Procesos básicos de extrusión en metales: a) directo y b) indirecto	133
Figura	128.	Embutición profunda de un vaso cilíndrico a) antes de la embutición y b) después de la embutición	133
Figura	129.	Refinamiento del grano en el proceso de laminación en caliente	134
Figura	130.	Perforación en caliente o tubos sin costura	134
Figura	131.	Extrusión en frío	135
Figura	132.	Estirado en frío	136
Figura	133.	Temp. de 99.98% al laminado en frío	137
Figura	134.	Diferencia de potencial, que representa la energía liberada, durante el calentamiento uniforme de la varilla de cobre puro trenzado plásticamente. recuperación de resistividad y dureza también se muestra	138
Figura	135.	Acero dulce forjado de bajo carbono, recocido e impreso con bola brinelt (diámetro de 0.2mm), luego recocido 30min al 750°C. el tamaño de grano es mayor justo dentro de la zona más allá de la cual la tensión crítica para la recristalización donde no se ha logrado del todo	139

Figura	136.	Proyecciones estereográficas de las posiciones marcadas. nuevos granos 106 tiene una orientación con la extensión de la banda de la matriz “b”, mientras que los otros nuevos tienen una orientación “a”	139
Figura	137.	Tasa de crecimiento de nuevos granos en un cristal de aluminio de 615°C. el eje común [111] es el mismo en el cristal deformado	140
Figura	138.	Variación de la energía potencial	142
Figura	139.	Formación teórica de una soldadura	142
Figura	140.	Representación esquemática de la superficie metálica limpia (200 capas atómicas o 500 ángulos)	142
Figura	141.	Ilustración esquemática de como una carga de tracción produce un alargamiento y una deformación lineal positiva. Las líneas discontinuas representan la forma antes de la deformación. Las líneas sólidas después de la deformación	145
Figura	142.	Ilustración esquemática de como una carga de compresión produce una contracción y una deformación lineal negativa	145
Figura	143.	Representación esquemática de la deformación de cizalladura	145
Figura	144.	Representación esquemática de una deformación torsional (ósea un ángulo Θ) Producida por un par aplicado T	145
Figura	145.	Esquema del aparato utilizado para realizar el ensayo de tracción. La probeta es alargada por el cabezal móvil; La celda de la carga y el extensómetro miden, respectivamente, la carga aplicada y el alargamiento	146
Figura	146.	Probeta de tracción normalizada con sección circular	147
Figura	147.	Diagrama esquemático tensión- deformación con deformación elástica lineal para ciclos de carga- descarga	149
Figura	148.	Diagrama esquemático tensión - deformación mostrando comportamiento elástico no lineal y cómo se determinan los módulos secante y tangente	149
Figura	149.	Curva típica de tracción hasta la fractura, punto f. La resistencia a tracción está indicada en el punto m. Los insertos circulares representan la geometría de la probeta deformada en varios puntos de la curva	150
Figura	150.	Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura	151
Figura	151.	Esquema donde se indica cómo se obtiene el módulo de resiliencia (correspondiente al área sombreada) a partir de la curva de tracción	152
Figura	152.	Comparación de las varias escalas de dureza	155
Figura	153.	Viga ejemplo 5.1	157
Figura	154.	Diagrama cuerpo libre ejemplo 5.1	157
Figura	155.	Corte en el punto D ejemplo 5.1	158
Figura	156.	Viga ejemplo 5.2	158
Figura	157.	Diagrama del cuerpo libre ejemplo 5.2	159
Figura	158.	Corte en el punto D lado izquierdo ejemplo 5.2	159
Figura	159.	Corte en D, lado derecho ejemplo 5.2	160
Figura	160.	Esfuerzo axial	162
Figura	161.	Ejemplo 5.3	163
Figura	162.	Cortes de tramos Ejemplo 5.3	163
Figura	163.	Cortes del tramo AB Ejemplo 5.3	163
Figura	164.	Cortes del tramo BC Ejemplo 5.3	164
Figura	165.	Ejemplo 5.4	165
Figura	166.	Corte de tramos Ejemplo 5.4	165
Figura	167.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.4	165
Figura	168.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.5	166
Figura	169.	Ejemplo 5.6.	167
Figura	170.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.6	168

Figura	171.	Corte tramo AB Ejemplo 5.6.	168
Figura	172.	Corte tramo CD Ejemplo 5.6	169
Figura	173.	Pernos a cortante	170
Figura	174.	Perno a cortante simple	170
Figura	175.	Diagrama del cuerpo libre perno a cortante simple	171
Figura	176.	Perno a cortante doble	171
Figura	177.	Diagrama del cuerpo libre pernos a cortante doble	172
Figura	178.	Material sufriendo aplastamiento	172
Figura	179.	Área proyectada para esfuerzo de aplastamiento	172
Figura	180.	Ejemplo 5.7.	173
Figura	181.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.7	173
Figura	182.	Ejemplo 5.8.	174
Figura	183.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.8	175
Figura	184.	Ejemplo 5.9	178
Figura	185.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.9	178
Figura	186.	Área proyectada para esfuerzo cortante Ejemplo 5.10	180
Figura	187.	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.10	180
Figura	188.	Área proyectada para esfuerzo cortante Ejemplo 5.10	182
Figura	189	Elasticidad de materiales	183
Figura	190	Máquina para ensayos de tensión y probetas	183
Figura	191	Curva esfuerzo – deformación	184
Figura	192	Ejemplos de materiales no lineales. a) caucho blando, b) vidrio	185
Figura	193	Módulo de elasticidad E para diferentes materiales	186
Figura	194	Diferencias en compresión y tensión. a) material frágil, b) material dúctil	187
Figura	195	Ejemplo 5.11	187
Figura	196	Corte tramo DE Ejemplo 5.11	188
Figura	197	Corte tramo CD Ejemplo 5.11	188
Figura	198	Corte tramo BC Ejemplo 5.11	189
Figura	199	Corte tramo AB Ejemplo 5.11	189
Figura	200	Ejemplo 5.12	190
Figura	201	Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.12	190
Figura	202	Geometría de la deformación de la barra rígida CE Ejemplo 5.12	191
Figura	203	Barra expuesta a altas temperaturas	192
Figura	204	Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones	193
Figura	205	Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, eliminación de un apoyo redundante	193
Figura	206	Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, deformación producida por la reacción en el apoyo eliminado	193
Figura	207	Ejemplo 5.13	194
Figura	208	Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, eliminación del apoyo redundante en C	195
Figura	209	Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, deformación producida por la reacción de C	195
Figura	210	Diferencia de potencial ΔV aplicado al espécimen de alambre metálico de área de sección transversal A	197
Figura	211	Variación de la conductividad eléctrica de algunos metales con la temperatura..	199

Figura	212.	Condensador de placas paralelas está formado por un aislante, o dieléctrico, entre dos electrodos metálicos	200
Figura	213	Estructura del cristal cúbico de diamante	200
Figura	214	Electrón excitado desde un enlace en A y movido hasta el punto B	201
Figura	215	Semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo)	201
Figura	216	Semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo)	202
Figura	217	La resistividad del mercurio desciende repentinamente a 0 a una temperatura crítica $T_c = 4.12$ K, por debajo de T_c el mercurio es superconductor	202
Figura	218	Modelo de banda para energía aislante	203
Figura	219	Demostración de polarización inversa	204
Figura	220	Demostración de polarización directa	204
Figura	221	Transistor de unión bipolar	205
Figura	222	Proceso de luminiscencia	205
Figura	223	Campo magnético en un solenoide largo. Si $NI/m = 79.57747$ A/m, el campo en el centro del solenoide sería 1 Oe	206
Figura	224	a) Curva de desmagnetización y b) curva de productos energéticos para un Permanente	207
Figura	225	Curva de B -versus- H curva de solenoide	208
Figura	226	Curva de B -versus- curva de H para una barra de hierro virgen en el campo de solenoide	208
Figura	227	Explicación del diamagnetismo. a) Inducción de una corriente una pieza de alambre en forma de lazo moviendo un imán de barra hacia el lazo de alambre. La corriente en el circuito causa un campo magnético que se dirige opuesto al campo magnético del imán. b) Precesión de un electrón en órbita en un campo magnético externo	209
Figura	228	Paramagnetismo	210
Figura	229	Ferromagnetismo	211

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	1.	Patrón utilizado para la asignación de electrones a los niveles de energía	25
Tabla	2.	Número permitido de electrones en los niveles y subniveles de energía	25
Tabla	3.	Valores del exponente de repulsión	38
Tabla	4.	Relación de longitud de aristas y ángulos interaxiales para los siete sistemas cristalinos	44
Tabla	5.	Relación constante de red y radio atómico	48
Tabla	6.	Variaciones de estructuras cristalinas para elementos metálicos	54
Tabla	7.	Reflexiones en estructuras cúbicas	57
Tabla	8.	Ejemplos de planos difractores para estructuras cúbicas	57
Tabla	9.	Tipos y características generales de los cerámicos	59
Tabla	10.	Números y geometrías de coordinación para varios cocientes entre los radios del catión y del anión	61
Tabla	11.	. Resumen de las estructuras cristalinas más comunes de los cerámicos	71
Tabla	12.	Valores para la Temperatura de Solidificación, calor de fusión, energía de superficie y máximo subenfriamiento para algunos metales seleccionados.....	82
Tabla	13.	Valores experimentales de coeficientes de difusión en gases a una atmósfera.....	112
Tabla	14.	Volúmenes de difusión atómica para su uso	114
Tabla	15.	Coeficientes de difusión a 25 °C en algunos sólidos característicos	117
Tabla	16.	Coeficiente de Difusión de algunos solutos y solventes	117
Tabla	17.	Función error	122
Tabla	18.	Módulos de elasticidad y de cizalladura a temperatura ambiente y coeficiente de Poisson para varios metales y aleaciones	148
Tabla	19.	Propiedades mecánicas típicas de varios metales en el estado de recocido y de pureza Comercial	151
Tabla	20.	Técnicas de ensayo de dureza	153
Tabla	21.	Escalas de dureza Rockwell	154
Tabla	22.	Escalas de dureza Rockwell superficial	154
Tabla	23.	Unidades utilizadas para el esfuerzo mecánico	162
Tabla	24.	Conductividades eléctricas de algunos metales y no metales a temperatura ambiente	197
Tabla	25.	Conductividad eléctrica a temperatura ambiente	198

Prólogo

Conocer la introducción a los Materiales utilizados en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica tiene por objetivo brindar una base de conocimientos sólidos a los estudiantes de Ingeniería en el entendimiento de la constitución de los materiales metálicos, poliméricos y cerámicos.

Como inicio para el lector se da a comprender la formación de un material a partir de la escala atómica y de sus enlaces, dado que las características y propiedades de estos dependerán de un ordenamiento y enlace entre átomos. Interpretando porqué un material es conductor eléctrico y térmico o si es aislante, si posee buena resistencia mecánica o a su vez si es muy débil, si su temperatura de fusión será alta, posee fragilidad o ductilidad, en fin, es la base indispensable para una posterior selección de materiales en el ámbito del diseño mecánico.

Al revisar la segunda unidad se distingue cualidades esenciales y diferencia entre materiales, citando como ejemplo una característica típica de los metales, la formación de capas atómicas muestra estructuras cristalinas con un ordenamiento a largo alcance (hierro **BCC** - Body Center Cubic), obteniendo buenas propiedades mecánicas, mientras que un polímero tiene un ordenamiento de corto alcance entre las cadenas moleculares, concluyendo del porqué su baja resistencia mecánica.

En la Ingeniería Mecánica es muy importante enfocarse en la resistencia de un acero en específico para un diseño en particular, pero dicha resistencia dependerá de los constituyentes que se tratarán en un libro posterior y de su proceso de manufactura, sabiendo que la mayoría de elementos mecánicos metálicos son previamente fundidos y solidificados a diferentes velocidades de enfriamiento, dando a muchas irregularidades cristalinas y reduciendo dicha resistencia, lo cual se deberá diseñar con un mayor coeficiente de seguridad, la unidad tres enseña específicamente los defectos producidos en la solidificación de los metales.

Es necesario la fabricación de elementos de máquinas como engranajes, que requieren buena tenacidad en el núcleo y muy alta dureza para evitar el desgaste al entrar en contacto entre sí, la forma más común de obtener estas características es mediante difusión en estado sólido, en el texto se hace hincapié en la aportación de carbono en la superficie de aceros en estado no estacionario, típico de los procesos industriales.

Finalmente, se presenta conceptos generales de los procesos de manufactura más comunes en la industria ecuatoriana, con la especificación y evaluación de todas las propiedades mecánicas, el aporte de ejercicios resueltos en la resistencia de materiales como el inicio al diseño de elementos de máquinas, enseña un texto con aplicación ingenieril generando interés en los estudiantes que necesitan conocimientos de los materiales utilizados en la ingeniería. Sin descartar las propiedades eléctricas y magnéticas que influyen en la tecnología actual mediante el uso de semiconductores, pudiendo ingresar a la microelectrónica con circuitos integrados cada vez de menor tamaño.



Capítulo 1

Capítulo 1

Estructura atómica
de los materiales

Capítulo I.

Estructura Atómica de los Materiales

1.1. Introducción

Toda las cosas del mundo que nos rodea que ocupan un volumen y tienen masa, incluso el aire que respiramos, es conocido como materia. A través de siglos de investigación científica hemos llegado a saber y entender que todo material está compuesto de átomos y los átomos están compuestos por núcleos, protones, neutrones y electrones.

Muchas de las propiedades de los materiales dependen de la ubicación geométrica de los átomos, así como la disposición geométrica entre moléculas y átomos constituyentes. Es indispensable entender conceptos básicos como estructura atómica, configuración electrónica en átomos, tabla periódica, y tipos de enlaces primarios y secundarios que unen a los átomos para formar sólidos.

La estructura atómica influye en la forma en que los átomos se unen entre sí; esta comprensión a su vez nos ayuda a clasificar los materiales como metales, semiconductores, cerámicos y polímeros y nos permite llegar a ciertas conclusiones generales en relación con las propiedades mecánicas y el comportamiento físico de estas cuatro clases de materiales.

1.2. Estructura del átomo

El átomo es una estructura conformada por protones que llevan carga positiva en términos de la unidad de carga eléctrica ($1e = 1.602 \times 10^{-19} C$), neutrones (partículas elementales que no llevan carga) y que juntas conforman el núcleo del átomo de diámetro aproximado de 10^{-15} metros dependiendo de la cantidad de protones y neutrones contentivos, y electrones con carga negativa ($-1e$) y una masa de aproximadamente $1/1836$ de la masa de un protón.

Para asegurar la neutralidad de carga del átomo, la cantidad de protones en el núcleo (Z) debe ser igual a la cantidad de electrones. El **número atómico** “ Z ” sirve de herramienta para identificar cada elemento. La cantidad de neutrones puede variar, sin embargo, solo los electrones pueden ser transferidos de un átomo a otro. Átomos del mismo tipo (igual número atómico), pero con distintos números de neutrones son llamados isótopos.

La **masa atómica** (A) de un átomo específico se puede expresar como la suma de las masas de los protones y los neutrones del núcleo.

De acuerdo con esta escala las masas del protón y del neutrón son algo mayores que la unidad, por lo que:

$$A = Z + N \quad (1-1)$$

El peso atómico de un elemento o el peso molecular de un compuesto se puede expresar en **uma** por átomo (molécula) o en masa por mol de materia. En una mol de una sustancia hay $6,023 \times 10^{23}$ (número de Avogadro) átomos o moléculas. Estas dos formas de expresar los pesos atómicos se relacionan según la siguiente ecuación:

$$1 \text{ uma /átomo (o molécula)} = 1 \text{ g/mol}$$

1.3. Modelos atómicos

1.3.1. Modelo atómico de Rutherford (1911)

El modelo atómico de Rutherford se basa en experimentos de dispersión (bombardeo) con partículas α , en el cual, Rutherford determinó que el átomo está formado por un núcleo pequeño y un enjambre de electrones. La diferencia fundamental entre los modelos atómicos de Thompson y de Rutherford es que en el último se consideraba un espacio vacío entre el núcleo “macizo” y los electrones, como una suerte de sistema solar en miniatura, mientras que Thompson imaginó a los átomos como una estructura maciza donde los electrones estaban dentro de una esfera junto a los protones, como si fueran pasas en un pastel. Sin embargo, el modelo de átomo de Rutherford presentaba ciertos inconvenientes: electrones giratorios sobre el núcleo son partículas aceleradas y en consecuencia deberían emitir energía electromagnética (radiación), por lo tanto, girarían en espiral hacia el núcleo hasta colapsar.

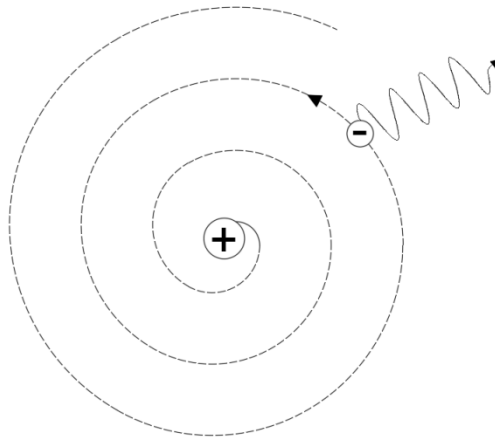


Figura 1.

Modelo del átomo similar a un planeta de Rutherford.

Fuente: (Mittemeijer, 2010)

1.3.2. Modelo atómico de Bohr (1913)

Bohr desarrolló el primer modelo cuántico del átomo. Basó su modelo en el postulado de Max Planck que en 1900 concluyó que la energía no es continua, pero si cuantificada, nos quiere decir que la transferencia de energía se produce por una pequeña corriente, no divisible, considerados paquetes de energía llamados “quantum”.

La energía de un cuanto de radiación no es una constante de la naturaleza sino variable, lo cual quiere decir que depende de la frecuencia de la radiación considerada. La energía del quantum, obedece a la relación de Planck:

$$E = h\nu \quad (1-1)$$

donde h es la constante de Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$) y ν es la frecuencia de la radiación.

Bohr conjeturó que las líneas espectrales agudamente definidas en una emisión atómica o el espectro de absorción, es indicativo de transiciones de electrones en el átomo desde un estado de energía específico a otro estado de energía específico, en asociación con la emisión o absorción de un cuanto de energía por transición.

Si un electrón "salta" de una trayectoria "superior" a una "inferior", la diferencia entre estos dos estados se emite como energía.

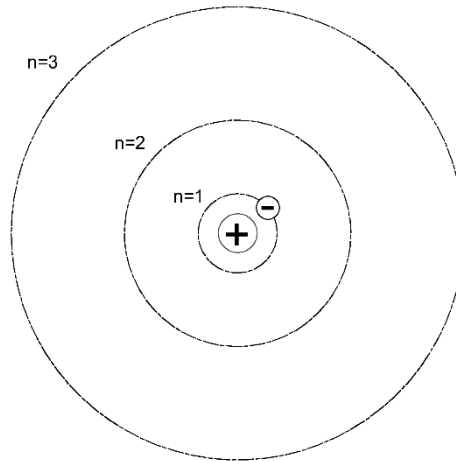


Figura 2.

El modelo del átomo de Bohr.

Fuente: (Mittemeijer, 2010)

Esta energía es emitida como radiación. La longitud de onda de esta radiación (λ), se calcula usando la relación de Planck, reconociendo que $E_{\text{Cuanto}} = h\nu$ es un quantum:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-2)$$

con c como la velocidad constante de la luz ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Es así como se pudo deducir longitudes de onda de los átomos de hidrógeno, que concuerdan con los experimentos del modelo de Bohr. Sin embargo, no pudo explicar satisfactoriamente el comportamiento de muchos sistemas de electrones. Además, el modelo del átomo de Bohr se consideró incoherente debido a las demasiadas suposiciones o postulados.

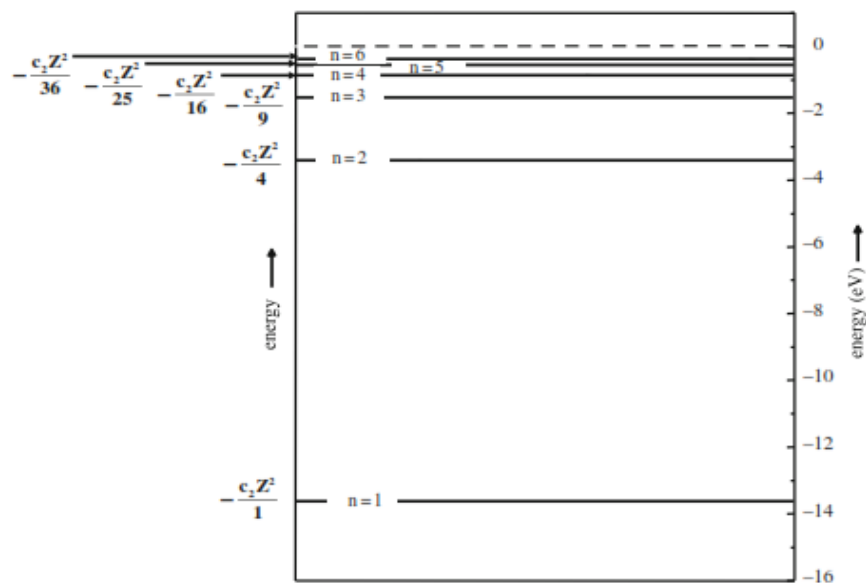


Figura 3.

Modelo atómico de Bohr. Los niveles de energía de las órbitas para diferentes valores del número cuántico principal n .

(1 eV = 1.602×10^{-19} J)

Fuente: (Mittemeijer, 2010)

1.3.3. Modelo atómico de la mecánica ondulatoria (Heisenberg/Schrödinger, 1926)

De Broglie (1924), postula que toda la materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares comportándose de uno u otro modo dependiendo del experimento específico. A su vez, para la fecha se determinó que un haz de electrones se dispersaba y difractaba al pasar por un sistema de doble rendija de la misma forma que lo hacen los fotones de luz. En consecuencia, no solo la radiación electromagnética, sino también la materia en movimiento, tienen naturaleza ondulatoria.

La famosa ecuación de la energía de Einstein establece que, una partícula masiva que se mueve a la velocidad de la luz tendrá una magnitud energética de la forma

$$E = m * c^2 \quad (1-4)$$

Combinando las ecuaciones (1-3) y (1-4) se encuentra que $\lambda = h/mc$, para el caso de una partícula masiva desplazada a la velocidad de la luz. Es así como sabemos que:

$$\lambda = h/mv \quad (1-5)$$

Siendo v como la velocidad del objeto material considerado. Poco después de esta estipulación, experimentalmente se demostró, que una corriente de electrones puede dar lugar a la difracción de fenómenos que asocian una longitud de onda a la corriente de electrones.

Como resultado del modelo de la mecánica ondulatoria, el electrón exhibe características similares a ondas y a partículas. Con este modelo, un electrón ya no se trata como una partícula que se mueve en un orbital discreto, sino que se considera el electrón como una onda que orbita alrededor del átomo y en consecuencia se considera la probabilidad de posición del electrón en un espacio alrededor del núcleo. Es decir, la posición se describe mediante una distribución de probabilidad o nube de electrones.

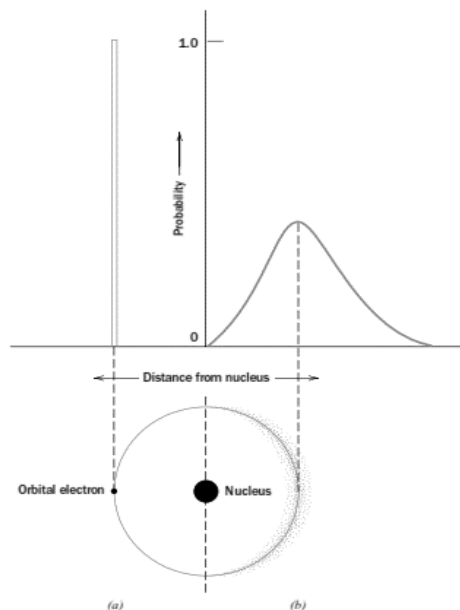


Figura 4.

Comparación del modelo atómico de (a) Bohr y (b) el Modelo atómico de la Mecánica Ondulatoria en términos de la distribución de un electrón.

Fuente: (Callister, 2000)

1.4. Estructura electrónica del átomo

Los electrones ocupan distintos niveles de energía, es así que cada electrón tiene una energía en particular. También, en 1925, Ernst Pauli demostró que solo pueden coexistir dos electrones con la misma energía, cada uno con un “spin” (análogo al sentido de giro o rotación) opuesto, de modo que cada nivel energético de los átomos tendrá subniveles para la disposición de más de dos electrones.

1.4.1. Números cuánticos

Representan el nivel de energía al que corresponde cada electrón, son cuatro números cuánticos, el número de niveles de energía está determinado por los tres primeros números cuánticos.

1. El primer número cuántico (n) es designado con números enteros los cuales se refieren a la capa a la que pertenece el electrón. También las capas cuánticas se les designa una letra, es así que $n=1$ se llamará K, $n=2$ se llamará L, $n=3$ se llamará M y así a continuación.
2. El número de sub niveles de energía en cada capa cuántica está determinado por el número cuántico acimutal (ℓ) y por el número cuántico magnético (m). Los números cuánticos acimutales están asignados con números $\ell = 0, 1, 2, 3, (n - 1)$. Si $n = 2$ existen dos números cuánticos acimutales $\ell = 0$ y $\ell = 1$, son designados mediante letras minúsculas

s para $\ell = 0$

p para $\ell = 1$

d para $\ell = 2$

f para $\ell = 3$

El **número cuántico magnético (m)** da el número de niveles de energía u orbitales para el número cuántico acimutal. El total de número cuántico magnético para cada número cuántico acimutal (ℓ) se calcula de la siguiente manera:

$$m = 2\ell + 1 \quad (1-6)$$

Los valores para m se dan en números enteros entre $-\ell$ y $+\ell$.

Por ejemplo, para $\ell = 3$, existen $m = 2(3) + 1 = 7$, tenemos 7 números magnéticos con valores $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ (Askeland, 1998).

3. El **Principio de Exclusión de Pauli** nos dice que no puede haber más de dos electrones con giros propios opuestos en cada orbital. El número cuántico de espín m , toma los valores de $+1/2$ y $-1/2$ que representan los distintos giros.

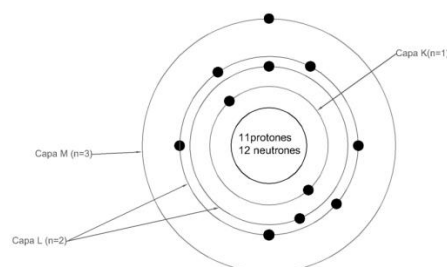


Figura 5.

Estructura atómica del sodio, número atómico 11, mostrando los electrones de las capas cuánticas K, L y M.

Fuente: (Askeland, 1998)

Tabla 1.

Patrón utilizado para la asignación de electrones a los niveles de energía.

		$\ell=0$	$\ell=1$	$\ell=2$	$\ell=3$
		(s)	(p)	(d)	(f)
n=1	(K)	2			
n=2	(L)	2	6		
n=3	(M)	2	6	10	
n=4	(N)	2	6	10	14
n=5	(O)	2	6	10	14
n=6	(P)	2	6	10	
n=7	(Q)	2	6		

1.4.2. Configuración electrónica

La configuración electrónica o estructura de un átomo representa el modo como se van ocupando estos estados. En la notación convencional, el número de electrones de cada subnivel se indica mediante un superíndice después del nivel o subnivel designado. No siempre se sigue la construcción ordenada de la estructura electrónica, pero cuando el número atómico es grande y los niveles d y f se empiezan a llenar.

Tabla 2.

Número permitido de electrones en los niveles y subniveles de energía.

Número Quántico Principal n	Designación del nivel	Subnivel	Números de		
			Estados	Números de Electrones	
			Por subcapa	Por capa	
1	K	s	1	2	2
2	L	s	1	2	8
		p	3	6	
3	M	s	1	2	18
		p	3	6	
		d	5	10	
4	N	s	1	2	32
		p	3	6	
		d	5	10	
		f	7	14	
5	O	s	1	2	32
		p	3	6	
		d	5	10	
		f	7	14	
6	P	s	1	2	18
		p	3	6	
		d	5	10	
7	Q	s	1	2	8
		p	3	6	

Valencia: La valencia de un átomo se relaciona con la capacidad del mismo para entrar en combinación química con otros elementos y está determinado por el número de electrones en los niveles **s, p** combinados (más externos).

La valencia depende de la naturaleza de la reacción química.

1.4.3. Estabilidad atómica y electronegatividad

IA																	0
1												III A	IV A	V A	VI A	VII A	2
H												B	C	N	O	F	He
2.1												2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	-
3	4											13	14	15	16	17	18
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar
1.0	1.5											1.5	1.8	2.1	2.5	3.0	-
11	12	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII			IB	IIB						
Na	Mg						26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
0.9	1.2						Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
19	20	21	22	23	24	25	1.8	1.8	1.8	1.9	1.6	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	-
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	1.8	1.8	1.8	1.9	1.6	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	-
0.8	1.0	1.3	1.5	1.6	1.6	1.5	1.8	1.8	1.8	1.9	1.6	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	-
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.2	2.2	2.2	1.9	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1	2.5	-
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
0.7	0.9	1.1-1.2	1.3	1.5	1.7	1.9	2.2	2.2	2.2	2.4	1.9	1.8	1.8	1.9	2.0	2.2	-
87	88	89-102															
Fr	Ra	Ac-No															
0.7	0.9	1.1-1.7															

Figura 6.

Electronegatividad de algunos elementos

Fuente: (Callister, 2000)

La electronegatividad de un elemento es la tendencia del mismo a ganar un electrón, a diferencia de esto los electropositivos son aquellos que fácilmente ceden un electrón. Los elementos con un número atómico alto tienen baja electronegatividad ya que sus electrones están alejados al núcleo positivo (Mittemeijer, 2010).

1.5. Enlaces atómicos

También sabemos que es la interacción eléctrica la que mantiene la unión entre átomo, fundamentalmente por la compartición de cargas eléctricas entre ellos, bien por compartición de electrones o por la fuerza dipolar en las moléculas. Nuestra experiencia nos convence de que existen dos tipos de enlaces de electrones:

- Enlace Primario o de unión fuerte
- Enlace secundario o unión débil.

La unión débil no implica la interacción directa electrón-electrón, sino que utiliza las fuerzas de Van der Waals o la interacción dipolo-dipolo para formar enlaces. La fuerte unión, por otro lado, implica una interacción directa electrón-electrón.

1.5.1. Enlaces primarios

Los enlaces primarios, también conocidos como "enlaces fuertes", se crean cuando hay interacción directa de electrones entre dos o más átomos, ya sea mediante transferencia o como resultado de la compartición. Cuantos más electrones por átomo se produzcan en este proceso, mayor será el "orden" de los enlaces (por ejemplo, enlace simple, doble o triple) y más fuerte será la conexión entre los átomos. Hay tres categorías generales de enlaces primarios: iónico, covalente y metálico.

1.5.1.1. Enlace covalente:

Los materiales con enlace covalente comparten electrones opuestos girados entre dos o más átomos. El enlace (o distribución de carga de electrones) está esencialmente localizado entre los átomos vecinos más cercanos que aportan electrones para la unión. Dado que estos pares de electrones siguen las estadísticas de 'Bose-Einstein', por lo tanto, se los conoce como 'bosón'. En este caso, las partículas emparejadas no

obedecen el Principio de exclusión de Pauli y muchos pares de electrones en el sistema pueden ocupar el mismo nivel de energía.

Las diferencias de electronegatividad de menos de aproximadamente 0,4 caracterizan los enlaces covalentes. Para dos átomos con una diferencia de electronegatividad de entre 0.4 y 2.0, se forma un enlace covalente polar, uno que no es ni verdaderamente iónico ni totalmente covalente.

Aunque los enlaces covalentes son muy fuertes, los materiales enlazados de esta manera por lo general tienen pobre ductilidad y mala conductividad eléctrica y térmica. Para que se mueva un electrón y pueda transportar corriente, debe romperse el enlace covalente lo que requiere de altas temperaturas o altos voltajes. Muchos materiales cerámicos, semiconductores y polímeros están total o parcialmente enlazados mediante enlaces covalentes, lo que explica la razón por la cual el vidrio se rompe cuando se cae y por qué los ladrillos son buenos materiales aislantes.

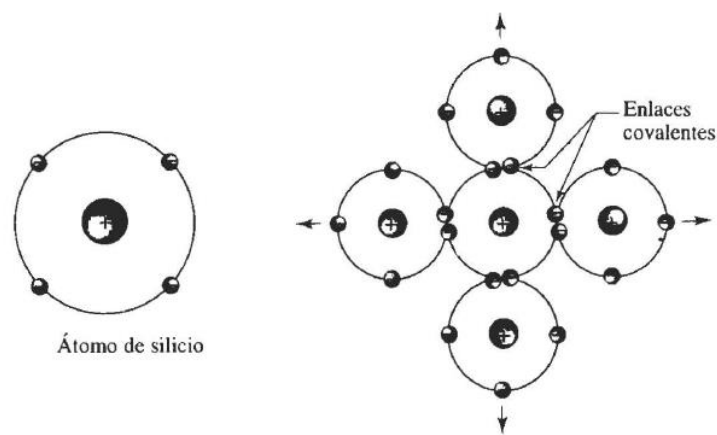


Figura 7.

El enlace covalente en el caso del silicio

Fuente: (Askeland, 1998)

En su libro, Wang representa el enlace en la realidad:

“Un par de perros (electrón), cada uno proviene de dos núcleos adyacentes (persona), persíguelos mutuamente de manera circular para que sus correas estén retorcidas juntas (*Figura 8*). Mientras la persona (núcleo) continúe sujetando su correa, los dos núcleos adyacentes están atados (unidos) entre sí a través de la correa trenzada y el par de perros (electrón).” (Wang, 2005).

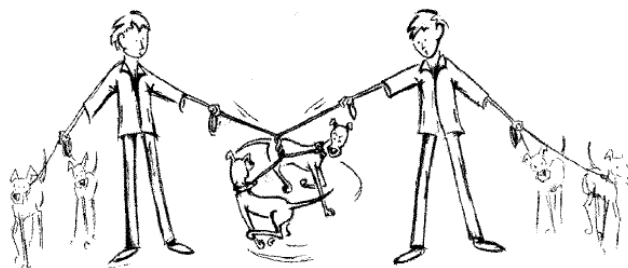


Figura 8.

Imagen conceptual del enlace covalente considerando a las personas como núcleo y a los perros como electrones

Fuente: (Wang, 2005)

Los núcleos que contribuyen electrones en formar el enlace, pueden ser o no el mismo tipo de átomos. En la medida en que el vínculo está directamente ligado a la correa mantenida por el núcleo, el enlace es necesariamente direccional y muy fuerte y está confinado al espacio entre los dos núcleos que forman el enlace. Dado que el enlace requiere un fuerte agarre de la correa por parte del núcleo, el número de enlaces que puede formar un núcleo dado es, por lo tanto, limitado de acuerdo con la fuerza o el orbital atómico disponible del núcleo.

Cuando ambos átomos son del tipo aceptor de electrones, es decir, con cerca de 8 electrones más externos, las estructuras de octetos se pueden construir compartiendo dos o más electrones de valencia entre los átomos, formando un enlace covalente.

“Los enlaces covalentes son muy fuertes y direccionales; pueden conducir a estructuras bidimensionales y tridimensionales muy fuertes en elementos donde los enlaces pueden formarse compartiendo electrones con más de un átomo adyacente, es decir, que tienen cuatro, cinco o seis electrones de valencia.” (Domone, 2010).

“Dos átomos pueden formar un enlace entre sí al compartir algunos o todos sus electrones de valencia y por lo tanto, reducir la energía potencial total de la combinación. El enlace covalente es el resultado del intercambio de electrones de valencia para completar las subcapas de cada átomo.” (Kasap, 2006).

Debido a la fuerte atracción coulombiana entre los electrones compartidos y los núcleos positivos, la energía de enlace covalente es generalmente la más alta para todos los tipos de enlaces, lo que lleva a temperaturas de fusión muy altas y sólidos muy duros: el diamante es uno de los materiales más duros conocidos.

Los sólidos covalentemente unidos también son insolubles en casi todos los disolventes. La naturaleza direccional y la fuerza del enlace covalente también hacen que estos materiales no sean dúctiles.

“Bajo una fuerte fuerza, exhiben una fractura frágil. Además, dado que toda la valencia los electrones están encerrados en los enlaces entre los átomos, estos electrones no son libres de desplazarse en el cristal cuando se aplica un campo eléctrico. En consecuencia, la conductividad eléctrica de tales materiales es muy pobre.” (Kasap, 2006).

Por ejemplo, en una molécula del gas metano, cuatro átomos de hidrógeno se combinan con un átomo de carbono. El átomo de carbono tiene cuatro electrones en su capa exterior, pero a éstos se unen cuatro electrones más, contribuidos individualmente por cada uno de los cuatro átomos de hidrógeno (*Figura 9*).

De este modo, el octeto del átomo de carbono se completa y al mismo tiempo, al compartir uno de los electrones del átomo de carbono, cada átomo de hidrógeno puede completar su "doblete de helio". Este intercambio de electrones por dos átomos los une y se forma una molécula en la que los átomos se mantienen unidos mediante fuertes enlaces de valencia. Cada electrón compartido ahora, pasa de un orbital controlado por un núcleo a un orbital controlado por dos núcleos y es este control el que constituye el enlace covalente.

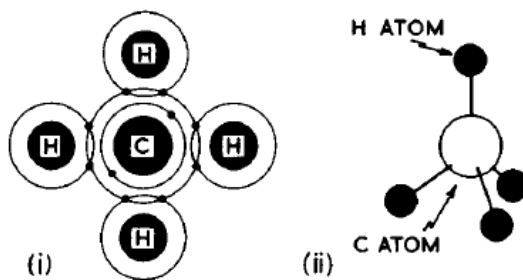


Figura 9.

Enlace covalente en una molécula de metano.

Fuente: (Higgins, 1993)

A medida que aumenta el tamaño de la molécula de los compuestos covalentes, aumenta la resistencia de la unión del material, como se indica en los compuestos complejos tales como el caucho y las fibras vegetales. A veces, las moléculas simples de compuestos covalentes se pueden unir con moléculas de su propio tipo, formando grandes moléculas de tipo cadena en las cuales la fuerza de enlace es muy alta. Este proceso se llama 'polimerización'. Por ejemplo, el eteno C_2H_4 de gas se puede hacer polimerizar formando polietileno.

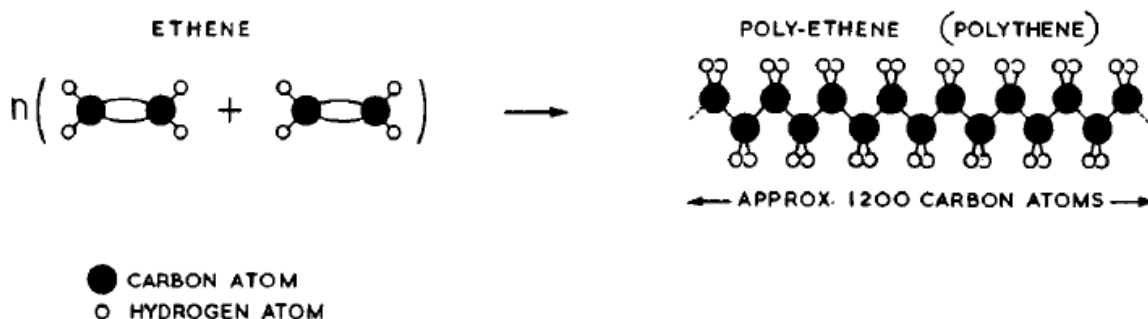


Figura 10.

Unión de moléculas de compuestos covalentes.

Fuente: (Higgins, 1993)

1.5.1.2. Enlace iónico

La unión iónica se encuentra frecuentemente en materiales que normalmente tienen un metal y un no metal como elementos constituyentes y que están situados en los extremos horizontales de la tabla periódica. Cuando en un material se encuentran presentes más de un tipo de átomos, uno de ellos puede donar sus electrones de valencia a un átomo distinto, llenando la capa energética externa del segundo átomo. Ambos átomos ahora tendrán su nivel de energía externo lleno (o vacío) y a la vez han adquirido una carga eléctrica y se comportan como iones. El átomo que cede los electrones queda con carga neta positiva y es un catión; en tanto que el que acepta los electrones adquiere carga neta negativa y es un anión.

Los iones de carga opuesta se atraen entonces el uno al otro y producen un enlace iónico. Por ejemplo, la atracción entre iones de sodio y cloro (*Figura 11*), produce el cloruro de sodio (NaCl) o sal de mesa. La conductividad eléctrica es mala; la carga eléctrica se transfiere mediante el movimiento de iones completos, los que, por su tamaño, no se desplazan tan fácilmente como los electrones.

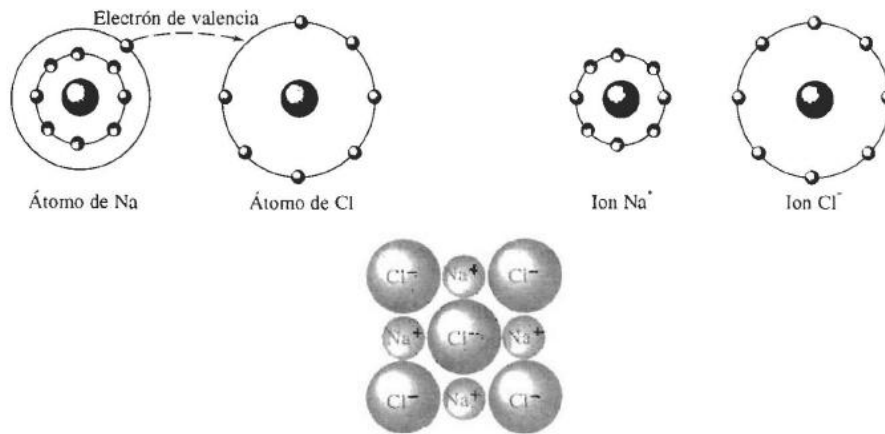


Figura 11.
Enlace iónico de la sal.
Fuente: (Askeland, 1998)

Los enlaces iónicos generalmente se producen cuando la diferencia de electronegatividad entre dos átomos en una molécula diatómica es mayor que aproximadamente 2,0. Debido a la gran discrepancia en electronegatividades, un átomo generalmente ganará un electrón, mientras que el otro átomo en una molécula diatómica perderá un electrón. Ambos átomos tienden a estar "satisfechos" con esta disposición, porque a menudo terminan con configuraciones de electrones de gases nobles, es decir, orbitales electrónicos completos.

Si un átomo (A) con un electrón en la capa más externa reacciona con un átomo (B) con siete electrones en la capa más externa, entonces ambos pueden alcanzar la estructura del octeto si el átomo A dona su electrón de valencia al átomo B. Sin embargo, la neutralidad de los átomos se altera y B, con un electrón extra, se convierte en un ion cargado negativamente (un anión), mientras que A se convierte en un ion de carga positiva (un catión). Los dos iones son atraídos entre sí por la fuerza electrostática entre ellos y se forma un compuesto iónico.

La fuerza del enlace iónico es proporcional a $e_A e_B / r$ donde e_A y e_B son las cargas sobre los iones y r es la separación interatómica. El enlace es fuerte, como lo demuestra el alto punto de fusión de los compuestos iónicos y su fuerza aumenta, como se podría esperar, donde se donan dos o más electrones.

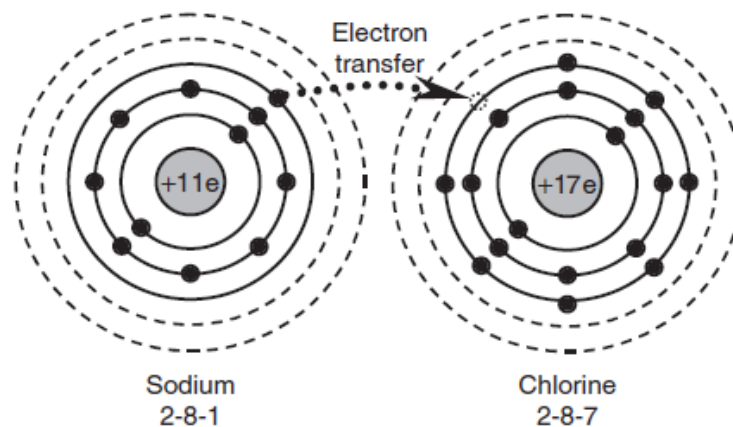


Figura 12.
Enlace iónico.
Fuente: (Domone, 2010)

El enlace iónico siempre es no direccional; es decir, cuando un cristal se forma con un gran número de iones, las cargas electrostáticas se disponen simétricamente alrededor de cada ion, con el resultado de que los iones A se rodean de iones B y viceversa, formando un sólido.

Como en el enlace covalente, Wang también representa el enlace de forma real:

Implica también, un par de perros (electrón) de dos núcleos (personas) adyacentes y teniendo sus correas retorcidas juntas de la misma manera. La gran diferencia es que hay dos núcleos distintos (personas) en lugar de núcleos idénticos (personas). Por ejemplo, un núcleo humano y un núcleo y suponer que el hombre-núcleo es más fuerte que el núcleo femenino.

La formación de un par trenzado de electrones (perros) entre hombres-hombre pareja de núcleos adyacentes tendrá lugar de la misma manera que en todos los núcleos idénticos. Sin embargo, en este caso, el núcleo femenino más débil puede soltar la correa y el resultado es que el electrón emparejado (perro) se tira hacia el lado del núcleo del hombre (*Figura 13*). Esto da como resultado un núcleo humano con un electrón adicional (perro), mientras que un núcleo femenino tiene menos de un electrón (perro). Por lo tanto, no existe un lazo de correa directo para mantener unidos al par hombre-mujer-núcleo. Sin embargo, la mujer-núcleo no se iría porque ella ve a su perro (electrón) retenido por el hombre-núcleo y no puede irse. Por lo tanto, la formación del par de enlaces iónicos con carga negativa positiva. Por lo tanto, debe destacarse que la formación de enlaces iónicos requiere dos tipos distintos de núcleos (Wang, 2005).

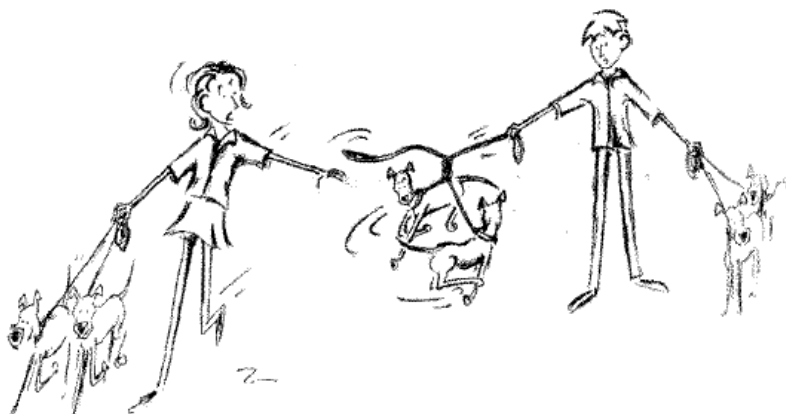


Figura 13.

Ilustración conceptual del enlace iónico considerando a la chica como núcleo más débil que el núcleo del chico y a los perros como electrones.

Fuente: (Wang, 2005)

1.5.1.3. Enlace metálico

Cuando muchos átomos de metal se juntan para formar un sólido, estos electrones de valencia se pierden de átomos individuales y se comparten colectivamente por todos los iones.

Los elementos metálicos, que tienen una electronegatividad baja, ceden sus electrones de valencia para formar un "mar" de electrones que rodea a los átomos (*Figura 14*). El aluminio, por ejemplo, cede sus tres electrones de valencia, dejando un cuerpo central formado por el núcleo y los electrones internos. En vista de que en este cuerpo central faltan tres electrones cargados negativamente, éste tiene una carga positiva igual a tres. Los electrones de valencia se mueven libremente dentro del mar de electrones y se asocian con varios centros atómicos. Los centros atómicos cargados positivamente se mantienen unidos mediante la atracción mutua con los electrones, produciendo así un fuerte enlace metálico.

Dado que sus electrones no están fijos a ninguna posición en particular, los metales son buenos conductores eléctricos. Bajo la influencia de un voltaje aplicado, los electrones de valencia se mueven haciendo que fluya una corriente si el circuito está completo.

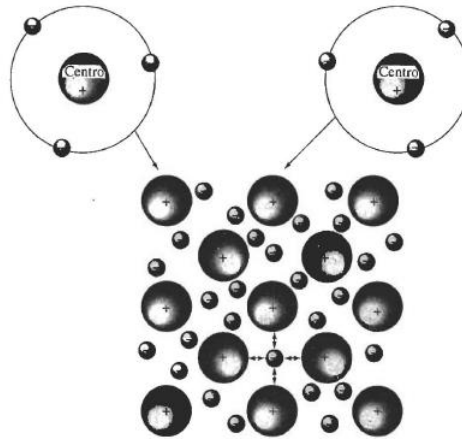


Figura 14.

Enlace metálico.

Fuente: (Askeland, 1998)

Aquí los electrones de enlace se "descentralizan" y son compartidos por el núcleo de núcleos positivos. Los enlaces metálicos se producen cuando los elementos de baja electronegatividad (generalmente se encuentran en la parte inferior izquierda de la tabla periódica) se unen entre sí para formar una clase de materiales que llamamos metales. Los metales tienden a tener características comunes tales como ductilidad, brillo y alta conductividad térmica y eléctrica. Todas estas características se pueden explicar en cierta medida por la naturaleza del enlace metálico. El modelo de un enlace metálico, propuesto por primera vez por Lorentz, consiste en un conjunto de núcleos de iones cargados positivamente rodeados de electrones libres o un "gas de electrones".

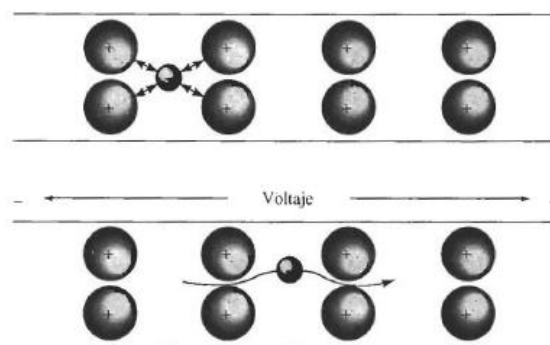


Figura 15.

Cuando se aplica voltaje a un metal, los electrones del mar de electrones se pueden mover fácilmente y conducir la corriente.

Fuente: (Askeland, 1998)

La unión metálica también explica la alta conductividad térmica y eléctrica de los metales. Dado que los electrones de valencia no están ligados a ningún átomo en particular, pueden moverse a través del enrejado bajo la aplicación de un potencial eléctrico, causando un flujo de corriente y también pueden, mediante una serie de colisiones con electrones vecinos, transmitir energía térmica rápidamente a través del enrejado.

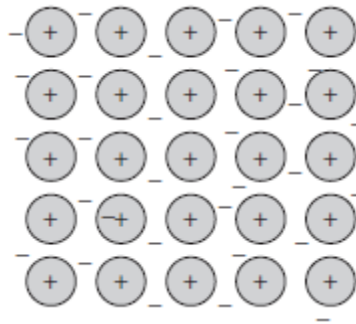


Figura 16.

El sistema de electrones libres en el enlace metálico en un metal monovalente.

Fuente: (Domone, 2010)

“Cuando muchos átomos de metal se juntan para formar un sólido, estos electrones de valencia se pierden de átomos individuales y se comparten colectivamente por todos los iones. Por lo tanto, los electrones de valencia se deslocalizan y forman un gas de electrones o nube de electrones, impregnando el espacio entre los iones, como se muestra en la *Figura 16.*” (Kasap, 2006).

Un conocimiento más detallado de la estructura del átomo indicaría que la situación no es tan simple como para explicar la vinculación metálica en términos de este concepto de "nube de electrones". Sin embargo, para nuestros propósitos actuales, será suficiente si aceptamos los resultados de esta interpretación simplificada, ya que nos permite explicar muchas propiedades característicamente metálicas.

El brillo opaco de los metales se debe al reflejo de la luz por electrones libres. Una onda de luz que golpea la superficie de un metal hace que un electrón libre vibre y absorba toda la energía de la onda, deteniendo así la transmisión. El electrón vibratorio vuelve a emitir la onda desde la superficie del metal dando lugar a lo que llamamos 'reflexión'.

La propiedad muy importante de la mayoría de los metales para poder sufrir una deformación plástica considerable, también se debe a la existencia del enlace metálico. Bajo la acción de las fuerzas de cizallamiento, las capas de iones positivos pueden deslizarse una sobre la otra sin alterar drásticamente su relación con la nube de electrones compartida (Higgins, 1993).

1.5.2. Enlace secundario

Los enlaces secundarios, o enlaces débiles, se producen debido a la interacción indirecta de electrones en átomos o moléculas adyacentes, llamados también fuerzas Van der Waals. Estas fuerzas intermoleculares son comunes, pero muy débiles y se encuentran en gases inertes donde no existen otros tipos de enlaces.

Las fuerzas secundarias de unión surgen de dipolos atómicos o moleculares. En esencia, existe un dipolo eléctrico cada vez que hay alguna separación de porciones positivas y negativas de un átomo o molécula. La unión resulta de la atracción coulombiana entre el extremo positivo de un dipolo y la región negativa de uno adyacente, como se indica en la *Figura 17.* Las interacciones dipolo ocurren entre dipolos inducidos y moléculas polares (que tienen dipolos permanentes) y entre moléculas polares. El enlace de hidrógeno, un tipo especial de enlace secundario se encuentra entre algunas moléculas que tienen hidrógeno como uno de los constituyentes.

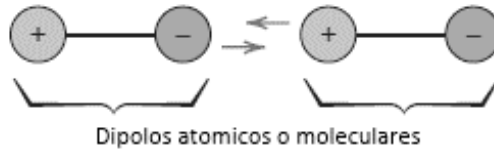


Figura 17.

Ilustración esquemática de la vinculación de Van der Waals entre dos dipolos.

Fuente: (Callister, 2000)

1.5.2.1. Enlace de dipolos inducidos

Un dipolo puede ser creado o inducido en un átomo o molécula que normalmente es eléctricamente simétrico es decir, la distribución espacial global de los electrones es simétrica con respecto al núcleo con carga positiva, como se muestra en la *Figura 18a*. Todos los átomos están experimentando un movimiento vibratorio constante que puede causar distorsiones instantáneas y de corta duración de esta simetría eléctrica para algunos de los átomos o moléculas y la creación de pequeños dipolos eléctricos, como se representa en la *Figura 18b*. Uno de estos dipolos puede a su vez producir un desplazamiento de la distribución de electrones de una molécula o átomo adyacente, lo que induce al segundo también a convertirse en un dipolo que luego es débilmente atraído o unido al primero; este es un tipo de vinculación de Van der Waals. Estas fuerzas atractivas pueden existir entre un gran número de átomos o moléculas, fuerzas que son temporales y fluctúan con el tiempo.

La licuefacción y en algunos casos, la solidificación de los gases inertes y otras moléculas eléctricamente neutras y simétricas como H_2 y Cl_2 se realizan debido a este tipo de unión. Las temperaturas de fusión y ebullición son extremadamente bajas en materiales para los que predomina la unión inducida por dipolo; de todos los enlaces intermoleculares posibles, estos son los más débiles.

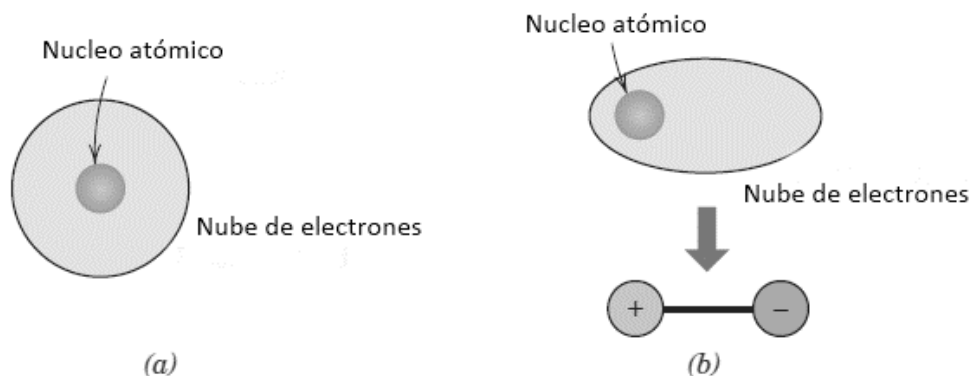


Figura 18.

Representaciones esquemáticas de (a) un átomo eléctricamente simétrico y (b) un dipolo atómico inducido.

Fuente: (Callister, 2000)

1.5.2.2. Enlace de dipolos permanente

Las fuerzas de Van der Waals también existirán entre moléculas polares adyacentes. Las energías de enlace asociadas son significativamente mayores que para los enlaces que involucran dipolos inducidos.

El tipo de enlace secundario más fuerte, el enlace de hidrógeno, es un caso especial de enlace de molécula polar. Ocurre entre moléculas en las que el hidrógeno está covalentemente unido a flúor (como en HF), oxígeno (como en H_2O) y nitrógeno (como en NH_3).

Para cada enlace H-F, H-O o H-N, el electrón de hidrógeno individual se comparte con el otro átomo. Por lo tanto, el extremo de hidrógeno del enlace es esencialmente un protón aislado, sin que este unido electrostáticamente a ningún electrón en particular. Este extremo de la molécula altamente cargado positivamente es capaz de una fuerte fuerza de atracción con el extremo negativo de una molécula adyacente, como se demuestra en la *Figura 19* para HF. En esencia, este único protón forma un puente entre dos átomos cargados negativamente.

La magnitud del enlace de hidrógeno es generalmente mayor que la de los otros tipos de enlaces secundarios. Las temperaturas de fusión y ebullición del fluoruro de hidrógeno y el agua son anormalmente altas, tomando en cuenta sus bajos pesos moleculares, como consecuencia del enlace de hidrógeno.

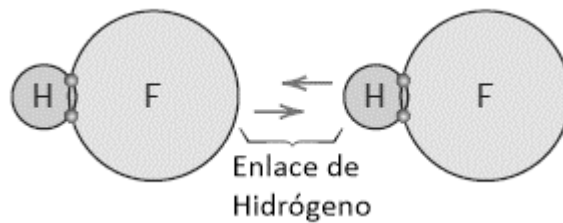


Figura 19.

Representación esquemática de enlaces de hidrógeno en fluoruro de hidrógeno (HF).

Fuente: (Callister, 2000)

1.5.3. Enlaces mixtos

En muchos sólidos, la unión entre átomos generalmente no es solo de un tipo, más bien, es una mezcla de tipos de enlaces. Sabemos que la unión en el cristal de silicio es totalmente covalente, porque los electrones compartidos en los enlaces son igualmente atraídos por los núcleos de iones positivos vecinos y por lo tanto, son igualmente compartidos. Cuando hay un enlace de tipo covalente entre dos átomos diferentes, los electrones se comparten de manera desigual, porque los dos núcleos de iones vecinos son diferentes por lo cual, tienen diferentes capacidades de atracción de electrones.

El vínculo ya no es puramente covalente, tiene algún carácter iónico, porque los electrones compartidos están en promedio, más cerca de uno de los núcleos de iones. Los enlaces covalentes que tienen un carácter iónico, debido a una distribución desigual de electrones.

1.5.3.1. Enlace mixto iónico-covalente

La mayoría de las moléculas con enlaces covalentes tienen algo de enlace iónico y viceversa. El carácter iónico parcial de los enlaces covalentes puede interpretarse con respecto a los términos de la escala de electronegatividad de la *Figura 6*. Cuanto mayor es la diferencia en las electronegatividades de los elementos que intervienen en un enlace mixto iónico-covalente, mayor es el grado de carácter iónico del enlace (Smith, 2006).

Muchos compuestos semiconductores tienen enlace mixto iónico-covalente. Por ejemplo, *GaAs* es un compuesto 3-5 (Ga está en el grupo 3A y As en el grupo 5A de la tabla periódica) y *ZnSe* es un compuesto 2-6. El grado de carácter iónico en el enlace de esos compuestos crece a medida que lo hace la diferencia de electronegatividades entre los átomos en el compuesto. Por tanto, se podría esperar que un compuesto 2-6 tenga un mayor carácter iónico que un 3-5 debido a la mayor diferencia de electronegatividad en el compuesto 2-6.

1.5.3.2. Enlace mixto metálico-covalente

“Éste se presenta frecuentemente. Por ejemplo, los metales de transición tienen enlace metálico-covalente mixto que supone orbitales dsp. Los altos puntos de fusión de los metales de transición se atribuyen al enlace mixto metálico-covalente. También, en el grupo 4ª de la tabla periódica, hay una transición gradual desde el enlace covalente puro en el carbono (diamante) a algún carácter metálico en el silicio y germanio. El estaño y el plomo tienen un enlace primordialmente metálico” (Smith, 2006).

1.5.3.3. Enlace mixto metálico-iónico

“Si se da una diferencia significativa de electronegatividad en los elementos que forman un compuesto intermetálico, podría existir una cantidad considerable de transferencia de electrones (enlace iónico) en el compuesto. Por tanto, algunos compuestos intermetálicos son buenos ejemplos de enlace mixto metálico-iónico. La transferencia de electrones es especialmente importante para los compuestos intermetálicos tales como el $NaZn_{13}$ y menos importantes para compuestos como el Al_9Co_3 y Fe_5Zn_{21} debido a que las diferencias de electronegatividades para estos dos últimos compuestos son mucho menores.” (Smith, 2006).

1.5.4. Relación de los enlaces

Conceptualmente podemos representar en un esquema los tipos de materiales en relación a los enlaces como en la *Figura 20*, para las cuatro categorías fundamentales de materiales para ingeniería.

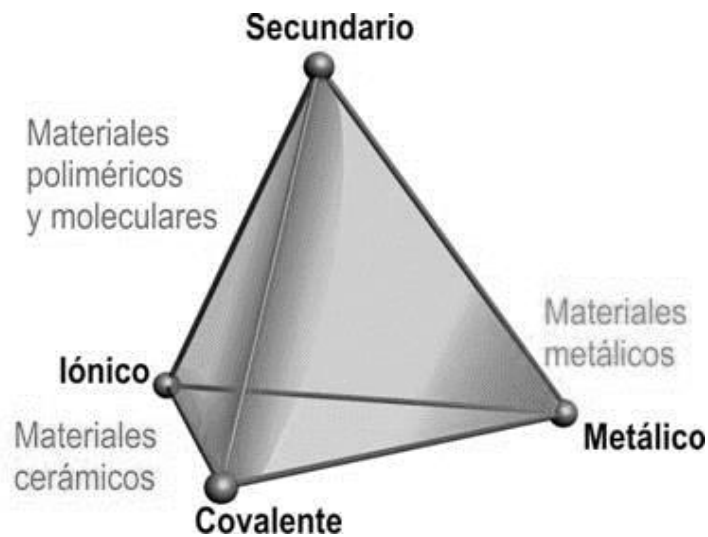


Figura 20.

Relación de los diferentes tipos de enlace para los materiales.

Fuente: (Callister, 2000)

1.6. Fuerzas interiónicas

Cuando se unen dos átomos, los electrones de valencia interactúan entre sí y con el núcleo positivamente cargado del vecino. El resultado de esta interacción es a menudo la formación de un enlace entre los dos átomos, produciendo una molécula. La formación de un enlace significa que la energía del sistema de dos átomos juntos debe ser menor que la de los dos átomos separados, de modo que la formación de la molécula sea energéticamente favorable, es decir, más estable. El principio general de la formación de la molécula se ilustra en la *Figura 21*, que muestra dos átomos unidos desde el infinito.

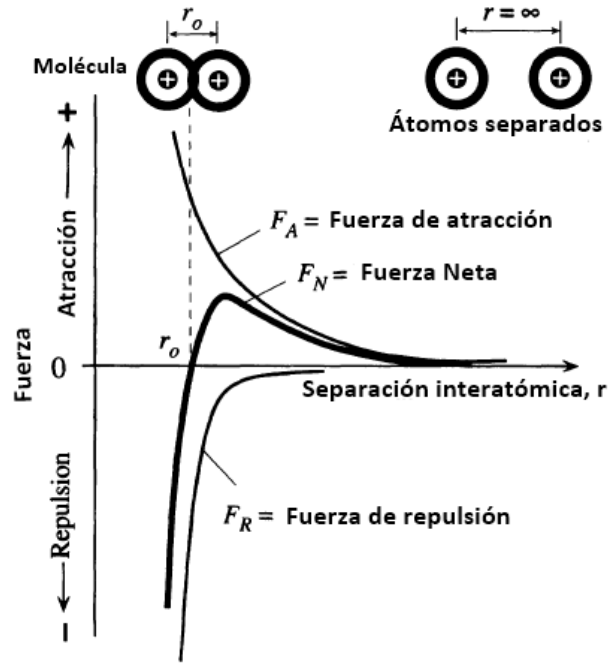


Figura 21.

Fuerza vs separación interatómica.

Fuente: (Kasap, 2006)

A medida que los dos átomos se aproximan, los átomos ejercen fuerzas atractivas y repulsivas entre sí como resultado de interacciones electrostáticas mutuas. Inicialmente, la fuerza de atracción F_A domina sobre la fuerza de repulsión F_R . La fuerza neta F_N es la suma de los dos y ésta es inicialmente atractiva, como se indica en la *Figura 21*.

$$F_N = F_R + F_A \quad (1-7)$$

La fuerza atractiva entre el par de iones es la fuerza coulombiana que resulta cuando los iones son considerados como cargas puntuales. Aplicando la ley de Coulomb con unidades del SI, puede escribirse la siguiente ecuación:

$$F_A = -\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-8)$$

donde: $Z_1 Z_2$ Número de electrones cedidos o aceptados durante la formación

e Carga del electrón

r Distancia de separación interiónica

ϵ_0 Permitividad en el vacío = $8.854 \times 10^{-12} C^2/N \cdot m^2$

La fuerza neta de repulsión entre un par de iones ha resultado de forma experimental, inversamente proporcional a la distancia de separación interiónica a y puede describirse por la ecuación:

$$F_r = -\frac{nb}{r^{n+1}} \quad (1-9)$$

dónde r representa la Distancia de separación interiónica y, b y n son constantes.

Tabla 3.
Valores del exponente de repulsión.

Gas noble	Configuración núcleo externo	del n
He	$1s^2$	5
Ne	$1s^2 2p^6$	7
Ar	$3s^2 3p^6$	9
Kr	$3d^{10} 5s^2 4p^6$	10
Xe	$4d^{10} 4s^2 5p^6$	12

Fuente: (Mitchell, 2004)

Al sumar la fuerza de atracción y repulsión obtenemos:

$$F_N = -\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{nb}{r^{n+1}} \quad (1-10)$$

1.7. Energías interiónicas

La energía potencial neta E entre un par de iones con cargas opuestas, por ejemplo, Na^+Cl^- , a las que se les acerca hasta estar muy juntos, es igual a la suma de las energías asociadas con la atracción y la repulsión de los iones y puede escribirse en forma de ecuación como:

$$E_N = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{b}{r^n} \quad (1-11)$$

El término de la energía de atracción de la ecuación, representa la energía liberada cuando los iones se acercan y es negativa porque el producto de $(+Z_1)$ $(-Z_2)$ es negativo. El término de la energía de repulsión de la ecuación, representa la energía absorbida cuando los iones se aproximan y es positiva. La suma de las energías asociadas con la atracción y repulsión de los iones es igual a la energía neta, que es mínima cuando los iones están separados a la distancia de separación de equilibrio r_0 . En la *Figura 22* se muestra la relación entre estas tres energías e indica la energía mínima E_{min} . En el mínimo de energía, la fuerza entre los iones es cero.

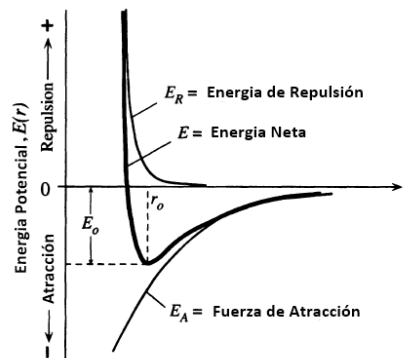


Figura 22.

Energía potencial vs separación interiónicas.

Fuente: (Kasap, 2006)

1.8. Tabla periódica de los elementos

Todos los elementos se han clasificado según la configuración electrónica en la tabla periódica *Figura 23*. Aquí, los elementos están situados, con un número atómico creciente, en siete filas horizontales llamadas períodos. La disposición es tal, que todos los elementos dispuestos en una columna o grupo dado tienen estructuras electrónicas de valencia similares, así como propiedades químicas y físicas. Estas propiedades cambian gradualmente, moviéndose horizontalmente a través de cada período y verticalmente hacia abajo en cada columna.

IA		IIA		VIII										IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0																								
1 H 1.0080		3 Li 6.941	4 Be 9.0122	19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.87	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.41	31 Ga 69.72	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80	5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180	2 He 4.0026															
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.30	55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	Rare earth series	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.2	76 Os 190.23	77 Ir 192.2	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.19	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	Actinide series	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)																																		
Rare earth series			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.35	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97																										
Actinide series			89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)																										

Figura 23.

La tabla periódica de los elementos. Los números entre paréntesis son los pesos atómicos de los isótopos más estables o comunes.

Fuente: (Callister, 2000)

Los elementos posicionados en el Grupo O, el grupo más a la derecha, son los gases inertes, que han llenado capas de electrones y configuraciones estables de electrones. Los elementos del grupo VIIA y VIA son uno y dos electrones deficientes, respectivamente, por tener estructuras estables. Los elementos del Grupo VIIA (F, Cl, Br, I y At) a veces se denominan halógenos. Los metales alcalinos y alcalinotérreos (Li, Na, K, Be, Mg, Ca, etc.) están etiquetados como Grupos IA e IIA, que tienen, respectivamente, uno y dos electrones en exceso de estructuras estables. Los elementos en los tres períodos largos, Grupos IIIB a IIB, se denominan metales de transición, que tienen estados de electrones d parcialmente llenos y en algunos casos, uno o dos electrones en la siguiente capa de energía más alta.

Los grupos IIIA, IVA y VA (B, Si, Ge, As, etc.) muestran características que son intermedias entre los metales y los no metales en virtud de sus estructuras electrónicas de valencia.

Como se puede observar en la tabla periódica, la mayoría de los elementos realmente están incluidos en la clasificación de metales. A veces se los denomina elementos electropositivos, lo que indica que son capaces de ceder sus pocos electrones de valencia para convertirse en iones con carga positiva. Además, los elementos situados en el lado derecho de la mesa son electronegativos es decir, aceptan fácilmente electrones para

formar iones cargados negativamente o a veces, comparten electrones con otros átomos. La *Figura 6* muestra los valores de electronegatividad que se han asignado a los diversos elementos dispuestos en la tabla periódica. Como regla general, la electronegatividad aumenta al moverse de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba en la tabla periódica. Es más probable que los átomos acepten electrones si sus capas externas están casi llenas y si están menos "blindados" (es decir, más cerca de) el núcleo.



Capítulo 2

Capítulo 2

Estructura física
de los materiales

Estructura Física de los Materiales

2.1. Introducción

Además de presentar una estructura atómica los elementos, presentan una estructura física la cual describe la posición de los átomos de un elemento en el espacio, esta distribución dará lugar a varias disposiciones las cuales presentan características específicas que permitirán clasificar los materiales.

Al hablar de estructura física se habla de cristales los cuales son los componentes de la estructura física de un elemento, se entiende entonces como los cuerpos macroscópicos encontrados en la naturaleza. La estructura física de los materiales toma el nombre de Cristalografía para el estudio de la ciencia e ingeniería de materiales, entonces puede ser descrita como la ciencia que involucra la estructura interna de un material y los cristales que los componen, además realiza un análisis e interpretación de los mismos para poder clasificar los materiales dependiendo de su disposición espacial, esta distribución de celdas unitarias puede presentar varios apilamientos los cuales variaran en las propiedades físicas, eléctricas y mecánicas de un material. La mayoría de elementos químicos presentan cristales en su solidificación a partir de un estado líquido, aunque no podrá estar compuesto de un solo cristal de gran tamaño, pero estará formado por varios cristales los cuales son llamados granos. El objetivo principal de este capítulo será comprender y estudiar el arreglo interno de un sólido cristalino y la “regularidad” de sus redes cristalinas.

2.2. Ordenamiento atómico

La estructura cristalina se define como la disposición de átomos en el interior de un cristal, esta unidad fundamental se repite en varios intervalos de manera tridimensional en el interior del cristal. Dependiendo de la disposición de la unidad fundamental, existen varios niveles de arreglo atómico los cuales darán diferentes tipos de elementos (Smith, 2006).

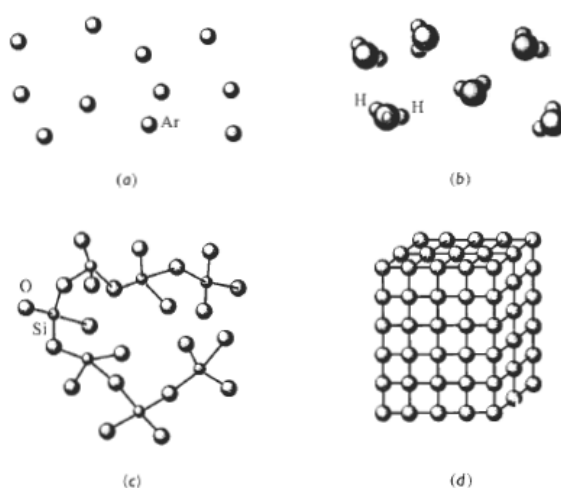


Figura 24.

Niveles de arreglo atómico en los materiales.

Fuente: (Smith, 2006)

a) Sin orden: En gases, los átomos no tienen orden por lo tanto llenan el espacio en el cual se encuentra el gas de manera aleatoria.

b y c) Orden de corto alcance (sólidos amorfos): se da cuando el arreglo espacial de los átomos se extiende solo a sus vecinos más cercanos, es común en materiales frágiles (polímeros) incluyendo el vidrio común.

d) Orden de largo alcance (sólidos cristalinos): se presentan en los elementos con estructura cristalina definida, su arreglo espacial se extiende por todo el material y los átomos forman un patrón repetitivo que a su vez es regular en una forma específica. Es común en metales, semiconductores, algunos materiales cerámicos y algunos polímeros, también en las gemas, es decir los cristales naturales como diamante, zafiro, rubí, entre otros.

Algunas propiedades de los sólidos dependen de su estructura cristalina, es decir la manera en la que los átomos, iones o moléculas se encuentran ordenadas en el espacio. Existen innumerables configuraciones atómicas espaciales ofreciéndose un rango extenso de ordenamientos atómicos, pueden variar desde estructuras relativamente simples para los metales hasta estructuras con gran complejidad como las que se pueden encontrar en cerámicos o polímeros. Cuando se trata de estructuras cristalinas, los átomos encontrados en las mismas pueden tomar la forma de esferas sólidas con diámetros fijos las cuales están en contacto con sus átomos más próximos, como se puede observar en la *Figura 25* (Callister, 2000).

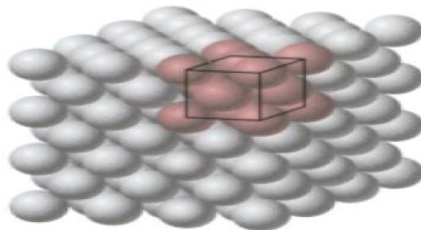


Figura 25.

Representación de una Estructura Cristalina.

Fuente: (Callister, 2000)

2.3. Redes espaciales y celdas unitarias

2.3.1. Red espacial

La unión de estructuras atómicas simples tiene la forma de una red, esta es un conjunto de puntos llamados puntos de red los cuales están organizados mediante un patrón periódico de forma que el entorno de cada punto en la red es idéntico logrando que uno o más átomos queden asociados a cada punto. Esta red difiere de un material a otro tanto en tamaño como en forma y depende de los átomos y el tipo de enlace entre ellos. Es por ello, que la estructura cristalina de un material se refiere al tamaño, forma y organización de átomos dentro de la red (Callister, 2000).

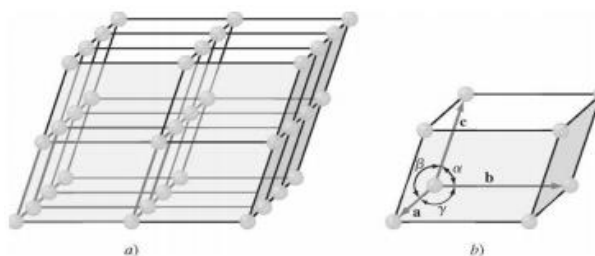


Figura 26.

a) Red espacial de un sólido cristalino y b) Celda unitaria mostrando sus constantes de red.

Fuente: (Smith, 2006)

2.3.2. Celda unitaria

Una celda unitaria es el patrón más pequeño de un arreglo atómico, un cristal consiste en varias celdas unitarias apiladas, todas de tamaño, forma y orientación idéntica una respecto a otra. Esta celda a su vez conserva las características generales de toda la red, geoméricamente por lo general se representan como paralelepípedos o prismas con tres pares de caras paralelas en la cual se agregan esferas *Figura 25, 26 b*. Estas celdas representan la simetría de la estructura cristalina, donde las posiciones de los átomos en el cristal son generadas por las distancias integrales de la celda unitaria a lo largo de cada uno de sus bordes (Smith, 2006) (ASM Internacional, 2004).

2.3.3. Parámetros de red

Los parámetros de red describen el tamaño y la forma de la celda unitaria e incluyen, las dimensiones de los costados de la celda unitaria y los ángulos entre sus costados. La longitud de los lados de la figura geométrica, toma el nombre de parámetros de red a que son medidos a menudo en nanómetros o Angstroms. Existen varios tipos de celdas las cuales tienen que ser dimensionadas de diferente manera dependiendo su forma, se obtienen siete sistemas cristalinos con catorce tipos de celdas unitarias las cuales son:

Tabla 4.

Relación de longitud de aristas y ángulos interraciales para los siete sistemas cristalinos.

Sistema	Longitud de Aristas	de Ángulos Interraciales	Ejemplos
Triclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	CaSO ₄ ; H ₂ O; CuO
Monoclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	CoSb ₂
Ortorrómbico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Ga; Fe ₃ C (cementita)
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	TiO ₂ ; Sn; SnO ₂
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	Zn; Cd; NiAs
Romboédrico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As; Sb; Bi
Cubico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Ag; Diamante; NaCl

Fuente: (ASM Internacional, 2004)

2.3.4 Átomos por celda unitaria

Cada celda unitaria está definida por un Número específico de puntos de red, las esquinas de las celdas y las posiciones centradas en el cuerpo son fáciles de identificar, para contar los átomos se deben tomar en cuenta los átomos compartidos por otras celdas, es decir una esquina estará compartida con siete celdas por lo tanto un octavo de átomo corresponde a la celda estudiada; de igual manera, las caras corresponden a medio átomo y las posiciones en el centro del cuerpo cuentan como átomos enteros. El número de átomos por celda unitaria, es el producto del número de átomos por punto de red multiplicado por el número de puntos de red existentes en la celda (Carter, 2007).

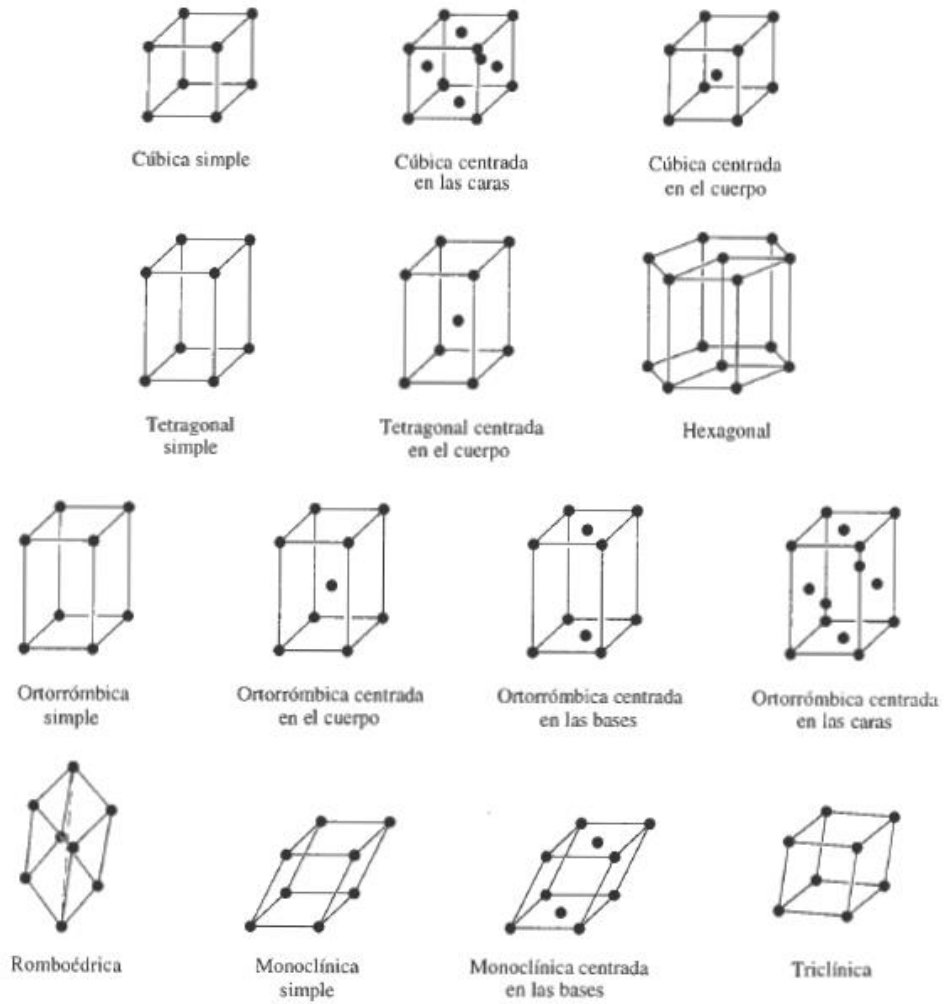


Figura 27.
Estructuras Espaciales con sus Átomos.

Fuente: (Askeland, 1998)

Los sistemas más usados en los metales corresponden a las estructuras BCC (cúbica centrada en el cuerpo), FCC (cúbica centrada en las caras) y HCP (hexagonal compacta).

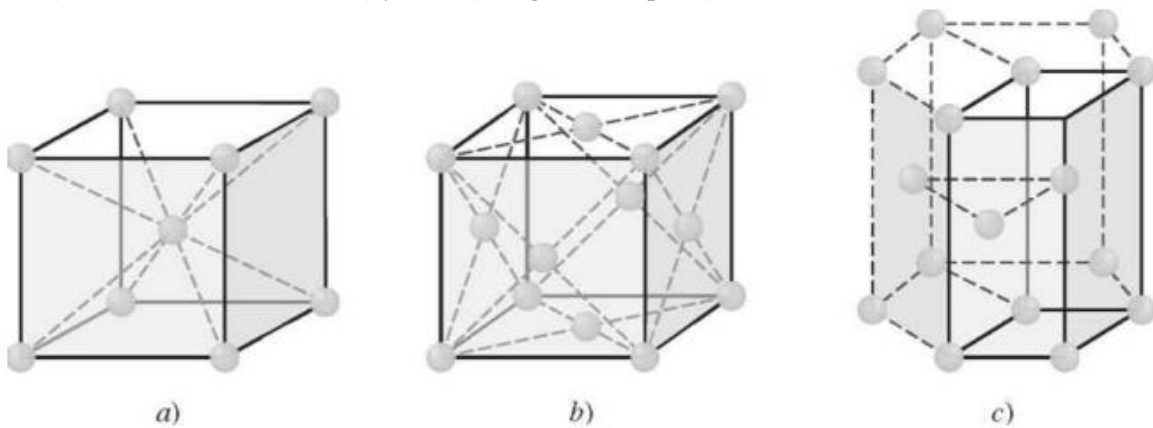


Figura 28.
Principales estructuras cristalinas en los metales a) BCC, b) FCC y c) HCP.

Fuente: (Smith, 2006)

2.3.5. Factor de empaquetamiento

Es la fracción entre el volumen de átomos en una celda unitaria dividido para el volumen de la misma.

$$APF = \frac{\text{Volumen átomos celda unitaria}}{\text{Volumen de la celda unitaria}} \quad (2-1)$$

Este valor de APF, dependerá de cada tipo de estructura espacial, existen valores tabulados, pero para demostrar los valores tabulados se debe realizar la siguiente deducción:

- **Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC)**

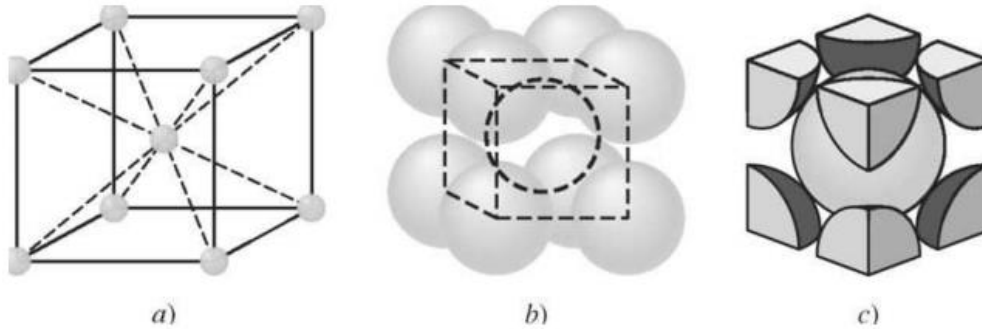


Figura 29.

Representación estructura BCC a) Posiciones atómicas, b) Esferas rígidas y c) Aislada.

Fuente: (Smith, 2006)

Aislamos una celda y observamos un átomo entero en la parte central y un octavo en cada vértice de la celda obteniéndose dos átomos por celda. Como los átomos entran en contacto entre sí a lo largo de la diagonal del cubo, obtenemos que la relación entre la arista a del cubo y el radio atómico es:

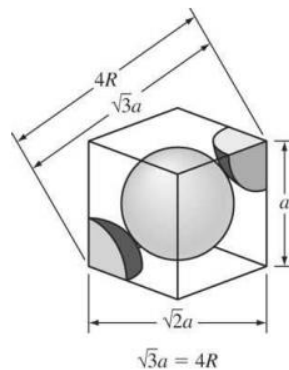


Figura 30.

Relación arista – radio atómico estructura BCC.

Fuente: (Smith, 2006)

Por lo tanto, el factor de empaquetamiento estará expresado de la siguiente manera:

$$APF_{BCC} = \frac{2 \text{volumen átomo}}{a^3} = \frac{2 \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}} \right)^3} = 0,68 \quad (2-2)$$

- Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC)

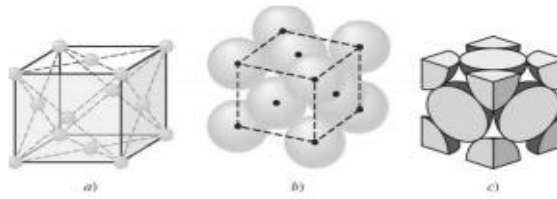


Figura 31.

Representación estructura FCC a) Posiciones atómicas, b) Esferas rígidas y c) Aislada.

Fuente: (Smith, 2006)

Consideramos una celda FCC, en la cual hay un átomo en cada vértice del cubo y uno en el centro de cada cara, en total entonces obtendremos cuatro átomos. Al tener dos octavos de átomo y una mitad relacionamos la arista del cubo y el radio atómico obteniéndose:

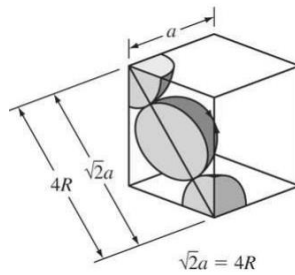


Figura 32.

Relación arista – radio atómico estructura FCC.

Fuente: (Smith, 2006)

Por lo tanto, el factor de empaquetamiento estará expresado de la siguiente manera:

$$APF_{FCC} = \frac{4 \text{ volúmen átomo}}{a^3} = \frac{4 \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}} \right)^3} = 0,74 \quad (2-3)$$

Al tener un valor mayor que el de BCC, se demuestra que los átomos se encuentran ordenados de una manera más compacta.

- Estructura cristalina hexagonal compacta (HCP)

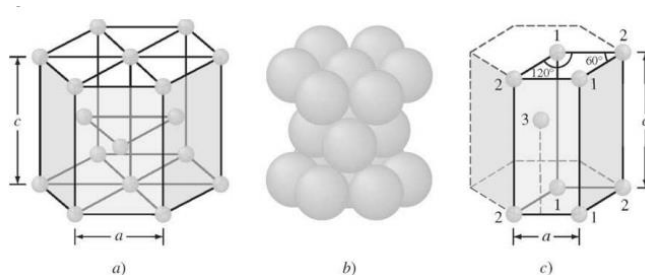


Figura 1.

Representación estructura HCP a) Posiciones atómicas, b) Esferas rígidas y c) Aislada.

Fuente: (Smith, 2006)

Esta celda posee una forma especial hexagonal, en la *Figura 33c* se aísla una celda en la cual los átomos 1 contribuyen con un sexto de átomo y los átomos marcados por el número 2 aportan un doceavo los cuales en total aportan con un átomo más el átomo número 3 que se encuentra en su totalidad dando así 2 átomos por celda primitiva, la celda espacial se encuentra conformada por tres celdas primitivas por lo tanto el total de átomos asciende a seis.

A su vez, esta estructura presenta los parámetros de celda a y c los cuales se relacionan tal que $c = 1.633a$ en metales ideales entre los más comunes tenemos Cadmio, Magnesio, Titanio, Zinc, etc.

Tabla 5.

Relación constante de red y radio atómico.

Metal	Constante de Red a (nm)	Radio Atómico R* (nm)
Cromo	0,289	0,125
Hierro	0,287	0,124
Potasio	0,533	0,231
Sodio	0,429	0,186
Aluminio	0,405	0,143
Cobre	0,3615	0,128
Oro	0,408	0,144
Plomo	0,495	0,175
Platino	0,393	0,139
Plata	0,409	0,144

Fuente: (Smith, 2006)

El factor de empaquetamiento estará expresado de la siguiente manera:

$$APF_{FCC} = \frac{6 \text{ volúmen átomo}}{3a^2 \text{sen}60^\circ c} = \frac{6\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{3(2R)^2 \text{sen}60^\circ (1.633(2R))} = 0,74 \quad (2-4)$$

Por lo tanto, al obtener un valor de 0,74 se entiende que la distribución atómica de HCP es recíproca a la distribución FCC a pesar de presentar una estructura totalmente diferente (Smith, 2006).

2.3.6. Celdas unitarias cúbicas

2.3.6.1. Ordenamiento atómico en celdas unitarias cúbicas

Para situar un átomo en una celda cúbica se usan los ejes x, y, z. La distancia desde el origen al átomo se mide en función del número de parámetros de red, que debe desplazarse en cada uno de los ejes, estas distancias se expresan numéricamente y separadas con comas.

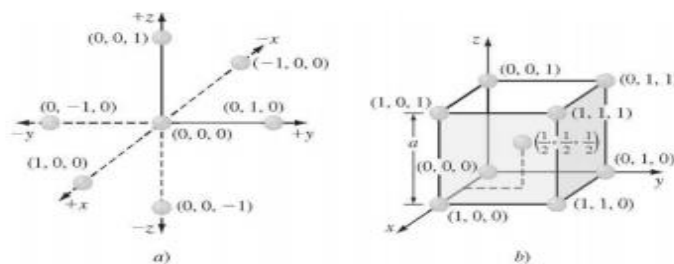


Figura 34.

a) Ejes cartesianos y b) posiciones atómicas en una celda cúbica.

Fuente: (Smith, 2006)

2.3.6.2. Índices de dirección en celdas unitarias cúbicas

En cristalografía, es necesario referirse a ubicaciones específicas en las redes cristalinas. Para ello se emplean índices de Dirección. Los metales y aleaciones varían su orientación cristalográfica y los índices de Miller permiten su caracterización morfológica. En este caso, las direcciones son los componentes del vector de dirección descompuesto sobre cada eje y reducido a mínimos enteros.

Para indicar una dirección, se dibuja un vector desde el origen hasta la superficie del cubo, después se convierten estos puntos en enteros y se colocan en corchetes sin separación por comas.

Dependiendo de los valores de la dirección es necesario modificar el origen de coordenadas de tal manera que el vector dirección no exceda los límites de la celda unitaria *Figura 35d*.

Se debe tomar en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Ubicar dos puntos en el sistema de coordenadas.
2. Restar las coordenadas iniciales a las finales.
3. Reducir las fracciones a enteros.
4. Colocar los índices entre paréntesis y si hay un negativo colocar una barra sobre el número.

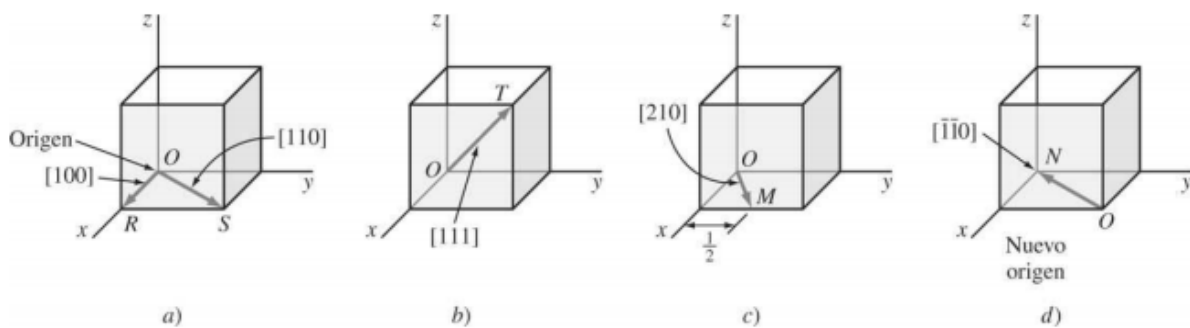


Figura 35.

Representaciones de varios índices de dirección.

Fuente: (Smith, 2006)

En la *Figura 35c*, se deberá multiplicar los interceptos por el número dos para poder obtener enteros llegando al índice de dirección $[210]$, de igual manera como no se pueden obtener cantidades negativas en la *Figura 35d* se debe agregar la barra encima de la cantidad y modificar el origen obteniéndose el índice de dirección $[\bar{1}\bar{1}0]$.

Se usan las letras u, v, w para índices de dirección en lugar de x, y, z y se representan entre corchetes [uvw]. Todos los vectores de dirección paralelos, tienen el mismo índice de dirección y una dirección es equivalente si el espacio atómico en cada dirección es el mismo, por ejemplo los índices para las aristas del cubo son $[100]$ en todas sus combinaciones, para las diagonales del cubo serán $[111]$ en todas sus combinaciones y para las caras del cubo $[110]$.

2.3.6.3. Índices de Miller en celdas unitarias cúbicas

Todas las caras presentes en un cristal pueden ser descritas en términos de sus interceptos axiales. Estos ejes referencian a los ejes cristalográficos los cuales son seleccionados para encajar en simetría por lo tanto uno o más ejes serán de simetría o paralelos a ellos. Para describir estos planos se usan los índices de Miller los cuales toman las notaciones de h, k, l definidos como el recíproco de las intersecciones que un plano

representa con los ejes x, y, z de las tres aristas no paralelas de la celda unitaria cúbica. Los índices de Miller además, representan a todos los planos paralelos idénticos (Mittermeijer, 2010) (Carter, 2007).

Se pueden determinar los índices de Miller de un plano mediante:

1. Elegir un plano que no tenga interceptos en el origen de coordenadas.
2. Determinar los interceptos del plano en función de los ejes x, y, z para la celda unitaria.
3. Obtenemos el recíproco de los interceptos.
4. Simplificamos las fracciones multiplicando para el divisor mayor.
5. Si existen negativos se coloca una barra sobre el número y se encierran los índices entre paréntesis sin usar comas (Smith, 2006).

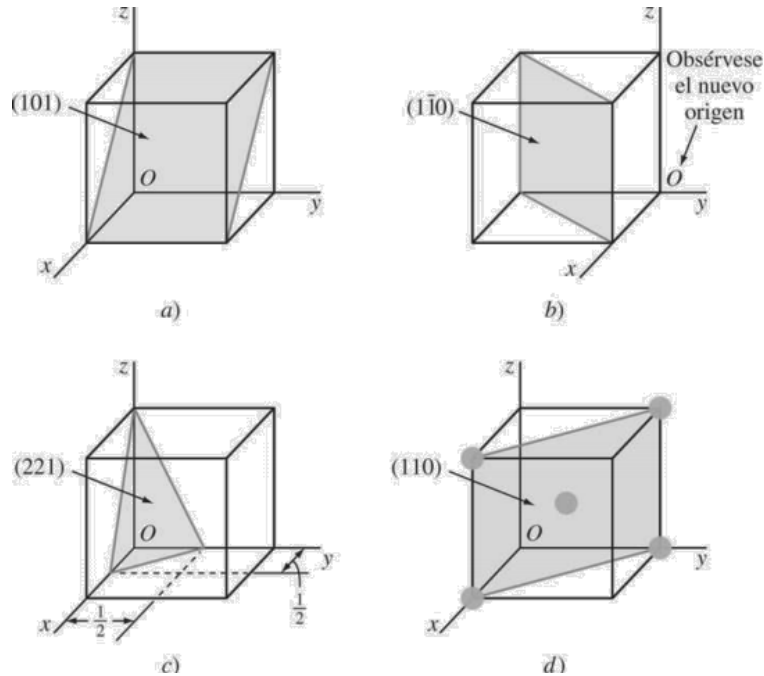


Figura 36.

Varias representaciones de índices de Miller.

Fuente: (Smith, 2006)

En la *Figura 36b*, se puede observar que se debe establecer un nuevo origen ya que la coordenada en el eje y es negativa obteniéndose los índices $(1\bar{1}0)$, de igual manera como no se pueden obtener números fraccionarios es necesario multiplicar los mismos por el divisor mayor obteniéndose así los índices (221) .

En el sistema cúbico, los índices de dirección de una recta perpendicular a un plano tienen los mismos índices de Miller que el plano.

2.3.6.4. Distancia entre planos

En las estructuras cristalinas cúbicas, el espacio interplanar entre dos planos paralelos con los mismos índices de Miller se identifica como d la cual está en función de h , k y l . Este espacio representa la distancia desde un origen elegido que contiene a un plano a otro plano paralelo con los mismos índices que sea cercano al primero (Tilley, 2006).

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2-5)$$

Donde a = constante de red, h, k, l = índices de Miller de los planos considerados

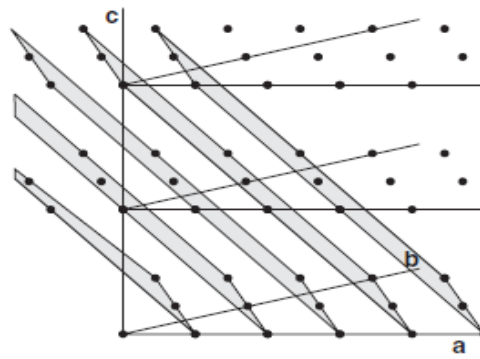


Figura 37.

Planos paralelos con índices de Miller (122)

Fuente: (Tilley, 2006)

2.4. Celdas unitarias hexagonales

2.4.1 Índices de dirección en celdas unitarias hexagonales

En las celdas HCP, las direcciones se indican por cuatro índices $[uvtw]$, en este caso el índice u será a lo largo de la dirección a_1 , v a lo largo de a_2 y t a lo largo de a_3 . El índice w , es una red en el vector con dirección c a lo largo del eje z (Tilley, 2006).

En la *Figura 38*, podemos observar en a) dirección del eje $+a_1$ en el plano, b) dirección del eje $+a_2$ en el plano, c) dirección del eje $+a_3$ en el plano, d) se obtiene una dirección en el plano a lo largo del eje $+a_3$ incorporando al eje c y e); se pueden observar las direcciones en el plano incorporadas a la celda hexagonal completa. Además en la sección a) se puede ver los índices de dirección para a_1 , de igual manera en la sección b) para a_2 y finalmente en c) para a_3 (Smith, 2006).

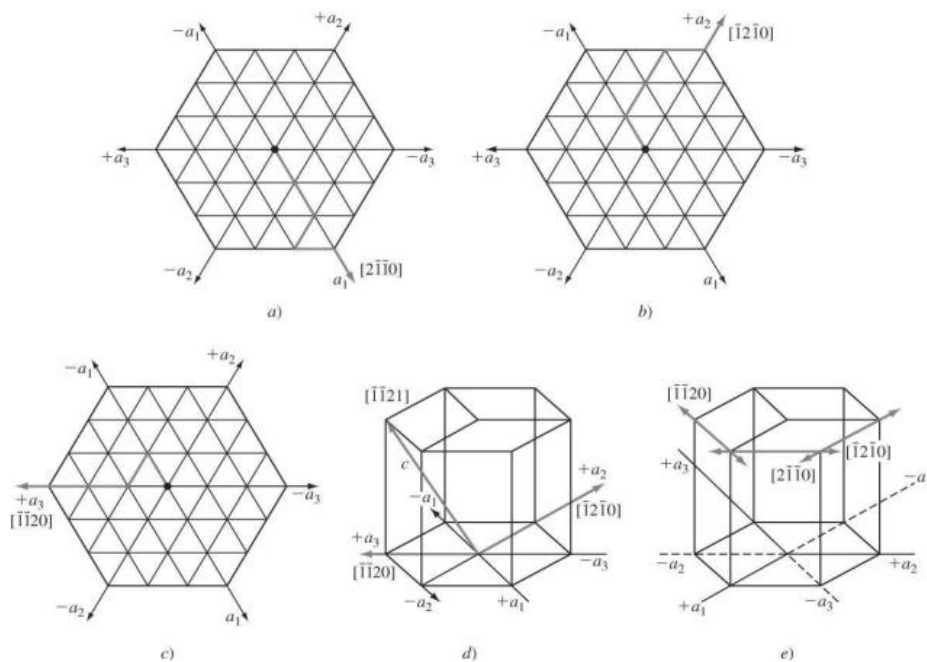


Figura 38.

Varios ejemplos de índices de dirección en estructura HCP.

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.2. Índices de Miller-Bravais en celdas unitarias hexagonales

Los planos cristalinos en las celdas hexagonales se describen mediante cuatro índices, estos índices se conocen como índices de Miller – Bravais además, se representan mediante las letras h, k, i y l los cuales van entre paréntesis (h, k, i, l). Estos índices se basan en cuatro ejes, tres ejes basales en a₁, a₂ y a₃ donde a₁ y a₂ forman un ángulo de 120° entre sí. El eje c es vertical y se encuentra en el centro de la celda. La unidad de medida **a** es la distancia entre dos átomos ubicados a lo largo de los ejes basales y la unidad **c** da la altura de la celda unitaria (Mittlemeijer, 2010).

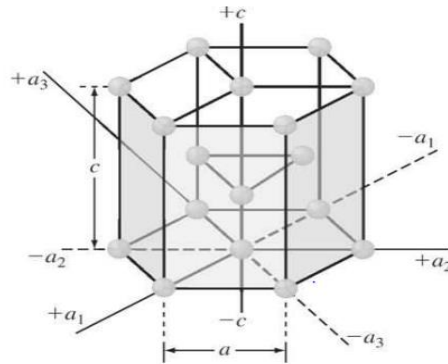


Figura 39.

Representación estructura HCP.

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.3. Isotropía y anisotropía

Las propiedades físicas de un cristal único de una sustancia dependen de la dirección cristalográfica en la que son medidas. Por ejemplo, los módulos de elasticidad y conductividad eléctrica además del índice de refracción presentan diferentes valores en las direcciones [100] y [111]. La direccionalidad de estas propiedades es determinada **anisotropía** y es asociada con la variación del espacio atómico o iónico de una dirección cristalográfica. Al contrario de una sustancia anisotrópica, existen sustancias cuyas propiedades son independientes de la dirección donde son medidas y son llamadas **isotrópicas**. La extensión o magnitud de los efectos de anisotropía de un cristal, dependen de la simetría de la estructura cristalina. Para los elementos polí cristalinos, las orientaciones cristalográficas de cada grano son aleatorias, bajo estas circunstancias a pesar de que un grano pueda ser anisotrópico, una muestra compuesta por los mismos puede presentar un comportamiento isotrópico. En ciertos casos, los granos de un material polí cristalino presentan una orientación cristalina común en estos casos se dice que el material presenta una “textura” (Callister, 2000).

Densidad volumétrica

$$\rho_v = \frac{\text{masa por celda unitaria}}{\text{volumen por celda unitaria}} \quad (2- 6)$$

Densidad atómica planar

$$\rho_p = \frac{\text{átomos cortados por el área seleccionada}}{\text{área seleccionada}} \quad (2- 7)$$

Densidad atómica lineal

$$\rho_l = \frac{\text{número de diámetros de átomos cortados por la línea seleccionada}}{\text{longitud línea seleccionada}} \quad (2-8)$$

2.4.4. Comparación entre estructuras FCC, BCC y HCP

Estructuras FCC y HCP

Estas estructuras son compactas es decir, que sus átomos o “esferas” están empaquetados lo más juntos posible de manera que, su factor de empaquetamiento asciende hasta 0,74. Es por este motivo, que el plano (111) de FCC es idéntico al plano (0001) de la estructura HCP, a pesar de estas relaciones estas estructuras no son idénticas dado que el apilamiento de átomos en cada estructura es diferente siendo ABCABCABCABCABC para FCC y ABABABABABAB en HCP.

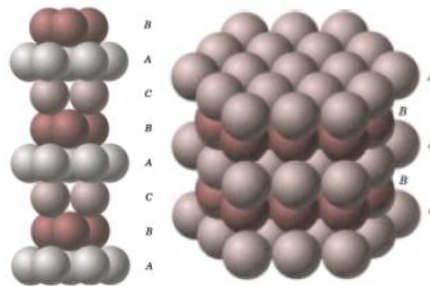


Figura 40.

Apilamiento atómico FCC y HCP.

Fuente: (Callister, 2000)

Estructura BCC

Esta estructura no es tan compacta por lo tanto, no presenta planos compactos como (111) en FCC y (0001) en HCP. En este caso, los planos densamente empaquetados son la familia de planos (110) aunque las diagonales del cubo de esta estructura cristalina, presentan direcciones de empaquetamiento compacto en las direcciones (111) (Smith, 2006).

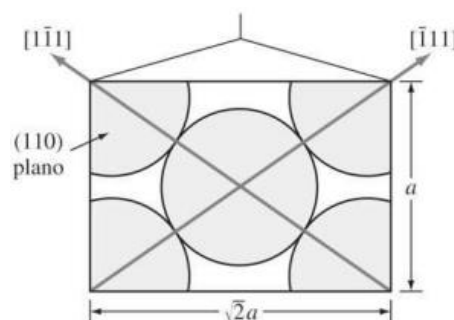


Figura 41.

Plano (110) de BCC con sus diagonales

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.5. Polimorfismo y alotropía

Se conocen como materiales alotrópicos a aquellos que pueden tener una o más estructuras cristalinas. El término alotropía es usado comúnmente en elementos puros con este comportamiento, mientras que a los compuestos que presentan esta característica se los conoce como polifórmicos. Algunos elementos como el titanio o hierro, presentan más de una estructura cristalina dependiendo de la temperatura o presión a la que se encuentran. A bajas temperaturas, el hierro cristaliza con estructura BCC pero a altas temperaturas este se

transforma en un elemento con estructura FCC. Estas transformaciones resultan en una variación de las propiedades del material y estos cambios, son la base de los tratamientos térmicos de los aceros y otras aleaciones.

Muchos materiales cerámicos son polimórficos, esto se debe a la variación del volumen de un cerámico en los procesos de calentamiento y enfriado, si estos procesos no son controlados minuciosamente pueden causar fallas y roturas en el cerámico. El polimorfismo es un punto central en varias aplicaciones, las propiedades de un material dependen del tipo de polimorfismo en el que se encuentra un elemento (Callister, 2000) (Mittemeijer, 2010).

Tabla 6.
Variaciones de estructuras cristalinas para elementos metálicos.

Metal	Estructura a temperatura ambiente	Estructura a otras temperaturas
Ca	FCC	BCC > 447° C
Co	HCP	FCC > 427° C
Hf	HCP	BCC > 1742° C
Fe	BCC	FCC 912-1394° C BCC > 1394° C
Li	BCC	HCP < -193° C
Na	BCC	HCP < -233° C
Tl	HCP	BCC > 294° C
Ti	HCP	BCC > 883° C
Y	HCP	BCC > 1481° C
Zr	HCP	BCC > 872° C

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.6. Análisis de estructuras cristalinas

Para obtener información de una estructura, el método más usado es la difracción de rayos X. La difracción se da cuando un haz monocromático (de una sola longitud de onda) cuya longitud de onda es del orden de la distancia entre planos de una red cristalina es dispersado por el cristal y los planos que lo conforman. Existen ciertos planos cristalográficos en los cuales la onda se ve reforzada en vez de eliminada, los cuales en estas condiciones satisfacen la ley de Bragg.

Esta ley enuncia que, si se disparan rayos X hacia una red cristalina de una longitud de onda conocida y con un ángulo conocido, se pueden detectar rayos X difractados de varias intensidades que representan un espacio interplanar específico en la estructura. Al escanear el elemento con ángulos diferentes a la misma longitud de onda y contando los haces difractados se obtiene un patrón de difracción como se muestra en la *Figura 42* (Mitchell, 2004).

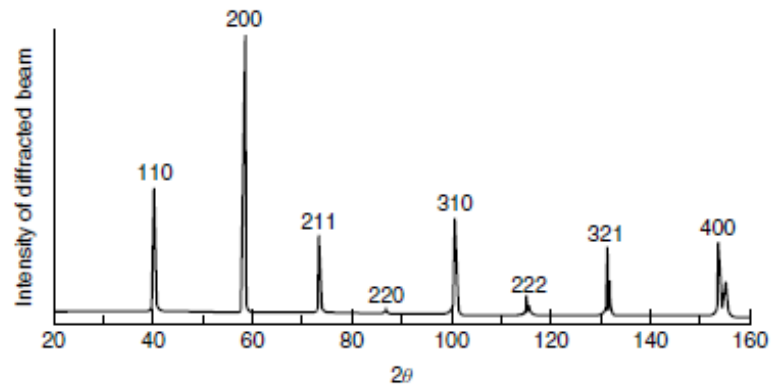


Figura 42.
Patrón de Difracción de Tungsteno.
Fuente: (Mitchell, 2004)

La ley de Bragg, entonces, quedará expresada de la siguiente manera:

$$\text{Sen } \theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}} \quad (2-9)$$

Donde θ es el ángulo entre el haz difractado y la dirección original del haz, λ es la longitud de onda de los rayos X y d_{hkl} es la distancia interplanar entre los planos que causan el refuerzo del haz. Los rayos X usados en la difracción poseen una longitud de onda entre 0,05 y 0,25 nm además la difracción permite determinar estructuras cristalinas, parámetros reticulares y la identificación de un material.

Entonces al considerar un haz de rayos X que incide en un cristal como se muestra en la *Figura 43*, se obtienen los planos que actúan como espejos reflejando el haz incidente de rayos X además, las líneas horizontales representan planos paralelos con índices de Miller (h, k, l); cuando el haz incide en este conjunto de planos con un ángulo tal que las trayectorias de ondas que abandonan los planos no están en fase, no se produce un reforzamiento de haz generándose una interferencia destructiva. A su vez si estas trayectorias son reflejadas por los planos en fase se produce un refuerzo del haz o llamada también interferencia constructiva (Askeland, 1998).

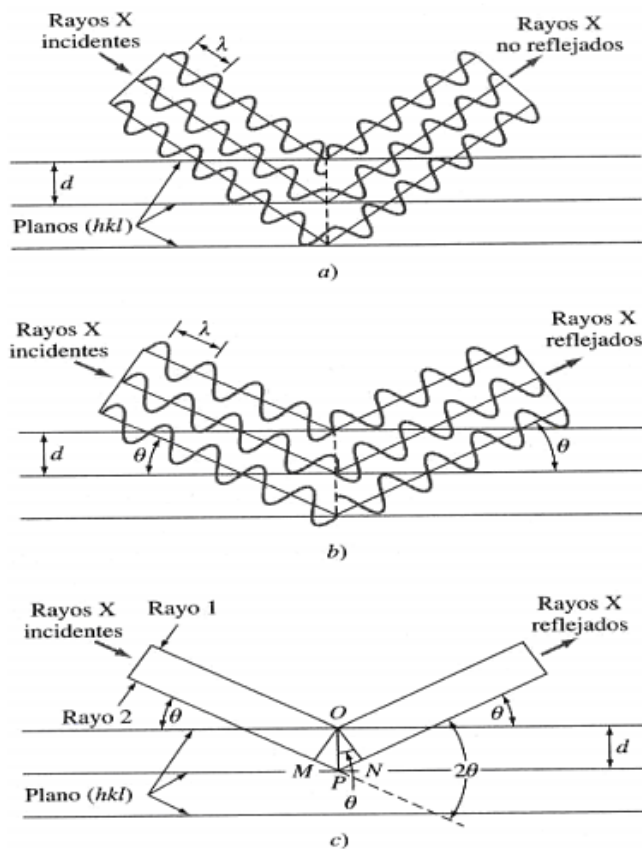


Figura 43.

Reflexión de Rayos X para un cristal a) ángulo de incidencia arbitrario b) ángulo de fase y refuerzo c) representación en b) sin la representación de la onda

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.7. Proceso de difracción

Un generador de radiación libera un haz de rayo X con una longitud de onda λ , el cual al contactar con los planos paralelos de la muestra separados por una distancia d_{hkl} , difracta un haz de luz con una nueva dirección e inclinación 2θ , que será detectado y marcará su ángulo de difracción en un goniómetro (Smith, 2006).

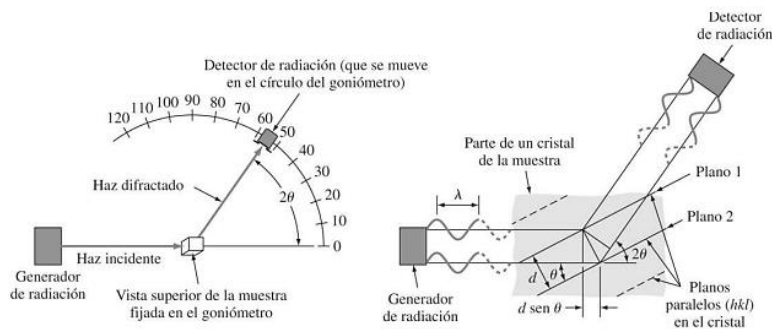


Figura 44.

Proceso de difracción

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.8. Condiciones de difracción

Como sabemos la ecuación para la distancia entre planos es:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2-10)$$

Al reemplazar esta ecuación en la ley de Bragg, se obtiene:

$$\lambda = \frac{2a \operatorname{sen} \theta}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2-11)$$

La cual puede ser empleada junto con los datos de difracción de rayos X, para determinar si una estructura es cúbica centrada en el cuerpo o en las caras. Para emplear esta ecuación en difracción de rayos X, se deben conocer cuales planos cristalinos son planos de difracción para cada tipo de estructura. Para la red cúbica sencilla todos los planos (hkl) son planos de reflexión. Pero para BCC, la difracción tiene lugar solo en los planos cuyos índices de Miller (h+k+l) sean un número par. Para FCC, los planos de difracción son aquellos cuyos índices de Miller son números pares o impares cero (0) es considerado par (Smith, 2006).

Tabla 7.
Reflexiones en estructuras cúbicas.

Celda Unitaria	Reflexiones Presentes	Reflexiones Ausentes
BCC	(h+k+l) = par	(h+k+l) = impar
FCC	(h,k,l) todos pares o impares	(h,k,l) no todos pares o impares

Fuente: (Smith, 2006)

Tabla 8.
Ejemplos de planos difractores para estructuras cúbicas.

Planos del cubo	Suma	Planos de difracción del cubo {hkl}	
$h^2 + k^2 + l^2$	$[h^2 + k^2 + l^2]$	FCC	BCC
{100}	1		
{110}	2	...	110
{111}	3	111	
{200}	4	200	200
{210}	5		
{211}	6	...	211
...	7		
{220}	8	220	220
{221}	9		
{310}	10	...	310

Fuente: (Smith, 2006)

2.4.9. Interpretación de resultados experimentales de estructuras cristalinas cúbicas

Se puede usar este análisis para diferenciar las estructuras BCC y FCC de un metal cúbico, supongamos que se tiene un metal con una estructura antes mencionada y se pueden identificar los planos de difracción principal y los valores 2θ . Este análisis se deriva de elevar al cuadrado los miembros de la ecuación anterior y despejar $\operatorname{sen}^2 \theta$ se obtiene una nueva ecuación:

$$\operatorname{sen}^2 \theta = \frac{\lambda^2 (h^2+k^2+l^2)}{4a^2} \quad (2-12)$$

A partir de los datos experimentales de difracción, se pueden obtener los valores de 2θ para una serie de planos principales de difracción $\{hkl\}$ ya que la longitud de onda y la constante de red no varían, se pueden despreciar obteniéndose la ecuación 3.11 donde θ_A y θ_B son los ángulos de difracción asociados a los planos principales $\{h_A k_A l_A\}$ y $\{h_B k_B l_B\}$ (Smith, 2006).

$$\frac{\text{sen}^2 \theta_A}{\text{sen}^2 \theta_B} = \frac{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}{h_B^2 + k_B^2 + l_B^2} \quad (2-13)$$

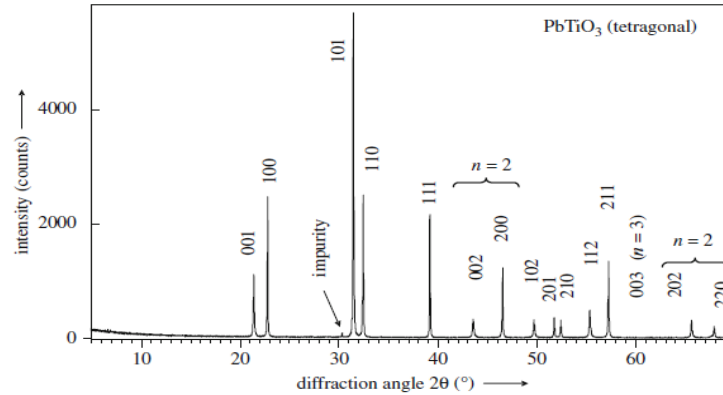


Figura 45.

Ejemplo de un patrón experimental de difracción de rayos X. Grabado para policristalino, muestra en polvo de $PbTiO_3$ (tetragonal) usando radiación $Cu\ K\alpha_1$.

Fuente: (Mittemeijer, 2010)

En valores específicos de la difracción, se puede observar la intensidad difractada de ángulo 2θ . En consecuencia, el patrón de difracción puede ser concebido como una "huella dactilar" de la sustancia difractante. Tal identificación de fase se refiere a una de las principales aplicaciones de la difracción de rayos X en la ciencia de materiales (Mittemeijer, 2010).

Ejercicio

Para el hierro BCC, calcular, a) la distancia Inter planar y b) el ángulo de difracción para el conjunto de planos (3 2 1). El parámetro de red, para el hierro, es de 0.2866 nm (2.866 Å). Se utiliza una radiación monocromática de una longitud de onda de 0.1542 nm (0.1542Å) y el orden de difracción es 1.

Solución

- a) La distancia interplanar d_{hkl} se calcula utilizando la ecuación

$$\begin{aligned} d_{hkl} &= \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} & (2-14) \\ &= \frac{0.2866}{\sqrt{1^2 + 2^2 + 1^2}} = 0.1170 \text{ nm} \end{aligned}$$

- b) El valor de θ se puede calcular mediante la ecuación

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d_{hkl}} \quad (2-15)$$

Donde n es 1, ya que se trata de una difracción de primer orden

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d_{hkl}} = \frac{1 * 0.1542 \text{ nm}}{2 * 0.1170 \text{ nm}} = 0.659$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.659) = 41.22^\circ$$

2.5. Estructura de los materiales cerámicos

La estructura de los cristales cerámicos, que contienen varios átomos de diferentes tamaños, es de las estructuras más complejas de los materiales. Los enlaces entre estos átomos son por lo general covalentes (compartiendo electrones de ahí que son de enlaces muy fuertes) o iónicos (enlaces primarios entre iones de carga opuesta, también son enlaces fuertes), estos enlaces son muchos más fuertes que los enlaces metálicos. En consecuencia, las propiedades tales como la dureza o la resistencia térmica y eléctrica, son significativamente más elevadas en los cerámicos que los metales (Kalpakjian, 2002).

Los cerámicos están dispuestos como un monocristal en forma de policristalino es decir, con muchos granos. El tamaño del grano tiene mucha influencia en lo que tiene que ver con la resistencia y las propiedades propias de los cerámicos. Mientras más fino sea el tamaño del grano (de ahí el nombre de cerámicos finos), más elevada será la resistencia y tenacidad.

Entre los materiales más antiguos como materia prima para la elaboración de cerámicos está la arcilla, que presenta una estructura en forma de hoja de grano fino. El ejemplo más común es el caolín (por Kao-ling, una colina en China). Es una arcilla blanca, formada por silicato de aluminio con capas alternas débilmente enlazadas de iones de silicio y aluminio. Cuando a la caolinita se le agrega agua, esta se fija a las capas (absorción), haciéndolas resbaladizas y le imparte a la arcilla su suavidad conocida y sus propiedades plásticas (hidro plasticidad) que la hacen moldeable (Kalpakjian, 2002).

Otras materias primas de importancia para los cerámicos que se encuentran de forma natural son el pedernal (roca formada por sílice de grano muy fino, SiO_2) y el feldespato (grupo de minerales cristalinos formados por silicatos de aluminio más potasio, calcio o sodio). Estas materias primas en su estado natural por lo general, contienen impurezas de varios tipos las cuales deben ser eliminadas antes de cualquier procesamiento posterior de los materiales en productos de utilidad con un desempeño confiable. Las materias primas altamente refinadas proporcionan cerámicos de propiedades mejoradas (Kalpakjian, 2002).

Tabla 9.

Tipos y características generales de los cerámicos.

Tipos	Características generales
Cerámicos a base de óxidos	
Alúmina	Elevada dureza, resistencia moderada; cerámica de uso más frecuente; herramientas de corte, abrasivos, aislamiento térmico y eléctrico.
Zirconio	Alta resistencia y tenacidad; dilatación térmica parecida a la del hierro fundido, adecuada para componentes de motor térmicos.
Carburos	
Carburo de tungsteno	La dureza, resistencia y resistencia al desgaste dependen del contenido de aglutinante de cobalto, de uso común para troqueles y herramientas de corte.
Carburo de titanio	No tan tenaz como el carburo de tungsteno; utiliza como aglutinante el níquel y el molibdeno; usado en herramientas de corte.
Carburo de silicio	Alta resistencia y resistencia al desgaste a elevadas temperaturas; usado para motores

	térmicos y como abrasivo
Nitruros	
Nitruro de titanio	De color oro; usado como recubrimiento por su baja característica de fricción.
Nitruro de silicio	Elevada resistencia a la termofluencia y al choque térmico; usado en motores térmicos.
Sialon	Formado por nitruros de silicio y otros óxidos y carburos; usado en herramientas de corte.
Cermets	Formado por óxidos, carburos y nitruros; usado en aplicaciones de altas temperaturas.
Sílice	Resistencia a la alta temperatura; el cuarzo exhibe un efecto piezoeléctrico; los silicatos que contienen varios óxidos se usan en aplicaciones no estructurales a alta temperatura.
Vidrios	Contienen por lo menos 50 por ciento de sílica; estructuras amorfas; disponibles varios tipos con una gama de propiedades físicas y mecánicas.
Vitrocerámicos	Tienen un elevado componente cristalino en su estructura; buena resistencia al choque térmico y resistentes.
Grafito	Forma cristalina del carbono; elevada conductividad eléctrica y térmica; buena resistencia al choque térmico.
Diamante	Sustancia más dura conocida; disponible como un monocristal o en forma policristalina; usado como herramientas de corte y abrasivos y en dados para el estirado fino de alambres.

Fuente: (Kalpakjian, 2002).

2.5.1. Tipos principales de intersticios en los cerámicos

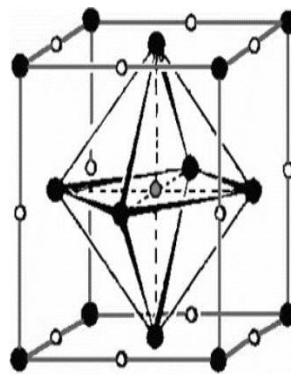


Figura 46.

Huecos octaédricos (Estructura FCC).

Fuente: (uniovi.es, 2012)

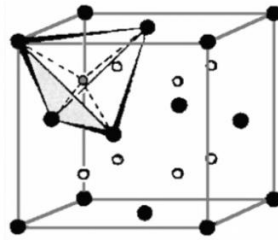


Figura 47.

Huecos tetraédricos (Estructura FCC).

Fuente:(uniovi.es, 2012)

El número de coordinación de un átomo es el número de átomos unidos directamente a él. En la tabla 10 se ejemplifican el número y la geometría para enlace catión-ion tipo AX.

Tabla 10.

Números y geometrías de coordinación para varios cocientes entre los radios del catión y del anión.

Número de coordinación	Cocientes entre los radios del catión y el anión	Geometría de coordinación
2	<0.155	
3	0.155-0.225	
4	0.225-0.414	
6	0.414-0.732	
8	0.732-1	

Fuente: (Callister)

Estructuras cristalinas del tipo AX

Algunos de los materiales cerámicos más comunes, son aquellos en los cuales el número de cationes y aniones son iguales. Estos se refieren a menudo como compuestos AX, donde A indica el catión y X el anión.

2.5.2. Estructura del cloruro sódico

El cloruro sódico es la estructura cristalina más común del tipo AX. El número de coordinación para los cationes y aniones es 6, de acuerdo a esto el cociente entre el radio del catión y el anión está comprendido entre 0.414 y 0.732., una celdilla unidad de esta estructura cristalina (*Figura 48*), se puede formar a partir de una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) en las caras de los aniones con los cationes situados uno, en el centro del cubo y otro en el centro de los doce lados del cubo. Una estructura cristalina semejante, se forma a partir de una estructura cúbica centrada en las caras formadas por cationes. Por ello, la estructura cristalina del

cloruro sódico puede ser imaginada como formada por dos redes cúbicas centradas en las caras interpenetrantes, una compuesta por de cationes y la otra de aniones. Algunos de los materiales más comunes que presentan esta estructura cristalina son el NaCl, MgO, MnS, LiF, y FeO (Callister).

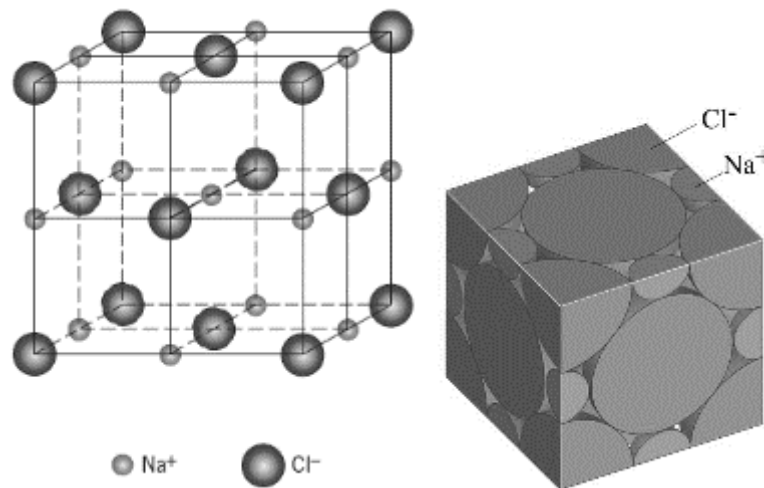


Figura 48.

Estructura cristalina del cloruro de sodio, ClNa.

Fuente: (Callister)

2.5.3. Estructura del cloruro de cesio

La *Figura 49* muestra una celdilla unidad de la estructura cristalina del cloruro de cesio, [Cloruro de cesio], donde el número de coordinación es 8 para ambos tipos de iones. En este caso, los cationes son demasiado grandes para poder situarse en los huecos octaédricos y por tanto, se sitúan en el hueco de mayor tamaño correspondiente al centro de un cubo. Los aniones están colocados en cada uno de los vértices del cubo, mientras que el centro del cubo hay un catión. El intercambio de las posiciones de los iones positivos y negativos reproduce la misma estructura. Esta no es una estructura cúbica centrada en el cuerpo, puesto que distintos tipos de iones ocupan los puntos de la red. El ion Cs^+ es mayor que el Cl^- . La relación entre los radios iónicos vale $Cs/Cl=0.939$. La estructura del CsCl se construye sobre la red de Bravais cúbica simple con dos iones (Uno Cs^+ y otro Cl^-) asociados a cada punto reticular. Existen dos iones en cada celda unidad (Uno Cs^+ y otro Cl^-). Cada Cs^+ está enlazado por igual con los ocho Cl^- adyacentes y viceversa (Callister).

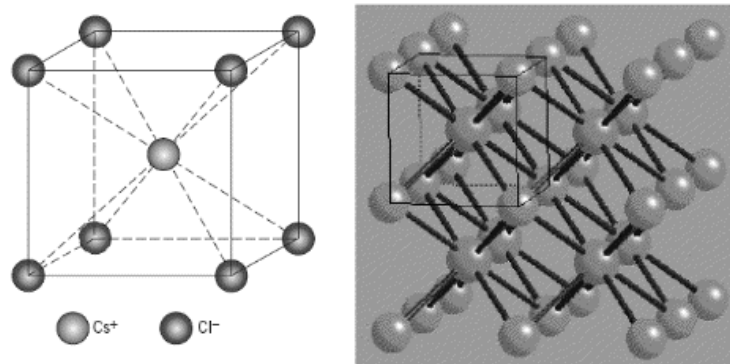


Figura 49.

Celdilla unidad de la estructura cristalina del cloruro de cesio (CsCl).

Fuente:(Callister)

Estructura del sulfuro de cinc [Sulfuro de cinc (ZnS), Blenda] y Wurtzita.

Una tercera estructura [AX] es una en la cual el número de coordinación es 4, es decir, todos los iones están con coordinación tetraédrica. Los cationes son demasiado pequeños para permanecer estable en los huecos octaédricos y por tanto, se ajustan mejor en los huecos tetraédricos que son más pequeños. Desde el punto de vista del empaquetamiento denso, toda estructura puede representar como formada por octaedros y un número dos veces mayor de tetraedros, siendo posibles tetraedros de dos clases: una mitad de los tetraedros tienen los vértices orientados “mirando” a lo largo del eje ternario (eje perpendicular a las capas densamente empaquetadas) del empaquetamiento hacia arriba y la otra mitad, hacia abajo. Ocupando una mitad de los tetraedros con cationes, se llega a la estructura del tipo ZnS, que esencialmente es la estructura cúbica del diamante, con los iones Zn y S alternados en las posiciones atómicas (Callister).

En la naturaleza se encuentran dos modificaciones de ZnS:

La llamada blenda de zinc ordinaria o esfalerita, tiene como base el empaquetamiento cúbico centrado en las caras de aniones S^{2-} , en la cual una mitad de cuyos huecos tetraédricos está ocupada por cationes Zn^{2+} (Figura 50). El número de coordinación es 4, es decir todos los iones están coordinados tetraédricamente. La estructura de la blenda de zinc tiene cuatro ejes polares, en correspondencia con los cuatro ejes ternarios dirigidos a lo largo de las diagonales del cubo. La estructura cristalina de la blenda es similar a la del diamante, con los cationes y aniones alternándose en las posiciones de los átomos de carbono (Callister).

La modificación hexagonal compacta del ZnS, wurtzita (Figura 50), tiene en la base un empaquetamiento hexagonal de aniones S^{2-} . La wurtzita solo tiene un eje polar, el único eje ternario, dirigido a lo largo del eje c de la celdilla hexagonal (Callister).

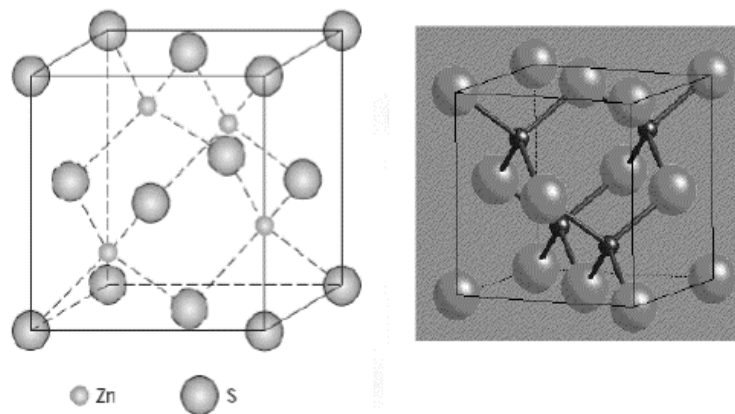


Figura 50.

Estructura cristalina de la blenda o esfalerita (ZnS).

Fuente:(Callister)

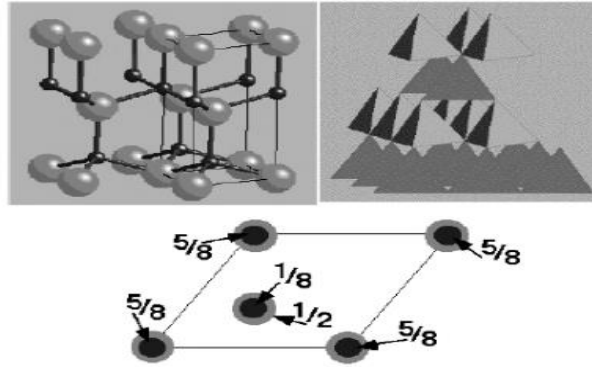


Figura 51.

Estructura cristalina de la wurtzita (ZnS).

Fuente: (Callister)

2.5.4. Estructuras cristalinas del tipo $AmXp$

Si las cargas de los cationes y de los aniones no son iguales, entonces puede existir un compuesto con la fórmula química $AmXp$ donde m y/o p son diferentes de 1.

2.5.4.1. Estructura cristalina tipo Fluorita AX_2

La fórmula química AX_2 , incluye un gran número de cerámicas estructurales. Un ejemplo, es la estructura cristalina del mineral natural fluorita (CaF_2) del cual recibe el nombre. El cociente de radios iónicos (r_C/r_A) para el CaF_2 es alrededor de 0.8, lo cual corresponde a un número de coordinación de 8. Los iones de calcio de gran tamaño están colocados en los centros de los cubos, con iones fluoruro en los vértices, estos últimos forman una estructura cúbica simple. La fórmula química muestra que el número de iones Ca^{2+} es igual a la mitad de los iones F^- , por consiguiente, la estructura cristalina es similar a la del CsCl, excepto que solo la mitad de los centros de los cubos están ocupados por iones Ca^{2+} , de ello resulta una estructura cristalina con huecos, relativamente, grandes. Una celdilla unidad está formada por ocho cubos, tal como se indica en la *Figura 52*. Cada celda unidad contiene 12 iones (Cuatro Ca^{2+} y ocho F^-), en la que hay tres iones (Un Ca^{2+} y dos F^-) asociados a cada punto reticular (Callister).

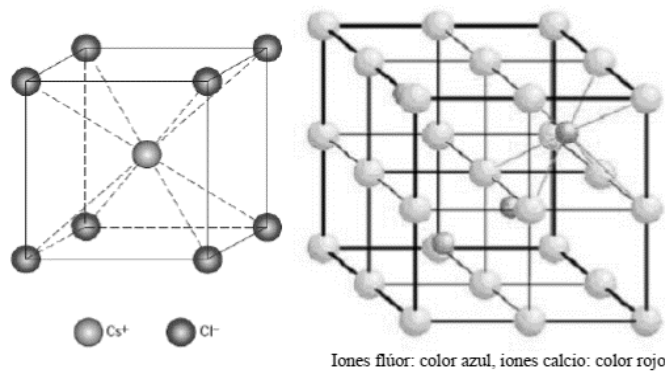


Figura 52.

Estructura fluorita. Los cationes tienen coordinación 8 mientras que los aniones tienen coordinación 4 (tetraédrica).

Fuente: (Callister)

2.5.4.2. Estructura cristalina tipo Antifluorita A_2X

Los cationes monovalentes Li^+ , Na^+ , K^+ , Ag^+ , Rb^+ etc. Se combinan con los aniones O^{2-} , Te^{2-} , S^{2-} etc. Para formar compuestos de fórmula A_2X con los aniones y los cationes en las posiciones de red contrarias a las de las estructuras de la fluorita, es decir, los aniones están dispuestos en un ordenamiento cúbico centrado en las caras con los cationes ajustándose en todos los huecos tetraédricos, se forma así la estructura cristalina denominada Antifluorita.

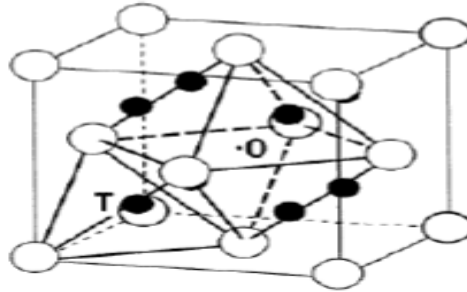


Figura 53.

Estructura de α - Ag_2Te . Ag = Esferas negras, Te = Esferas blancas.

Fuente:(Callister)

2.5.5. Estructura de los cerámicos cristalinos

En estas estructuras, los iones de las celdas unitarias ocupan sitios en la red que proporcionan la coordinación adecuada y aseguran que se obtenga el equilibrio adecuado de cargas. Un gran número de materiales cerámicos, incluyendo el CaO, el MnS, el NiO, el MnO, el FeO, y el HfN poseen la estructura del cloruro de sodio. La estructura que presenta la blenda de zinc es típica del ZnS, del BeO, y del SiC; en tanto que varios materiales cerámicos, incluyendo el CaF₂, el CeO₂, el ZrO₂, y el HfO₂, tienen la estructura de la fluorita. La mayor parte de los cerámicos, presentan estructuras cristalinas más complicadas (Askeland, 1998).

2.5.6. Estructura Perovskite

La celda unitaria Perovskite (*Figura 54*) se encuentra en varios cerámicos eléctricos importantes, como el BaTiO₃, y el SrTiO₃. Para este tipo de celda están presentes tres tipos de iones. Si en las esquinas de un cubo están los iones de bario, los iones de oxígeno llenarán los sitios centrados en las caras y los iones de titanio ocuparán los sitios centrados en el cuerpo. La distorsión de la celda unitaria ocasiona una señal eléctrica, lo que permite que algunos titanos sirvan como transductores (Askeland, 1998).

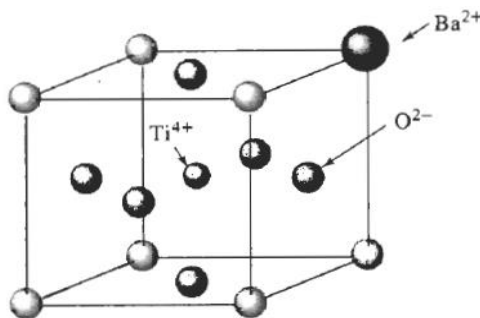


Figura 54.

Celda unitaria Perovskite

Fuente: (Askeland, 1998)

2.5.7. Estructura del corindón

Una de las formas de la alúmina, Al_2O_3 tiene la estructura cristalina del corindón, similar a una estructura hexagonal compacta; a pesar de, a cada celda unitaria están asociados 12 iones de aluminio y 18 de oxígeno (*Figura 55*). La alúmina es un material común que se utiliza como refractario, aislante eléctrico y abrasivo. Otros componentes cerámicos, incluyendo el Cr_2O_3 y Fe_2O_3 tienen esta estructura.

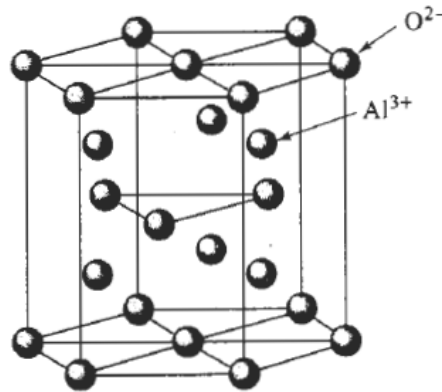


Figura 55.

Celda unitaria corindón.

Fuente:(Askeland, 1998).

2.5.8. Estructura de espinel

La estructura del espinel típica del $MgAl_2O_4$ (*Figura 56*), tiene una celda unitaria que se puede visualizar como una formación de ocho cubos más pequeños. En cada uno de estos cubos menores, se localizan iones de oxígeno en las posiciones normales de una red cúbica centrada en las caras. Dentro de los cubos pequeños, hay cuatro sitios intersticiales octaédricos y ocho sitios intersticiales tetraédricos, de los cuales los cationes ocupan tres. En espinel normal los iones bivalentes (como el Mg^{2+}) ocupan sitios tetraédricos y los trivalentes (como el Al^{3+}), los octaédricos. En los espineles inversos, el ion bivalente y la mitad de los iones trivalentes se localizan en los sitios octaédricos. Esta estructura la tienen muchos cerámicos eléctricos y magnéticos importantes, incluyendo el Fe_3O_4 (Askeland, 1998).

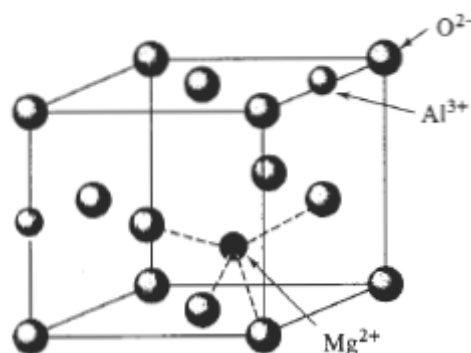


Figura 56.

Celda unitaria corindón.

Fuente:(Askeland, 1998)

2.5.9. Grafito

El grafito, una de las formas cristalinas del carbono, algunas veces se le considera material cerámico, aunque el carbono es un elemento y no una combinación de átomos metálicos. El grafito presenta una estructura hexagonal por capas (*Figura 57*) y se utiliza como material refractario, como lubricante y como fibra (Askeland, 1998).

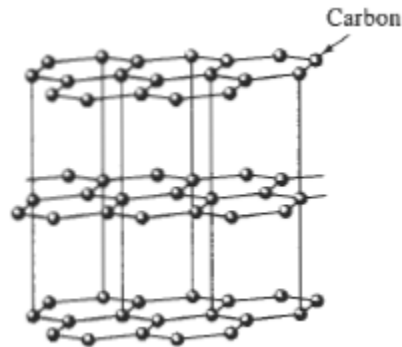


Figura 57.

Estructura del grafito.

Fuente: (Askeland, 1998)

2.5.10. Estructura de los silicatos cristalinos

Muchos materiales cerámicos contienen estructuras de silicatos con átomos de silicio y oxígeno enlazados entre sí en varias distribuciones. También, un gran número de formaciones naturales de tipo mineral, tales como arcillas, feldspatos y micas son silicatos. Debemos tener en cuenta que el silicio y el oxígeno son los dos elementos químicos más abundantes en la corteza terrestre, de ahí que los silicatos se utilicen ampliamente en ingeniería debido a su bajo precio, disponibilidad, así como por sus propiedades especiales. Las estructuras de silicatos son particularmente importantes para materiales de construcción en ingeniería: vidrios, cemento portland y refractarios.

Algunos materiales cerámicos contienen enlaces covalentes. Un ejemplo de la forma cristobalita del SiO_2 , o sílice, que es una materia prima importante para los productos cerámicos (*Figura 58*), la ubicación de los átomos en la celda unitaria ayuda a una coordinación adecuada, equilibra la carga y además, asegura que no se incumpla la direccionalidad de los enlaces covalentes.

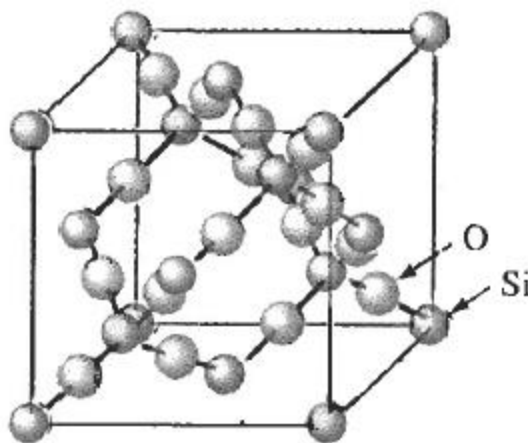


Figura 58.

Estructura cristalina de cristobalita una de las formas del SiO_2 .

Fuente: (Askeland, 1998)

En la sílice, el enlace covalente requiere que los átomos de silicio tengan cuatro vecinos cercanos (cuatro átomos de oxígeno), formando así una estructura tetraédrica. Los tetraedros de silicio-oxígeno, son las unidades estructurales elementales de la sílice, de las arcillas y los silicatos vítreos.

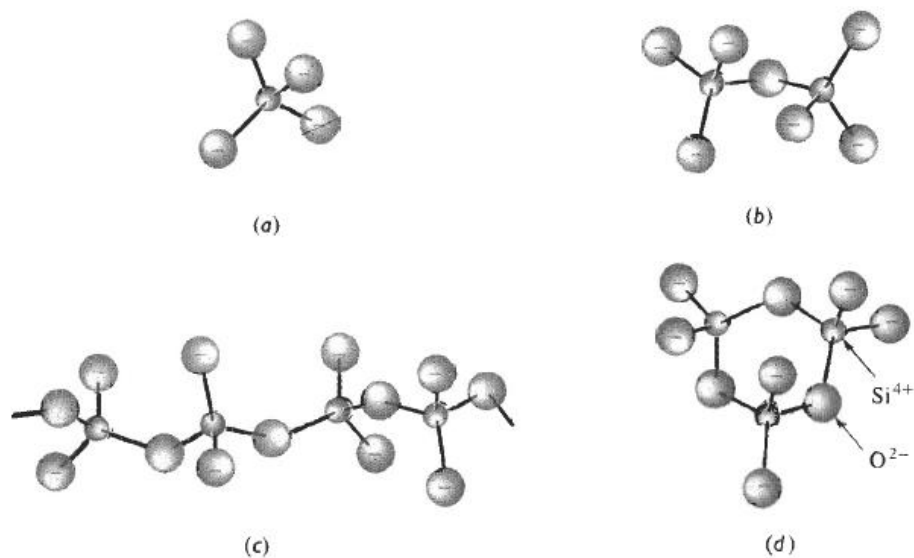


Figura 59.

Disposición de los tetraedros de sílice: a) isla de orto silicato, b) isla de piro silicato, c) cadena, d) anillo. Los iones positivos son atraídos hacia los grupos silicatos.

Fuente: (Askeland, 1998)

2.5.11. Compuestos de silicatos

Cuando los iones Mg^{2+} están libres para mezclarse con un tetraedro, se produce un compuesto Mg_2SiO_4 , o forsterita. Los dos iones Mg^{2+} cumplen la condición de carga y equilibran a los iones SiO_4^{4-} . Los grupos Mg_2SiO_4 , a su vez producen una estructura cristalina tridimensional. De modo similar, los iones Fe^{2+} pueden mezclarse con los tetraedros de sílice para producir Fe_2SiO_4 que forman una serie de soluciones sólidas conocidas como alivinas u ortosilicatos (Askeland, 1998).

Dos tetraedros de silicatos pueden combinarse compartiendo un vértice para producir un tetraedro doble, es decir, un ion $S_2O_7^{6-}$. Este grupo iónico a su vez, puede combinarse con otros iones para producir pirosilicatos, compuestos que presentan tetraedros dobles.

2.5.12. Estructura de anillo y cadena

Cuando dos vértices del tetraedro se comparten con otros grupos tetraédricos, se forman anillos y cadenas con el tipo de fórmula de $(SiO_3)_n^{2n-}$, donde n presenta el número de grupos SiO_3^{2-} de la cadena o el anillo. Una gran cantidad de los materiales cerámicos tienen esta estructura de metasilicato. La eolastonita ($CaSiO_3$) está constituida por anillos de Si_3O_9 ; el berilo ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$) contiene anillos grandes de Si_6O_{18} y la enstatita ($MgSiO_3$) tiene una estructura de cadena.

2.5.13. Estructuras laminares (arcillas)

Cuando la relación Si:O da la fórmula Si_2O_3 , los tetraedros se combinan para formar estructuras laminares, *Figura 60*. En una formación ideal, tres de los átomos de oxígeno de cada tetraedro están ubicados en un solo plano, formando un patrón hexagonal. Los átomos de silicio en los tetraedros forman un segundo plano también con un patrón hexagonal. El cuarto átomo de oxígeno de cada tetraedro está presente en un tercer

plano. Estos últimos están enlazados iónicamente con otros grupos de átomos, formando materiales como las arcillas, la mica y el talco (Askeland, 1998).

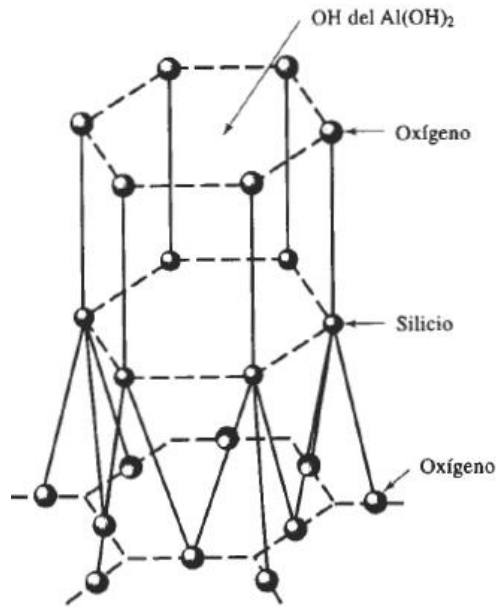


Figura 60.

Los tetraedros de sílice producen estructuras laminares en forma hexagonal, que son la base de las arcillas y otros minerales.

Fuente: (Askeland, 1998)

La caolinita, una arcilla común está conformada por láminas de silicato enlazadas iónicamente a una hoja compuesta por grupos Al y OH, lo que forman unas placas delgadas de arcilla en forma hexagonal con la fórmula $Al_2Si_2O_5(OH)_4$.

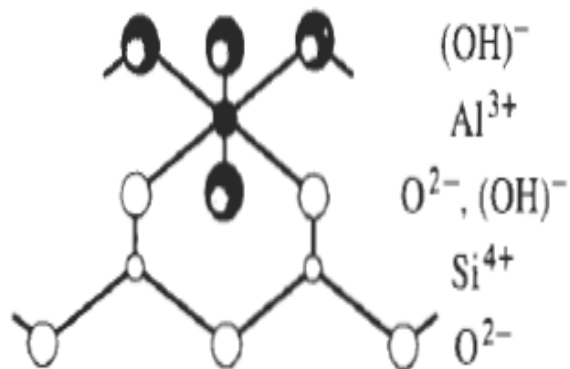


Figura 61.

Caolinita estructura laminar de los silicatos.

Fuente:(Askeland, 1998)

La montmorillonita, es decir $Al_2(Si_2O_5)_2(OH)_2$, contiene dos láminas de silicato que presionan al aluminio central y a una capa de OH (Figura 62). Los enlaces entre cada una de estas plaquetas de arcilla, se realizan por medio de una combinación de enlaces iónicos y covalentes. Las plaquetas individuales están unidas entre sí por enlaces de Van de Waals débiles. Las arcillas son componentes importantes de muchos materiales cerámicos.

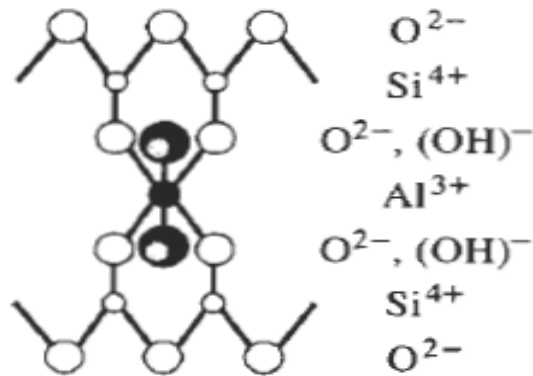


Figura 62.

Montmorillonita estructura laminar de los silicatos.

Fuente:(Askeland, 1998)

2.5.14. Sílice

Finalmente, cuando las cuatro esquinas de los tetraedros están compartidas con otros tetraedros iguales se forma la cristobalita, forma típica del SiO_2 . Este compuesto puede existir en varias formas alotrópicas. Conforme se aumenta la temperatura, la sílice cambia de cuarzo α a cuarzo β a tridimita β a cristobalita β y a líquido. El diagrama de equilibrio presión temperatura de la Figura 63, muestra las formas estables de la sílice. La transformación del cuarzo α al β está acompañada por un cambio brusco en las dimensiones de la sílice. Estos mismos cambios en el cuarzo se muestran en la Figura 64. Este cambio de volumen está acompañado por esfuerzos altos e incluso por agrietamiento.

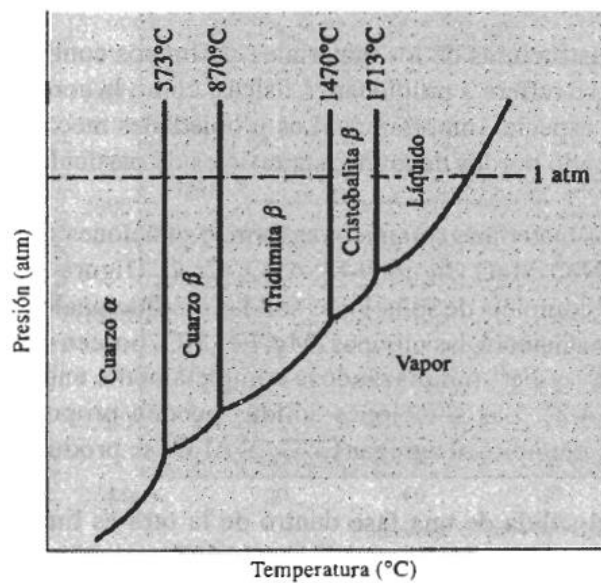


Figura 63.

Diagrama de fase de presión-temperatura para el SiO_2 .

Fuente: (Askeland, 1998)

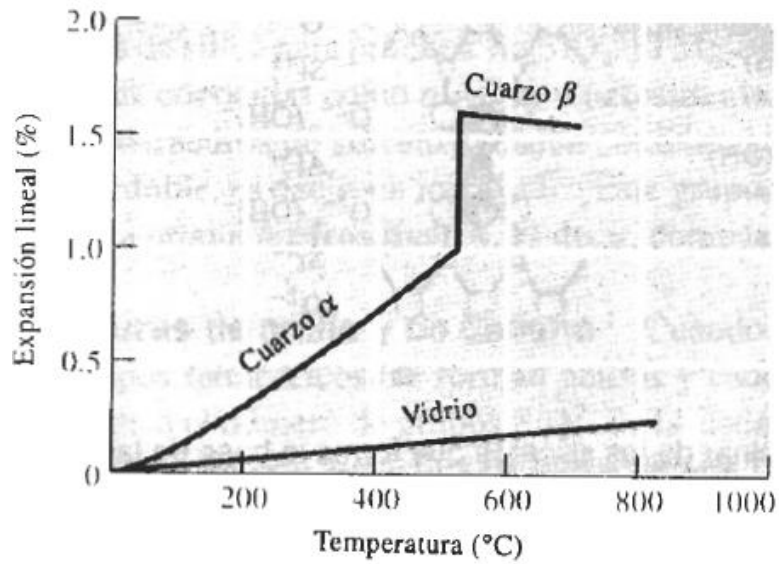


Figura 64.

Expansión del cuarzo.

Fuente: (Askeland, 1998)

Tabla 11.

Resumen de las estructuras cristalinas más comunes de los cerámicos.

Nombre de estructura	de fórmula	Tipo de celda unidad	Número de coordinación		Ejemplo de
			Catión	Anión	
Cloruro sódico NaCl	AX	FCC	6	6	NaCl, MnO, FeO
Cloruro de cesio CsCl	AX	BCC	8	8	CsCl, CsBr, TiCl, TiBr, AgMg, LiMg
Blenda de zinc	AX	FCC	4	4	ZnS, SiC, ZnTe
Fluorita	AX ₂	FCC	8	4	CaF ₂ , UO ₂ , ThO ₂ ,
Antifluorita	A ₂ X	FCC	4	8	LiO ₂ , NaO ₂ , K ₂ O, iMg ₂ S
Perovskita	ABX ₃	FCC	12(A) 6(B)	6	BaTiO ₃ , SrZrO ₃
Espinela	AB ₂ X ₄	FCC	4(A) 6(B)	4	MgAl ₂ O ₃ , FeAl ₂ O ₄
Sílice	AX ₄	Tetraedro	4	2	SiO ₂ , GeO ₂

Fuente: (Callister)

2.6. Polímeros

La palabra polímero significa, literalmente, “muchas partes”. En este sentido, puede considerarse como un material polimérico sólido aquel que contiene múltiples partes o unidades enlazadas químicamente y que están unidas entre sí para formar un sólido. En este capítulo se estudian algunos aspectos de la estructura, propiedades, procesamiento y aplicaciones de dos materiales poliméricos importantes en los procesos de fabricación industrial: plásticos y elastómeros. Los plásticos son un grupo grande y variado de materiales sintéticos, que se procesan para darles forma por moldeo o deformación. Así como existen muchos tipos de metales, como el aluminio y el bronce, también se cuenta con muchos tipos de plásticos, como el polietileno y el nailon. Los plásticos se dividen en dos clases, termoplásticos y termofijos, según sean los enlaces químicos de su estructura. Los elastómeros o cauchos pueden alcanzar una deformación elástica muy grande cuando se les aplica una fuerza y recuperar su forma original (o casi) cuando cesa la fuerza (Smith, 2004).

2.6.1. Termoplásticos

A los termoplásticos es necesario calentarlos para darles su forma y después enfriarlos, de este modo adquieren y conservan la forma originalmente adquirida. Estos materiales pueden volverse a calentar cierto número de veces para darles nuevas formas sin que haya un cambio significativo en sus propiedades. La mayoría de los termoplásticos están constituidos por cadenas principales muy largas de átomos de carbono, enlazados entre sí en forma covalente. Algunas veces, se enlazan también átomos de nitrógeno, oxígeno o azufre en forma covalente con la cadena molecular principal. En los termoplásticos, las largas cadenas moleculares están ligadas entre sí por enlaces secundarios (Smith, 2004).

Reacciones de polimerización

La mayoría de los termoplásticos se sintetizan por medio del proceso de polimerización de crecimiento en cadena. En este proceso muchas moléculas pequeñas (pueden ser miles) se enlazan entre sí, para formar cadenas moleculares muy largas. Las moléculas simples que se enlazan para formar cadenas largas se llaman monómeros (de las palabras griegas *mono*, que significa “uno”, y *meros*, que significa “parte”). La molécula de cadena larga formada a partir de unidades de monómero se denomina polímero (de las palabras griegas *polys*, que significa “muchos”, y *meros*, que significa “parte”) (Smith, 2004).

Estructura del enlace covalente de una molécula de etileno.

La molécula de etileno, C_2H_4 , está enlazada químicamente por un enlace covalente doble, entre los átomos de carbono y por cuatro enlaces covalentes sencillos entre el carbono y los átomos de hidrógeno, *Figura 65*. Una molécula a base de carbono, que posee uno o más enlaces dobles carbono-carbono, recibe el nombre de molécula insaturada. El etileno es una molécula insaturada a base de carbono, puesto que contiene un doble enlace carbono-carbono.

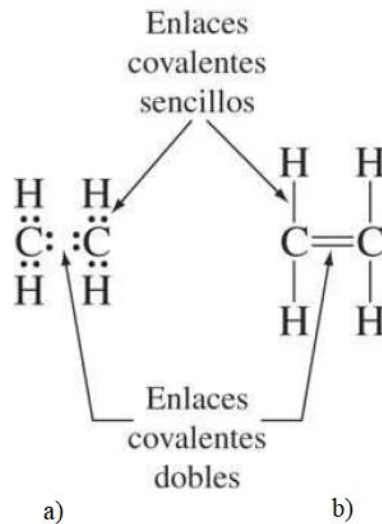


Figura 65.

Enlace covalente en la molécula de etileno ilustrado por a) electrón punto (los puntos representan los electrones de valencia), y b) notación de línea recta.

Fuente: (Smith, 2004)

2.6.2. Estructura de los polímeros lineales no cristalinos

Una cadena de polietileno de corta longitud adopta una configuración en zigzag *Figura 66*, debido al ángulo de enlace covalente entre los enlaces covalentes sencillos carbono-carbono, que es de aproximadamente 109° . Sin embargo, en una escala mayor, las cadenas de polímero están enredadas al azar en el polietileno no cristalino como espaguetis dentro de un tazón. Esta maraña de polímero lineal se ilustra en la *Figura 66*. En el caso de algunos materiales poliméricos, como el polietileno, pueden presentarse tanto regiones cristalinas como no cristalinas.

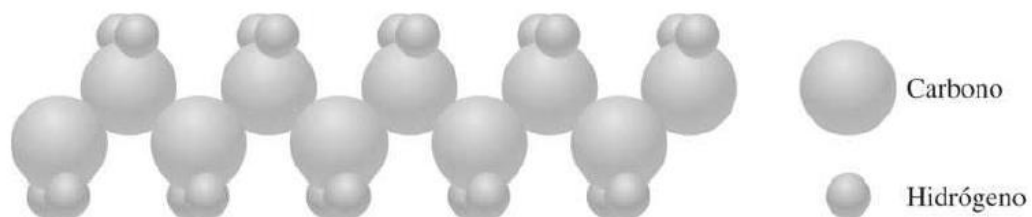


Figura 66.

Estructura molecular de una cadena de polietileno de corta longitud.

Fuente: (Smith, 2004)

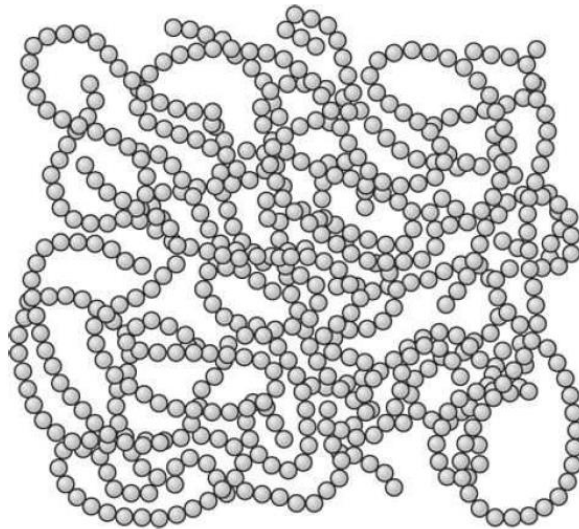


Figura 67.

Representación esquemática de un polímero. Las esferas representan las unidades que se repiten en la cadena del polímero, y no a átomos específicos.

Fuente: (Smith, 2004)

2.6.3. Polímeros de vinilo y vinilideno

Se pueden sintetizar muchos materiales poliméricos de adición (de cadena) útiles, tienen una estructura de cadena principal de carbono similar a la del polietileno, reemplazando a uno o más de los átomos de hidrógeno del etileno con otros tipos de átomos o grupos de átomos. Si sólo se reemplaza a un átomo de hidrógeno del monómero del etileno con otro átomo o grupo de átomos, el polímero polimerizado se polímero de vinilo. Algunos ejemplos de polímeros de vinilo son: policloruro de vinilo, polipropileno, poliestireno, acrilonitrilo y poliactetato de vinilo. La reacción general para la polimerización de los polímeros de vinilo es *Figura 68*, donde R1 puede ser otro tipo de átomo o grupo de átomos. En la *Figura 69*, se muestra el enlace estructural de algunos polímeros de vinilo.

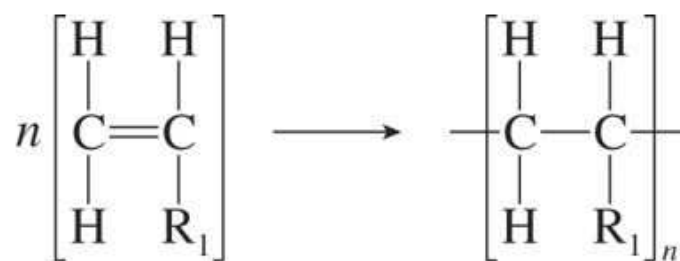


Figura 68.

Reacción general para la polimerización de los polímeros de vinilo.

Fuente: (Smith, 2004)

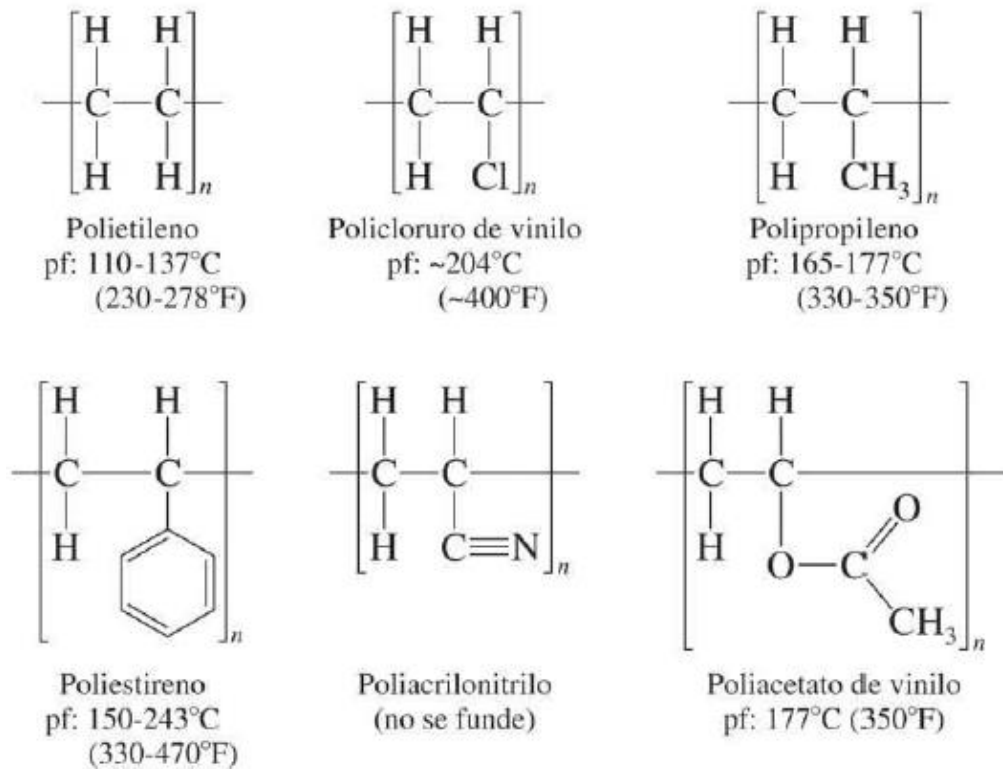


Figura 69.
Fórmulas estructurales de algunos polímeros de vinilo.
Fuente: (Smith, 2004)

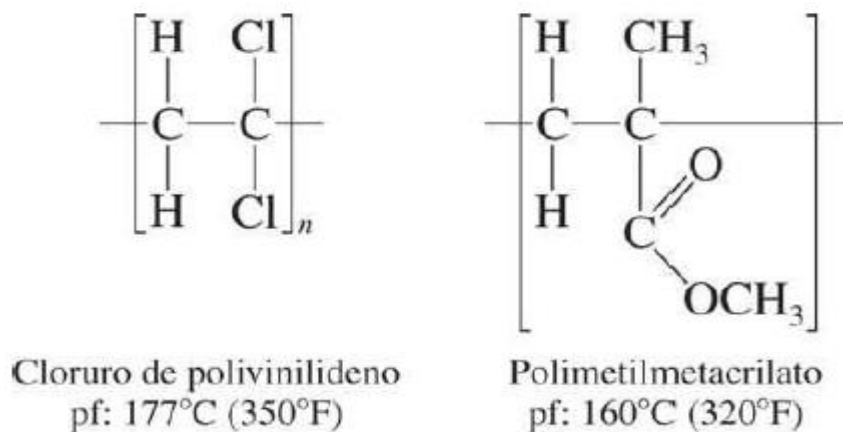


Figura 70.
Fórmulas estructurales de algunos polímeros de vinilideno.
Fuente: (Smith, 2004)

2.6.4. Homopolímeros y copolímeros

Los homopolímeros, son materiales poliméricos que consisten en cadenas de polímero formadas por unidades sencillas que se repiten. Esto significa que si A es una unidad que se repite, una cadena del homopolímero tendrá una secuencia de AAAAAA... en la cadena molecular del polímero. Los copolímeros, en contraste, consisten en cadenas de polímero formadas por dos o más unidades químicamente diferentes que se repiten y que pueden estar en distintas secuencias. Aunque en la mayoría de los copolímeros

los monómeros están dispuestos al azar, se han identificado cuatro tipos distintos de copolímero: aleatorio, alternante, en bloque e injertado (Smith, 2004).

Copolímeros aleatorios. - Diferentes monómeros están dispuestos aleatoriamente dentro de las cadenas de polímero. Si A y B son monómeros diferentes, entonces una disposición puede ser: AABABBBBAABABAAB, *Figura 71*.

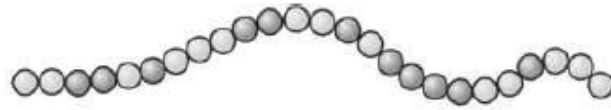


Figura 71.

Copolímero en el que las unidades diferentes están dispuestas aleatoriamente a lo largo de la cadena.

Fuente: (Smith, 2004)

Copolímeros alternantes. Diferentes monómeros muestran un orden definido alterno como: ABABABABABAB, *Figura 72*.



Figura 72.

Copolímero en el que las unidades se alternan regularmente.

Fuente: (Smith, 2004)

Copolímeros de bloque. Diferentes monómeros en la cadena están dispuestos en bloques relativamente largos de cada monómero como: AAAAA—BBBBB— (*Figura 73*)



Figura 73.

Copolímero de bloque.

Fuente: (Smith, 2004)

Copolímeros injertados. Apéndices de un tipo de monómero se injertan en la cadena larga de otro, como en *Figura 74*.

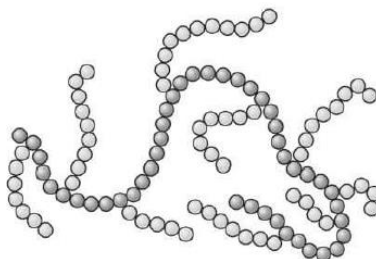


Figura 74.

Copolímero injertado.

Fuente: (Smith, 2004)



Capítulo 3 Capítulo 3

Solidificación e
imperfecciones
cristalinas

Solidificación e Imperfecciones Cristalinas

3.1. Introducción

Usualmente en todos los metales y en muchos semiconductores, cerámicos, polímeros y compuestos, el procesado implica la transformación de estado líquido a sólido, al reducir la temperatura por debajo de la de solidificación. La estructura producida durante la solidificación (forma y tamaño de granos), afecta a las propiedades mecánicas e influye en los tratamientos posteriores para modificarla.

En forma general, se puede decir que la solidificación de materiales y aleaciones es el proceso mediante el cual ocurre la formación de la red dendrítica cristalina, debido a la transformación desde el estado líquido al estado sólido, iniciado gracias a un proceso de nucleación y crecimiento de una nueva fase cuya interfaz sólido-líquido avanza continuamente, sucediéndose cambios en la morfología de esa intercara.

3.2. Solidificación en metales

La solidificación de metales y aleaciones es un importante proceso industrial, dado que la mayoría de metales se funden para moldearlos como productos semiacabados o acabados. En general, la solidificación de un metal o aleación puede dividirse en las siguientes etapas:

- La formación de núcleos estables en el fundido (nucleación).
- El crecimiento de núcleos para formar cristales y la formación de una estructura granular (Smith, 2011).

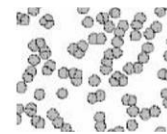
En la solidificación, el material se transforma de estado líquido, con orden atómico de corto alcance, a un estado sólido cristalino, con orden de largo alcance.

En función de la composición química del líquido, la solidificación puede ocurrir a través de tres procesos diferentes:

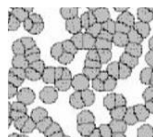
- A una temperatura constante para metales puros y para aleaciones de composición eutéctica.
- A través de un intervalo de temperaturas, en el caso de las que forman soluciones sólidas monofásicas.
- A través de una combinación de ambos procesos, para el caso de aleaciones que involucran reacciones eutécticas y proeutécticas (Verhoeven, 1995).

3.3. Proceso de solidificación

En estado líquido: átomos desordenados, algunos coinciden su posición.



Nucleación: Empiezan a crecer los cristales.



Crecimiento dendritas: El crecimiento del cristal es más en orientación preferente.

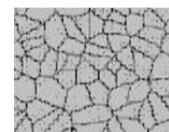


Figura 75.

Proceso de solidificación.

Fuente: (Verhoeven, 1995)

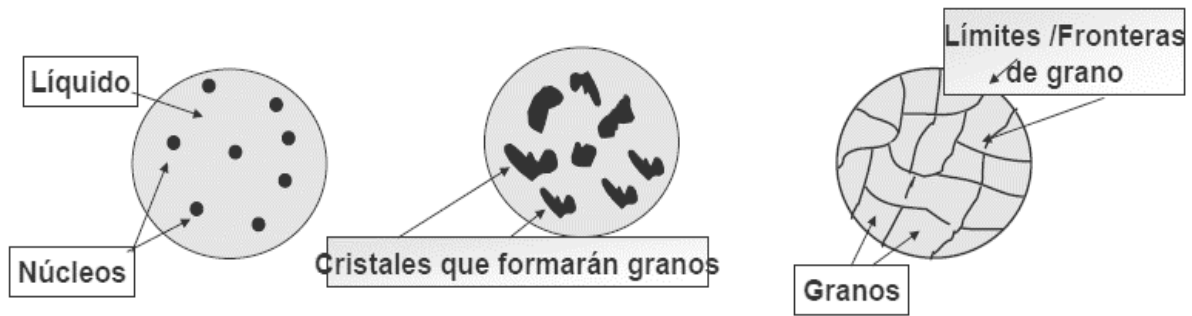


Figura 76.

Proceso de solidificación en un cuerpo

Fuente: (Smith, 2011)

En el crecimiento las dendritas chocan unas contra otras originando **Bordes de Grano**.

La solidificación comienza cuando un metal líquido llena la cavidad de un molde y por efectos del fenómeno de nucleación heterogénea sobre las rugosidades de las paredes, se produce inmediata aparición de una delgada capa de sólido, que rápidamente incrementa su espesor a medida que se produce la extracción del calor que evoluciona por la transformación de fase, incrementando su espesor hasta que todos los frentes chocan entre sí en el centro de la pieza. Esta primera capa solidificada está constituida por cristales al azar en forma dendrítica, como se muestra en la *Figura 77*; a medida que progresa la solidificación, los cristales crecen en forma dendrítica en dirección perpendicular a la superficie de extracción de calor; en esta figura también se muestra la estructura equiaxial central. Todo ello constituye lo que se denomina estructura de lingotes (Anderson, 2003).

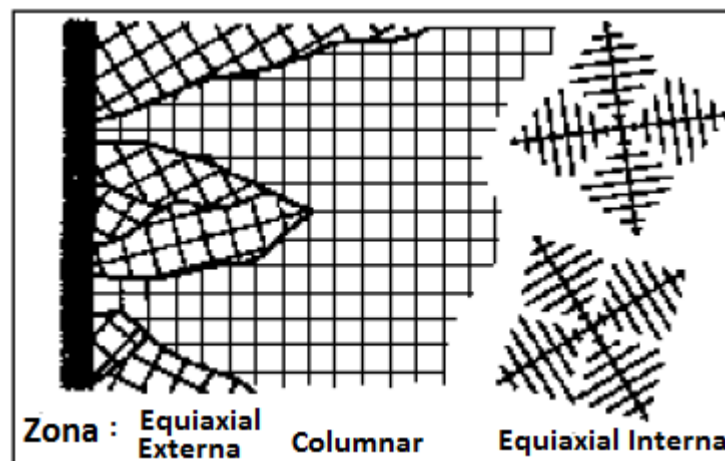


Figura 77.

Dibujo de la estructura de lingote que se obtiene durante la solidificación. En ella se señalan las características de las piezas vaciadas.

Fuente: (Glicksman, 2011)

Durante el crecimiento cristalino del frente de solidificación el mecanismo fundamental de control de la velocidad de enfriamiento, es la remoción del calor latente de fusión. Este calor liberado calienta el material en los alrededores del frente de solidificación de la aleación. El proceso de crecimiento es morfológicamente inestable y es el causante de la producción de las dendritas, las cuales son la microestructura más frecuentemente encontrada en piezas obtenidas por procesos de vaciado de aleaciones (Anderson, 2003).

Se forman núcleos estables desde el fundido (Nucleación) y van creciendo estos núcleos (Crecimiento) hasta generar los cristales, dando lugar a una estructura granular.

3.4 Formación de núcleos estables

La "nucleación" es un proceso absolutamente necesario para el nacimiento de la estructura microscópica y se han intentado varios estudios sobre ella desde tiempos antiguos. Sin embargo, "un núcleo" no solo es extremadamente pequeño (alrededor de 10^{-9} m), sino también extremadamente efímero (10^{-3} a 10^{-13} s) (Anderson, 2003).

Mecanismos principales:

- Nucleación homogénea.
- Nucleación heterogénea.

3.4.1. Nucleación homogénea o espontánea

La formación y crecimiento de núcleos durante la solidificación de metales y aleaciones metálicas, es el resultado de la disminución temperatura hasta límites en que la energía libre de Gibbs, es menor en estado sólido que en estado líquido, es decir, que el estado sólido es más estable que el líquido. La nucleación homogénea es la generación de un núcleo sólido a partir de un sector enteramente líquido. En este caso, la formación de núcleos requiere un cierto gasto energético por concepto de generar un volumen y una superficie.

Es un proceso más simple, se da en metales puros, el metal fundido genera ordenación atómica para dar lugar a los núcleos.

Primero, piense en la nucleación en una sustancia pura sin impurezas partículas en absoluto. Esto se llama nucleación homogénea (o nucleación espontánea) (Nishizawa, 2008).

3.4.2. Proceso de nucleación homogénea

- Enfriamiento del líquido (puro) por debajo de la T de solidificación.
- Debido al enfriamiento, los átomos se mueven lentamente dando lugar a pequeños pre-núcleos homogéneos de átomos.
- Estabilización de los prenúcleos: En los metales se suele necesitar alto subenfriamiento para originar cristales, para ello, durante la estabilización deben alcanzar un tamaño crítico (Smith, 2011).

Tamaño > tamaño crítico \rightarrow núcleos.

Tamaño < tamaño crítico \rightarrow embriones.

3.4.3. Energías que participan en la nucleación homogénea

En la nucleación homogénea de un metal puro que está solidificando deben considerarse dos tipos de cambios de energía:

2 energías involucradas:

- **Energía libre volumétrica:** liberada para la transformación de líquido a sólido.
- **Energía libre superficial:** requerida para formar nuevas superficies sólidas de las partículas.

Aparece un valor de radio crítico a partir del cual la energía libre se minimiza en la formación de núcleos o en la redisolución de los mismos (Wisley, 1964).

El cambio de energía libre total para la formación de un embrión esférico o de un núcleo de radio r viene dado por la ecuación:

$$\Delta G_T = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma \quad (3 - 1)$$

Donde:

El término a la izquierda de la suma es el Volumen de Energía, el término a la derecha de la suma es la Energía de Interfaz.

ΔG_T = Cambio de energía libre total.

r = Radio del embrión o del núcleo.

ΔG_V = Cambio de energía libre volumétrica.

γ = Energía libre superficial específica.

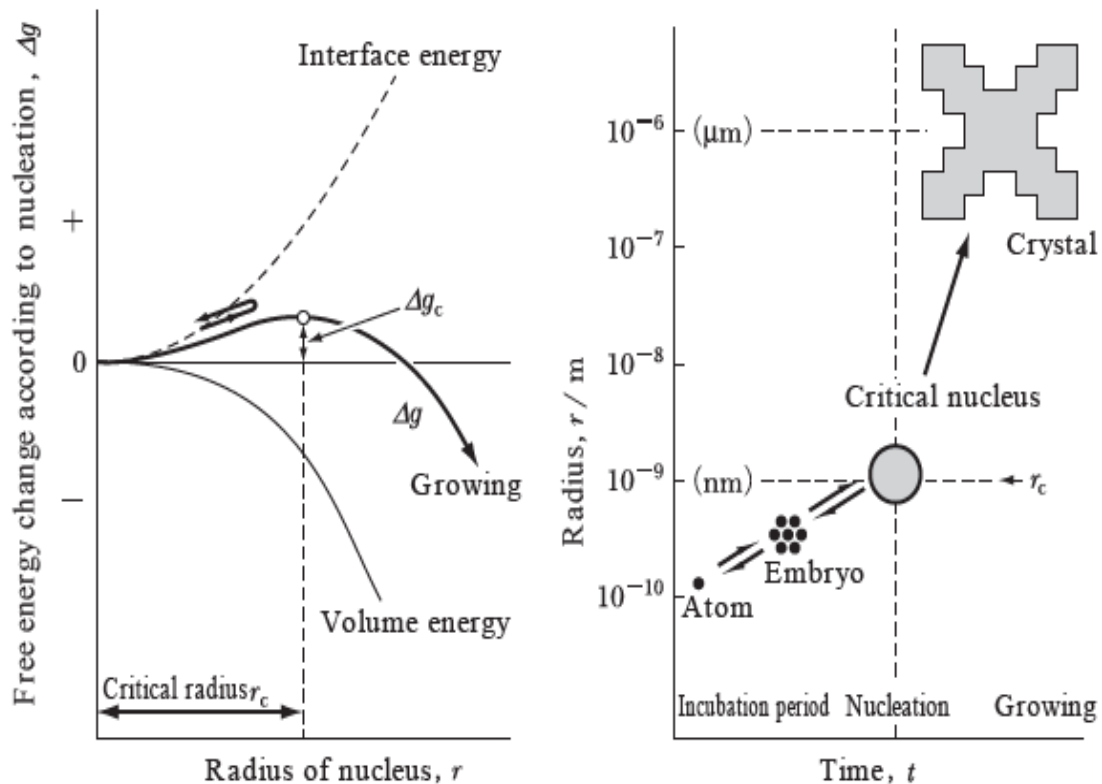


Figura 78.

El proceso y el cambio de energía de la nucleación espontánea (homogénea nucleación)

Fuente: (Nishizawa, 2008)

Tabla 12.

Valores para la temperatura de solidificación, calor de fusión, energía de superficie y máximo subenfriamiento para algunos metales seleccionados.

Metal	Temperatura de Solidificación		de Calor de Fusión (J/cm ³)	de Energía Superficie (J/cm ²)	de Máximo observado (ΔT [C])	Subenfriamiento
	C	K				
Pb	327	600	280	33.3 x 10 ⁻⁷	80	
Al	660	933	1066	93 x 10 ⁻⁷	130	
Ag	962	1235	1097	126 x 10 ⁻⁷	227	
Cu	1083	1356	1826	177 x 10 ⁻⁷	236	
Ni	1453	1726	2660	255 x 10 ⁻⁷	319	
Fe	1535	1808	2098	204 x 10 ⁻⁷	295	
Pt	1772	2045	2160	240 x 10 ⁻⁷	332	

Fuente: (Wisley, 1964)

3.4.4. Embrión y núcleo crítico

Si se produce una partícula globular de una nueva fase (una fase líquida o una fase sólida) en una fase súper enfriada (una fase gaseosa o una fase líquida).

El tamaño crítico del núcleo está relacionado con el subenfriamiento por la siguiente relación:

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f \Delta T} \quad (3 - 2)$$

Donde:

r^* = Radio crítico del núcleo

γ = Energía libre superficial

ΔH_f = Calor latente de fusión

ΔT = Cantidad de subenfriamiento a la que se ha formado el núcleo

Para valores como se puede observar en la *Figura 79*:

$r < r^*$ las partículas se re disuelven

$r > r^*$ los núcleos se convierten en partículas más grandes

$r = r^*$ ΔG_T alcanza su valor mínimo.

Debido a que el cambio en la energía libre es hacia arriba mientras que el radio es menor que r_c ver *Figura 78*; la nueva partícula de fase es metal estable y se anulará inmediatamente después de que se haya generado. La nueva partícula de fase en tal estado se llama embrión. Sin embargo, debido a que una vez que el radio va más allá de r_c , el cambio en la energía libre se vuelve hacia abajo, las partículas de la nueva fase seguirán creciendo. Este r_c se llama radio crítico y una nueva partícula de fase de radio r_c se llama núcleo crítico. Una relación entre el radio crítico del cobre en comparación con la temperatura de subenfriamiento se muestra en la *Figura 79*.

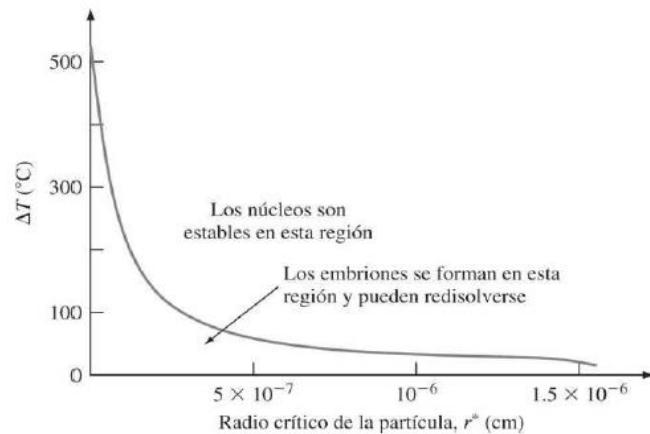


Figura 79.

Radio crítico de los núcleos de cobre en comparación con el grado de subenfriamiento.

Fuente: (Wisley, 1964)

En general, la energía libre de la ΔG de transformación es proporcional al grado de sobre enfriamiento ΔT (Nishizawa, 2008).

Ejercicio:

- Calcule el radio crítico (en centímetros) de un núcleo homogéneo que se forma al solidificar cobre puro líquido. Considere ΔT (subenfriamiento) = $0.2 T_m$. Aplique los datos de la Tabla 7.
- Calcule el número de átomos en el núcleo de tamaño crítico a esta temperatura de subenfriamiento.

Solución:

a)

$$\Delta T = 0.2 T_m = 0.2 (1083^{\circ}\text{C} + 273) = (0.2 \times 1356 \text{ K}) = 271 \text{ K}$$

$$\gamma = 177 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2 ; \Delta H_f = 826 \text{ J/cm}^3 ; T_m = 1083^{\circ}\text{C} = 1356 \text{ K}$$

$$r^* = \frac{2(177 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2)(1356 \text{ K})}{(1856 \text{ J/cm}^3)} = 9.70 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

b)

$$\text{Volumen de un núcleo de tamaño crítico} = \frac{4}{3} \pi r^{*3} = \frac{4}{3} \pi (9.70 \times 10^{-8} \text{ cm})^3$$

$$= 3.82 \times 10^{-21} \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de una celda unidad del Cu (a = 0.361 nm)} = a^3 = (3.61 \times 10^{-8} \text{ cm})^3$$

$$= 4.70 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

Dado que hay cuatro átomos de cobre por la celda unitaria FCC.

$$\text{Volumen/átomo} = \frac{4.70 \times 10^{-23} \text{ cm}^3}{4} = 1.175 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

Así, el número de átomos por núcleo crítico homogéneo es:

$$\frac{\text{Volumen del Nucleo}}{\text{Volumen/Atomo}} = \frac{3.82 \times 10^{-21} \text{ cm}^3}{1.175 \times 10^{-23} \text{ cm}^3} = 325 \text{ átomos}$$

3.4.5. Tasa de nucleación

Debido a que la nucleación es un proceso dinámico, no debe considerarse como "cuántos núcleos existen en una unidad de volumen", sino "cuántos núcleos se crean en una unidad de tiempo". Esto se denomina tasa de nucleación y puede expresarse por el producto de la densidad de núcleos críticos y la tasa de transición de embriones en núcleos críticos como:

$$I \text{ (tasa de nucleación)} = (N_c/V) \times v_c \text{ (tasa de transición)} \quad (3 - 3)$$

Un núcleo crítico se convierte en un cristal si solo se agrega un átomo o se convierte en un embrión si solo un átomo se separa. Por lo tanto, el valor de n_c es, como en la siguiente ecuación, igual al producto del número de átomos en la superficie de un núcleo crítico n_s y los tiempos de transición atómica en un tiempo unitario (Nishizawa, 2008). Tenemos, entonces:

$$v_c \approx n_s v_+ \quad (3-4)$$

3.4.6. Nucleación heterogénea

La nucleación heterogénea consiste en la formación de núcleos en zonas donde ya existe superficie sólida, por ejemplo, en paredes de molde o en el borde de partículas sólidas introducidas en el metal fundido. La preexistencia de una superficie sólida ayuda a la nucleación, fenómeno también conocido como coalescencia. Las fuerzas de tensión superficial en el líquido (gotitas) son de tipo van Der Waals y producen electricidad estática de contacto facilitando la adhesión de otras gotas vecinas por interacción coulombiana. Ese mecanismo de crecimiento de gotas es común para las gotas de lluvia en la atmósfera y también para los materiales fundidos en proceso de solidificación.

Este tipo de nucleación se da sobre los pronúcleos ya existentes debido a que la energía libre superficial para formar un núcleo disminuye.

La nucleación real no es tan espontánea como se mencionó anteriormente, pero a menudo ocurre en la superficie de un sustrato. Esto se denomina nucleación heterogénea (o nucleación de la interfaz) y se ha analizado mediante el modelo de lente o el modelo de disco (también llamado el modelo pastillero) (Nishizawa, 2008).

- Existen superficies libres en el líquido (impurezas, aleantes... entre otros; de baja T_{ra} solidificación que el sólido) que disminuyen la energía necesaria para formar un núcleo estable.
- Existen pre-núcleos \rightarrow Menores subenfriamientos.
- Principal condición: Mojabilidad de los pronúcleos.

Al disminuir $\Delta G_s \rightarrow \Delta G_T$ también disminuye y por tanto, un tamaño de radio crítico menor requiere menor subenfriamiento.

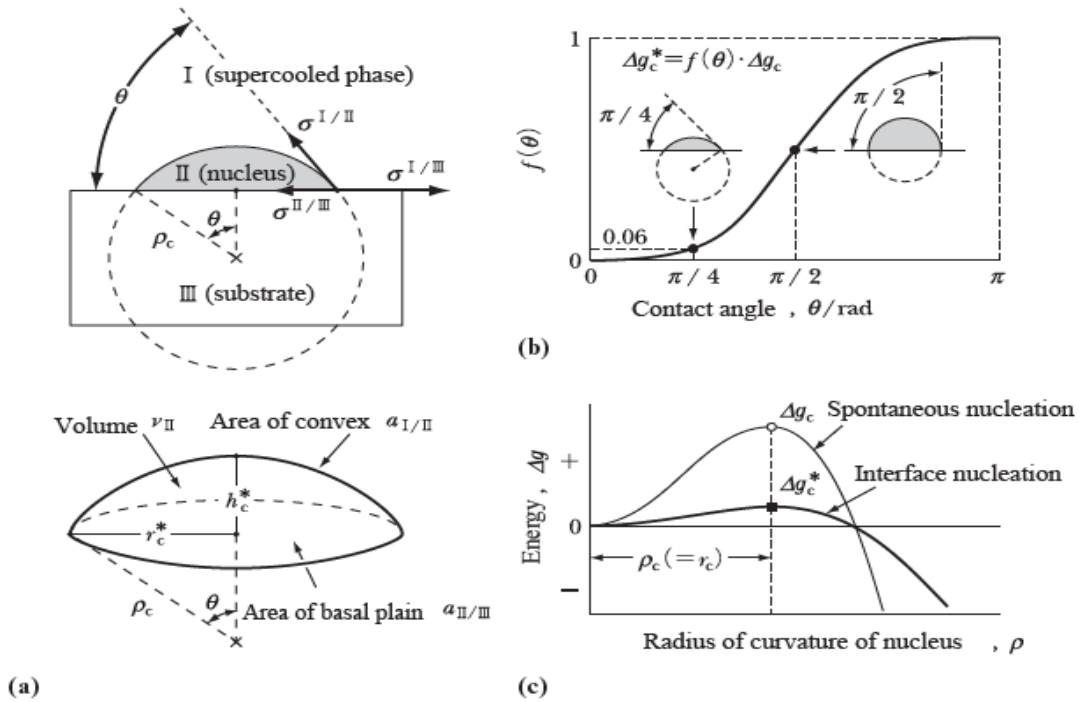


Figura 80.

El modelo de lente para la nucleación de la interfaz (nucleación heterogénea). (a) Núcleo crítico de nucleación de la interfaz. (b) Energía del núcleo crítico. (c) Cambio en la energía libre de acuerdo con la nucleación.

Fuente: (Nishizawa, 2008)

Para que ocurra la nucleación heterogénea, el agente de nucleación sólido (impureza sólida o recipiente) debe ser mojado por el metal líquido. También el líquido debe solidificarse fácilmente en el agente de nucleación. En la *Figura 81* se muestra un agente de nucleación (sustrato) “humedecido” por el líquido a solidificar, lo cual crea un pequeño ángulo de contacto entre el metal sólido y el agente de nucleación.

La nucleación heterogénea ocurre sobre el agente de nucleación, porque la energía superficial para formar el núcleo estable es inferior a que si el núcleo se formara en el propio líquido puro (nucleación homogénea). Al ser menor la energía superficial para nucleación heterogénea, el cambio de energía libre total para la formación de un núcleo estable deberá ser también menor y también será menor el tamaño del núcleo crítico (Smith, 2011).

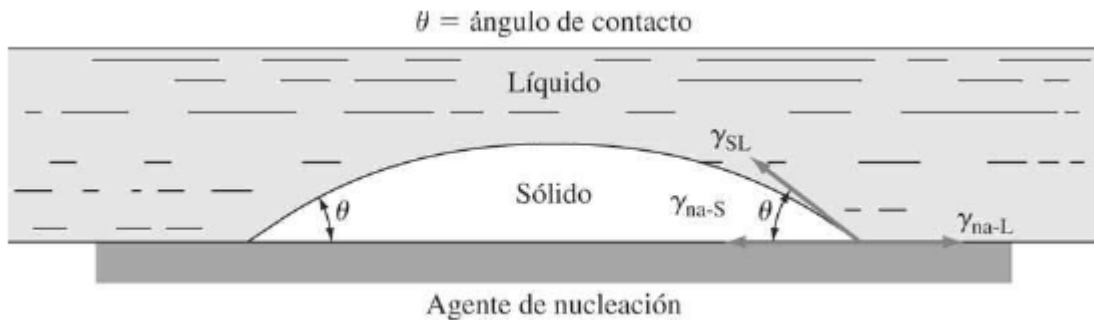


Figura 81.

Nucleación heterogénea de un sólido en un agente de nucleación. na = agente de nucleación, SL = sólido-líquido, S = sólido, L = líquido; θ = ángulo de contacto.

Fuente: (Smith, 2011)

En conclusión, se requiere menor subenfriamiento para producir un núcleo estable por nucleación heterogénea.

3.5. Crecimiento

Después que se forman los núcleos estables en un metal en solidificación, crecen hasta formar cristales. En cada cristal los átomos están ordenados en un modelo esencialmente regular, pero la orientación de cada cristal varía. Cuando finalmente concluye la solidificación del metal, los cristales se juntan unos con otros en diferentes orientaciones y forman límites cristalinos en los que los cambios de orientación tienen lugar en una distancia de pocos átomos. Un metal solidificado que contenga muchos cristales se llama policristalino.

En el metal solidificado los cristales se llaman granos y las superficies entre ellos, límites de grano (O'Reilly, 2003).

Una vez formados los núcleos estos crecen formando cristales de forma regular pero con distintas orientaciones.

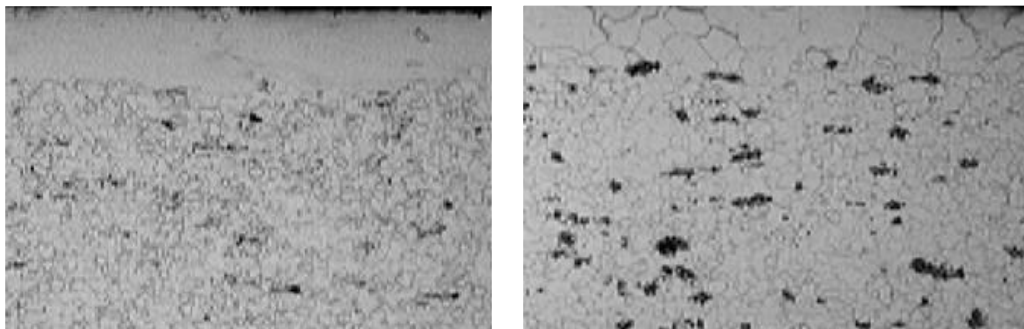
Cuando el total del líquido ha solidificado se produce la unión de los cristales originando Límites de Grano entre ellos.

El número de granos de un metal depende del número de lugares disponibles para la nucleación.

Bajos puntos de nucleación disponibles es una estructura grano gruesa, bajo número de límites de grano.

Altos puntos de nucleación disponibles es una estructura grano fina, con alto número de límites de grano.

Los límites de grano otorgan resistencia y uniformidad a los metales solidificados.



Tamaño grano fino

Tamaño grano grueso

Figura 82.

Tamaños de grano

Fuente: (Mullin)

3.5.1. Estructura de grano

El crecimiento depende de la temperatura, molde, composición.

Aparecen 2 tipos de granos:

- Granos Equiaxiales.
- Granos Columnares.

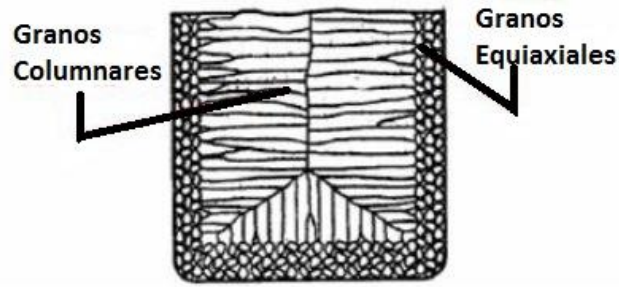


Figura 83.
Tipos de grano
Fuente: (Glicksman, 2011)

3.5.2. Granos equiaxiales:

- Condiciones iguales en todo el molde y el fundido.
- Morfología similar a una esfera facetada.

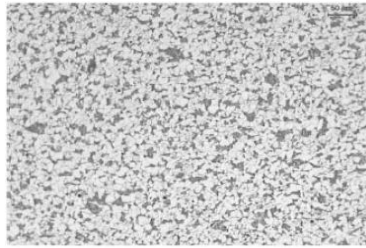


Figura 84.
Granos equiaxiales
Fuente: (Nishizawa, 2008)

3.5.3. Granos columnares

- Condiciones distintas en composición.
- Existencia de un fuerte gradiente térmico.
- Existen pocas zonas donde puedan generarse núcleos.
- Morfología de grano grande, alargado en dirección del gradiente térmico.

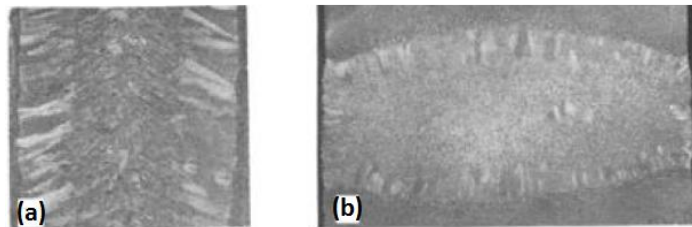


Figura 85.
Granos columnares
Fuente: (Kakani, 2004)

3.5.4. Estructuras en solidificación

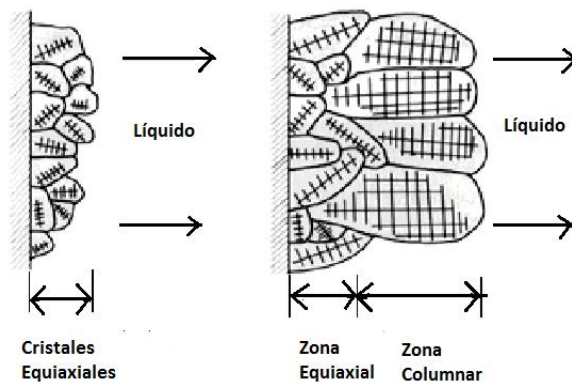


Figura 86.

Estructura en solidificación

Fuente: (Anderson, 2003)

En aplicaciones industriales, moldeo, aparece una combinación de ambas.

Los granos equiaxiales aparecen en las paredes del molde frío, el fuerte enfriamiento en la pared origina una alta concentración de núcleos en la solidificación.

Posteriormente, el líquido encerrado dentro de la estructura de granos equiaxiales habrá sufrido un cambio de composición y temperatura originándose un crecimiento de Granos Columnares.

Este crecimiento se debe a las pocas zonas de nucleación preferente y a que el ΔT direcciona estos granos (O'Reilly, 2003).

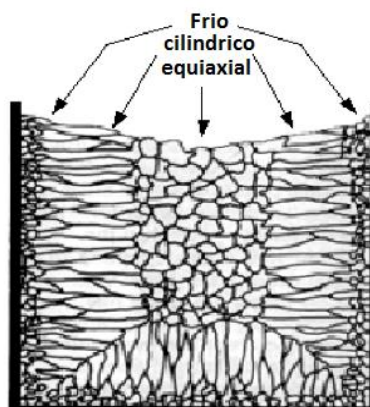


Figura 87.

Granos en un recipiente

Fuente: (Anderson, 2003)

En aleaciones: Finalmente quedará encerrado en el centro del molde una porción de líquido de composición distinta temperatura y se solidificará de nuevo en forma equiaxial, debido a las restricciones.

Las distintas morfologías podemos obtener, dependiendo de la temperatura, composición, tiempo (Borisenko, 2000).

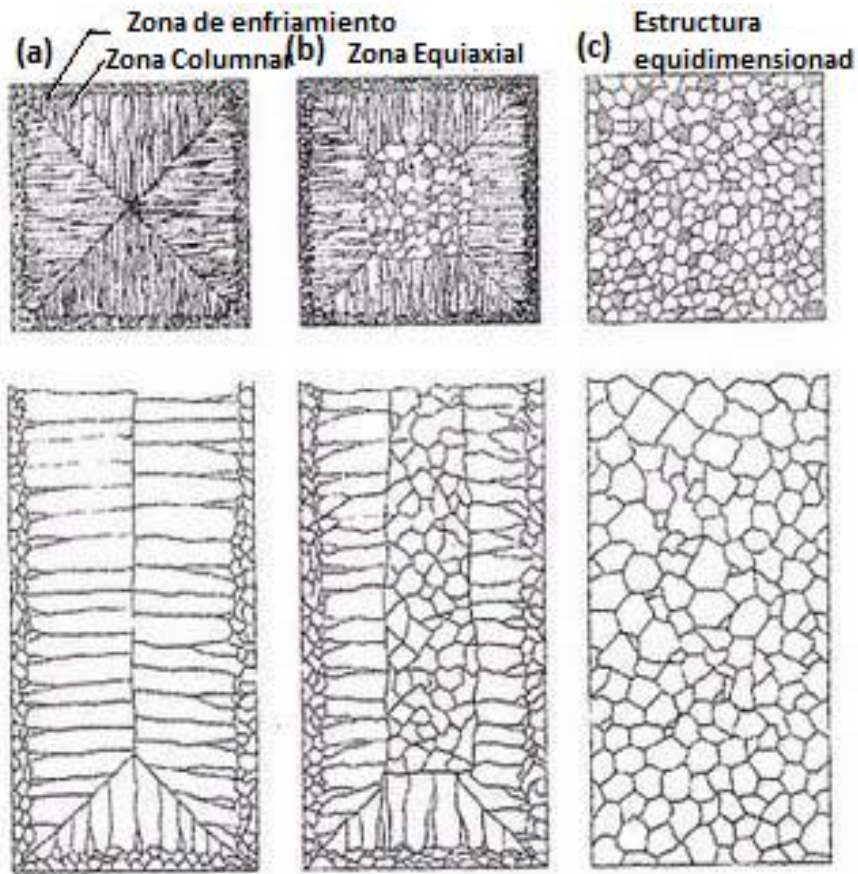


Figura 88.

a) Estructura cristalina característica de un metal puro. b) estructura cristalina característica de una fundición para aleación, mostrando la segregación hacia el centro de los componentes de la aleación. c) Figura de un metal con un molde calentado

Fuente: (Borisenko, 2000)

3.5.5. Soluciones sólidas metálicas

Formar una solución sólida: Es un sólido formado por dos o más elementos dispersos atómicamente formando una estructura. Dentro de las aleaciones es el caso más sencillo.

Existen dos tipos: Sustitucional o Intersticial.

Formar una mezcla heterogénea (aleaciones heterogéneas): Aleación es la combinación metálica de un metal con otro metal o un no metal.

Formar un compuesto intermetálico: mediante reacción química con propiedades y composición definida

3.5.6. Solución sólida sustitucional

Se origina por la ocupación por átomos del soluto en posiciones del solvente.

La estructura cristalina del elemento progenitor permanece inalterada aunque puede distorsionarse por la presencia extraña de átomos.

Se puede ocupar desde el 1% al 99% del disolvente (Borisenko, 2000).

Reglas de Hume-Rothery

- Tamaño:

$$\text{Radios Similares: } \left\{ \begin{array}{l} < 15\% \text{ en metálicos} \\ < 30\% \text{ en cerámicos} \end{array} \right.$$

- Estructura:

$$\text{Cristalina: } \left\{ \begin{array}{l} \text{Igual estructura cristalina} \\ \text{si tiene distinta estructura} \\ \text{puede que no den solución sólida} \end{array} \right.$$

- Valencia:

$$\text{Valor de Valencia: } \left\{ \begin{array}{l} \text{Igual Valencia} \\ \text{Distinta valencia produce formación de compuestos.} \end{array} \right.$$

- Electronegatividad:

$$\text{Tipo: } \left\{ \begin{array}{l} \text{Similar electronegatividad} \\ \text{Muy diferentes; se forman compuestos.} \end{array} \right.$$

Las “reglas” de Hume-Rothery son condiciones necesarias para la solubilidad pero no son suficientes. Por ejemplo los óxidos de magnesio y níquel. Los iones de Mg y de Ni son similares en tamaño y valencia y en consecuencia, pueden remplazar uno al otro en una red similar a la del cloruro de sodio, formando una serie completa de soluciones sólidas de la forma (Mg, Ni) O.

La solubilidad de los átomos intersticiales siempre es limitada. Los átomos intersticiales son mucho más pequeños que los átomos del elemento huésped, violando por lo tanto la primera de las condiciones de Hume-Rothery.

Si se cumplen todas, no necesariamente es **SOLUBILIDAD TOTAL**.

Si se incumple alguna condición es **SOLUBILIDAD PARCIAL**.

3.5.7. Soluciones sólidas

Endurecimiento por solución sólida.

Características:

- Genera endurecimiento.
- Grado de endurecimiento: tamaño, calidad.
- Diferencia del tamaño atómico.
- Mayor endurecimiento: a mayor diferencia mayor distorsión de la red inicial será más difícil el deslizamiento.
- A mayor cantidad añadida mayor efecto endurecedor.
- Átomos grandes o pequeños a mayor diferencia de tamaño producirá mayor efecto endurecedor. (Borisenko, 2000).

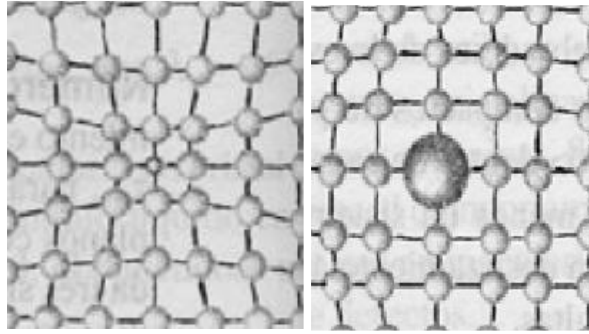


Figura 89.

Soluciones sólidas

Fuente: (Borisenko, 2000)

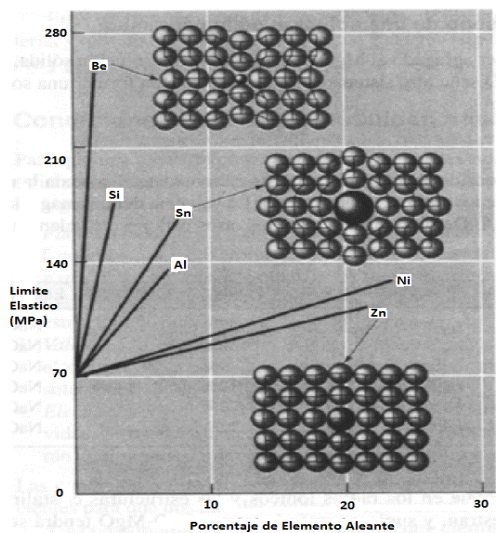


Figura 90.

Diagrama límite elástico Vs Porcentaje del elemento aleante

Fuente: (Markov, 2003)

Los endurecimientos por solución sólida presentan las siguientes ventajas:

- Límite elástico, resistencia y dureza mayor que los materiales puros.
- Menor ductilidad que en el material puro.
- Menor conductividad eléctrica que en material puro (Anderson, 2003).

3.6. Imperfecciones cristalinas

3.6.1. Introducción

Se dice que los cristales se caracterizan porque sus átomos están situados en posiciones fijas, pero esto no es completamente cierto, ya que los átomos se mueven dentro de unos límites, de una posición a otra.

Son muy pocas las veces en que los cristales son perfectos. Estos contienen varios tipos de defectos e imperfecciones que afectan a la mayoría de las propiedades tanto físicas como mecánicas, eléctricas, electrónicas, etc. Por otra parte, estos defectos tienen influencia sobre el comportamiento de los materiales desde el punto de vista de ingeniería, tales como: velocidad de difusión, conductividad en semiconductores, corrosión o comportamiento mecánico entre otros.

Normalmente, el cristal no está compuesto por átomos idénticos situados en posiciones análogas sobre una red tridimensional que se repite regularmente, sino que contiene imperfecciones o defectos que alteran la estructura de la red espacial. Esta separación de la perfección es discreta y finita, pudiéndose considerar la red como una superposición de imperfecciones sobre una estructura cristalina perfecta. Se considera como imperfección cualquier desviación del modelo ideal de esferas rígidas que se ha considerado al estudiar las agrupaciones de los sólidos.

Al ser un concepto geométrico vamos a tratar separadamente cada uno de los tipos de imperfecciones. Según su geometría y forma se clasifican en: *Puntuales, Lineales, Superficiales y de Volumen.*

3.6.2. Imperfecciones en los sólidos

Se entiende por imperfección o defecto cristalino cualquier región del cristal en la que la organización microscópica de átomos, iones o moléculas, difiere de la correspondiente a un cristal periódico ideal.

Cristal Perfecto: Todos los átomos se encuentran en posiciones reticulares fijas a 0 K.

$$\mathbf{CRISTAL\ REAL = CRISTAL\ IDEAL + DEFECTOS}$$

$$\text{Cristal Real: } \left\{ \begin{array}{l} \text{Átomos Vibrando} \\ \text{Existen posiciones no ocupadas} \\ \text{Átomos desplazados de posiciones ideales} \end{array} \right.$$

El cristal sirve como una referencia y a este se le añaden los defectos.

Propiedades como: resistencia mecánica, dureza, difusión, resistencia eléctrica, o actividad química dependen más de los átomos en posiciones no periódicas que de los átomos situados en posiciones periódicas.

Muchas de las propiedades de los materiales son muy sensibles al desvío de la perfección cristalina. Esta influencia no siempre es perjudicial, sino que algunas características específicas se consiguen deliberadamente introduciendo cantidades controladas de defectos particulares; es importante saber que la presencia de defectos es un medio para controlar las propiedades físicas (Sons, 1983).

Se introducen intencionadamente para beneficiar determinadas propiedades.

Ejemplos:

- Carbono en Fe para mejorar dureza.
- Cu en Ag para mejorar propiedades mecánicas.
- Dopantes en semiconductores, los dispositivos micro electrónicos de circuitos integrados encontrados en nuestras computadoras, calculadoras y electrodomésticos funcionan debido a concentraciones altamente controladas de impurezas específicas que se incorporan en regiones pequeñas y localizadas de materiales semiconductores.
- El latón (70% cobre-30% zinc) es mucho más duro y más resistente que el cobre puro (Callister, 2008).

Henderson (1972) ha escrito una introducción elemental sobre varios defectos en sólidos cristalinos y Watts (1977), da una explicación algo más avanzada con énfasis en los no metales, mientras que Varotsos y Alexopoulos (1986), tratan su propio enfoque de los defectos cristalinos en gran profundidad. Los límites de

grano se tratan en Chadwick y Smith (1976) y Humphreys y Hatherly (1996). Hay una gran cantidad de artículos de revisión, p. por Seeger (1973), Kovacs y El Sayed (1976) y Wollenberger (1996) que cubren defectos puntuales, principalmente en metales.

Los defectos extendidos en los materiales han sido revisados por Friedel (1980) (Grimval, 1999).

3.6.3. Diferencia entre defecto y falla

La verdadera influencia de fallas y defectos en la falla de los componentes es comúnmente malentendida. Este malentendido a menudo surge de uno de los dos conceptos erróneos. El primer error se puede aclarar mediante simples definiciones de un defecto y una falla.

Falla. Una falla puede definirse como una imperfección en un material que no afecta su utilidad o capacidad de servicio. Un componente puede tener imperfecciones y aún retener su utilidad. Este hecho es reconocido por la mayoría de los códigos materiales que permiten, pero limitan, el tamaño y el alcance de las imperfecciones. Esto es particularmente cierto en las soldaduras, que comúnmente contienen imperfecciones no perjudiciales. No es raro que ocurran desperfectos en las cercanías de fallas de un material, las cuales no han contribuido en nada al modo de inoperatividad del dispositivo o ingenio.

Defecto. Un defecto es una imperfección en un componente, como resultado de la forma en que fue fabricado, enviado, manipulado o instalado, que puede contribuir materialmente a fallas o capacidad de servicio limitada. Las inoperatividades de un dispositivo o ingenio como resultado de un defecto directa o indirectamente representan menos del 1% de todas las salidas de servicio o inoperatividad de los equipos, ingenios o dispositivos.

El segundo concepto erróneo implica la percepción de lo que constituye un defecto. Un defecto no es simplemente una discontinuidad visualmente observable, como un agujero, vuelta o costura en un componente. Los defectos, desde el punto de vista del análisis de fallas, también pueden ser factores tales como un alto estrés residual que puede conducir a la formación de grietas o microestructuras desfavorables que pueden provocar grietas o corrosión altamente localizada.

El porcentaje de fallas que ocurren únicamente por defectos materiales es bastante bajo, menos del 1% de todas las fallas. Lo que es más común es que los defectos pueden actuar junto con factores ambientales específicos para producir fallas, como grietas o corrosión localizada (Port, 1993).

3.6.4. Clasificación de los defectos

3.6.4.1. Defectos puntuales

Las imperfecciones puntuales, que son errores reticulados en puntos aislados de la red, tienen lugar debido al empaquetamiento imperfecto de los átomos durante la cristalización. Las imperfecciones puntuales también tienen lugar debido a las vibraciones de los átomos a altas temperaturas. Las imperfecciones puntuales son completamente locales, por ejemplo, un sitio de enrejado vacante. Los defectos puntuales siempre están presentes en los cristales y su resultado actual es una disminución en la energía libre.

Los procesos que originan este tipo de defecto suelen ser muy variados, y entre ellos podemos citar:

1. La temperatura, el aumento de esta aumenta la amplitud de vibración de los átomos, permitiéndoles emigrar y cambiar sus posiciones en la red, produciendo defectos puntuales.
2. Enfriamiento rápido, manteniendo los defectos existentes a temperaturas superiores.
3. Procesos de deformación plástica, los movimientos relativos de planos cristalinos generan gran cantidad de defectos tanto puntuales como de otros órdenes.

4. La irradiación con partículas de alta energía, produce desplazamientos puntuales de átomos y con ellos la creación de éste tipo de defecto.

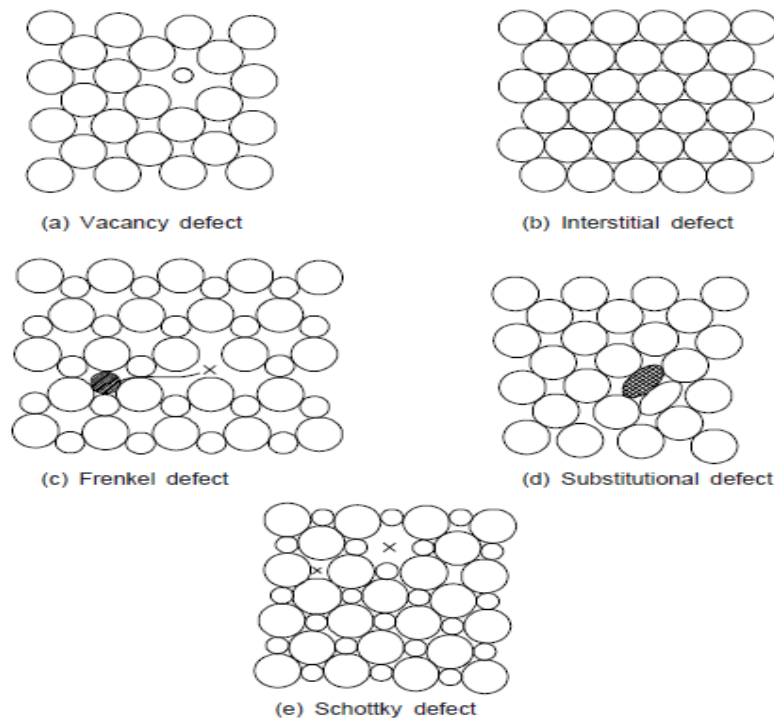


Figura 91.

Defectos de punto en una red cristalina

Fuente: (Kakani, 2004)

3.6.4.2. Vacantes

El defecto puntual más simple es una vacante. Esto se refiere a un sitio vacío (desocupado) de una red cristalina, es decir, un átomo faltante o un sitio atómico vacante [Figura 91 (a)] tales defectos pueden surgir de un empaquetamiento imperfecto durante la cristalización original o de vibraciones térmicas de los átomos a temperaturas más altas. En este último caso, cuando se aumenta la energía térmica debida a la vibración, siempre hay una mayor probabilidad de que los átomos individuales salgan de sus posiciones de energía más baja.

Se fomentan por la acción de:

- Calentamiento.
- Radiación con partículas.
- Deformación plástica.
- Desviación de la composición química.

Las vacantes son el tipo más importante de defectos puntuales; aceleran todos los procesos asociados con los desplazamientos de átomos: difusión, sinterización de polvo, entre otros (Kakani, 2004). Suponiendo que las vacantes tienen su origen en condiciones no ionizantes y en ambiente controlado (no están inmersas en un baño químico particular), entonces las vacantes son producidas por fluctuaciones térmicas únicamente. Si se asume una probabilidad de ocurrencia azarosa, podemos modelar el número de vacantes por una distribución tipo Boltzmann, donde la difusividad es el cociente entre la energía de activación y la energía térmica. Entonces:

$$n = N e^{\left[\frac{-Q_v}{kT}\right]} \quad (3 - 4)$$

Donde:

Q_v = Energía de activación (necesaria para la creación de una vacante)

T = Temperatura absoluta (K)

Constante de Boltzmann (k) = 1.38×10^{-23} J/átomo.K, 8.62×10^{-5} eV/átomo.K

Definimos N como el número total de posiciones reticulares del cristal ideal y se expresa de la siguiente forma:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A} \quad (3 - 5)$$

Dónde:

N_A = Número de Avogadro

ρ = Densidad

A = Peso Atómico

Ejercicio:

- a) Calcule el número de equilibrio de vacantes por metro cúbico de cobre a 1000°C . La energía para la formación de vacantes es $0.9 \text{ eV} / \text{átomo}$; el peso atómico y la densidad (a 1000°C) para el cobre son $63.5 \text{ g} / \text{mol}$ y $8.40 \text{ g} / \text{cm}^3$, respectivamente.

Solución:

Primero se calcula el valor de N

$$N = \frac{(6.02 \times 10^{23} \text{ atomos/mol})(8.4 \text{ g/cm}^3)(10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)}{63.5 \text{ g/mol}}$$

$$N = 8.0 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3$$

Por lo tanto, el número de vacantes a 1000°C (1273 K) es igual a:

$$n = (8.0 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3) e^{\left[\frac{-(0.9 \text{ eV})}{(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(1273 \text{ K})} \right]}$$

$$n = 2.2 \times 10^{25} \text{ vacancias/m}^3$$

3.6.4.3. Agregados intersticiales

En una estructura compacta cerrada de átomos en un cristal si el factor de compactación atómica es bajo, un átomo extra puede alojarse dentro de la estructura cristalina. Esto se conoce como posición intersticial, es decir, huecos. Un átomo extra puede entrar en el espacio intersticial o vacío entre los átomos posicionados regularmente solo cuando es sustancialmente más pequeño que los átomos originales (*Figura. 91 (b)*), de lo contrario producirán distorsión atómica. El defecto causado se conoce como defecto intersticial. En estructuras empaquetadas próximas, p. FCC y HCP, el tamaño más grande de un átomo que puede caber en el vacío o espacio intersticial tiene un radio de aproximadamente 22.5% de los radios de los átomos originales. Las intersticiales también pueden ser intersticiales únicos, di-intersticiales y tri-intersticiales. Debemos notar que la vacante y la intersticialidad son fenómenos inversos.

3.6.4.4. Desorden de Frenkel

Cuando un átomo faltante, que es responsable de una vacante, ocupa un sitio intersticial (responsable del defecto intersticial) como se muestra en la *Figura 91 (c)*, el defecto causado se conoce como defecto de Frenkel. Obviamente, el defecto de Frenkel es una combinación de vacantes y defectos intersticiales. Estos defectos son menos en número porque se requiere energía para forzar a un ión a una nueva posición. Este tipo de imperfección es más común en los cristales iónicos, porque los iones positivos, al ser de menor tamaño, se alojan fácilmente en las posiciones intersticiales.

3.6.4.5. Defecto Schottky

Estas imperfecciones son similares a las vacantes. Este defecto se produce cuando falta un par de iones positivos y negativos en un cristal (*Figura. 91 (e)*). Este tipo de imperfección mantiene una neutralidad de carga. Las estructuras cerradas tienen menos intersticiales y defectos de Frenkel que las vacantes y los defectos de Schottky, ya que se requiere energía adicional para forzar a los átomos en sus nuevas posiciones.

3.6.4.6. Defecto sustitutivo

Cuando un átomo extraño reemplaza al átomo padre de la red y por lo tanto ocupa la posición del átomo padre (*Figura 91 (d)*), el defecto causado se denomina defecto de sustitución. En este tipo de defecto, el átomo que reemplaza al átomo, el átomo padre puede ser del mismo tamaño o ligeramente más pequeño o mayor que el del átomo padre (Kakani, 2004).

3.6.4.7. Phonon

Cuando la temperatura sube, se producen vibraciones térmicas. Esto da como resultado el defecto de una simetría y una desviación en la forma de los átomos. Este defecto tiene mucho efecto sobre las propiedades magnéticas y eléctricas.

3.6.4.8. Desorden anti estructural

Átomos de una subred ocupan posiciones correspondientes a las de otra y viceversa (en aleaciones metálicas).

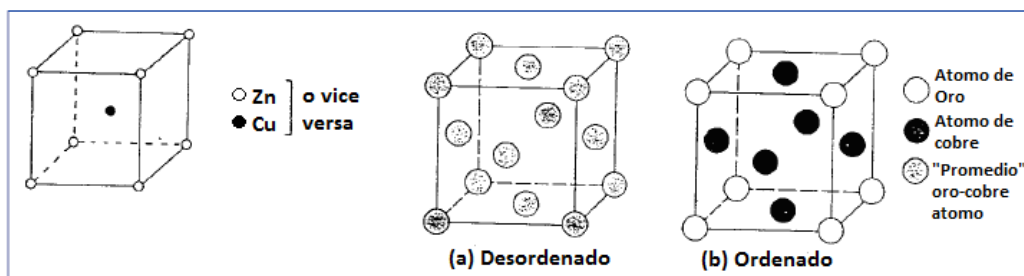


Figura 92.

Desorden anti estructural

Fuente: (Hall, 1998)

Todos los tipos de defectos puntuales distorsionan la red cristalina y tienen cierta influencia sobre las propiedades físicas. En metales comercialmente puros, defectos puntuales, aumentan la resistencia eléctrica y casi no tienen efecto sobre las propiedades mecánicas. Solo a altas concentraciones de defectos en metales irradiados, la ductilidad y otras propiedades se reducen notablemente.

Además de los defectos puntuales creados por fluctuaciones térmicas, los defectos puntuales también pueden crearse por otros medios. Un método para producir un número excesivo de defectos puntuales a una temperatura dada, es mediante enfriamiento (enfriamiento rápido) desde una temperatura más alta. Otro

método para crear defectos en exceso es mediante una deformación severa de la red cristalina, por ejemplo, martilleando o rodando. Debemos observar que el enrejado aún conserva su naturaleza cristalina general, se introducen numerosos defectos. También existe un método para crear defectos puntuales en exceso mediante bombardeo externo mediante átomos o partículas de alta energía, p. desde el haz del ciclotrón o los neutrones en un reactor nuclear. La primera partícula colisiona con los átomos reticulares y los desplaza, causando un defecto puntual. El número de defectos puntuales creados de esta manera depende únicamente de la naturaleza del cristal y de las partículas que bombardean y no de la temperatura (Kakani, 2004).

3.6.5. Defectos de línea o dislocaciones

Al deformarse un metal plásticamente, se comprueba que el esfuerzo realizado es muy inferior al límite elástico teórico, esto nos lleva a la conclusión de que el deslizamiento no se produce en los átomos por un simple movimiento de una capa de átomos con respecto a otra; sino que debe existir algún tipo de debilidad mecánica en los cristales reales que sea la causa de que el deslizamiento se produzca aún con la aplicación de pequeños esfuerzos.

Esta diferencia entre las fuerzas de deformación aparente y real, se produce por el hecho de que los cristales reales no son perfectos, sino que contienen defectos de línea, dislocaciones, que implican planos extras en la red y facilitan el desplazamiento, produciendo una distorsión en la red centrada alrededor de una línea. Estas se pueden formar de muchas maneras, en el proceso de solidificación, por deformación permanente, por acumulación de vacantes o intersticios, entre otros y están presentes siempre en los cristales reales (Bacon, 2011).

Su formación se genera por:

- Solidificación.
- Condensación de vacante.
- Deformación plástica.
- Desajuste atómico solución sólida.

Las dislocaciones siempre están presentes en los materiales, facilitando la deformación plástica (permanente) de los sólidos cristalinos.

Un material recocido (baja densidad de dislocaciones) puede contener más de 1000 km de dislocaciones por milímetro cúbico. Por otro lado, un material fuertemente deformado en frío puede alcanzar los 10M de km de dislocaciones por milímetro cúbico.

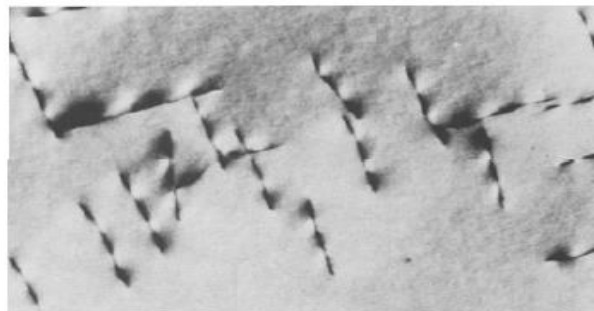


Figura 93.

Dislocaciones en una lámina de acero inoxidable

Fuente: (Nicodemi, 2004)

En la *Figura 93*, se observan dislocaciones presentes en una lámina de acero inoxidable de 100 nm de espesor.

Las líneas de dislocación presentes en la micrografía tienen una longitud aproximada de 1000 diámetros atómicos. El tamaño de la imagen es aproximadamente 1000×1500 nm.

3.6.5.1. Dislocación de arista

También llamadas de borde, cuña o línea semiplano de átomos cuya arista (borde) termina dentro del cristal. Se simboliza \perp .

Este tipo de dislocación se forma añadiendo un plano parcial adicional de átomos al cristal (Figura.94 (a)). Una dislocación de borde en su sección transversal es esencialmente el borde de un semiplano "extra" en la red cristalina. El enrejado alrededor de la dislocación está distorsionado elásticamente.

La Figura 94 (a) muestra una sección transversal de un cristal en el que los átomos (representados por puntos), se disponen de una manera ordenada perfecta. Cuando se inserta un medio plano adicional desde la parte superior, el desplazamiento de átomos se muestra en la Figura 94 (b). Observamos en la Figura 94 (b) que la parte superior e inferior del cristal por encima y por debajo de la línea XY parece perfecta. Cuando el semiplano extra se inserta desde la parte superior, los defectos así producidos se representan ∇ (T invertida) y si el medio plano adicional se inserta desde la parte inferior, los defectos así producidos se representan con T (I).

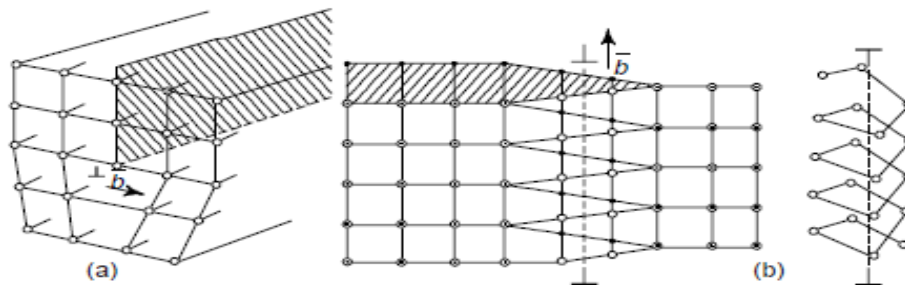


Figura 94.

Esquemas de (a) dislocación del borde (b) Deslocalización del tornillo

Fuente: (Kakani, 2004)

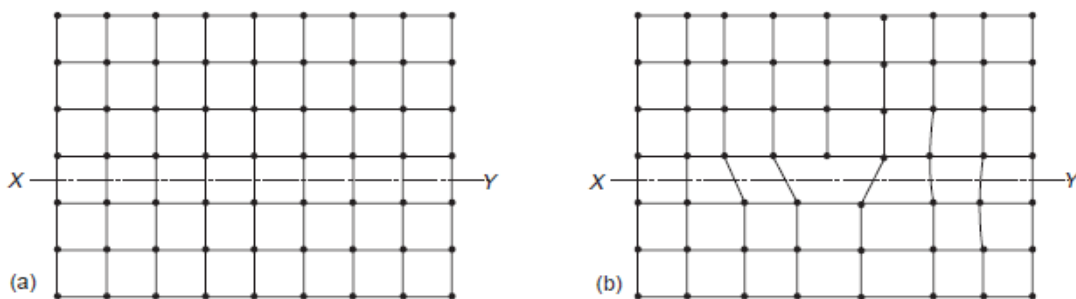


Figura 95.

Dislocación del borde causada por un plano parcial adicional de átomos en el cristal

Fuente: (Kakani, 2004)

Cerca de la dislocación, la distorsión en el cristal se debe a la presencia de zonas de compresión y tensión en la red cristalina. El enrejado sobre la línea de dislocación está en un estado de compresión, mientras que debajo de esta línea, está en tensión. Debemos notar que la línea de dislocación es una región de mayor

energía que el resto del cristal. El criterio de distorsión es lo que se llama “vector de hamburguesas”. Se puede determinar si un contorno cerrado se dibuja alrededor de una zona en un cristal ideal pasando de un sitio a otro como se muestra en la *Figura 95(a)* y luego el procedimiento se repite una zona en un cristal real que contiene una dislocación. Como se puede ver en la *Figura 95 (b)*, el contorno descrito en el cristal real resulta ser no cerrado. El vector requerido para cerrar el contorno es el vector Burgers. El vector Burgers de una dislocación de borde es igual al espacio interatómico.

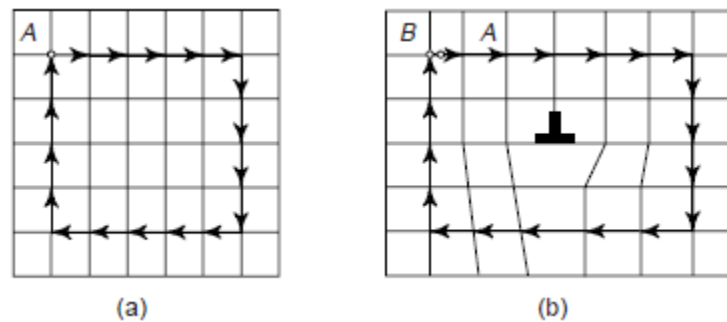



Figura 96.

Determinación del Vector Burgers (BA)

Fuente: (Kakani, 2004)

3.6.5.2. Dislocación de hélice

También llamada de Tornillo, es la apilación de planos en espiral a lo largo de la línea de dislocación. Se simboliza: .

La formación de la dislocación del tornillo se muestra en la *Figura 97(b)*. En esto, los átomos se desplazan en dos planos separados perpendiculares entre sí. Una vista isométrica de un cristal perfecto se muestra en la *Figura 97 (a)*. El desplazamiento de átomos en la región ABC se muestra en la *Figura 97(b)*. La disposición de los átomos en las dislocaciones de los tornillos aparece como la de un tornillo o una superficie helicoidal.

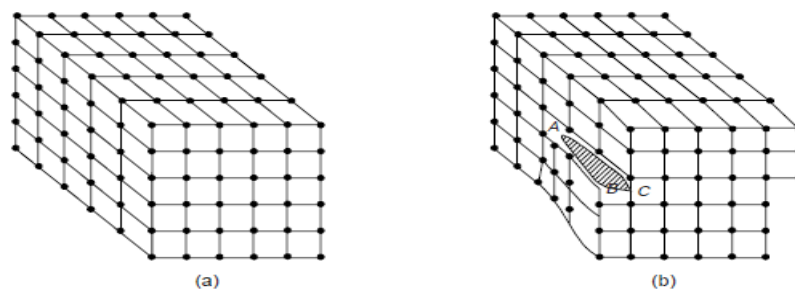


Figura 97.

Esquema de la Distorsión de Tornillo

Fuente: (Kakani, 2004)

Una dislocación de tornillo no presenta movimiento de ascenso.

Los siguientes efectos de la dislocación del tornillo son de gran importancia.

- (i) Probablemente, la fuerza requerida para formar y mover una dislocación de tornillo es algo mayor que la requerida para iniciar una dislocación de borde.
- (ii) Sin romper la continuidad del enrejado, la deformación plástica es posible bajo tensión baja.

(iii) La dislocación del tornillo causa distorsión de la red cristalina a una distancia considerable del centro de la línea y toma la forma de distorsión en espiral de los planos. Debemos recordar que las dislocaciones de ambos tipos, es decir, combinaciones de borde y tornillo, están estrechamente asociadas con la cristalización y la deformación.

3.6.5.3. Dislocaciones mixtas

De carácter doble: arista y helicoidal.

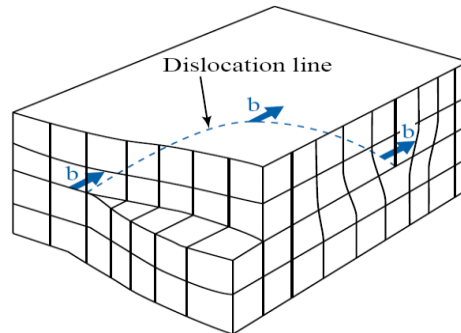


Figura 98.

Dislocación mixta

Fuente: (Bacon, 2011)

Características geométricas de las dislocaciones:

- (i) La suma vectorial de los vectores de dislocaciones de Burgers que se encuentran en un punto llamado nodo debe ser cero, análoga a la ley de Kirchhoff para las corrientes eléctricas que se encuentran en una unión.
- (ii) Una línea de dislocación no puede terminar abruptamente dentro del cristal. O termina en un nodo o en la superficie. Alternativamente, una línea de dislocación puede cerrarse sobre sí misma como un bucle (Kakani, 2004).

3.6.6. Defectos superficiales

Las imperfecciones de los límites superficiales y de grano de naturaleza estructural surgen de un cambio en el apilamiento de los planos atómicos a través de un límite y son bidimensionales. El cambio puede ser una de las orientaciones o de la secuencia de apilamiento de los planos. Los tipos más importantes de defectos superficiales son los límites de ángulo alto y de ángulo bajo, las fallas de apilamiento y los límites gemelos. Básicamente, las imperfecciones de la superficie son de dos tipos: externas e internas.

3.6.6.1. Superficie

La superficie externa de un material es una imperfección en sí misma porque los enlaces atómicos no se extienden más allá de ella. Los átomos de la superficie tienen vecinos de un lado solamente mientras que los átomos dentro del cristal tienen vecinos a cada lado de ellos (*Figura 99*). Como los átomos de la superficie no están completamente rodeados por otros, poseen una energía más alta que la de los átomos internos. Para la mayoría de los metales, la energía del átomo de superficie es del orden de 1 J / m^2 .

Las imperfecciones de la superficie interna se manifiestan por defectos tales como los límites de grano, los límites de inclinación, los límites gemelos y las fallas de apilamiento.

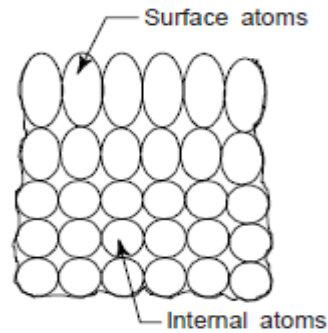


Figura 99.

Defectos superficiales externos

Fuente: (Kakani, 2004)

3.6.6.2. Bordos de grano

Los bordes entre los granos o entre los subgranos se caracterizan por su estructura, el ángulo de desorientación y la presencia de inclusiones extrañas. La fracción de esta región altamente defectuosa cerca de los límites de grano, es una característica importante del material poli cristalino. A su vez, el ancho de un límite de grano se estima como 2-3 constantes de red a del metal puro.

Los materiales de ingeniería pueden ser de tipo policristalino o monocristalino. Una aleación policristalina contiene una enorme cantidad de granos finos. Las imperfecciones del límite del grano, son aquellas imperfecciones superficiales que separan cristales o granos de diferente orientación en una agregación policristalina durante la nucleación o cristalización. La forma de un grano generalmente está influenciada por la presencia de granos circundantes. Las redes de granos adyacentes están orientadas al azar y de forma diferente (*Figura 100*) y un límite entre dos granos es esencialmente, una capa de transición de un grosor de 1-5 nm. Esta capa puede tener una disposición desordenada de átomos, dislocación de racimos y una concentración elevada de impurezas. En los límites de grano, el empaque atómico es imperfecto y entre dos granos adyacentes, hay una zona de transición que no está alineada con ninguno de los granos (*Figura 100*). Como resultado, notamos que los átomos límite en tales casos no pueden tener un complemento perfecto de átomos circundantes. El desajuste con la orientación del grano adyacente produce un empaquetado de átomos menos eficiente a lo largo del límite. Por lo tanto, los átomos a lo largo del límite tienen una energía más alta que aquellos dentro de los granos. La energía más alta de los átomos límite también es importante para la nucleación de los cambios de fase polimórficos. El límite entre dos cristales que tienen diferentes disposiciones cristalinas o diferentes composiciones, se llama un límite de interfase o comúnmente llamado una interfaz (Kakani, 2004).

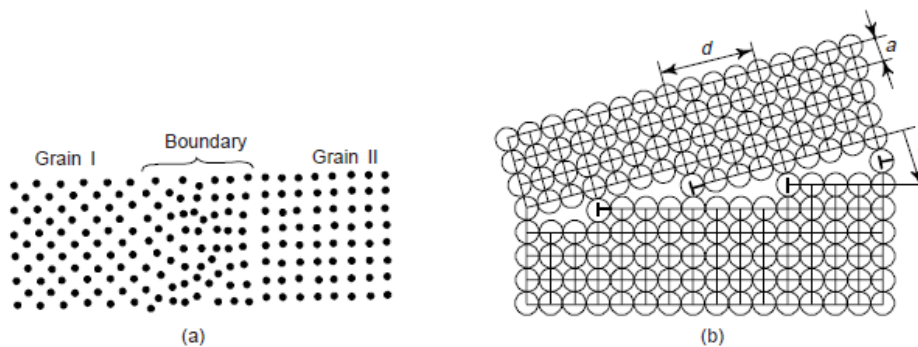


Figura 100.

Esquemas de (a) ángulo alto y (b) límites de ángulo bajo

Fuente: (Kakani, 2004)

El empaque atómico más bajo a lo largo del límite, favorece la difusión atómica. Cuando la diferencia de orientación entre los granos vecinos es más de 10° - 15° , los límites se llaman límites de grano de ángulo alto (*Figura 100 (a)*). Cada grano a su vez consiste en subgranos o bloques.

Un subgrano, es una porción de un cristal de una estructura relativamente regular. Los límites del subgrano están formados por paredes de dislocaciones que dividen un grano en una cantidad de subgranos o bloques (*Figura. 100 (b)*). El ángulo de desorientación entre los subgranos adyacentes no es grande (no más de 5°), por lo que sus límites se denominan 'ángulo bajo'. Los límites de ángulo bajo también pueden servir como lugares de acumulación de impurezas.

3.6.6.3. Límites de inclinación

Este es otro tipo de defecto superficial llamado límite de ángulo bajo, ya que la diferencia de orientación entre dos cristales vecinos es inferior a 10° . Esta es la razón por la cual la interrupción en el límite no es tan drástica como en el límite de ángulo alto.

Este tipo de límite se asocia con relativamente poca energía y se compone de dislocaciones de borde que se encuentran una encima de la otra. En general, se pueden describir los límites de ángulo bajo mediante arreglos adecuados de dislocación. El ángulo o inclinación, $\theta = \frac{b}{D}$ (*Figura 102*), donde b es la magnitud del vector Burgers y D es la distancia vertical promedio entre dislocaciones.



Figura 101. Área de desorden en los límites de grano

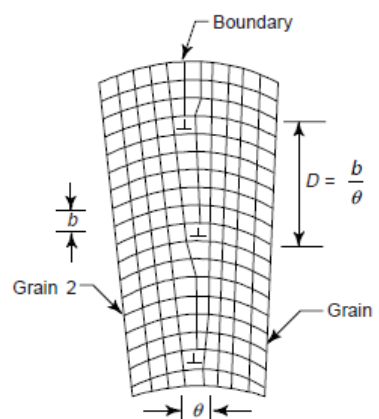


Figura 102. Límites de inclinación

Fuente: (Kakani & Kakani, 2004)

3.6.6.4. Límites gemelos

Esta es otra imperfección superficial plana. La disposición atómica en un lado de un límite gemelo es un reflejo de espejo de la disposición en el otro lado. El hermanamiento puede ocurrir durante el crecimiento del cristal o la deformación de los materiales. Los límites gemelos se producen en pares, de modo que el cambio de orientación introducido por un límite, es restaurado por el otro. La región entre el par de fronteras se denomina región hermanada. Uno puede identificar fácilmente los límites gemelos bajo un microscopio óptico. Los gemelos que se forman durante el proceso de recristalización, es decir, en el proceso de trabajo mecánico se conocen como gemelos mecánicos, mientras que los gemelos formados como resultado del recocido después de la deformación plástica se conocen como gemelos de recocido, (*Figura 103*).

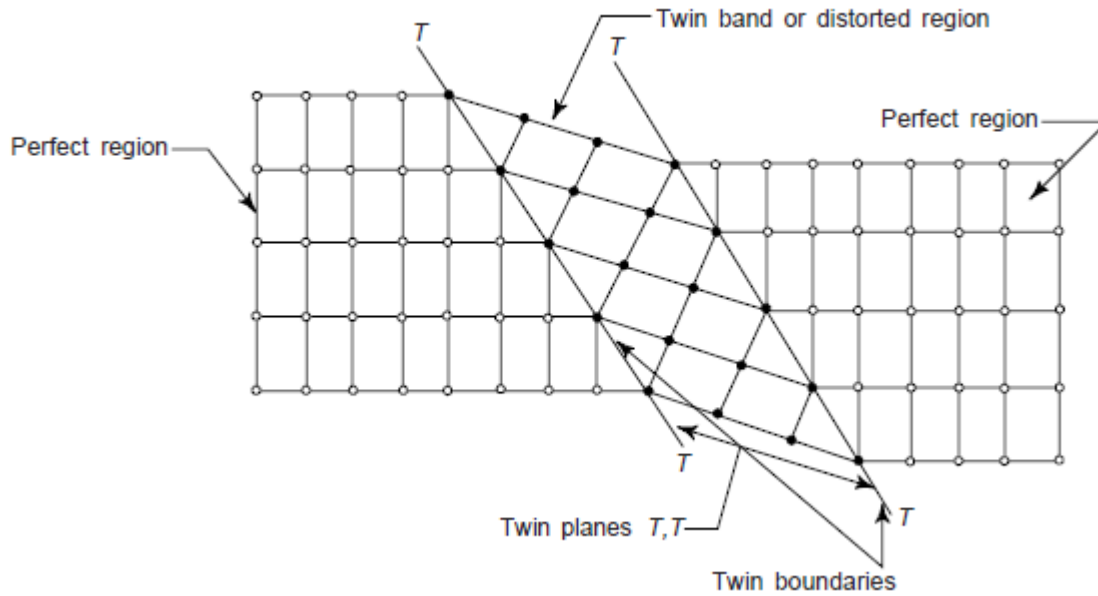


Figura 103.

Límites gemelos

Fuente: (Kakani, 2004)

3.6.6.5. Faltas acumuladas

Esta es una parte de un plano atómico confinado entre dislocaciones y en el que se altera el orden regular de alternancia de capas atómicas. Este tipo de falla surge del apilamiento de un plano atómico fuera de secuencia en otro, mientras que el enrejado a cada lado de la falla es perfecto. Por ejemplo, en las aleaciones de celosía FCC, las capas atómicas cerradas al aire libre normalmente están en una alternancia ABC ABC AB... Al pasar por una falla de apilamiento, su alternancia puede cambiar, por ejemplo, a ABC BCA BC... La alternancia de BCBC es típica de un retículo HCP, y por lo tanto la falla de apilamiento en el caso considerado representa, por así decirlo, una placa delgada de un retículo HCP en la estructura de un enrejado de FCC. La *Figura 104* muestra las fallas en la estructura de un cristal de FCC.

Aquí la secuencia de apilamiento de un cristal de FCC ideal se describe como ABC ABC... y la falla de apilamiento puede cambiar la secuencia ABC ACAB.

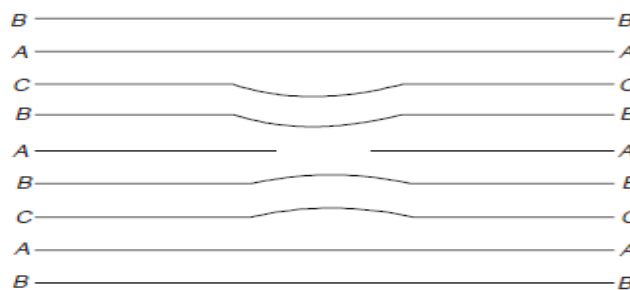


Figura 104.

Fallo en la secuencia de apilamiento de un cristal FCC

Fuente: (Kakani, 2004)

3.6.7. Defectos en volumen

Son defectos a gran escala de tipo macroscópico y representan una inhomogeneidad en la masa del sólido. Grietas, poros, inclusiones etc. son defectos de éste tipo. Estos, debido a que se forman principalmente en el proceso de solidificación (Zangari, 2011).

Características:

- Defectos de mayor tamaño. Son los poros, grietas, inclusiones no metálicas y segundas fases (o precipitados).
- Son de suma importancia para materiales policristalinos, aparecen al unir materiales amorfos con cristales.
- El concepto de un defecto tridimensional puede ampliarse a una región amorfa dentro de un material policristalino.
- Los defectos tienen un efecto considerable en el comportamiento y desempeño de un material.
- Se forman cuando un grupo de átomos o de defectos puntuales se unen para formar un vacío tridimensional o poro.
- De manera inversa, un grupo de átomos de alguna impureza puede unirse para formar un precipitado tridimensional.

Formación:

Aparecen debido a:

- Se forman cuando un grupo de átomos o defectos puntuales se unen.
- Control inadecuado durante la solidificación de los metales.
- Inadecuada realización de tratamientos térmicos.
- Sobre esfuerzos aplicados a las piezas.
- Mal diseño de piezas mecánicas.
- Mala selección de materiales.
- Procesos de crecimiento de baja calidad.

3.6.7.1. Poros y grietas

Los poros y grietas son huecos debidos a oclusión de gases, contracción durante la solidificación o tensiones producidas en los procesos de fabricación de las piezas.

Poros: Son pequeñas cavidades producidas por los gases desprendidos en el enfriamiento del material, que no llegan a la superficie.

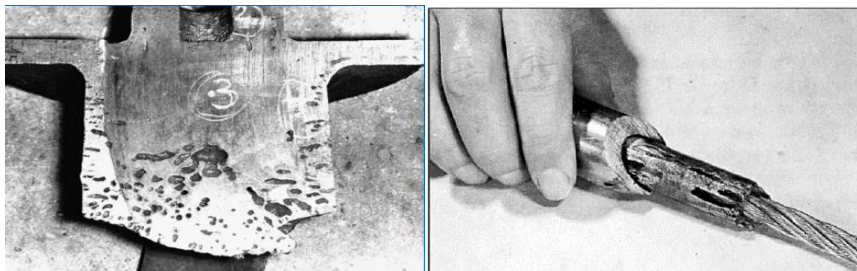


Figura 105.

Poros en lingote y gancho de anclaje

Fuente: (Smith, 2011)

Poros, normalmente nocivos para la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas tradicionales (Kakani, 2004).

Grietas: Son fisuras o rajaduras que se originan al final de la solidificación, por una desigualdad en el enfriamiento de las diferentes partes de una pieza o lingote, dividiéndose en: 1) Macro grietas y 2) Micro grietas como se puede observar en la *Figura 106*.

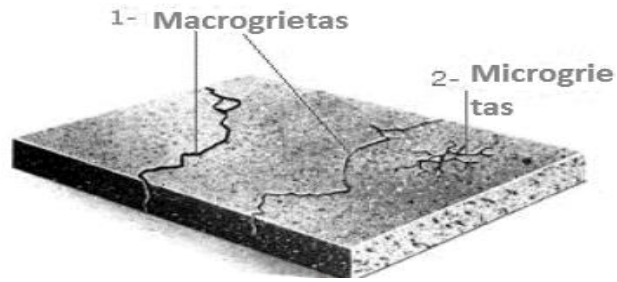


Figura 106.

Grietas en un lingote

Fuente: (Hall, 1998)

3.6.7.2. Inclusiones

Son partículas indeseables, o materiales extraños que pueden quedar atrapados en el interior del metal solidificado, como: escoria, clavos, arena, óxidos, partículas de refractarios.

Las inclusiones no metálicas se forman por reacción de impurezas provenientes de la materia prima. En el caso de óxidos y silicatos que se encuentra en los aceros comerciales, la cantidad y tamaño de estas inclusiones, está normalizado por la ASTM (American Society for Testing and Materials).

El estándar más común para el análisis de inclusiones no metálicas es el ASTM E-45

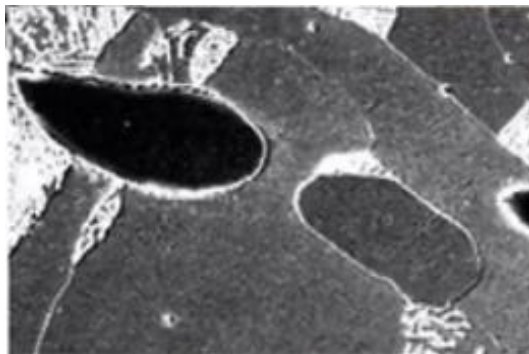


Figura 107.

Inclusiones

Fuente: (Weng, 2003)

3.6.7.3. Segregaciones

Son acumulaciones de ciertos elementos en determinadas regiones del volumen de un metal.

Se denomina mecanismo de segregación al proceso regular que produce la agrupación de partículas similares. El mecanismo de condensación tiene su origen en la diferencia de la densidad de las partículas: las partículas más pesadas tienden a ubicarse en la parte baja del medio y las livianas viajan a mayores elevaciones (Schroeter, 2006).

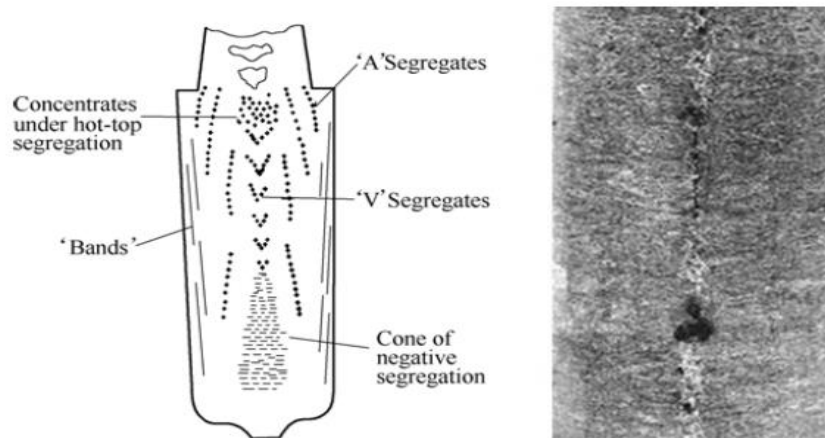


Figura 108.

Esquema de segregación de un lingote tradicional solidificado y una losa delgada segregación de una losa fina de colada continua (losa de CSP).

Fuente: (Weng, 2003)

3.6.7.4. Precipitados

Partículas desarrolladas por tratamientos térmicos en aleaciones metálicas para endurecer, por ejemplo. Los precipitados son segundas fases que se forman en las aleaciones metálicas debido a la disminución de solubilidad de las soluciones sólidas.

El precipitado posee una red cristalina propia, distinta de la del cristal por lo tanto, la interfase matriz-precipitado tiene una alta energía acumulada. Mediante tratamientos térmicos, se puede lograr que esos precipitados se dispersen uniformemente en la matriz mejorando las propiedades de la aleación.

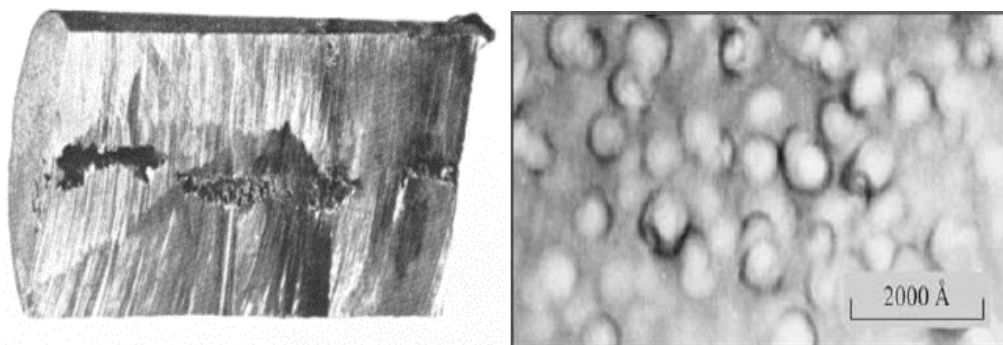


Figura 109.

Precipitados

Fuente: (Smith, 2011)

3.6.8. Rechupes

Son cavidades que se producen en el centro y parte superior del lingote, la formación de rechupes se produce en todos los materiales de fundición, independientemente del molde y del proceso de fundición.

3.6.8.1. Rechupes por solidificación

Los rechupes externos son cavidades simétricas y profundas que suelen tener una apertura con forma de embudo hacia el exterior y a veces, continúan hacia el interior formando cavidades cerradas. Las paredes de las cavidades suelen ser ásperas y a menudo dendríticas. Los rechupes externos son claramente apreciables a simple vista.

3.6.8.2. Rechupes internos

No tienen conexión con el exterior y por tanto, están situados en el interior de la pieza fundida. Su forma es irregular, las paredes son ásperas y a menudo están cubiertas por dendritas. Se aprecian a simple vista durante una prueba no destructiva o, a más tardar, durante el procesamiento (Hasse, 2005).

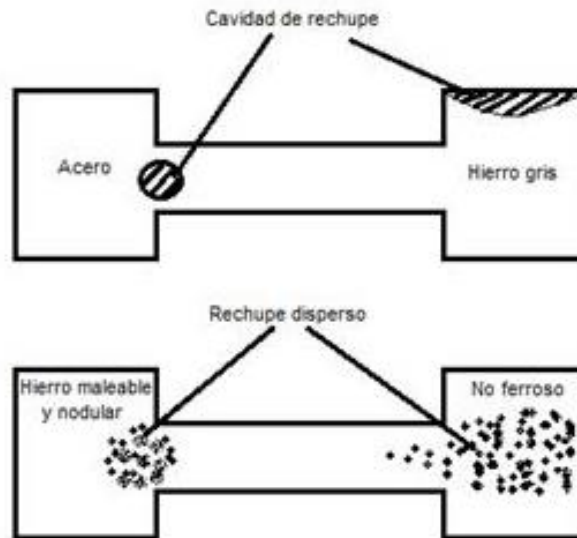


Figura 110.

Distintas formas en que ocurren los rechupes o cavidades de contracción en función del metal que se está trabajando

Fuente: (Hasse, 2005)



Capítulo 4

Capítulo 4

Difusión

Difusión

4.1 Introducción

Muchas reacciones y procesos que son importantes en el tratamiento de materiales se basan en la transferencia de masa dentro de un sólido específico (ordinariamente a nivel microscópico) o de un líquido, un gas u otra fase sólida. La difusión es, esencialmente, el fenómeno de transporte de materia por el movimiento atómico y molecular. Este capítulo analiza los mecanismos atómicos por los cuales se produce la difusión, los modelos matemáticos de la misma, la influencia de la temperatura y la tasa de difusión de especies.

La difusión consiste en la dilución, penetración y propagación de materia en una región espacial causada por el movimiento aleatorio de las partículas, maximizando la entropía y ocupando, luego del equilibrio, toda la región espacial accesible con la misma energía para las partículas que se expanden o propagan. Se puede demostrar con el uso de una difusión pareja, que se forma uniendo barras de dos metales diferentes para que hay un contacto íntimo entre las dos caras; esto se ilustra para cobre y níquel en la *Figura 111*, que incluye representaciones esquemáticas de las posiciones de los átomos y composición a través de la interfaz. Esta pareja se calienta durante un período prolongado en una temperatura elevada (pero inferior a la temperatura de fusión de ambos metales) y enfriado a temperatura ambiente. El análisis químico revelará una condición similar a que representa en la *Figura 112a*, a saber, cobre puro y níquel en las dos extremidades de la pareja, separados por una región aleada. Concentraciones de ambos metales varían con la posición como se muestra en la *Figura 112c*. Este resultado indica que los átomos de cobre han migrado o difundido en el níquel y ese níquel se ha difundido en cobre.

Este proceso por el cual los átomos de un metal se difunden en otro, se denomina Inter difusión, o difusión de impurezas.

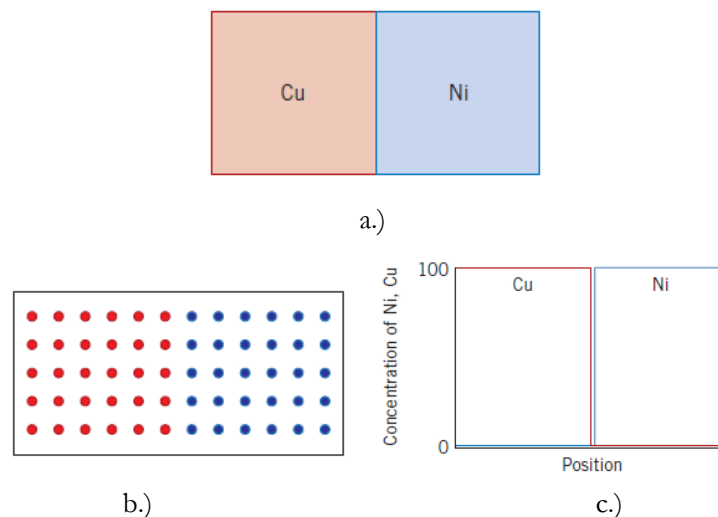


Figura 111.

(a) Una pareja de difusión de cobre y níquel antes de un tratamiento térmico a alta temperatura. (b) Representaciones esquemáticas de Cu (rojo círculos) y Ni (círculos azules) ubicaciones de átomos dentro la pareja de difusión. (c) Concentraciones de cobre y níquel como una función de la posición a través de la Pareja. F.

Fuente: (Callister, 2007)

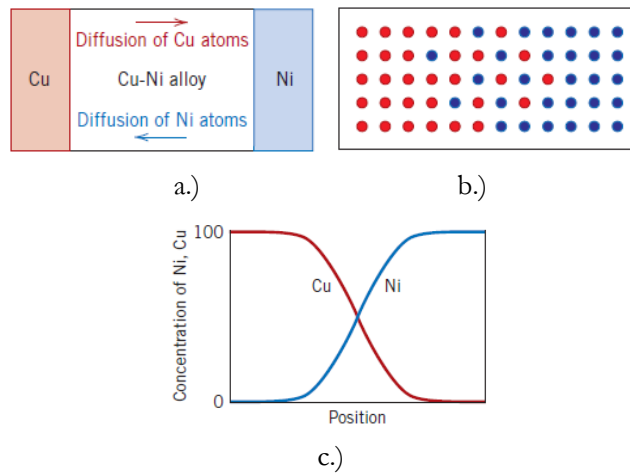


Figura 112.

(a) Una pareja de difusión de cobre y níquel después de un tratamiento térmico a alta temperatura, mostrando la zona de difusión aleada. (b) Representaciones esquemáticas de átomos de Cu (círculos rojos) y Ni (círculos azules) lugares dentro de la pareja. (c) Concentraciones de cobre y níquel como una función de posición a través la pareja.

Fuente: (Callister, 2007)

4.2 Modelos para difusión

Si se colocan algunos cristales de un material coloreado como sulfato de cobre en la parte inferior de una botella alta llena de agua, el color se extenderá lentamente a través de la botella.

Al principio, el color se concentrará en el fondo de la botella. Después de un día penetrará hacia arriba unos pocos centímetros. Después de varios años, aparecerá una solución homogénea.

El proceso responsable de que el color del material es la difusión. La difusión es causada por un movimiento molecular aleatorio que conduce a una mezcla completa. Puede ser un proceso lento. En los gases, la difusión progresa a una velocidad de aproximadamente 5 cm / min; en líquidos, su velocidad es de aproximadamente 0.05 cm / min; en sólidos, su tasa puede ser solo de 0.00001cm / min. En general, varía menos con la temperatura que muchos otros fenómenos.

Esta lenta velocidad de difusión es responsable de su importancia. En muchos casos, la difusión ocurre secuencialmente con otros fenómenos. Cuando es el paso más lento en la secuencia, limita la tasa global del proceso. Por ejemplo, la difusión a menudo limita la eficacia de destilaciones comerciales y la tasa de reacciones industriales utilizando catalizadores porosos. Eso limita la velocidad con la que reaccionan el ácido y la base y la velocidad con que el humano el intestino absorbe los nutrientes. Controla el crecimiento de microorganismos que producen penicilina, la tasa de corrosión del acero y la liberación de sabor de los alimentos.

En gases y líquidos, las velocidades de estos procesos de difusión a menudo se pueden acelerar mediante agitación. Por ejemplo, el sulfato de cobre en la botella alta se puede mezclar por completo en unos minutos si la solución se agita. Esta mezcla acelerada no se debe a la difusión solo, pero a la combinación de difusión y agitación. La difusión aún depende de lo aleatorio movimientos moleculares que tienen lugar a distancias más pequeñas. La agitación o agitación no es un proceso molecular, sino un proceso macroscópico que mueve porciones del fluido sobre distancias mucho más grandes. Después de este movimiento macroscópico, la difusión se mezcla nuevamente adyacentes porciones del fluido. En otros casos, como la dispersión de contaminantes, la agitación del viento o del agua produce efectos cualitativamente similares a la difusión; estos efectos, llamados dispersión, se tratarán por separado.

La descripción de la difusión involucra un modelo que describa cuantitativamente la fenomenología. Puede plantearse una descripción empírica o macroscópica y otra descripción más formal y microfísica. La más fundamental, la ley de difusión de Fick, utiliza un coeficiente de difusión. Esta es la ley que se cita comúnmente en las descripciones de difusión. El segundo, que no tiene nombre formal, implica un enfoque a través de la constante de transferencia de masa; un tipo de constante de velocidad reversible.

4.3 Los dos modelos básicos

En esta sección queremos ilustrar las dos formas básicas en que la difusión puede ser descrita. Para esto, primero imaginamos dos bulbos o recipientes grandes, conectados por un capilar largo y delgado (Figura 113). Los bulbos están a temperatura y presión constantes y son de volúmenes iguales. Sin embargo, un bulbo contiene dióxido de carbono y el otro está lleno de nitrógeno.

Para saber qué tan rápido se mezclarán estos dos gases, medimos la concentración de carbono dióxido en el bulbo que inicialmente contiene nitrógeno. Hacemos estas mediciones cuando solo se ha transferido un rastro de dióxido de carbono y encontramos que la concentración del dióxido de carbono varía linealmente con el tiempo. De esta manera, sabemos la tasa de transferencia o velocidad de transporte del dióxido de carbono. Por otro lado, nos interesa analizar esta cantidad transferida para determinar las propiedades físicas que ser aplicable no solo a este experimento sino también en otros experimentos. Para hacer esto, nosotros primero definimos el flujo:

$$(\text{flujo de dióxido de carbono}) = \left(\frac{\text{cantidad de gas removido}}{\text{tiempo}(\text{área capilar})} \right) \quad (4 - 1)$$

Al dividir por unidad de longitud el numerador y el denominador de la expresión (4-1); se obtiene entonces la diferencia de masas sobre volumen que es la diferencia de concentración; y queda en el denominador el término (tiempo/longitud). Luego, es fácil ver que el flujo es proporcional a la concentración de gas:

$$(\text{flujo de dióxido de carbono}) = k \left(\frac{\text{diferencia de concentración}}{\text{de dióxido de carbono}} \right) \quad (4 - 2)$$

El factor de proporcionalidad k se denomina coeficiente de transferencia de masa. Su introducción señala uno de los dos modelos básicos de difusión. Alternativamente, podemos reconocer.

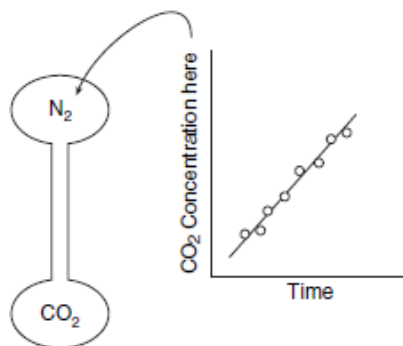


Figura 113.

Un experimento de difusión simple. Dos bulbos que inicialmente contienen diferentes gases son conectados con un capilar largo y delgado. El cambio de concentración en cada foco es una medida de difusión y puede analizarse de dos maneras diferentes.

Fuente: (Cussler, 2007)

Aumentar la longitud del capilar disminuirá el flujo, y entonces podemos suponer que:

$$(\text{flujo de dióxido de carbono}) = D \left(\frac{\text{diferencia de concentración de dióxido de carbono}}{\text{longitud del capilar}} \right) \quad (4 - 3)$$

La nueva constante de proporcionalidad D es el coeficiente de difusión. La descripción formal de la expresión (4-3) se conoce como primera Ley de Fick. *Ver referencia original en: A. Fick, Phil. Mag. (1855), 10, 30*

Estas suposiciones son similares a las hechas en muchas otras ramas de la ciencia. Por ejemplo, son similares a los utilizados en el desarrollo La ley de Ohm, que dice que:

$$(\text{Cantidad de electrones por unidad de tiempo}) = \left(\frac{1}{\text{resistencia}} \right) (\text{voltaje}) \quad (4 - 4)$$

Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de masa k es análogo al recíproco de la resistencia. Una forma alternativa de la ley de Ohm para conductores y aislantes. Esto es:

$$(\text{flujo de electrones}) = \left(\frac{1}{\text{resistividad}} \right) \left(\frac{\text{voltaje}}{\text{longitud}} \right) \quad (4 - 5)$$

El coeficiente de difusión D es análogo al recíproco de la resistividad.

Los paralelos con la ley de Ohm también proporcionan una pista sobre los mecanismos generales de transporte en materiales; bien sea de carga para la ley de Oh, de calor para la ley de Fourier o de masa para la ley de Fick.

4.4 Coeficientes de difusión en gases

Los coeficientes de difusión en gases se ilustran mediante los valores en la Tabla 13. De acuerdo ambiente y cerca de la temperatura ambiente, estos valores se encuentran entre 0.1 y 1 cm² / seg. De hecho, dada la variación de la química, los valores varían notablemente poco. Para una primera aproximación, los coeficientes son inversamente proporcionales a la presión, por lo que duplicar el la presión corta el coeficiente de difusión a la mitad. Varían con la potencia de 1.5 a 1.8 de la temperatura, por lo que un aumento de 300K triplica los coeficientes. Varían de una manera más complicada moda con factores como el peso molecular.

El significado físico de los coeficientes de difusión de este tamaño se ilustra mejor con:

Tabla 13.

Valores experimentales de coeficientes de difusión en gases a una atmósfera.

Gas	Temperatura (K)	Coefficiente de difusión
Aire-benceno	298.2	0.096
Aire-CH ₄	282.0	0.196
Aire-C ₂ H ₅ OH	273.0	0.102
Aire-CO ₂	282.0	0.148
Aire-H ₂	282.0	0.710
Aire-H ₂ O	289.1	0.282
	298.2	0.260

	312.6	0.277
	333.2	0.305
Aire-He	282.	0.658
Aire-n-hexano	294.0	0.080
Aire-tolueno	299.1	0.086
Aire-anilina	299.1	0.074
Air2-2-propanol	299.1	0.099
CH_4 -He	298.0	0.675
CH_4 - H_2	298.0	0.726
CH_4 - H_2O	307.7	0.292
CO- N_2	295.8	0.212
12CO-14CO	373.0	0.323
CO- H_2	295.6	0.743
CO-He	295.6	0.702
CO_2 - H_2	298.2	0.646
CO_2 - N_2	298.2	0.165
CO2-O2	296.0	0.156
CO2-He	298.4	0.597
CO2-CO	315.4	0.185
CO2-H2O	307.4	0.202
CO2-SO2	263.0	0.064
12CO2-14CO2	312.8	0.125
CO2-propano	298.1	0.087
H_2 - N_2	297.2	0.779
H_2 -O2	316.0	0.891
H_2 -He	317.0	1.706
H_2 -Ar	317.0	0.902
H_2 -Xe	341.2	0.751
H_2 -SO2	285.5	0.525
H_2 -H2O	307.1	0.915
H_2 -NH3	298.0	0.783
H_2 -etanol	298.0	0.537
H_2 -n-hexano	288.7	0.290
H_2 -ciclohexano	288.6	0.319
H_2 -benceno	311.3	0.404
N_2 -O2	316.0	0.230
	293.2	0.220
Gas	Temperatura (K)	Coefficiente de difusión
N_2 -He	317.0	0.794
N_2 -Ar	316.0	0.216
N_2 -NH3	298.0	0.230
N_2 -H2O	298.2	0.293
N_2 -SO2	263.0	0.104
N_2 -etano	298.0	0.148
N_2 -n-butano	298.0	0.096
N_2 -isobutano	298.0	0.090

N2-n-hexano	288.6	0.076
N2-n-octano	303.1	0.073
N2-trimentinentano	303.3	0.071
N2-benceno	311.3	0.102
O2-He (He raro)	298.2	0.737
(O2-raro)	298.2	0.718
O2-He	317.0	0.822
O2-H2O	308.1	0.282
O2-CCl4	296.0	0.075
O2-benceno	311.3	0.101
O2-n-hexano	288.6	0.075
O2-n-octano	303.1	0.071
O2-trimentinentano	303.0	0.071
He-Ar	298.0	0.742
He-H2O	298.2	0.908
He-NH3	297.1	0.842
Ar-Ne	303.0	0.327
Ar-Kr	303.0	0.140
Ar-Xe	329.9	0.137
Ne-Kr	273.0	0.223
Etileno-H2O	307.8	0.204

Fuente: (Cussler, 2007)

Es igual a la unidad, el proceso de difusión ha procedido de manera significativa. En otras palabras, donde z^2 es igual a $4Dt$, la difusión ha penetrado una distancia z en el tiempo t .

En gases, esta distancia de penetración es mucho más grande que en otras fases. Por ejemplo, el coeficiente de difusión de la difusión del vapor de agua en el aire es de aproximadamente $0.3 \text{ cm}^2 / \text{seg}$. En 1 segundo, la difusión penetrará 0.5 cm; en 1 minuto, 4 cm; y en 1 hora, 30 cm.

4.5 Gas a altas presiones

Las ecuaciones dadas anteriormente en este capítulo, permiten predecir los coeficientes de difusión en gases diluidos a un promedio de ocho por ciento. Estas predicciones, que son aproximadamente dos veces más precisos que los de líquidos, a menudo son aclamados como una respuesta final.

Tabla 14.
Volúmenes de difusión atómica para su uso.

Volumen de difusión atómico y estructural incrementos V_{ij}	Volúmenes de difusión para simple Moléculas $\sum V_{ij}$		
C	16.5	H2	7.07
H	1.98	He	2.88
O	5.48	N2	17.9
(N)	5.69	O2	16.6
(Cl)	19.5	Aire	20.1
(S)	17.0	Ar	16.1
Aro	20.2	Kr	22.8
Anillo heterocíclico	20.2	CO	18.9
		CO2	26.9

	N2O	35.9
	NH3	14.9
	H2O	12.7
	(Cl2)	37.7
	(SO2)	41.1

Fuente: (Cussler, 2007)

Sin embargo, estas ecuaciones concuerdan con el experimento a bajas presiones, tienen mucho menos éxito a altas presiones. A presiones más altas, algunos datos binarios están disponibles; para la auto difusión, una sugerencia empírica sensata es.

$$pD = p_0 D_0 \quad (4 - 6)$$

En el cual el subíndice 0 indica valores a baja presión a la misma temperatura. La relación inversa entre difusión y presión, consistente con Eq. 4.5-6, es un buen guía.

4.6 Los coeficientes de difusión en líquidos

Los coeficientes de difusión en líquidos se ejemplifican con los valores dados en las tablas. La mayoría de estos valores caen cerca de $10^{-5} \text{cm}^2/\text{seg}$. Esto es cierto para orgánicos comunes solventes, mercurio e incluso hierro fundido. Se producen excepciones para alto peso molecular solutos como albúmina y poliestireno, donde la difusión puede ser 100 veces más lenta. Actualmente, el rango de estos valores es notablemente pequeño. A 25°C , casi ninguno es más rápido que $10^{-5} \text{cm}^2/\text{seg}$ y aquellos significativamente por debajo de $10^{-5} \text{cm}^2/\text{seg}$ son macromoléculas, como la hemoglobina. Las razones para este rango estrecho, es que la viscosidad de líquidos simples como el agua y el hexano varía poco y los coeficientes de difusión son solo una función débil del tamaño del soluto.

Los coeficientes de difusión en líquidos son aproximadamente diez mil veces más lentos que los de gases diluidos. Para ver lo que esto significa, calculamos nuevamente la distancia de penetración $\sqrt{4Dt}$, que fue la distancia que encontramos central a la difusión inestable. Como ejemplo, considere benceno que se difunde en ciclo hexano con un coeficiente de difusión de aproximadamente $2 \cdot 10^{-5} \text{cm}^2/\text{seg}$. En el momento cero, ponemos en contacto el benceno y el ciclohexano. Después de 1 segundo, en la difusión ha penetrado 0,004 cm, en comparación con 0,3 cm para los gases; después de 1 minuto, en la penetración es de 0.03 cm, en comparación con 4 cm; después de 1 hora, es 0.3 cm, comparado con 30 cm.

La difusión líquida, limita a menudo la tasa general de procesos que ocurren en la biología. En química, la difusión limita la tasa de ácido-base reacciones en fisiología, la difusión limita la tasa de digestión; en metalurgia, difusión puede controlar la tasa de corrosión superficial; en la industria química, la difusión es responsable de las tasas de extracciones líquido-líquido. La difusión en líquidos es importante porque es lenta.

4.7 Difusión de vacantes

Un mecanismo implica el intercambio de un átomo desde una posición de celosía normal a un sitio de celosía vacante adyacente o vacante, como se representa esquemáticamente en la *Figura 114a*. Este mecanismo se llama apropiadamente difusión de vacantes. Por supuesto, este proceso requiere la presencia de vacantes y la medida en que la difusión de vacantes puede ocurrir es una función del número de estos defectos que están presentes; significativo las concentraciones de vacantes pueden existir en metales a temperaturas elevadas (Sección 4.2). Como la difusión de átomos y las vacantes intercambian posiciones, la difusión de átomos en una dirección corresponde al movimiento de las vacantes en la dirección opuesta. Ambos la auto-difusión y la

inter-difusión ocurren por este mecanismo; para este último, la impureza los átomos deben sustituir a los átomos del anfitrión.

4.8 Difusión intersticial

El segundo tipo de difusión involucra átomos que migran desde una posición intersticial a un vecino que está vacío. Este mecanismo se encuentra para la Inter-difusión de impurezas como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que tienen átomos que son lo suficientemente pequeños como para caber en las posiciones intersticiales. Host o impureza sustitutiva los átomos raramente forman intersticiales y normalmente no se difunden a través de este mecanismo. Este fenómeno se denomina apropiadamente difusión intersticial (*Figura 114b*).

En la mayoría de las aleaciones metálicas, la difusión intersticial ocurre mucho más rápidamente que la difusión por el modo vacante, ya que los átomos intersticiales son más pequeños y por lo tanto, más móviles. Además, hay más puestos intersticiales vacíos que vacantes; por lo tanto, la probabilidad de movimiento atómico intersticial es mayor que para la difusión de vacantes.

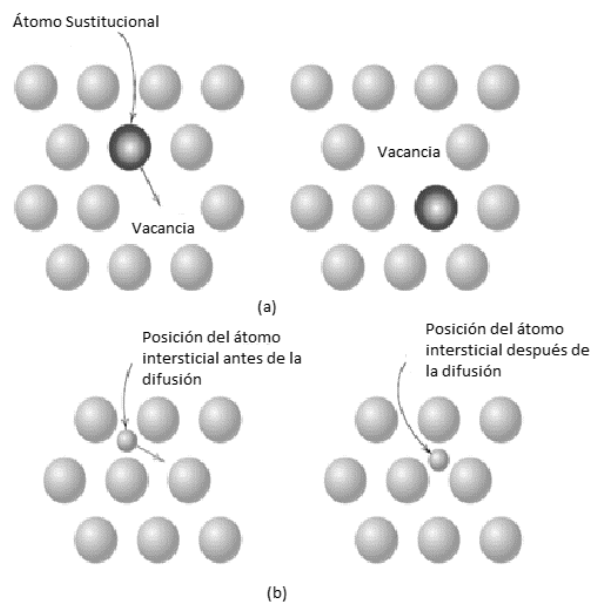


Figura 114.

Representación esquemática de (a) Difusión de vacantes (b) Difusión intersticial.

Fuente: (Callister, 2007)

4.9 Difusión en sólidos

La difusión en sólidos es descrita por la ley de Fick como gases o líquidos. Los coeficientes de difusión, sin embargo, son mucho, mucho más pequeños, como lo muestran los valores en la Tabla 16. Estos valores hacen aumentar rápidamente con la temperatura. La excepción es hidrógeno. En metales, diatómico el hidrógeno primero se disocia para formar hidrógeno atómico, que luego pierde su electrón para la nube de electrones dentro de los metales. Por lo tanto, en este caso, "difusión de hidrógeno" se refiere al movimiento de protones desnudos, cuyo pequeño tamaño les da una movilidad inusualmente grande.

Tabla 15.

Coeficientes de difusión a 25 ° C en algunos sólidos característicos.

Sólido	Soluto	D(cm ² /sec)
Acero (a Fe; BCC)	Fe	3.10 ⁻⁴⁸
	C	6.10 ⁻²¹
	H2	2.10 ⁻⁹
Acero (a Fe; FCC)	Fe	8.10 ⁻⁵⁵
	C	3.10 ⁻³¹
Cobre	Cu	8 .10 ⁻⁴²
	Zn	2.10 ⁻³⁸
SiO2	H2	6 .10 ⁻¹³
	He	4.10 ⁻¹⁰

Fuente: (Cussler, 2007)

Otra tabla tomada tenemos:

Tabla 16.

Coeficiente de difusión de algunos solutos y solventes.

Soluta	Solvente (Estructura)	Coeficiente de Difusión (m ² /s)	
		500°C	1000°C
C	FCC Fe	(5 × 10 ⁻¹⁵)	3 × 10 ⁻¹¹
C	BCC Fe	10 ⁻¹²	(2 × 10 ⁻⁹)
Fe	FCC Fe	(2 × 10 ⁻²³)	2 × 10 ⁻¹⁶
Fe	BCC Fe	10 ⁻²⁰	(3 × 10 ⁻¹⁴)
Ni	FCC Fe	10 ⁻²³	2 × 10 ⁻¹⁶
Mn	FCC Fe	(3 × 10 ⁻²⁴)	10 ⁻¹⁶
Zn	Cu	4 × 10 ⁻¹⁸	5 × 10 ⁻¹³
Cu	Al	4 × 10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰
Cu	Cu	10 ⁻¹⁸	2 × 10 ⁻¹³
C	HCP Ti	3 × 10 ⁻¹⁶	2 × 10 ⁻¹¹

Fuente: (Kakani, 2004)

4.10 Difusión en estado estacionario

La difusión es un proceso dependiente del tiempo, es decir, en un sentido macroscópico, la cantidad de un elemento que se transporta dentro de otro es una función del tiempo. A menudo es necesario cuantificar la difusión, o la velocidad de transferencia de masa. El flujo másico de difusión (J) se define como la masa (número de átomos) M de difusión a través de y perpendicular a una unidad área de sección transversal de sólido por unidad de tiempo. En forma matemática, esto puede ser representado como:

$$J = \frac{M}{At} \quad (4 - 7)$$

donde A denota el área a través de la cual se produce la difusión y t es el transcurrido tiempo de difusión. En forma diferencial, esta expresión se convierte:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (4 - 8)$$

Las unidades para J son kilogramos o átomos por metro cuadrado por segundo (kg / m² s) o (átomos / m² s).

Si el flujo de difusión no cambia con el tiempo, existe una condición de estado estacionario. Un ejemplo común de difusión en estado estacionario, es la difusión de átomos de un gas a través de una placa de metal para la cual las concentraciones (o presiones) de la difusión las especies en ambas superficies de la placa se mantienen constantes. Esto está representado esquemáticamente en la *Figura 115a*.

Cuando la concentración C se traza frente a la posición (o distancia) dentro del sólido x , la curva resultante se denomina perfil de concentración; la pendiente en un particular punto en esta curva es el gradiente de concentración:

$$\text{Gradiente de concentración} = \frac{dC}{dx} \quad (4 - 9)$$

En el presente tratamiento, se supone que el perfil de concentración es lineal, como representado en la *Figura 115b*.

$$\text{Gradiente de concentración} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad (4 - 10)$$

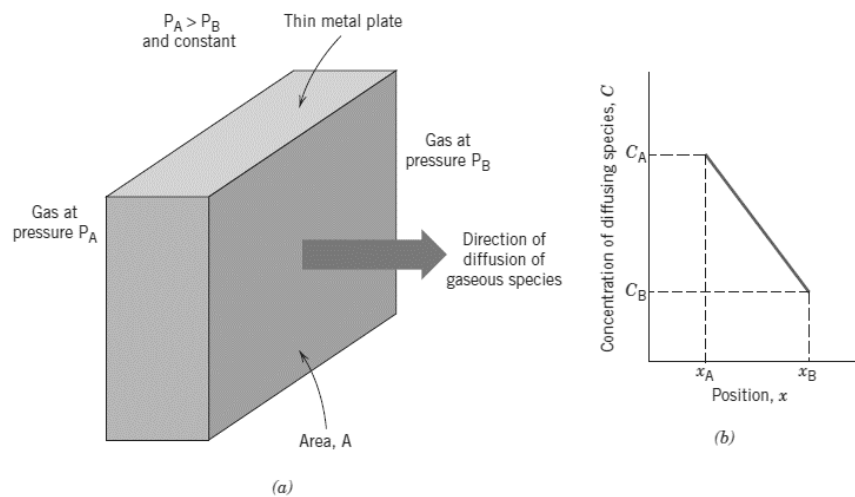


Figura 115.

Difusión en estado estacionario (a) Sin depender del tiempo (b) Comportamiento de la curva.

Fuente: (Callister, 2007)

En los ejercicios de difusión, a veces es conveniente expresar la concentración en términos de masa de especies difusoras por unidad de volumen de sólidos (kg / m³ o g / cm³).

Las matemáticas de la difusión en estado estacionario en una sola dirección (x) son relativamente simples, en que el flujo es proporcional al gradiente de concentración a través de la expresión:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (4 - 11)$$

La constante de proporcionalidad D se llama coeficiente de difusión, que se expresa en metros cuadrados por segundo. El signo negativo en esta expresión indica que la dirección de difusión está bajando el gradiente de concentración, de un alto a una baja concentración. La expresión anterior se denomina Primera Ley de Fick de la difusión.

4.10.1 Efecto de la temperatura en la difusión en los sólidos

Puesto que la difusión atómica implica movimientos atómicos, es de esperar que el aumento de la temperatura de un sistema de difusión incremente la velocidad de difusión. La dependencia de la velocidad de difusión de la temperatura de muchos sistemas de difusión, puede expresarse por un tipo de ecuación como la de Arrhenius. La "Ley" de Arrhenius se deduce formalmente a partir de la estadística de Boltzman: la probabilidad de difundir una molécula depende de la difusibilidad (exponente del exponencial en la estadística Maxwelliana o normal) que es el cociente entre la energía de activación y la energía cinética promedio. Esto es:

$$D = D_0 e^{\left(\frac{-Q_D}{RT}\right)} \quad (4 - 12)$$

Donde:

D = capacidad de difusión, m^2/s

D_0 = Constante de proporcionalidad m^2/s , independiente de la temperatura de intervalo en

Q = energía de activación de las especies en difusión, J/mol o cal/mol

R = constante molar de los gases

$$= 8.314 J / (mol \cdot K) \text{ o } 1,987 cal / (mol \cdot k)$$

T = Temperatura, K

Ejercicios:

- a) La cara de una lámina de hierro BBC de 2mm de espesor se expone a una atmosfera gaseosa carburante y la otra cara a una atmosfera descarburante a 625 °C. Después de alcanzar la condición de estado estacionario, el hierro se enfría a temperatura ambiente, se determinaron las concentraciones de carbono en las caras y resultaron 0,015 y 0,0068 %wt. Calcular el coeficiente de difusión si el flujo de difusión es de $7,36 \times 10^{-9}$ (kg/m² seg). Convertir las concentraciones en peso a quilogramos de carbono por metro cúbico de hierro.

Datos:

$$e = 2mm$$

$$T = 675^\circ C = 948 K$$

$$C_A = 0,015 \%$$

$$C_B = 0,0068 \%$$

$$J = 7,36 \times 10^{-9} \text{ kg} / m^2 \text{ seg}$$

De tablas:

$$D_0 = 6,2 \times 10^{-7} m^2 / seg$$

$$Q_d = 80 \text{ kJ} / mol$$

$$R = 8,31 \text{ J} / mol K$$

$$D = \left(6,2 \cdot 10^{-7} m^2 / seg\right) e^{\left(\frac{80000 J/mol}{(8,31 J/mol K)(948 K)}\right)}$$

$$D = -2,41 \times 10^{-11} m^2 / seg$$

$$J = -D \frac{\Delta c}{x_A - x_B}$$

$$\Delta c = -\frac{J}{D} x_B$$

$$\Delta c = \left[-\frac{7,36 \times 10^{-9}}{-2,41 \times 10^{-11}} (0,002) \right] \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta c = 0,6507 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta c = (C_A - C_B)x$$

$$x = \frac{\Delta c}{C_A - C_B}$$

$$x = \frac{0,6507}{0,015 - 0,0068} \%$$

$$x = 74,39 \text{ kg/m}^3 \%$$

$$C_A = (74,39 \text{ kg/m}^3 \%) (0,015 \%) = 1,11 \text{ kg/m}^3$$

$$C_B = (74,39 \text{ kg/m}^3 \%) (0,0068 \%) = 0,505 \text{ kg/m}^3$$

- b) Calcular el número de kilogramos de hidrógeno que pasa en una hora a través de una lámina de paladio de 0,25 m² de área y 6 mm de espesor a 600°C. Suponer un coeficiente de difusión de 1,7x10⁻⁸ m²/seg, las concentraciones de hidrógeno en los lados de alta y baja presión son 2 kg y 0,4 kg de H por metro cúbico de paladio y que se ha alcanzado un estado estacionario.

Datos:

$$e = 6 \text{ mm}$$

$$T = 600^\circ\text{C}$$

$$C_A = 2 \text{ kg/m}^3$$

$$C_B = 0,4 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 1,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$A = 0,25 \text{ m}^2$$

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

(4 - 11)

$$J = \left[-(1,7 \times 10^{-8}) \frac{2 - 0,4}{0 - 0,006} \right] \text{ kg/m}^2 \text{ seg}$$

$$J = 4,53 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \text{ seg}$$

$$J = \frac{M}{A t}$$

$$M = J A t$$

$$M = (4,53 \times 10^{-6})(0,25)(3600)$$

$$M = 4,08 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

4.11 Difusión en estado no estacionario

La mayoría de las situaciones prácticas de difusión son de estado no estacionario. Es decir, la difusión flujo y el gradiente de concentración en algún punto particular en un sólido varían con tiempo, con una acumulación neta o agotamiento de la especie difusa resultante. Esto es ilustrado en la *Figura 116*, que muestra los perfiles de concentración en tres diferentes tiempos de difusión.

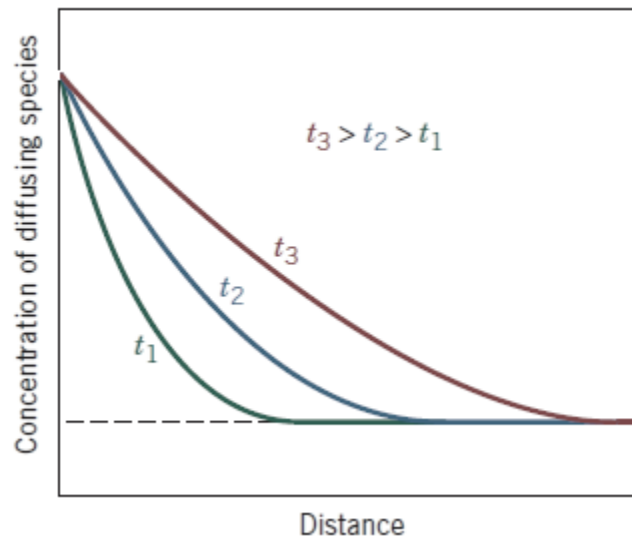


Figura 116.

Comportamiento de las curvas de difusión dependiendo del tiempo.

Fuente: (Callister, 2007)

En condiciones de estado no programado, el uso de la ecuación de la primera ley de Fick ya no es conveniente; en cambio, la ecuación diferencial parcial, conocida como la segunda ley de Fick, se usa.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4 - 13)$$

Si el coeficiente de difusión es independiente de composición (que debe verificarse para cada situación particular de difusión). La ecuación anterior se simplifica:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (4 - 14)$$

Las soluciones a esta expresión (concentración en términos de posición y tiempo) son posibles cuando se especifican condiciones de contorno físicamente significativas.

Una solución de la segunda Ley de Fick (4-14) prácticamente importante es para un sólido semi-infinito en el que la superficie la concentración se mantiene constante. Frecuentemente, la fuente de la especie difusora es una fase gaseosa, cuya presión parcial se mantiene a un valor constante. Además, se hacen las siguientes suposiciones:

1. Antes de la difusión, cualquiera de los átomos de soluto de difusión en el sólido es uniforme distribuido con concentración de C_0 .
2. El valor de x en la superficie es cero y aumenta con la distancia al sólido.

3. Se toma el tiempo como cero en el instante antes de que comience el proceso de difusión.

Estas condiciones de frontera se establecen simplemente como:

$$\text{Para } t = 0, \quad C = C_0 \quad \text{entre} \quad 0 \leq x \leq \infty$$

$$\text{Para } t > 0, \quad C = C_s \text{ (constante en la superficie de concentración)} \quad \text{y} \quad x = 0$$

$$\text{Para} \quad C = C_0 \quad \text{y} \quad x = \infty$$

La aplicación de estas condiciones de contorno a la Ecuación de la segunda ley de Fick produce la solución:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4 - 15)$$

Supongamos que se desea alcanzar alguna concentración específica de soluto, en una aleación; el lado izquierdo de la Ecuación 5.5 ahora se convierte:

$$\frac{C_1 - C_0}{C_s - C_0} = \text{Constante} \quad (4 - 16)$$

Siendo este el caso, el lado derecho de esta misma expresión también es una constante y posteriormente:

$$\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \text{Constante} \quad (4 - 17)$$

Tabla 17.
Función error.

z	$\operatorname{erf}(z)$	z	$\operatorname{erf}(z)$	z	$\operatorname{erf}(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

Fuente: (Shewmon, 1984)

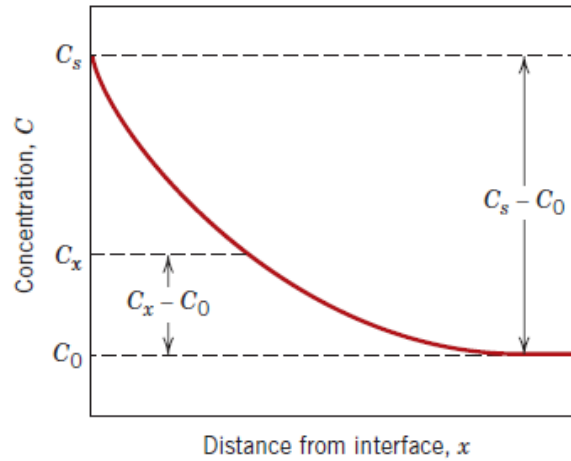


Figura 117.

Perfil de concentración para difusión de estado no programado; concentración los parámetros se relacionan con la ecuación de la segunda ley de Fick.

Fuente: (Callister, 2007)

Ejercicios:

- a) Mediante un tratamiento térmico carburante aplicado durante 15 horas se ha conseguido una concentración de carbono de 0,35 % a 2 mm de la superficie. Calcular el tiempo necesario para conseguir esta concentración a 6mm de profundidad para el mismo acero y tratamiento térmico.

Datos:

$$t_1 = 15 \text{ H}$$

$$C_1 = 0,35\%$$

$$x_1 = 2 \text{ mm}$$

$$t_2 = ?$$

$$C_2 = 0,35\%$$

$$x_2 = 6 \text{ mm}$$

Como $C_1 = C_2$

$D_1 = D_2$ Por ser mismo acero y tener el mismo tratamiento térmico

$$\operatorname{erf} z_1 = \operatorname{erf} z_2$$

$$\frac{x_1}{2\sqrt{D_1 t_1}} = \frac{x_2}{2\sqrt{D_2 t_2}}$$

$$t_2 = \frac{x_2^2 t_1}{x_1^2}$$

$$t_2 = \frac{(6\text{mm})^2 (15 \text{ H})}{(2\text{mm})^2}$$

$$t_2 = 135 \text{ H}$$

- b) Considere el gas carburizante de un engranaje de acero 1020 a 927°C. Calcule el tiempo necesario para incrementar el contenido en carbono 0,40% a 0,5 mm debajo de la superficie. Suponga que el contenido de carbono en la superficie es de 0,9% y que el acero tiene un contenido nominal de 0,2%.

Datos:

AISI 1020

$$C_0 = 0,2 \%$$

$$C_x = 0,4 \%$$

$$x = 0,5 \text{ mm}$$

$$C_s = 0,9 \%$$

$$D = 1,28 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$C_x - C_0 = C_s - C_0 = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (4 - 15)$$

$$\frac{0,4 - 0,2}{0,9 - 0,2} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0,0005}{2\sqrt{(1,28 \times 10^{-11})t}} \right)$$

$$0,7143 = \operatorname{erf} \left(\frac{69,87}{\sqrt{t}} \right)$$

De la tabla de función error:

$$\operatorname{erf} z = 0,7143$$

Interpolando

$$z = 0,755$$

$$0,755 = \frac{69,87}{\sqrt{t}}$$

$$t = 8564,21 \text{ seg} = 2,37 \text{ H}$$

- c) Determinar el tiempo necesario para alcanzar una concentración del 0,30% de carbono a 4 mm de la superficie de una aleación hierro-carbono que inicialmente contiene 0,10% de carbono. La concentración de la superficie se mantiene a 0,9% de carbono y la probeta se calienta a 1100°C. Utilizar los datos de difusión de Fe gama.

Datos:

$$C_x = 0,30\%$$

$$x = 4 \text{ mm}$$

$$C_0 = 0,10\%$$

$$C_s = 0,90\%$$

$$T = 1100 \text{ }^\circ\text{C} = 1373 \text{ K}$$

$$D = (2,3 \times 10^{-5}) e^{\left(-\frac{148000}{(8,31)(1373)}\right)} m^2/seg$$

$$D = 5,3 \times 10^{-11} m^2/seg$$

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\frac{0,30 - 0,10}{0,9 - 0,10} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0,004}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$0,75 = \operatorname{erf}\left(\frac{0,004}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

De la tabla de función error:

$$\operatorname{erf}z = 0,75$$

Interpolando

$$z = 0,82$$

$$0,82 = \frac{0,004}{2\sqrt{(5,3 \times 10^{-11})t}}$$

$$t = 112242,26 \text{ seg} = 31,17 \text{ H}$$

- d) Considere el gas carburizante de un engranaje de acero 1020 a 927°C. Calcule el contenido de carbono a 0,5 mm debajo de la superficie en un período de carburación de 5H. Tenga en cuenta que el contenido de carbono en la superficie es de 0,9%.

Datos:

AISI 1020

$$C_0 = 0,2 \%$$

$$C_x = ?$$

$$x = 0,5 \text{ mm}$$

$$C_s = 0,9 \%$$

$$t = 5H = 18000 \text{ seg}$$

$$D = 1,28 \times 10^{-11} m^2/seg$$

$$\frac{C_x - 0,20}{0,9 - 0,20} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0,0004}{2\sqrt{(1,28 \times 10^{-11})(54000)}}\right)$$

$$\frac{C_x - 0,20}{0,9 - 0,20} = 1 - \operatorname{erf}(0,5208)$$

De la tabla de función error

$$z = 0,5208$$

Interpolando

$$\operatorname{erf}(z) = 0,5383$$

$$\frac{C_x - 0,20}{0,9 - 0,20} = 1 - 0,5383$$

$$\frac{C_x - 0,20}{0,9 - 0,20} = 0,4616$$

$$C_x = 0,523\%$$



Capítulo 5

Capítulo 5

Procesamiento y
propiedades de los
materiales

Procesamiento y Propiedades de los Materiales

5.1 Procesamiento

5.1.1 Colado

5.1.1.1 Proceso de colada

El metal líquido (por ejemplo, fundición de hierro) se vierte en el molde, bien sea directamente desde el horno o por medio de calderos de colada.

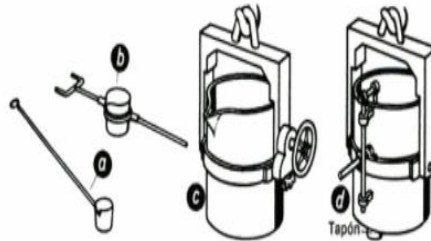


Figura 118.

Calderos o cucharas de colada.

Fuente: (Gerling, 1979)

La temperatura de colada es importante para conseguir las piezas moldeadas por colada. Las piezas de paredes delgadas, deben colarse a una temperatura más alta que las de paredes gruesas. Para medir la temperatura se utilizan dispositivos eléctricos. En el molde no deben entrar las escorias ni otras impurezas, porque ello podría inutilizar la pieza moldeada. Antes de la colada, la escoria existente en la superficie del caldero de colada se retira con la desnatadora previamente calentada. Incluso al verter el metal líquido en el molde es necesario frecuentemente retener la escoria con la mencionada desnatadora, previamente calentada. Incluso al verter el metal líquido en el molde es necesario frecuentemente retener la escoria con la mencionada desnatadora (Gerling, 1979).



Figura 119.

Desescoridado, desnatadora.

Fuente: (Gerling, 1979)

5.1.1.2 Tipos de colada

Colada horizontal:

Es la que más frecuentemente se emplea, por ejemplo, en el caso de discos y batidores (Gerling, 1979).

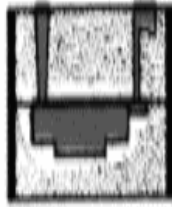


Figura 120.

Colada horizontal

Fuente: (Gerling, 1979)

Colada vertical:

Es apropiada para columnas y cilindros. La gran altura del molde proporciona una fundición compacta. La escoria asciende hacia arriba y entra en la mazarota. En el caso de la colada por el fondo, el metal entra por abajo y, en el caso de la colada por arriba, el metal entra desde arriba en el moldeo (Gerling, 1979).



Figura 121.

Colada vertical

Fuente: (Gerling, 1979)

Colada en moldes superpuestos:

Se utiliza para aprovechar el espacio en el taller de fundición (Gerling, 1979).

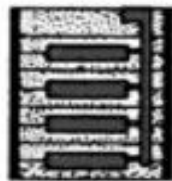


Figura 122.

Molde superpuesto.

Fuente: (Gerling, 1979)

Además de los métodos de moldeo en arena, en coquilla y a presión o por inyección, existen otros diversos procedimientos de colada que tienen como finalidad conseguir las siguientes mejoras: disminución de los costes de fabricación, mejora de la estabilidad dimensional y de la calidad superficial y mejora de las propiedades de resistencia mecánica (Gerling, 1979).

Moldeo de cáscara:

En lugar de los moldes de arena y muchos macizos, se utilizan moldes de cáscaras (moldes de cáscaras y matrices), de forma estable y de paredes delgadas. El procedimiento, adquiere una creciente importancia, es adecuado para la fabricación de piezas moldeadas de dimensiones pequeñas y medias en grandes series, el procedimiento es el siguiente:

El material para la preparación de la cáscara de molde o matriz se utiliza una mezcla de arena fina (componente refractario) y resina sintética la proporción de la mezcla resina es de 1:10 a 1:25 (Gerling, 1979).

Procedimiento de moldeo a la cera perdida:

El procedimiento se aplica para la fabricación en serie y permite colar casi todas las matrices metálicas.

Proceso: En un molde de dimensiones exactas se obtienen por colada hasta 100 modelos de cera, todos ellos conectados con el bebedero mediante canales de colada. El cuerpo del moldeo colado en cera se recubre por pulverización con una fina capa de cerámica y seguidamente, se calienta en un horno. De este modo, la cera funde y el recubrimiento solidifica. El material que se va a moldear se vierte en el molde (Gerling, 1979).

Colada con moldeo vaporizable:

En este nuevo procedimiento de colada, el metal líquido no se vierte en un molde hueco del tipo clásico, sino que el moldeo permanece en el molde de arena.

Proceso: Para la preparación de los moldes se utiliza plástico celular vaporizable este material tiene una densidad de solo $0,02 \text{ kg/dm}^3$, es fácil de trabajar y puede cortarse con un simple alambre caliente. Los moldes se preparan teniendo en cuenta la contracción y reciben la misma forma que la pieza moldeada final. No es necesario que consten de dos o más piezas; sobran las portadas machos y los machos de moldeo (Gerling 1979).

5.1.2 Laminación

Es un proceso muy común en la elaboración de productos férricos. Durante la elaboración del acero, bien sea a partir de mineral o por fusión de chatarra, se pueden obtener grandes volúmenes sólidos que se reservan para su aplicación posterior (lingotes). Se mantiene en hornos de fosa a temperaturas próximas a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ y en el momento de su utilización, se deforman por laminación o por forja, bajo la acción de fuerzas de compresión que convierte los bloques en perfiles de manejo más sencillo (Ballesteros, 2004).

5.1.2.1 Laminación en caliente

De los lingotes de sección rectangular o planchón, primero se lleva a cabo en caliente porque, cuando el metal está caliente, es posible una mayor reducción del espesor por cada pasada del laminador. Antes de la laminación en caliente, los planchones se precalientan a alta temperatura (alrededor de 1200°C). Aunque algunas veces es posible laminar en caliente directamente los planchones que salen de la máquina de colada. Después de extraer los lingotes del horno de precalentamiento, se laminan en caliente en un tren de laminación de desbaste reversible.

Otro tipo de productos que se pueden obtener directamente por solidificación del metal líquido son los planchones y las palanquillas, que son el resultado de conducir el metal líquido hacia un distribuidor que los divide en varios frentes de solidificación. En estos frentes se definen unos perfiles sencillos poligonales (planchón, palanquilla), que irán avanzando sobre unos rodillos hasta alcanzar una temperatura que permita su manipulación. Estos productos semielaborados posteriormente, se vuelven a laminar en un tren de laminación para la obtención de productos finales (barras, láminas, planchas o perfiles estructurales).



Figura 123.

Los planchones perfectamente conformados se cortan a la longitud requerida mediante una llamada de oxicorte.

Fuente: (Smith, 2006)

En estos trenes los rodillos que actúan sobre el metal para cambiar sus dimensiones suele estar agrupados en conjuntos denominados cajas de rodillos y el número de estas cajas determinara la longitud final de la instalación (Ballesteros, 2004).

En ocasiones se realiza un proceso previo de preparación de los productos (generalmente operaciones de desengrasado y decapado), a fin de proporcionar una limpieza superficial y la eliminación de residuos (capas de óxidos o cascarillas) que pueden influir negativamente en la calidad del producto, dañando además las superficies de las herramientas de trabajo de las instalaciones (Ballesteros, 2004).

5.1.2.2 Laminación en frío

Una vez finalizado el proceso, se hace preciso un nuevo laminado, este se realiza en frío, a fin de proporcionar componentes resistentes, con tolerancias menores y sin oxidaciones superficiales. Los procesos de laminación en frío suelen estar controlados automáticamente y en ellos se tiene en cuenta diversos parámetros, principalmente aquellos relacionados con la geometría y las dimensiones del producto (Ballesteros, 2004).

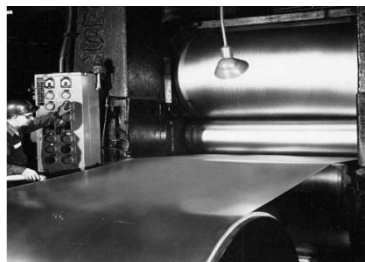


Figura 124.

Chapa de acero laminada en frío.

Fuente: (Smith, 2006)

Los productos resultantes suelen someterse a un proceso de lavado, a fin de eliminar cualquier resto de aceite, y de ahí se dirigen a los hornos de recocido, en los que se realizan calentamientos destinados principalmente a reducir las tensiones originadas por el proceso de deformación en frío (Ballesteros, 2004).

Además de los procesos de laminación, los de forja constituyen en el otro grupo más habitual de técnicas de conformado por deformación plástica, mediante la acción de esfuerzos de compresión. Pueden realizarse en frío o en caliente, si bien suelen producirse en caliente dado que el grado de deformación que se puede alcanzar en una sola etapa, es mucho mayor que el que se obtendrá en varias etapas de laminación (Ballesteros, 2004).

5.1.3 Forja

La forja es otro método primario de conformado de metales en formas útiles. En el proceso de forja, el metal es golpeado o comprimido hasta la forma deseada. Muchas operaciones de forja se llevan a cabo con el metal caliente, aunque en algunas ocasiones el metal puede forjarse en frío. Hay dos tipos principales de forja: con martillo y con prensa. En la forja con martillo, el martillo de la prensa golpea repetidamente contra la superficie del metal. En la forja con prensa, el metal está sujeto a una fuerza comprensiva que cambia lentamente (Smith, 2006).

5.1.3.1 Forja de matriz abierta

La forja en matriz abierta se lleva a cabo entre dos matrices planas o de forma muy simple, como cavidades semicirculares o en forma de v, y es particularmente útil para producir grandes piezas de acero para turbinas de vapor y generadores (Smith, 2006).

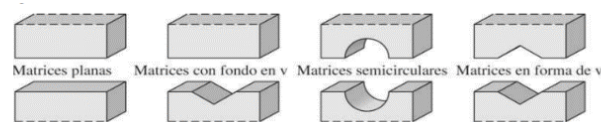


Figura 125.

Formas básicas de matrices abiertas.

Fuente: (Smith, 2006).

5.1.3.2 Forja de matriz cerrada

En la forja con matriz cerrada, el metal se coloca entre las dos partes de la matriz, una con la forma de la parte superior de la pieza que se desea obtener y otra con la parte inferior, y puede llevarse a cabo utilizando una sola matriz o un conjunto de matrices. A modo de ejemplo, las bielas utilizadas en motores de automóvil se fabrican utilizando un conjunto de matrices cerradas (Ballesteros, 2004)

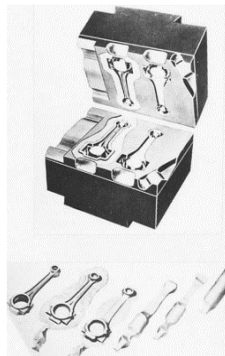


Figura 126.

Conjunto de matrices cerradas utilizado en la producción de bielas de automóvil

Fuente: (Smith, 2006)

5.1.4 Extrusión

Es un proceso de conformado plástico mediante el cual un material sometido a alta presión reduce su corte transversal cuando es forzado a pasar a través de una abertura o matriz de extrusión. Para muchos metales, el proceso de extrusión se utiliza para producir barras cilíndricas o tubos. En los materiales con mayor facilidad para la extrusión como aluminio, cobre y algunas de sus aleaciones, también es usual producir formas con corte transversal irregular. La mayoría de los metales se extruye en caliente porque la resistencia de la formación del metal es menor a que si lo fuera en frío. Durante la extrusión, el tocho de metal introducido en el contenedor de la prensa de extrusión es forzado por el pistón de la máquina a pasar a través de la matriz, de

tal modo que el metal es continuamente deformado para producir un perfil de gran longitud con el corte transversal deseado (Smith, 2006).

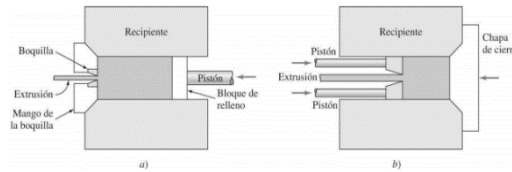


Figura 127.

Procesos básicos de extrusión en metales: a) directo y b) indirecto.

Fuente: (Smith, 2006)

Los dos principales procesos son la extrusión directa y extrusión indirecta. En la extrusión directa, el tocho de metal se coloca en el interior del contenedor de la prensa de extrusión y es forzado por el pistón a pasar a través de la matriz. En la extrusión indirecta, un pistón hueco empuja la matriz hacia el otro extremo del contenedor de la prensa de extrusión que está cerrado mediante una placa. Las fuerzas de fricción y la potencia necesaria en la extrusión indirecta son menores que en la extrusión directa. Sin embargo, la fuerza que puede aplicarse utilizando un pistón hueco en el proceso indirecto está mucho más limitada que la que puede utilizarse en la extrusión directa (Smith, 2006).

El proceso de la extrusión se utiliza principalmente para producir barras, tubos y formas irregulares de metales no ferrosos de bajo punto de fusión tales como aluminio, cobre y sus aleaciones. No obstante, con el desarrollo de prensas de extrusión de gran potencia y la optimización de lubricantes tales como el vidrio, algunos aceros al carbono y aceros inoxidable también se pueden extrudir en caliente (Smith, 2006).

5.1.5 Embutición

La embutición profunda es otro proceso de conformado metálico y se utiliza para fabricar artículos con forma de copa a partir de chapas de metal. La chapa de metal se coloca sobre una matriz con la forma adecuada y es presionada hacia el interior de la matriz por un punzón. Normalmente, se utiliza un anillo pisador para poder presionar el metal hacia el interior de la matriz sin que se arrugue o desgarre (Smith, 2006).

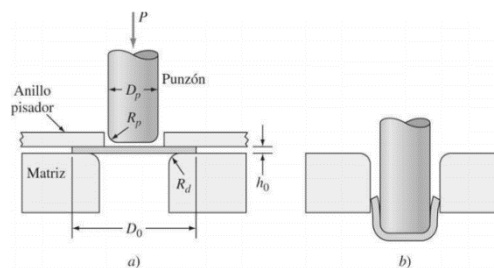


Figura 128.

Embutición profunda de un vaso cilíndrico a) antes de la embutición y b) después de la embutición.

Fuente: (Smith, 2006)

5.1.6 Trabajo o conformado según la temperatura

5.1.6.1 Trabajo en caliente

Los procesos de trabajos mecánicos que se realizan por encima de la temperatura de recristalización del metal se conocen como procesos de trabajo en caliente. Algunos metales, como el plomo y el estaño, tienen una baja temperatura de recristalización y se pueden trabajar en caliente incluso a temperatura ambiente, pero la

mayoría de los metales comerciales requieren un poco de calentamiento. Sin embargo, esta temperatura no debe ser demasiada alta para alcanzar la temperatura de solidificación, de lo contrario el metal se quemará y se volverá inadecuado para el calor extra después de trabajar en el crecimiento del grano (Singh, 2006).

El trabajo en caliente se favorece cuando se requieren grandes cantidades de deformación porque el material no se endurece en el trabajo, por lo que el material alcanza el estado estacionario con una tasa baja o cero acumulaciones de daños. La ausencia de endurecimiento por trabajo significa que los procesos de trabajo en caliente implican predominantemente compresión y corte y no tensión, ya que se requiere endurecimiento para estabilizar la deformación por tracción (Groza, 2007).

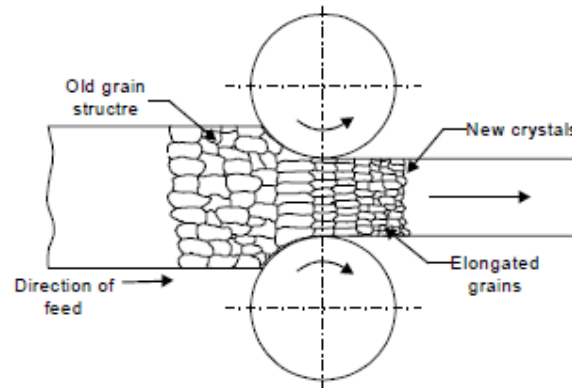


Figura 129.

Refinamiento del grano en el proceso de laminación en caliente.

Fuente: (Singh, 2006)

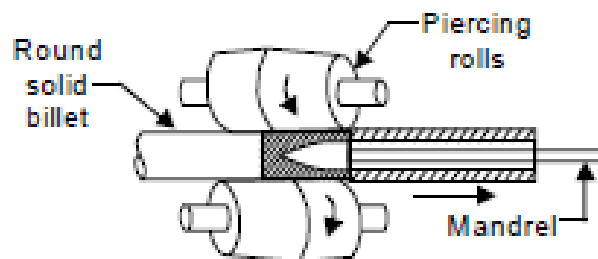


Figura 130.

Perforación en caliente o tubos sin costura.

Fuente: (Singh, 2006)

Varias son las ventajas del trabajo en caliente:

- Como el material está por encima de la temperatura de recristalización, se puede impartir cualquier cantidad de trabajo ya que no se produce endurecimiento por deformación.
- A una temperatura alta, el material tendrá mayor cantidad de ductilidad y, por lo tanto, no hay límite en la cantidad de trabajo en caliente que se puede realizar en un material. Incluso los materiales frágiles pueden ser trabajados en caliente.
- En el proceso de trabajo en caliente, la estructura del grano del metal se refina y así se mejoran las propiedades mecánicas.
- La porosidad del metal se minimiza considerablemente. Si el proceso se lleva a cabo correctamente, el trabajo en caliente no afecta la resistencia a la tracción, la dureza.

- Dado que la tensión de corte se reduce a temperaturas más altas, este proceso requiere mucha menos fuerza para lograr la deformación necesaria.
- La deformación más grande se puede lograr más rápidamente ya que el metal está en plástico (Singh, 2006).

Algunas de las desventajas del trabajo en caliente son:

- Debido a la alta temperatura en el trabajo en caliente, la oxidación rápida o la descarburación de la superficie y de la superficie tienen lugar en la superficie del metal, lo que conduce a un pobre acabado superficial y pérdida del metal.
- Debido a la pérdida de carbono de la superficie de la pieza de acero que se está trabajando, la capa superficial pierde su resistencia. Esta es una gran desventaja cuando la parte se pone al servicio.
- El debilitamiento de la capa superficial puede dar lugar a una fisura por fatiga que, en última instancia, puede dar como resultado una falla por fatiga del componente.
- Algunos metales no pueden ser trabajados en caliente debido a su fragilidad a altas temperaturas (Singh, 2006).

5.1.7 Trabajo en frío

El trabajo en frío de un metal se lleva a cabo con su temperatura de recristalización. Aunque normalmente se usan temperaturas ambiente normales para el trabajo en frío de varios tipos de acero, a veces se usan temperaturas hasta el rango de recristalización. En el trabajo en frío, los procesos de recuperación no son efectivos (Singh, 2006). Con los procesos de trabajo en frío implican una tensión significativa (como el trefilado), la cantidad de reducción está limitada por el comportamiento de endurecimiento del trabajo. Los procesos de deformación en frío que implica una gran tensión, evitan el esfuerzo de tracción y utiliza solo compresión y deslizamiento (Groza, 2007).

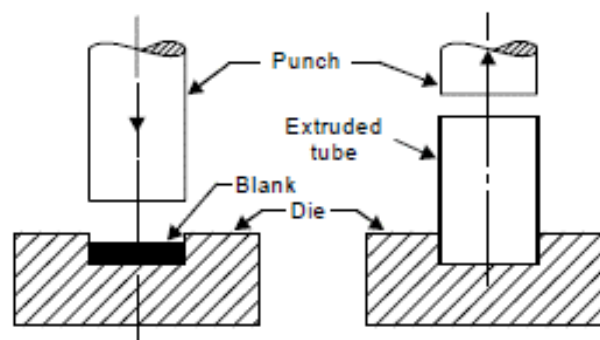


Figura 131.

Extrusión en frío.

Fuente: (Singh, 2006)

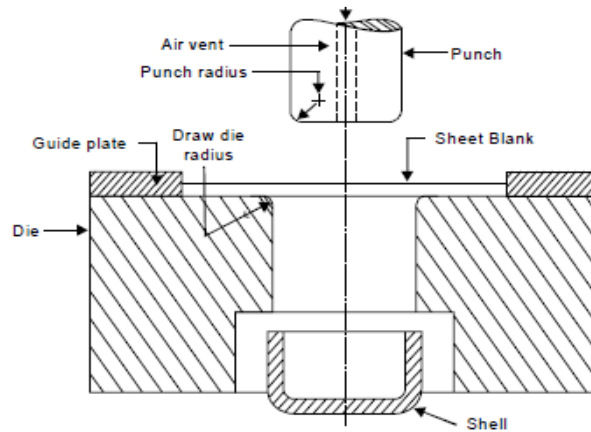


Figura 132.

Estirado en frío.

Fuente: (Singh, 2006).

5.1.7.1 Propósitos del trabajo en frío:

- El trabajo en frío se emplea para obtener un mejor acabado superficial en las piezas.
- Se aplican comúnmente para obtener mayores propiedades mecánicas.
- Se aplica ampliamente como un proceso de formación de productos de acero mediante prensado y centrifugado (Singh, 2006).

5.1.7.2 Ventajas del trabajo en frío:

- En el proceso de trabajo en frío, el acabado de la superficie lisa puede producirse fácilmente.
- Se pueden mantener las dimensiones exactas de las piezas.
- La resistencia y la dureza del metal se incrementan, pero la ductilidad disminuye.
- Como el trabajo se realiza en frío, no se formará óxido en la superficie y en consecuencia, se obtendrá un buen acabado superficial.
- El trabajo en frío aumenta la resistencia y la dureza del material debido al endurecimiento por tensión que sería beneficioso en algunas situaciones.
- No hay posibilidad de descarburación de la superficie.
- Se logra una mejor precisión dimensional.
- Es mucho más fácil manipular partes frías y también es económico para tamaños más pequeños.

5.1.7.3 Desventajas del trabajo en frío:

- Algunos materiales, que son frágiles, no se pueden trabajar en frío fácilmente.
- Dado que el material tiene una mayor resistencia a la fluencia a temperaturas más bajas, la cantidad de deformación que se puede aplicar está limitada por la capacidad de las prótesis o martillos usados.
- Una distorsión de la estructura del grano está creada.
- Como el material se endurece por deformación, la cantidad máxima de deformación que se puede administrar es limitada. Cualquier deformación adicional puede darse después del recocido.
- Se establecen tensiones internas que permanecen en el metal a menos que se eliminen mediante un tratamiento térmico (Singh, 2006).

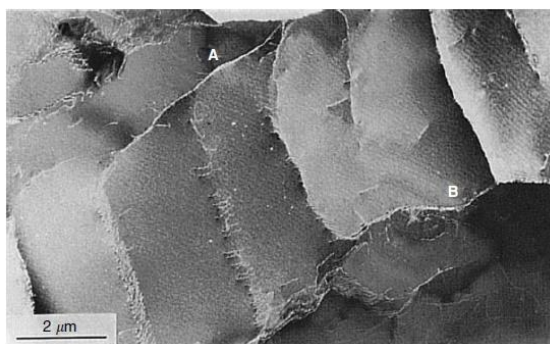


Figura 133.

Temp. de 99.98% al laminado en frío.

Fuente: (Groza, 2007)

5.1.8 Recristalización

Durante el proceso de deformación plástica en la formación de metal, se produce el flujo de plástico del metal y se cambian las formas de los granos. Si la deformación plástica se lleva a cabo a temperaturas más altas, los granos nuevos comienzan a crecer en el lugar de las tensiones internas causadas en el metal. Si la temperatura es suficientemente alta, la proa de los nuevos granos se acelera y continúa hasta que el metal se compone completamente de los nuevos granos. Este proceso de formación de nuevos granos se conoce como recristalización y se dice que se completa cuando la estructura metálica consiste en granos completamente nuevos (Singh, 2006).

5.1.8.1 Temperatura de recristalización

La temperatura a la que se completa la recristalización se conoce como la temperatura de recristalización del metal. Este es el punto que marca la diferencia entre los procesos de trabajo en frío y del proceso de trabajo en caliente. El trabajo mecánico de un metal por debajo de su temperatura de recristalización se denomina trabajo en frío y es logrado por encima de esta temperatura, pero debajo del punto de fusión o combustión se conoce como trabajo en caliente (Singh, 2006).

5.1.9. Recocido de recristalización

En la recristalización, la orientación del cristal de cualquier región en el material deformado se altera, quizá más de una vez. Esto es el resultado del paso a través del material de los límites de granos de gran ángulo. En la recristalización primaria, una población de nuevos granos esta nucleada, a menudo en los límites de grano de material deformado y estos crecen a expensas de la estructura deformada hasta que todo es consumido. A partir de entonces los límites de granos continúan migrando, pero más lentamente: esta etapa de canibalismo mutuo entre la nueva población de granos se denomina crecimiento de granos. El recocido de recristalización consta de las siguientes etapas (Cahn, 1996):

5.1.9.1 Recuperación

El término recuperación abarca todos los campos que no implican el barrido de la estructura deformada mediante la migración de los límites de grano de ángulo alto. La deformación plástica aumenta ligeramente la resistividad eléctrica. Se han hecho muchas investigaciones a las etapas por las cuales la resistencia eléctrica vuelve a su valor completamente recocido (Cahn, 1996).

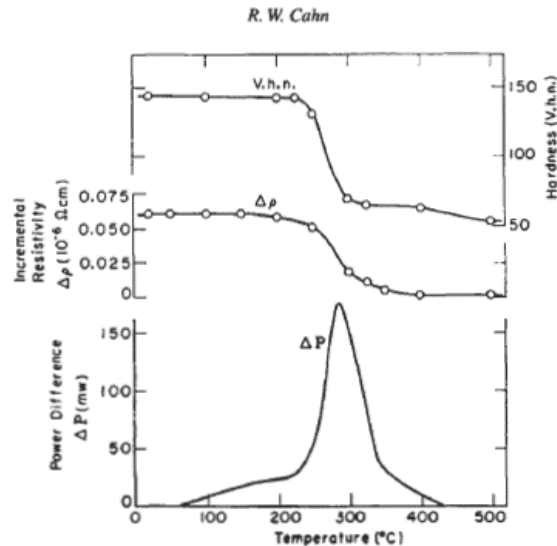


Figura 134.

Diferencia de potencial, que representa la energía liberada, durante el calentamiento uniforme de la varilla de cobre puro trezado plásticamente. Recuperación de resistividad y dureza también se muestra.

Fuente: (Cahn, 1996)

5.1.9.2 Leyes de recristalización

Una gran cantidad de información experimental sobre la recristalización primaria, que abarca más de setenta años, se puede resumir en las siguientes 6 leyes:

- Es necesaria una deformación mínima (crítica) para iniciar la recristalización.
- Cuanto menor es el grado de deformación, mayor es la temperatura requerida para iniciar la recristalización.
- Aumentar el tiempo de recocido disminuye la temperatura requerida para la recristalización.
- El tamaño final del grano depende principalmente del grado de deformación y en menor medida, de la temperatura de recocido, normalmente siendo más pequeño cuanto mayor es el grado de deformación y menor es la temperatura de recocido.
- Cuanto mayor sea el tamaño de grano original, mayor será la cantidad de deformación requerida para dar una temperatura y tiempo de recristalización equivalentes.
- La cantidad de deformación requerida para proporcionar un endurecimiento deformacional equivalente aumenta con la temperatura de trabajo creciente y por implicación, para un grado de deformación dado, una temperatura de trabajo superior implica un tamaño de grano recristalizado más grueso y una temperatura de recristalización superior.
- Los nuevos granos no crecen en granos deformados de orientación idéntica o ligeramente desviada, o en granos cercanos a una orientación doble.
- La recristalización se realiza si la temperatura de deformación se eleva dejando la pretensión igual, pero se acelera si, a mayor temperatura, el metal se esfuerza por la misma tensión.
- Calentamiento continuo, una vez que sea completado la recristalización primaria, hace que el tamaño de grano aumente (Cahn, 1996).

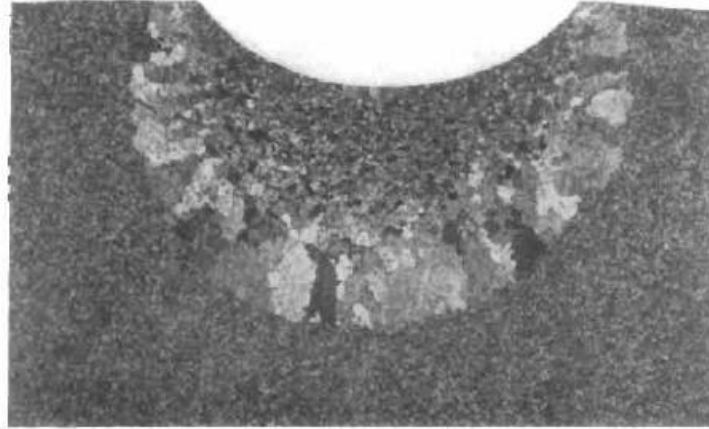


Figura 135.

Acero dulce forjado de bajo carbono, recocido e impreso con bola Brinelt (diámetro de 0.2mm), luego recocido 30min al 750°C el tamaño de grano es mayor justo dentro de la zona más allá de la cual la tensión crítica para la recristalización donde no se ha logrado del todo.

Fuente: (Cahn, 1996)

5.1.9.3 Nucleación del grano

Cualquier teoría de nucleación debe dar cuenta de las siguientes generalizaciones experimentales.

- Los núcleos se forman preferentemente en regiones donde el grado de deformación local es más alto, como límites de grano, bandas de deformación, inclusiones, intersecciones gemelas y superficies libres.
- La tasa de nucleación aumenta bruscamente al aumentar la tensión, por encima de una cantidad crítica mínima.
- Existe una amplia y concluyente evidencia de que las orientaciones de las regiones deformadas en las que se forman (Cahn, 1996).

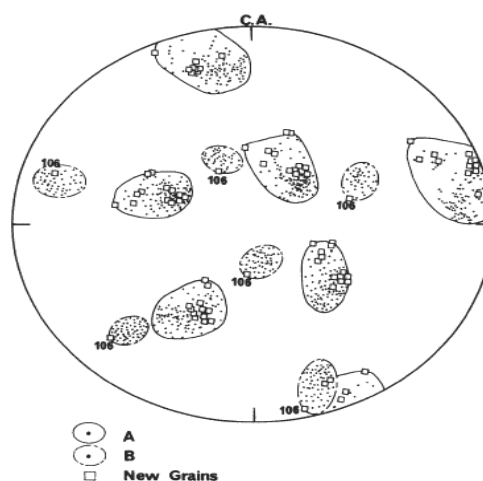


Figura 136.

Proyecciones estereográficas de las posiciones marcadas. Nuevos granos 106 tiene una orientación con la extensión de la banda de la matriz "b", mientras que los otros nuevos tienen una orientación "a".

Fuente: (Cahn, 1996)

5.1.9.4 Crecimiento de granos primarios

Está claro que la tasa de crecimiento de un grano nuevo en una estructura deformada es sensible a la orientación mutua de los dos granos y además que, para una orientación mutua dada, la tasa de crecimiento puede ser muy anisotrópica.

Una explicación alternativa, es que la tasa de crecimiento de un nuevo grano depende no solo de la orientación mutua de los granos nuevos y deformados, sino también de la inclinación de todos (Cahn, 1996).

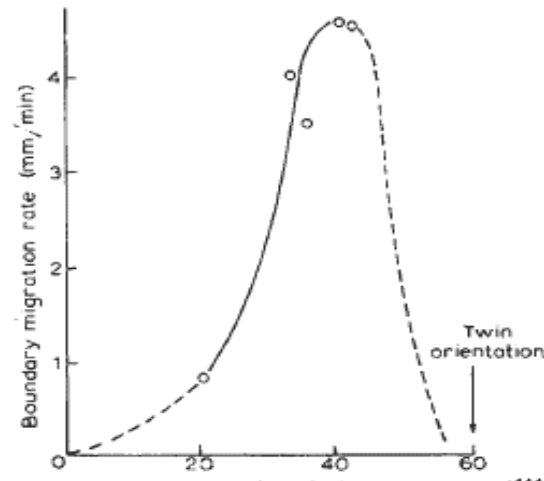


Figura 137.

Tasa de crecimiento de nuevos granos en un cristal de aluminio de 615°C. el eje común [111] es el mismo en el cristal deformado.

Fuente: (Cahn, 1996)

5.1.10 Trefilado

El trefilado de alambre es un proceso de conformado importante. En este caso, se reduce el diámetro de una barra o alambre inicial durante su paso a través de una o más matrices de prefijar. En el trefilado de alambre de acero se utiliza un injerto de carburo de wolframio insertado en una camisa de acero. El carburo aporta la resistencia al desgaste necesaria para la reducción del alambre de acero, pero es necesario asegurar que la superficie de la barra o alambre de acero de la barra o alambre inicial esté limpia y adecuadamente lubricada. Si el alambre endurece durante el procesado suele aplicarse un tratamiento térmico intermedio de reblandecimiento. Los procedimientos empleados varían considerablemente dependiendo del metal o aleación a trefilar, del diámetro final y propiedades mecánicas deseadas (Smith, 2006).

5.1.11 Soldadura

5.1.11.1 Métodos de unión de metales

Los métodos de unión de metales se pueden dividir en dos categorías principales, es decir, aquéllos basados en la aparición de fuerzas mecánicas macroscópicas entre las partes a ser unidas y aquéllos basados en fuerzas microscópicas (interatómicas o intermoleculares). En el primer caso, de la cual son ejemplos el atornillado y el remachado, la resistencia de la junta es dada por la resistencia al cizallamiento del tornillo o remache, más las fuerzas de fricción entre las superficies en contacto. En según el caso, la unión se logra por la aproximación de los átomos y moléculas de las partes a ser unidas o de éstas y un material intermedio, hasta distancias suficientemente pequeñas para la formación de conexiones metálicas y de Van Der Waals. Como ejemplos de esta categoría se citan a soldadura, soldadura y adhesivo (Modenesi, 2006).

5.1.11.2 Definición de soldadura

Un gran número de diferentes procesos utilizados en la fabricación y recuperación de piezas, equipos y estructuras está cubierto por el término soldadura. Clásicamente, la soldadura se considera un método de unión, sin embargo, muchos procesos de soldadura o variaciones de éstos, son usados para la deposición de material sobre una superficie, buscando la recuperación de piezas desgastadas o para la formación de un revestimiento con características especiales. Diferentes procesos relacionados con los de soldadura, se utilizan para el corte o para el recubrimiento de piezas. Diversos aspectos de estas operaciones de recubrimiento y corte son similares a la soldadura y por lo tanto, muchos aspectos de estos procesos se abordan junto con ésta (Modenesi, 2006).

5.1.11.3 Algunas definiciones de soldadura

- Proceso de unión de metales por fusión". (Se debe resaltar que no sólo los metales son soldables y que es posible soldar metales sin fusión).
- "Operación que busca obtener la unión de dos o más piezas, asegurando, en la junta soldada, la continuidad de propiedades físicas, químicas y metalúrgicas".
- "Operación que busca obtener la coalescencia localizada producida por el calentamiento hasta una temperatura adecuada, con o sin la aplicación de presión y de metal de adición. "(Definición adoptada por la AWS - American Welding Society).
- "Proceso de unión de materiales basado en el establecimiento, en la región de contacto entre los materiales que se unen, de fuerzas de unión química de naturaleza similar a las actuantes en el interior de los propios materiales."

5.1.11.4 Formación de una junta soldada

De una forma simplificada, una pieza metálica está formada por un gran número de átomos dispuestos en un arreglo espacial característico (estructura cristalina). Átomos localizados en el interior de esta estructura están rodeados por un número de vecinos más próximos, situados a una distancia r_0 , en la cual la energía del sistema es mínima (Modenesi, 2006).

En esta situación, cada átomo está en su condición de energía mínima, no tendiendo a ligarse con ningún átomo extra en la superficie del sólido, sin embargo, esta situación no se mantiene, pues los átomos están conectados a menos vecinos, por lo tanto, poseen un mayor nivel de energía que los átomos en su interior. Esta energía puede reducirse cuando los átomos superficiales se unen a otros. Así, aproximándose dos piezas metálicas a una distancia suficientemente pequeña para la formación de un enlace permanente, se formaría una soldadura entre las piezas, como se ilustra en la *Figura 139*. Este tipo de efecto puede obtenerse, por ejemplo, poniéndose en contacto íntimo dos bloques de hielo (Modenesi, 2006).

Sin embargo, se sabe que esto no ocurre para dos piezas metálicas, excepto en condiciones muy especial. La explicación para esto está en la existencia de obstáculos que impiden una aproximación efectiva de las superficies hasta distancias del orden de r_0 ; incluso una superficie con un acabado cuidadoso presenta irregularidades del orden de 50nm de altura, cerca de 200 capas atómicas. Esto impide una aproximación efectiva de las superficies, lo que ocurre sólo en unos pocos puntos de contacto, de modo que el número de conexiones formadas es insuficiente para garantizar cualquier resistencia a la junta (Modenesi, 2006).

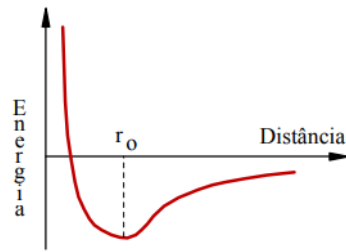


Figura 138.

Variación de la energía potencial.

Fuente: (Modenesi, 2006)

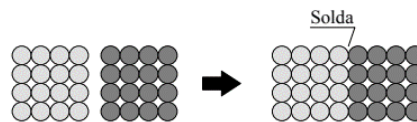


Figura 139.

Formación teórica de una soldadura.

Fuente: (Modenesi, 2006)

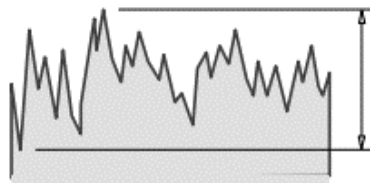


Figura 140.

Representación esquemática de la superficie metálica limpia (200 capas atómicas o 500 ángulos).

Fuente: (Modenesi, 2006)

Las superficies metálicas están normalmente recubiertas por capas de óxidos, humedad, grasa, polvo, entre otros, lo que impide un contacto real entre las superficies, previniendo formación de la soldadura. Estas capas se forman rápidamente y resultan exactamente de la existencia de vínculos químicos incompletos en la superficie (Modenesi, 2006).

Dos métodos principales se utilizan para superar estos obstáculos, que originan los dos grandes grupos de procesos de soldadura. El primero consiste en deformar las superficies del contacto permitiendo la aproximación de los átomos a distancias de la orden de r_0 . Las piezas pueden calentarse localmente para facilitar la deformación de las superficies de contacto (Modenesi, 2006).

El segundo método se basa en la aplicación localizada de calor en la región de unión hasta su fusión y del metal de adición (cuando se utiliza), destruyendo las superficies de contacto y produciendo la unión por la solidificación del metal fundido.

De tal manera, una forma de clasificación de los procesos de soldadura consiste en agruparlos en dos grandes grupos que se basan en el método dominante para producir la soldadura: (a) procesos de soldadura por presión (o por deformación) y procesos de soldadura por fusión (Modenesi, 2006).

5.1.11.5 Procesos de soldadura

Hay un gran número de procesos por fusión que se pueden separar en sub-grupos, por ejemplo, de acuerdo con el tipo de fuente de energía utilizada para fundir las piezas. Entre estos, los procesos de soldadura por arco (fuente de energía: arco eléctrico) son los de mayor importancia industrial en la actualidad. Debido a la tendencia de reacción del material fundido con los gases, la mayoría de los procesos de soldadura por fusión utilizan algún medio de protección para minimizar estas reacciones (Modenesi, 2006).

Procesos de soldadura por presión o por deformación:

Este primer grupo incluye los procesos de soldadura por ultrasonido, por fricción, por forja, por resistencia eléctrica, por difusión, por explosión, entre otros. Diversos de estos procesos, como, por ejemplo, los procesos de soldadura por resistencia presentan características intermedias entre los procesos de soldadura por fusión y por deformación. A efectos de clasificación, estos procesos se incluirán en este grupo (Modenesi, 2006).

Algunos de los procesos de soldadura y procesos relacionados de importancia en la industria serán discutidos de una forma reducida a continuación. Sin embargo, se debe plantear que este es un tema extenso e importante, existiendo una amplia bibliografía sobre el asunto. Para un estudio complementario, más profundizado, de los procesos de soldadura, consultar la bibliografía citada al final de este texto (Modenesi, 2006).

Procesos de soldadura por fusión:

Soldadura de arco:

La soldadura de arco incluye un gran número de procesos que incluyen los de mayor utilización industrial. Todos estos procesos utilizan, como fuente de calor para la fusión localizada, el arco que es una descarga eléctrica en un medio gaseoso parcialmente ionizado (Modenesi, 2006).

En la mayoría de los casos, el arco eléctrico se mantiene entre un electrodo cilíndrico y el metal base, existiendo, sin embargo, procesos en que el metal base no forma parte del circuito eléctrico o que utilizan electrodos de diferentes formas o varios electrodos simultáneamente.

En general, el electrodo se funde por el arco y suministra el metal de adición para la soldadura (soldadura con electrodos consumibles), existiendo sin embargo, procesos en que el electrodo (en general, de tungsteno o grafito) no se funde de forma apreciable (soldadura con electrodos no consumibles) (Modenesi, 2006).

En los procesos de soldadura por arco, la cantidad de calor suministrada a la junta y, por lo tanto, dimensiones y el formato del cordón de soldadura dependen de la corriente y la tensión eléctrica suministrada por el arco y, en la gran mayoría de los procesos de la velocidad de soldadura (es decir, la velocidad con que el arco se desplaza a lo largo de la junta) (Modenesi, 2006).

Soldadura con electrodos recubiertos:

La soldadura con electrodos recubiertos (Shielded Metal Arc Welding - SMAW), es el proceso en el cual la coalescencia (unión) de los metales es obtenida por el calentamiento de éstos con un arco establecido entre un electrodo especial revestido y la pieza. El electrodo está formado por un electrodo núcleo metálico ("alma"), con 250 a 500 mm de longitud, revestido por una capa de minerales (arcilla, fluoruros, carbonatos, etc.) y / u otros materiales (celulosa, hierro aleaciones, etc.), con un diámetro total típico entre 2 y 8mm. El alma del electrodo conduce la corriente eléctrica y sirve como metal de adición. El revestimiento genera escoria y gases que protegen de la atmósfera a la región, siendo soldada y estabiliza el arco (Modenesi, 2006).

Su equipo habitual consiste en una fuente de energía (o máquina de soldadura), porta-electrodo y cables, además de equipos de seguridad para el soldador (máscara, guantes, delantal, etc.) y para la limpieza del cordón y remoción de escoria (picadora y cepillo de acero). Para la soldadura, la parte no revestida del electrodo se fija en el puerto electrodo y el arco se inicia tocando rápidamente la punta del electrodo con la pieza (que está conectado, por cables, a los terminales de la máquina de soldadura).

El calor del arco funde la punta del electrodo y un pequeño volumen del metal de base formando el charco de fusión. La soldadura se realiza manualmente, con el soldador controlando la longitud del arco y el charco de fusión (por la manipulación del electrodo) y desplazando el electrodo a lo largo de la junta. Cuando el electrodo es casi todo consumido, el proceso se interrumpe para cambiar del electrodo y remoción de escoria de la región donde la soldadura será continuada (Modenesi, 2006).

5.2 Propiedades mecánicas

5.2.1 Introducción

El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (ósea su deformación). Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan realizando ensayos cuidadosos de laboratorio que reproducen las condiciones de servicio hasta donde sea posible. Los factores que deben considerarse son la naturaleza de la carga aplicada, su duración, así como las condiciones del medio. La carga puede ser una tracción, una compresión o una cizalladura y su magnitud, puede ser constante con el tiempo o bien fluctuar continuamente.

El tiempo de aplicación puede ser de sólo una fracción de segundo o durar un período de varios años. La temperatura de servicio puede ser un factor importante (Callister).

5.2.2 Concepto de esfuerzo y deformación

Si una carga es estática o bien cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección o superficie de una pieza, el comportamiento mecánico puede ser estimado mediante un simple ensayo esfuerzo o deformación. Con metales, este ensayo se realiza normalmente a temperatura ambiente. Existen tres principales maneras de aplicar la carga: tracción, compresión y cizalladura. En las aplicaciones de ingeniería, muchas cargas son torsionales más que de cizalladura pura (Callister).

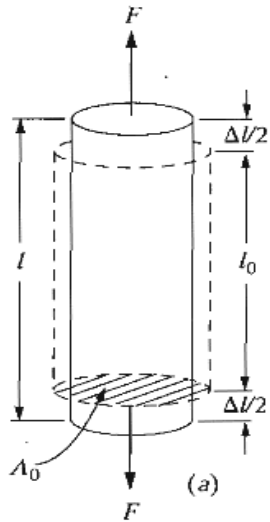


Figura 141.

Ilustración esquemática de como una carga de tracción produce un alargamiento y una deformación lineal positiva. Las líneas discontinuas representan la forma antes de la Deformación; las líneas sólidas después de la deformación.

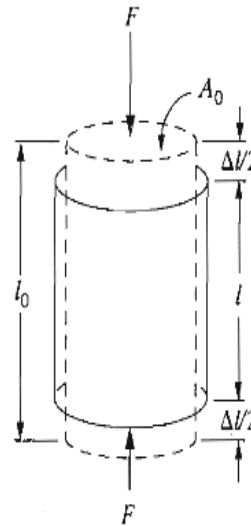


Figura 142.

Ilustración esquemática de como una carga de compresión produce una contracción y una deformación lineal negativa.

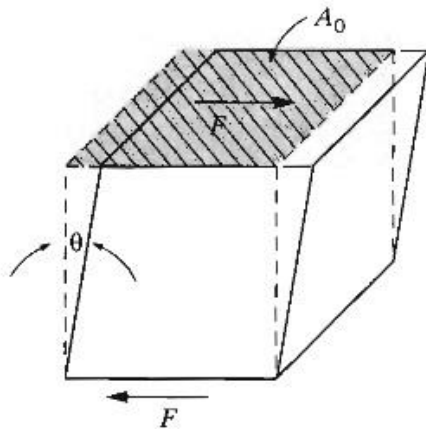


Figura 143.

Representación esquemática de la deformación de cizalladura.

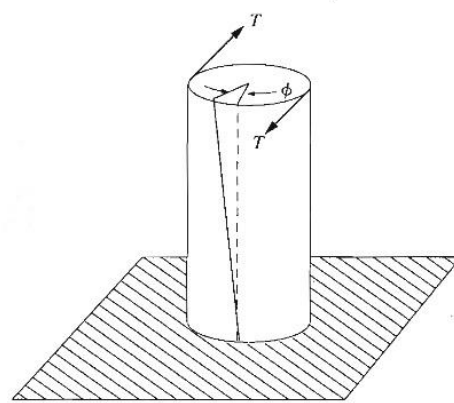


Figura 144.

Representación esquemática de una deformación torsional (ósea un ángulo Θ) Producida por un par aplicado T.

Fuente: (Callister)

5.2.3 Ensayos de tracción

Uno de los ensayos mecánicos más comunes en el diagrama esfuerzo deformación es el realizado a tracción. Tal como se expondrá más adelante; el ensayo de tracción puede ser utilizado para determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño. Normalmente se deforma una probeta hasta la rotura, con una carga de tracción que aumenta gradualmente y que es aplicada uniaxialmente a lo largo del eje de la probeta. En la *Figura 146*, se muestra una probeta de tracción normalizada (Hayden, 1965).

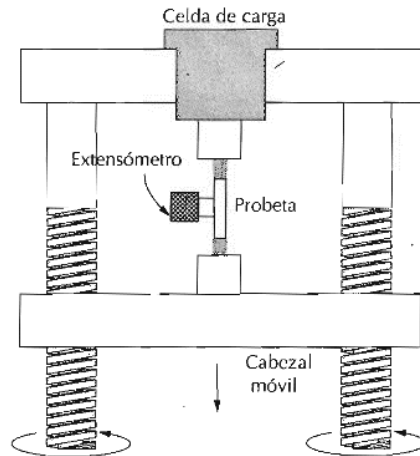


Figura 145.

Esquema del aparato utilizado para realizar el ensayo de tracción. La probeta es alargada por el cabezal móvil; La celda de la carga y el extensómetro miden, respectivamente, la carga aplicada y el alargamiento.

Fuente: (Hayden 1965)

Generalmente la sección de la probeta es circular, pero también se utilizan de sección rectangular. Durante el ensayo, la deformación está confinada en la región más estrecha del centro, la cual tiene una sección uniforme a lo largo de su longitud. La probeta se monta con sus extremos en las mordazas de la máquina de ensayos.

El ensayo dura varios minutos y es destructivo, es decir, la probeta de ensayo es deformada permanente y muy a menudo rota. El resultado del ensayo de tracción se registra en una banda de papel como carga en función del alargamiento. Para minimizar estos factores, la carga y el alargamiento son normalizados para obtener los parámetros tensión nominal y deformación nominal.

La tensión nominal por unidad de área se calcula mediante la relación

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5 - 1)$$

Donde:

F= Es la carga instantánea aplicada perpendicularmente a la sección de la probeta, en unidades de newtons (N).

A₀= Es el área de la sección original antes de aplicar la carga en m² o plg²

Las unidades de la tensión nominal son: pascuales o mega pascuales **MPa** o **psi**.

La deformación nominal se denomina mediante la relación:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5 - 2)$$

Donde:

l₀ = Es la longitud original antes de aplicar la fuerza.

l_i= Es la longitud instantánea.

Δl= Es el alargamiento producido por la deformación.

La deformación nominal no tiene unidades por lo que se expresa como porcentaje, esto es el valor de la deformación multiplicado por 100.

5.2.4 Ensayos de compresión

Los ensayos de compresión-deformación, se realizan si las fuerzas que operan en servicio son de este tipo. Un ensayo de compresión se realiza de forma similar a un ensayo de tracción, excepto que la fuerza es compresiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. Por convención, una fuerza de compresión se considera negativa y por tanto, produce un esfuerzo negativo (Callister).

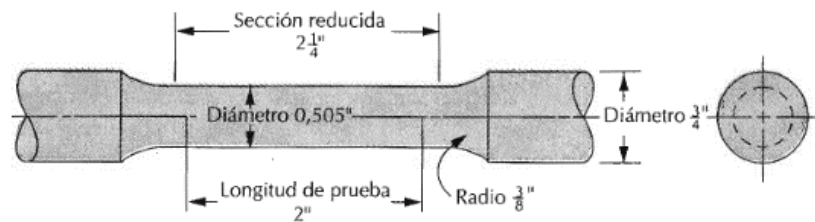


Figura 146.

Probeta de tracción normalizada con sección circular.

Fuente: (Callister)

Los ensayos de compresión se utilizan cuando se desea conocer el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes (es decir plásticas), tal como ocurren en los procesos de conformación, o bien cuando tiene un comportamiento frágil a tracción (Callister).

Ensayos de cizalladura y de torsión

En los ensayos en que se utiliza simplemente una fuerza de cizalladura, la tensión de cizalladura por unidad de área o presión de cizalladura τ , se calcula de acuerdo con:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (5 - 3)$$

Donde:

F= Es la carga o fuerza impuesta paralelamente a las caras superior e inferior, cada una de las cuales tiene un área A_0 .

La deformación de cizalladura γ se define como la tangente del ángulo de deformación. Las unidades de tensión y deformación de cizalladura son las mismas que las correspondientes de tracción. De las ecuaciones (5-1) y (5-2), observamos que la tensión y deformación de cizalladura tienen unidades de fuerza por unidad de área (presión).

En el Sistema Internacional 1Mpa= 145 psi del antiguo sistema anglosajón de unidades

La torsión es una variación de la cizalladura pura, mediante la cual un miembro estructural es deformado; las fuerzas de torsión producen un movimiento rotacional alrededor del eje longitudinal de un extremo del miembro respecto al otro extremo (Callister).

Ejemplos de torsión se encuentran en el caso de ejes de máquinas y ejes impulsores y también en brocas. Los ensayos de torsión generalmente se realizan sobre cilindros sólidos, o bien sobre tubos. La tensión de cizalladura τ en función del par aplicado T , mientras que la deformación de cizalladura γ está relacionada con el ángulo de giro ϕ de la *Figura 144* (Callister).

5.2.5 Deformación elástica

5.2.5.1 Comportamiento bajo cargas uniaxiales

El grado con que una estructura se deforma depende de la magnitud de la tensión impuesta. Para muchos metales sometidos a esfuerzos de tracción pequeños, la tensión por unidad de área y deformación son proporcionales según la relación:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5 - 4)$$

donde la deformación lineal ϵ es la tasa de variación longitudinal, definida como: $\epsilon = \Delta L/L$, siendo L la longitud inicial del material. Esta relación se conoce con el nombre de Ley de Hooke y la constante de proporcionalidad (E) está dada en MPa. En este caso, es el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young (Callister, s.f.). En base a esto, se hace necesario definir el coeficiente de Poisson, el cual es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de un material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Su valor es el cociente entre la deformación transversal entre la deformación longitudinal por lo que resulta 1 para materiales plásticos y 0 para materiales indeformables ideales

Tabla 18.

Módulos de elasticidad y de cizalladura a temperatura ambiente y coeficiente de Poisson para varios metales y aleaciones.

Metal o Aleación	Módulo de Elasticidad		Módulo de Cizalladura		Coeficiente de Poisson
	Psi*10 ⁶	MPa*10 ⁴	psi*10 ⁶	MPa*10 ⁴	
Aluminio	10	6,9	3,8	2,6	0,33
Latón	14,6	10,1	5,4	3,7	0,35
Cobre	16	11	6,7	4,6	0,35
Magnesio	6,5	4,5	2,5	1,7	0,29
Níquel	30	20,7	11	7,6	0,31
Acero	30	10	12	8,3	0,27
Titanio	15,5	10,7	6,5	4,5	0,36
Tungsteno	59	40,7	23,2	16	0,28

Cuando se cumple que la deformación es proporcional a la tensión, la deformación se denomina deformación elástica; al representar la tensión en el eje de ordenadas en función de la deformación en el eje de abscisas se obtiene una relación lineal, tal como se muestra en la *Figura 147*. La pendiente de este segmento lineal corresponde al módulo de elasticidad E. Este módulo puede ser interpretado como la rigidez, o como la resistencia de un material a la deformación elástica. Cuanto mayor es el módulo, más rígido es el material, es decir, menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada tensión. El módulo es un parámetro de diseño importante utilizado en el cálculo de las deformaciones (Callister).



Figura 147.

Diagrama esquemático tensión- deformación con deformación elástica lineal para ciclos de carga- descarga.

Fuente: (Callister).

Existen algunos materiales (por ejemplo: fundición gris y hormigón) para los cuales. Esta porción elástica inicial del diagrama tensión-deformación no es lineal (Figura 148); por tanto, no es posible determinar un módulo de elasticidad tal como ha sido descrito anteriormente (Callister).

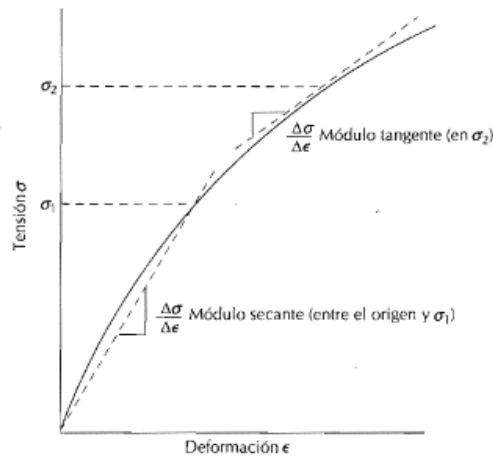


Figura 148.

Diagrama esquemático tensión - deformación mostrando comportamiento elástico no lineal y cómo se determinan los módulos secante y tangente.

Fuente: (Callister)

5.2.5.2 Inelasticidad

Hasta ahora se ha supuesto que la deformación elástica era independiente del tiempo, esto es: una tensión aplicada producía una deformación elástica instantánea que permanecía constante durante el tiempo que se mantenía aplicada la carga. También se ha supuesto que al retirar la carga, la deformación se recuperaba totalmente, se entiende entonces que, la deformación volvía a cero de forma instantánea en muchos materiales de ingeniería, sin embargo, existe una componente de la deformación elástica que depende del tiempo; es decir, la deformación elástica continúa aumentando después de aplicar la carga y al retirar la carga se requiere que transcurra algún tiempo para que el material se recupere completamente. Este comportamiento elástico dependiente del tiempo se denomina inelasticidad y es causado por la dependencia del tiempo de los mecanismos microscópicos que tienen lugar cuando el material se deforma (Callister).

5.2.6 Resistencia a la tracción

Después de iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo, punto M en la *Figura 149* y después disminuye hasta que finalmente se produce la fractura, punto F. La resistencia a la tracción (MPa o Psi) es la tensión máxima del diagrama tensión-deformación nominales (*Figura 149*). Esto corresponde a la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción; si esta tensión es aplicada y mantenida, se producirá la rotura. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la región estrecha de la probeta. Sin embargo, cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina estricción o cuello y toda la deformación subsiguiente está confinada en la estricción, tal como se indica esquemáticamente en la *Figura 149*. La fractura ocurre en la estricción. La tensión de fractura o bien de rotura corresponde a la tensión en la fractura (Callister).

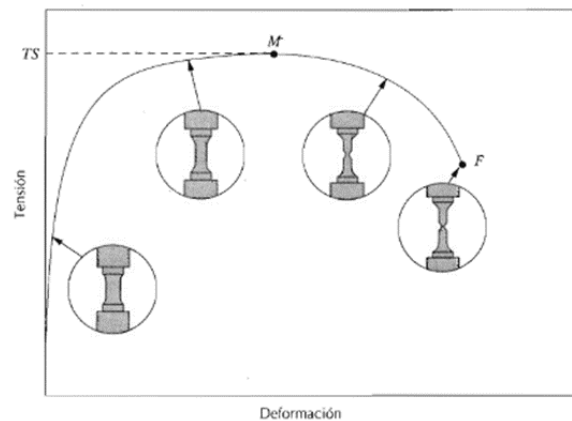


Figura 149.

Curva típica de tracción hasta la fractura, punto f. La resistencia a tracción está indicada en el punto m. Los insertos circulares representan la geometría de la probeta deformada en varios puntos de la curva.

Fuente: (Callister).

Las resistencias a la tracción pueden variar entre 50 MPa (7000 Psi) para un aluminio hasta valores tan altos como 3000 MPa (450000 Psi) para aceros de alta resistencia.

Debe indicarse que para poder observar este fenómeno, se debe utilizar una máquina de ensayos “rígida”; por “rígida” queremos decir que existe muy poca deformación elástica en la máquina durante la aplicación de la carga (Callister).

5.2.6.1 Ductilidad

La ductilidad es otra importante propiedad mecánica. Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil. El diagrama tensión-deformación para materiales dúctiles y para materiales frágiles se ilustran esquemáticamente en la *Figura 150*. La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como alargamiento relativo porcentual, o bien mediante el porcentaje de reducción de área (Callister).

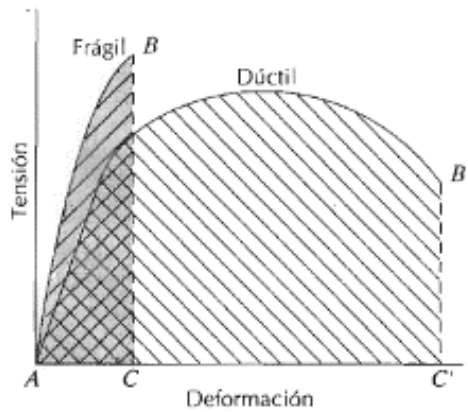


Figura 150.

Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura.

Fuente: (Callister, s.f.)

El alargamiento relativo porcentual a rotura, %EL, es el porcentaje de deformación plástica a rotura, o bien:

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \quad (5 - 5)$$

Donde:

l_f = Es la longitud en el momento de la fractura

l_o = Es la longitud original de la probeta antes de la deformación o rotura.

La magnitud de %EL dependerá de la longitud de prueba de la probeta. Cuanto más corta sea l_o mayor será la fracción del alargamiento total que proviene de la estricción y por consiguiente, mayor será el valor de %EL (Callister).

Tabla 19.

Propiedades mecánicas típicas de varios metales en el estado de recocido y de pureza comercial.

Metal	Límite Elástico Psi(MPa)	Resistencia a la tracción Psi (MPa)	Ductilidad plg. ^2)	%EL (en
Oro	---	19000 (130)	45	
Aluminio	4000 (28)	10000 (69)	45	
Cobre	10000 (69)	29000 (200)	45	
Acero	19000 (130)	38000 (262)	45	
Níquel	20000 (138)	70000 (480)	40	
Titanio	35000 (240)	48000 (330)	30	
Molibdeno	82000 (565)	95000 (655)	35	

5.2.7 Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar. La propiedad asociada se denomina módulo de resiliencia U_r , que es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico.

Matemáticamente el módulo de resiliencia de una probeta sometida a una carga uniaxial, es justamente el área bajo la curva tensión-deformación hasta la fluencia (Callister).

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon \quad (5 - 6)$$

Donde:

ϵ_y = Es la deformación en el límite elástico.

Las unidades de resiliencia es el Pascal (Pa). Para un material elástico lineal, la resiliencia puede ser calculada por medio de la ecuación:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma \epsilon_y^2$$

De donde resulta que la resiliencia es la densidad volumétrica de energía de deformación. Valores típicos son: la teta de araña (4500 kJ/m^3), el tendón humano (2800 kJ/m^3), el cuerno de mamíferos (1800 kJ/m^3) y el acero en (900 kJ/m^3)

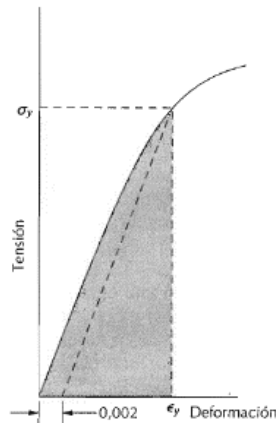


Figura 151.

Esquema donde se indica cómo se obtiene el módulo de resiliencia (correspondiente al área sombreada) a partir de la curva de tracción.

Fuente: (Callister)

5.2.8 Tenacidad

La tenacidad de un material es un término mecánico que se utiliza en varios contextos; en un amplio sentido, es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura. La geometría de la probeta, así como la manera con que se aplica la carga son importantes en la determinación de la tenacidad (Callister).

5.2.9 Dureza

Otra propiedad mecánica que puede ser sumamente importante considerar es la dureza, la cual es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada (por ejemplo, una pequeña abolladura o ralladura). Los primeros ensayos de dureza, se basaban en el comportamiento de los minerales junto con una escala construida según la capacidad de un material para rayar a otro más blando. Un método cualitativo de ordenar de forma arbitraria la dureza es ampliamente conocido y se denomina escala de Mohs, la cual va desde 1 en el extremo blando para el talco hasta 10 para el diamante. A lo largo de los años se han ido desarrollando técnicas cuantitativas de dureza, que se basan en un pequeño penetrador que es forzado sobre

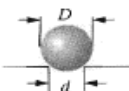

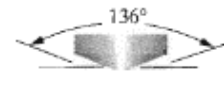

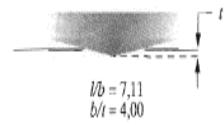
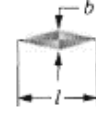
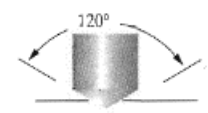



una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga. En estos ensayos, se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella y menor es el número de dureza (Callister).

5.2.9.1 Ensayos de dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar virtualmente cualquier metal o aleación desde el más duro hacia el más blando. Los penetradores son bolas esféricas de acero endurecido que tienen diámetros de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 plg. (1,588; 3,175; 6,350 y 12,70 mm) y un penetrador cónico de diamante (Brale), el cual se utiliza para los materiales más duros.

Con este sistema, se determina un número de dureza a partir de la diferencia de profundidad de penetración que resulta al aplicar primero una carga inicial pequeña y después una carga mayor; la utilización de la carga pequeña aumenta la exactitud de la medida. Basándose en la magnitud de las cargas mayores y menores, existen dos tipos de ensayo: Rockwell y Rockwell superficial. En el ensayo de Rockwell, la carga menor es de 10 kg, mientras las cargas mayores son 60, 100 y 150 kg (Callister).

Tabla 20.
Técnicas de ensayo de dureza.

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula para el número de la dureza
		Vista lateral	Vista Superior		
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o de carburo de tungsteno			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza a Vickers	Pirámide de diamante			P	$HV = 1.854 \frac{P}{d^2}$
Microdureza a Knoop	Pirámide de diamante			P	$HK = 14.2 \frac{P}{l^2}$
Rockwell y Rockwell superficial	Cono de diamante y Esfera de acero de 1/16; 1/8; 1/4; 1/2 pulgadas de diámetro				$\left. \begin{matrix} 60 \text{ Kg} \\ 100 \text{ Kg} \\ 150 \text{ Kg} \end{matrix} \right\} \text{Rockwell}$
					$\left. \begin{matrix} 15 \text{ Kg} \\ 30 \text{ Kg} \\ 45 \text{ Kg} \end{matrix} \right\} \text{Rockwell Superficial}$

Cada escala está representada por una letra del alfabeto, se indican varias de estas escalas junto con los penetradores y cargas correspondientes. Para ensayos superficiales, la carga menor es de 3 kg, mientras que el

valor de la carga mayor puede ser 15, 30 ó 45 kg. Estas escalas se identifican mediante un número (15, 30 ó 45, según la carga) y una letra (N, T, W o Y, según el penetrador).

Tabla 21.
Escalas de dureza Rockwell.

Símbolo de la escala	Penetrador	Carga mayor (Kg)
A	Diamante	60
B	Bola de 1/16 pulg	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Bola de 1/8 pulg	100
F	Bola de 1/16 pulg	60
G	Bola de 1/16 pulg	150
H	Bola de 1/8 pulg	60
K	Bola de 1/8 pulg	150

Tabla 22.
Escalas de dureza Rockwell superficial.

Símbolo de la escala	Penetrador	Carga mayor (Kg)
15N	Diamante	15
30N	Diamante	30
45N	Diamante	45
15T	Bola de 1/16 pulg	15
30T	Bola de 1/16 pulg	30
45T	Bola de 1/16 pulg	45
15W	Bola de 1/8 pulg	15
30W	Bola de 1/8 pulg	30
45W	Bola de 1/8 pulg	45

Los equipos modernos para la medida de la dureza Rockwell están automatizados y son de muy fácil utilización; la dureza es medida directamente y cada medida requiere únicamente unos pocos segundos (Callister).

5.2.9.2 Ensayos de dureza Brinell

En los ensayos de dureza Brinell así como en las durezas Rockwell, se fuerza un penetrador duro esférico en la superficie del metal a ensayar. El diámetro del penetrador de acero endurecido (o bien de carburo de tungsteno) es de 10,00 mm (0,394 plg.). Las cargas normalizadas están comprendidas entre 500 y 3000 kg en incrementos de 500 kg; durante un ensayo, la carga se mantiene constante durante un tiempo especificado (entre 10 y 30 s). Los materiales más duros requieren cargas mayores. El número de dureza Brinell, HB, es una función de tanto la magnitud de la carga como del diámetro de la huella resultante (Tabla 20).

Este diámetro se mide con una lupa de pocos aumentos, que tiene una escala graduada en el ocular. El diámetro medido es entonces convertido a número HB aproximado usando una tabla; en esta técnica solamente se utiliza una escala.

Los requerimientos de espesor de la muestra de posición de la huella (relativa a los bordes de la muestra) y de separación mínima entre huellas, son los mismos que en los ensayos Rockwell. Además, se necesita una huella bien definida, lo cual exige que la superficie sobre la cual se realiza la huella sea perfectamente lisa (Callister).

5.2.9.3 Ensayos de microdureza Vickers y Knoop

Otras dos técnicas de ensayo son la dureza Knoop y la dureza Vickers (también a veces denominado pirámide de diamante). En estos ensayos, un penetrador de diamante muy pequeño y de geometría piramidal es forzado en la superficie de la muestra. Las cargas aplicadas, mucho menores que en las técnicas Brinell y Rockwell, están comprendidas entre 1 y 1000 g. La marca resultante se observa en el microscopio y se mide esta medida, es entonces convertida en un número de dureza (Tabla 20). Es necesario que la superficie de la muestra haya sido preparada cuidadosamente mediante desbaste y pulida para poder asegurar una huella que pueda ser medida con exactitud. Las durezas Knoop y Vickers se designan por HK y HV respectivamente y las escalas de dureza para ambas técnicas son aproximadamente equivalentes. Las técnicas Knoop y Vickers se consideran ensayos de microdureza debido a la magnitud de la carga y al tamaño del penetrador. Ambas son muy convenientes para la medida de la dureza de pequeñas regiones seleccionadas en la superficie de la muestra; además, ambas técnicas Knoop y Vickers son utilizadas para el ensayo de materiales frágiles, tales como los cerámicos (Hayden, 1965).

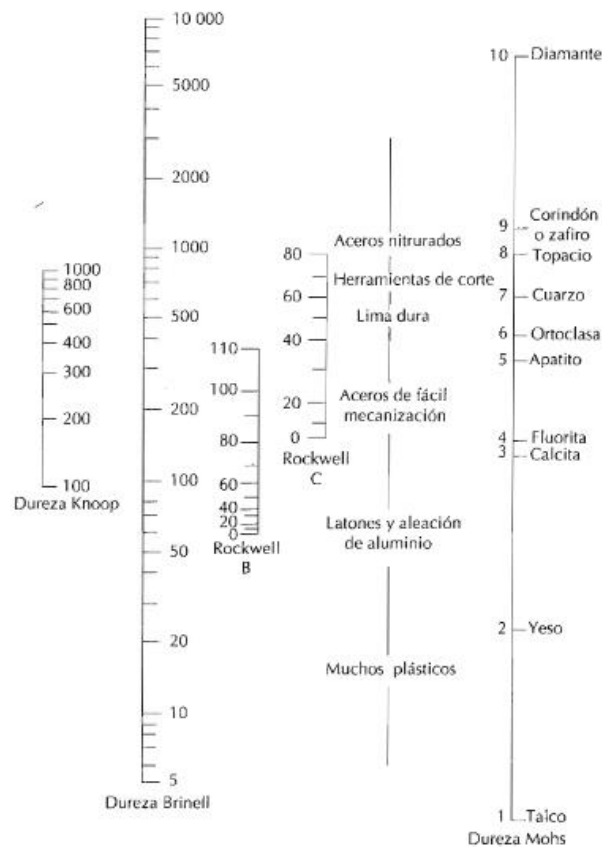


Figura 152.

Comparación de las varias escalas de dureza.

Fuente: (Hayden, 1965)

5.2.10 Ejercicios de aplicación en resistencia de materiales

5.2.10.1 Introducción

La mecánica de materiales es una rama de la mecánica que estudia las relaciones entre las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable y la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro del cuerpo. Tanto el análisis como el diseño de una estructura dada involucran la determinación de esfuerzos y deformaciones.

En el diseño de cualquier estructura, se hace necesario utilizar la estática para poder determinar las fuerzas internas que actúan en elementos, el tamaño de dichos elementos, sus deflexiones y su equilibrio no solo dependen de las cargas internas sino también del tipo de material que se ha construido.

Dentro de la ingeniería industrial es muy importante conocer y entender el comportamiento de los materiales sometidos a cargas externas. Englobando las principales cargas actuantes internas como son fuerzas axiales, cortantes, momentos torsores y flexionantes y poder analizar en un campo cuantitativo la resistencia a sus respectivos esfuerzos. El objetivo es poder obtener una certeza de que una construcción o ensamble dentro del campo de la ingeniería industrial, garantice su funcionalidad y seguridad ante accidentes laborales.

5.2.10.2 Equilibrio de cuerpos deformables

La estática juega un papel muy importante dentro de las construcciones industriales, es por ello que se debe dominar los principios para aplicarlo dentro de la mecánica de materiales. Por esta razón haremos un recuento de los principios.

- **Cargas superficiales:** Cuando dos cuerpos están en contacto directo y ejercen fuerzas entre sí. Según la dimensión o tipo de contacto pueden ser: cargas concentradas, carga linealmente distribuida o carga distribuida.
- **Cargas de cuerpo:** Cuando dos cuerpos no están en contacto directo pero ejercen atracción o repulsión. (Ej. La fuerza de la gravedad)

Como resultado de aplicar cargas externas en elementos estructurales, se obtiene cargas internas que el material soporta antes de la ruptura, entre ellas tenemos fuerzas axiales, cortantes, momentos torsores y flexionantes.

- **Fuerza axial:** Cuando la fuerza actuante es perpendicular al área transversal de un elemento; este tipo de fuerzas se generan a través de cargas externas que actúan a lo largo de la línea longitudinal y tienden a alargar o contraer el elemento.
- **Fuerza de corte:** Se generan cuando las cargas externas tienden a dividir un segmento del elemento en dos partes.
- **Momento flexionante:** Es causado por cargas externas que tienden a flexionar al elemento con respecto a un eje que se encuentra dentro del plano del área.
- **Momento torsionante:** Es causado cuando cargas externas tienden a torcer a un segmento un segmento del cuerpo con respecto al otro (Hibbeler, 2006).

Para la determinación de las fuerzas internas es necesario utilizar las ecuaciones de la estática:

$$\sum F_x = 0; \quad \sum F_y = 0; \quad \sum M_O = 0; \quad (5 - 7)$$

Ejemplo 5.1:

Una viga está sometida a las cargas mostradas en la *Figura 153*, determine las fuerzas internas resultantes en el punto D.

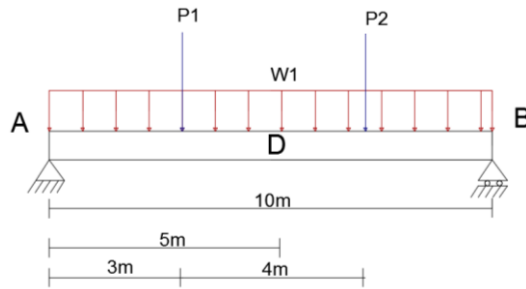


Figura 153.
Viga ejemplo 5.1
Fuente: Autores

Solución:

Datos:

$$W_1 = 25 \frac{kN}{m}$$

Diagrama del cuerpo libre:

$$P_1 = 50 \text{ kN}$$

$$P_2 = 60 \text{ kN}$$

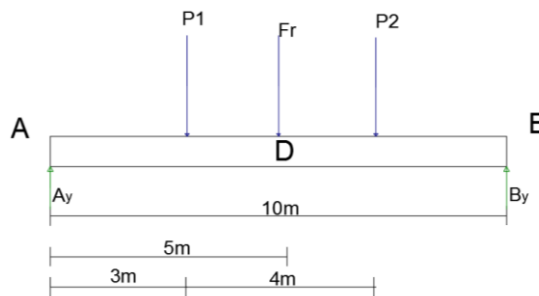


Figura 154.
Diagrama cuerpo libre ejemplo 5.1
Fuente: Autores

Se encuentra las reacciones

$$\vec{\uparrow} \sum F_x = 0; \quad A_x = 0$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -P_1 - P_2 - W_1 * (10m) + A_y + B_y = 0$$

$$\curvearrow + \sum M_A = 0; \quad -(P_1 * 3m) - (P_2 * 7m) - (W_1 * (10m) * 5m) + B_y * 10m = 0$$

$$B_y = 182 \text{ kN}$$

$$A_y = 178 \text{ kN}$$

Se realiza un corte en el punto D y se elige uno de los lados del corte, en este caso elegiremos el lado izquierdo:

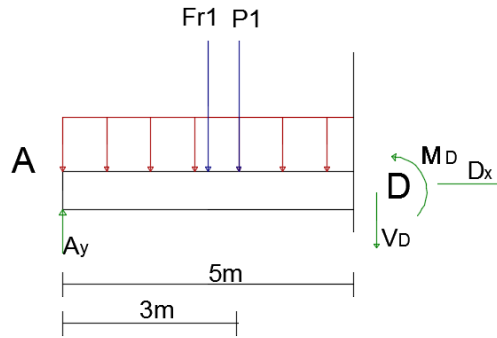


Figura 155.
Corte en el punto D ejemplo 5.1
Fuente: Autores

No existen cargas externas en el eje axial:

$$\vec{+} \sum F_x = 0; \quad D_x = 0$$

Ahora obtenemos la cortante en el punto D:

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -P_1 - W_1 * (5m) + A_y - V_D = 0$$

$$V_D = 3 \text{ kN}$$

Para determinar el momento en el punto D, hacemos sumatoria de momentos en D:

$$\curvearrow + \sum M_D = 0; \quad (P_1 * 2m) - (W_1 * (5m) * 2.5m) - (A_y * 5m) + M_D = 0$$

$$M_D = 477.5 \text{ kN} - m$$

Ejemplo 5.2

Una viga está sometida a las cargas mostradas en la *Figura 156*, determine las fuerzas internas resultantes en el punto D.

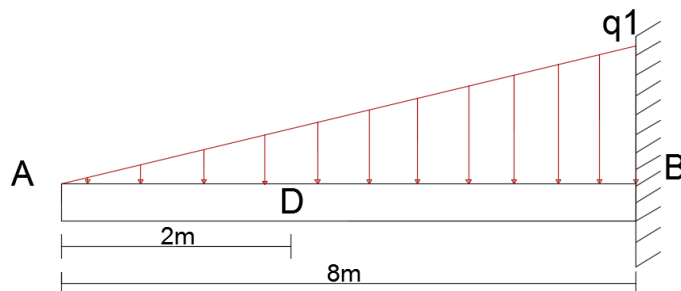


Figura 156.
Viga ejemplo 5.2
Fuente: Autores

Solución:

Datos:

$$q_1 = 15 \frac{kN}{m}$$

Diagrama del cuerpo libre:

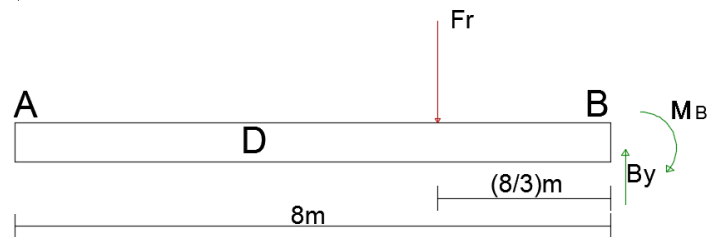


Figura 157.

Diagrama del cuerpo libre ejemplo 5.2

Fuente: Autores

Se encuentra las reacciones

$$\vec{+} \sum F_x = 0; \quad B_x = 0$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -q_1 * ((8m)/2) + B_y = 0$$

$$B_y = 60 \text{ kN}$$

$$\curvearrow + \sum M_B = 0; \quad (q_1 * (8/2m) * (8/3)m) - M_B = 0$$

$$M_B = 160 \text{ kN}$$

Se realiza un corte en el punto **D** y se elige uno de los lados del corte, en este caso elegiremos el lado izquierdo:

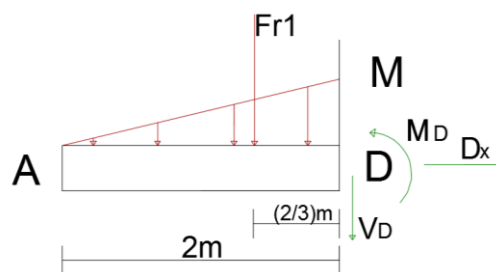


Figura 158.

Corte en el punto D lado izquierdo ejemplo 5.2

Fuente: Autores

$$\vec{+} \sum F_x = 0; \quad D_x = 0$$

Para encontrar la altura del punto M, utilizamos relación de triángulos:

$$\frac{M}{2} = \frac{q_1}{8}$$

$$M = 3.75 \text{ kN/m}$$

La fuerza resultante del tramo de la izquierda es el área:

$$F_{r1} = \frac{M * 2m}{2}$$

$$F_{r1} = 3.75 \text{ kN}$$

Ahora obtenemos la cortante en el punto D:

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -F_{r1} - V_D = 0$$

$$V_D = -3.75 \text{ kN}$$

El signo implica que la cortante en el punto D es hacia arriba.

Para determinar el momento en el punto D, hacemos sumatoria de momentos en D:

$$\curvearrowright + \sum M_D = 0; \quad -(F_{r1} * (2/3)m) - M_D = 0$$

$$M_D = -2.5 \text{ kN} - m$$

El signo implica que el momento en el punto D es en sentido de las manecillas del reloj.

También se puede determinar las fuerzas internas eligiendo el lado derecho de la viga:

Para encontrar la altura del punto M, utilizamos relación de triángulos:

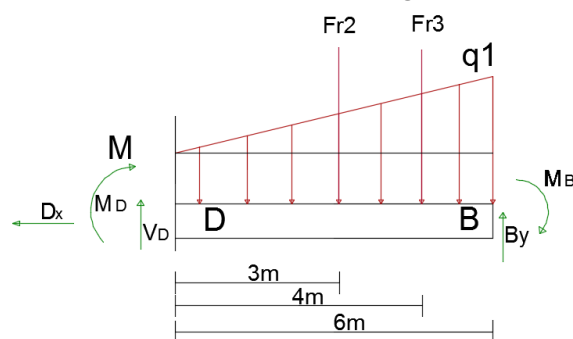


Figura 159.

Corte en D, lado derecho ejemplo 5.2

Fuente: Autores

$$\frac{M}{2} = \frac{q_1}{8}$$

$$M = 3.75 \text{ kN/m}$$

Ahora tenemos dos fuerzas resultantes, como se indica en la *Figura 159*, dividimos en dos áreas conocidas, un rectángulo y un triángulo:

$$F_{r2} = (M * 6m)$$

$$F_{r2} = 22.5 \text{ kN}$$

$$F_{r3} = \frac{(q_1 - M) * 6m}{2}$$

$$F_{r3} = 33.75 \text{ kN}$$

Ahora obtenemos la cortante en el punto D:

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -F_{r2} - F_{r3} + B_y + V_D = 0$$

$$V_D = -3.75 \text{ kN}$$

El signo implica que la cortante en el punto D es hacia abajo.

Para determinar el momento en el punto D, hacemos sumatoria de momentos en D:

$$\curvearrowright + \sum M_D = 0; \quad -M_D - (F_{r2} * 3m) - (F_{r3} * 4m) + B_y * 6 - M_B = 0$$

$$M_D = -2.5 \text{ kN} - m$$

El signo implica que el momento en el punto D es en sentido contrario a las manecillas del reloj.

5.2.10.3 Esfuerzos axiales

El determinar las fuerzas internas a las que está sometido un elemento, no es suficiente argumento para concluir si un material va a resistir o no a las cargas externas a las que está sujeto. Es por ello que hay que introducir un nuevo concepto, ha esto se lo define como esfuerzo.

Cuando una fuerza **P** actúa a lo largo de una barra su efecto sobre la misma depende no solo del material sino de la sección transversal que tenga la barra, de tal manera que a mayor sección mayor será la resistencia de la misma.

Se define entonces el esfuerzo axial o normal, como la relación entre la fuerza aplicada y el área de la sección sobre la cual actúa. O en otros términos, como la carga que actúa por unidad de área del material.

Los esfuerzos axiales o normales son de vital importancia dentro del campo industrial, ya que toda construcción ya sean estructuras metálicas, estructuras para maquinaria o montajes dentro de la producción, están sujetas a cargas que tensionan o comprimen a sus elementos y se debe garantizar con un margen de seguridad si resiste o no.

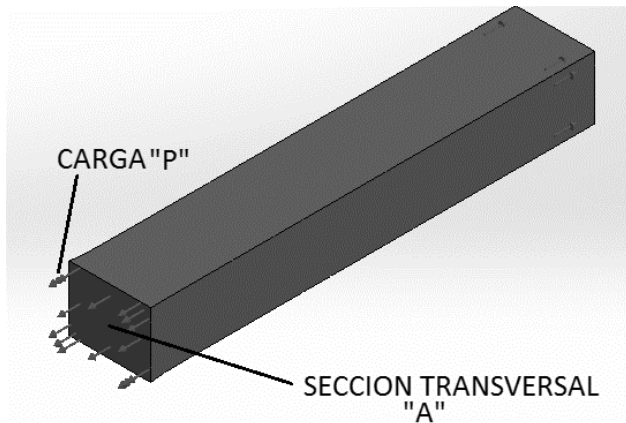


Figura 160.
Esfuerzo axial
Fuente: Autores

Al esfuerzo se lo representa:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5 - 1)$$

Donde **F** representa la fuerza promedio aplicada a la sección trasversal del elemento y **A**, el área de dicha sección.

Las unidades más utilizadas son:

Tabla 23.

Unidades utilizadas para el esfuerzo mecánico.

ESFUERZO	$\sigma = \frac{F}{A_0}$ (5 - 1)
MKS	$\frac{kg}{cm^2}$
SISTEMA INTERNACIONAL	$\frac{N}{m^2} : Pascal$
SISTEMA INGLES	$\frac{lb}{in^2} : psi$

Fuente: Autores

Ejemplo 5.3.

El elemento mostrado en la *Figura 161*, está sometida a una carga $P = 100 N$, el elemento **AB** tiene un $\varnothing = 6 cm$ y el elemento rectangular **BC** tiene de lados 10 y 12 cm respectivamente, determine los esfuerzos normales de cada sección.

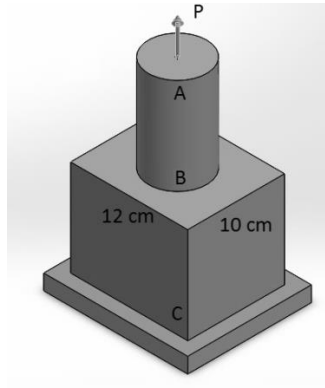


Figura 161.

Ejemplo 5.3.

Fuente: Autores

Solución:

Para calcular las fuerzas internas de cada sección se realiza un corte en el tramo AB y BC:

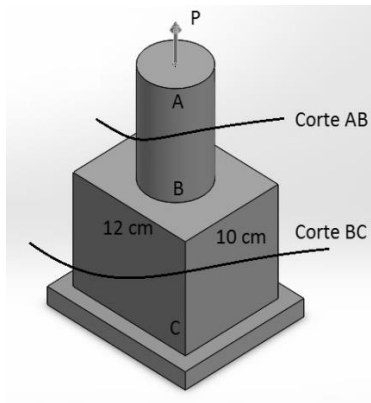


Figura 162.

Cortes de tramos Ejemplo 5.3.

Fuente: Autores

Tramo AB

Seleccionamos la parte superior, ya que es más rápido calcular su fuerza interna debido a que no interviene la reacción sobre el piso:

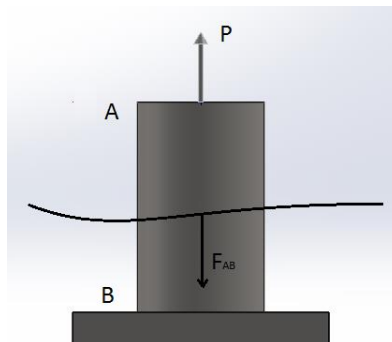


Figura 163.

Cortes del tramo AB Ejemplo 5.3.

Fuente: Autores

$$\uparrow + \sum F_y = 0;$$

$$F_{AB} = P = 100 \text{ N}$$

Determinamos el área de la sección transversal:

$$A = \frac{\pi * \phi^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (6\text{cm})^2}{4} = 28.2 \text{ cm}^2 = 2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El esfuerzo para la sección del tramo AB será determinado por la fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{AB} = \frac{F_{AB}}{A} = \frac{100\text{N}}{2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 35335.69 \text{ Pa} = 33.33 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tramo BC

Seleccionamos la parte superior, ya que es más rápido calcular su fuerza interna debido a que no interviene la reacción sobre el piso:

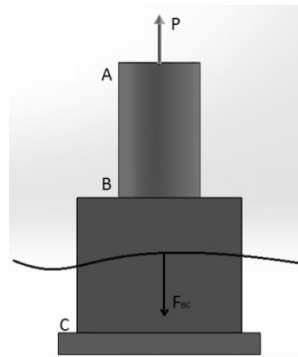


Figura 164.

Cortes del tramo BC Ejemplo 5.3.

Fuente: Autores

$$\uparrow + \sum F_y = 0;$$

$$F_{BC} = P = 100 \text{ N}$$

Determinamos el área de la sección transversal:

$$A = 10 * 12 \text{ cm}^2 = 120 \text{ cm}^2 = 0.012 \text{ m}^2$$

El esfuerzo para la sección del tramo AB será determinado por la fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{BC} = \frac{F_{BC}}{A} = \frac{100\text{N}}{0.012 \text{ m}^2} = 8333.33 \text{ Pa} = 8.33 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Es lógico que el tramo BC tenga mayor área, concluyendo que secciones con menor área sufren mayor esfuerzo.

Ejemplo 5.4.

Dos cables suspenden un pallet con un peso de 300 kg que contiene bloques de concreto, si el cable AB tiene un diámetro de 12 mm y el cable CD tiene un diámetro de 8 mm, ¿determine el esfuerzo axial en cada uno de ellos? (Se ha diseñado de tal manera que la carga se distribuya uniformemente para cada cable)

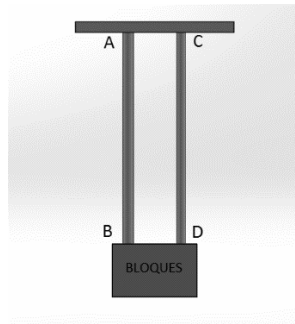


Figura 165.

Ejemplo 5.4.

Fuente: Autores

Solución:

Para calcular las fuerzas internas de cada sección se realiza un corte en el tramo AB y CD:

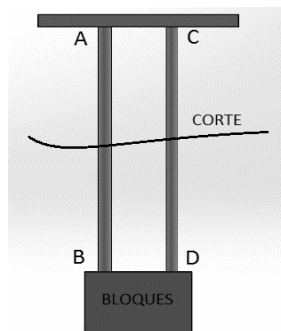


Figura 166.

Corte de tramos Ejemplo 5.4.

Fuente: Autores

El peso de los bloques se distribuye uniformemente para cada cable, ya que es simétrico, así obtenemos el diagrama del cuerpo libre:

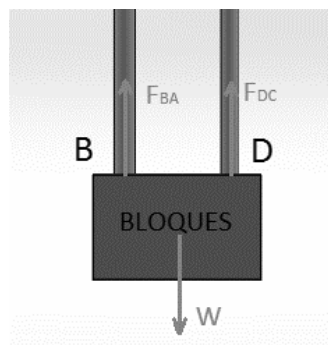


Figura 167.

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.4.

Fuente: Autores

$$\uparrow + \sum F_y = 0;$$

$$F_{BA} + F_{DC} - W = 0$$

Debido a la simetría $F_{BA} = F_{DC} = 150 \text{ kg}$

Determinamos el área de las secciones transversales, ya que los cables tienen sección circular entonces:

$$A = \frac{\pi * \varnothing^2}{4}$$

$$A_{BA} = \frac{\pi * (12\text{mm})^2}{4} = 113 \text{ mm}^2 = 1.13 \text{ cm}^2$$

$$A_{DC} = \frac{\pi * (8\text{mm})^2}{4} = 50.2 \text{ mm}^2 = 0.502 \text{ cm}^2$$

Los esfuerzos para cada sección se determinan por su respectiva fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{BA} = \frac{F_{BA}}{A_{BA}} = \frac{150 \text{ kg}}{1.13 \text{ cm}^2} = 132.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{DC} = \frac{F_{DC}}{A_{DC}} = \frac{150 \text{ kg}}{0.502 \text{ cm}^2} = 298.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Como se esperaba, el esfuerzo en el cable de menor sección será mayor.

Ejemplo 5.5.

Siguiendo el ejemplo anterior, determine los esfuerzos en cada cable pero suponiendo que los cables están inclinados a 40° el tramo DC y a 125° el tramo BA con respecto al eje positivo de las "x". Además considere que los cables están unidos en la parte superior del pallet.

Solución:

Para calcular las fuerzas internas de cada sección se realiza un corte en el tramo AB y CD:

Con los datos del problema trazamos el diagrama del cuerpo libre:

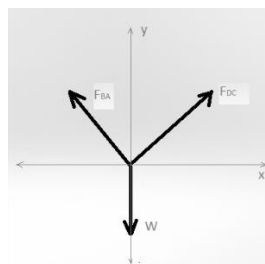


Figura 168.

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.5.

Fuente: Autores

Mediante las ecuaciones de equilibrio estático determinamos las fuerzas internas actuantes en cada cable:

$$\begin{aligned} \vec{+} \sum F_x = 0; & \quad F_{DC} * \cos(40) - F_{BA} * \cos(55) = 0 \\ \uparrow + \sum F_y = 0; & \quad F_{DC} * \text{sen}(40) + F_{BA} * \text{sen}(55) - W = 0 \end{aligned}$$

Se obtiene dos ecuaciones con dos incógnitas, resolviendo se obtiene que:

$$F_{DC} = 172.55 \text{ kg}$$

$$F_{BA} = 230.69 \text{ kg}$$

El área de las secciones transversales:

$$A_{BA} = \frac{\pi * (12\text{mm})^2}{4} = 113 \text{ mm}^2 = 1.13 \text{ cm}^2$$

$$A_{DC} = \frac{\pi * (8\text{mm})^2}{4} = 50.2 \text{ mm}^2 = 0.502 \text{ cm}^2$$

Los esfuerzos para cada sección se determinan por su respectiva fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{BA} = \frac{F_{BA}}{A_{BA}} = \frac{230.69 \text{ kg}}{1.13 \text{ cm}^2} = 204.15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{DC} = \frac{F_{DC}}{A_{DC}} = \frac{172.55 \text{ kg}}{0.502 \text{ cm}^2} = 343.72 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Con el mismo peso y la misma sección transversal para cada cable se obtiene un mayor esfuerzo debido a la inclinación que se tiene.

Ejemplo 5.6.

El mecanismo mostrado en la *Figura 169*, se utiliza para doblar varillas de acero de 1 pulgada de diámetro, se aplica una carga P de 450 lbf, ¿Determine los esfuerzos producidos en los elementos AB y CD? Si los eslabones tienen una sección rectangular de 0.5x1.5 in.

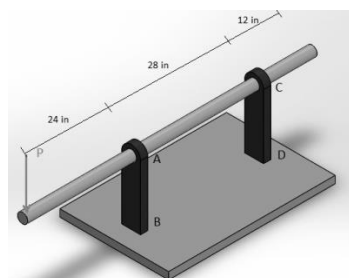


Figura 169.

Ejemplo 5.6.

Fuente: Autores

Solución:

Al aplicar la carga P, se producen esfuerzos en cada uno de los eslabones, el tramo AB sufre compresión y el tramo CD tensión debido al efecto palanca mecánica.

Para analizar las fuerzas a las que están sometidas cada eslabón, es necesario representar el diagrama del cuerpo libre:

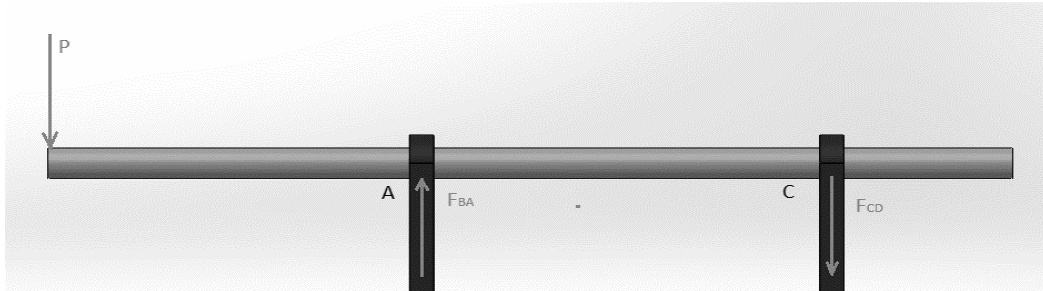


Figura 170.

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.6.

Fuente: Autores

Para determinar los esfuerzos en los eslabones, debemos calcular las fuerzas internas que están soportando:

$$\uparrow + \sum F_y = 0;$$

$$F_{BA} - F_{CD} - P = 0$$

$$\curvearrow + \sum M_C = 0; \quad -F_{BA} * 28in + P * 52 in = 0$$

$$F_{BA} = 835.7 \text{ lbf}$$

$$F_{CD} = 385.7 \text{ lbf}$$

Tramo AB

El tramo AB está soportando cargas internas de compresión en toda su sección transversal.

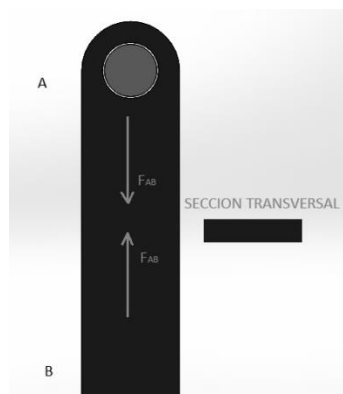


Figura 171.

Corte tramo AB Ejemplo 5.6.

Fuente: Autores

$$F_{AB} = F_{BA} = 835.7 \text{ lbf}$$

Determinamos el área de la sección transversal:

$$A_{AB} = 0.5 * 1.5 \text{ in}^2 = 0.75 \text{ in}^2$$

El esfuerzo para la sección del tramo AB será determinado por la fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{AB} = \frac{F_{AB}}{A_{AB}} = \frac{835.7 \text{ lbf}}{0.75 \text{ in}^2} = 1114.3 \text{ psi}; \text{ Esfuerzo de compresión}$$

Tramo CD

El tramo CD está soportando cargas internas de tensión, el lugar más crítico del eslabón está en la parte con menos sección transversal, como se indica en la *Figura 172*:

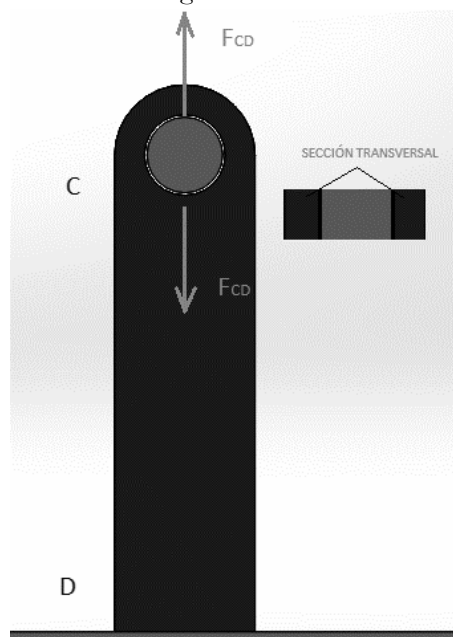


Figura 172.

Corte tramo CD Ejemplo 5.6.

Fuente: Autores

$$F_{CD} = 385.7 \text{ lbf}$$

Determinamos el área de la sección transversal, el área crítica será en donde se encuentra el agujero de encaje de la varilla:

$$A_{CD} = (0.5 * 1.5 \text{ in}^2) - 2(0.25 * 0.5) \text{ in}^2 = 0.5 \text{ in}^2$$

El esfuerzo para la sección del tramo CD será determinado por la fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{CD} = \frac{F_{CD}}{A_{CD}} = \frac{385.7 \text{ lbf}}{0.5 \text{ in}^2} = 771.4 \text{ psi}; \text{ Esfuerzo de tensión}$$

5.2.10.4 Esfuerzo cortante

La fuerza que actúa tangencial a una sección transversal en un cuerpo se denomina fuerza de cizallamiento. A menudo, se obtiene una aproximación de la tensión que actúa sobre el plano dividiendo la fuerza de cizalla por el área tangencial sobre la que actúa. Así,

$$\tau = \frac{FUERZA}{AREA} = \frac{V}{A} \quad (5 - 8)$$

Donde τ es el esfuerzo a corte, V la fuerza total que actúa a través y paralela a un plano de corte y A el área de sección transversal para el corte. Esta aproximación, que se basa en asumir una distribución uniforme de la tensión, se llama el esfuerzo cortante promedio.

Generalmente los elementos como remaches, pernos, pasadores sufren este tipo de esfuerzos y si no se realiza un buen diseño, estos fallan. En la *Figura 173*, se puede observar pernos que unen a las vigas con la columna, estos elementos de sujeción sufren esfuerzos de corte debido a las tensiones que se producen por movimientos leves y concentración de tensiones debido a la unión.



Figura 173.

Pernos a cortante

Fuente: (construcciones2sm.blogspot.com, 2010)

Esfuerzo cortante simple

Vamos a suponer que un perno une dos láminas de acero y que estas láminas efectúan fuerzas en sentido contrario F y F' con la misma magnitud, pero en sentido contrario.

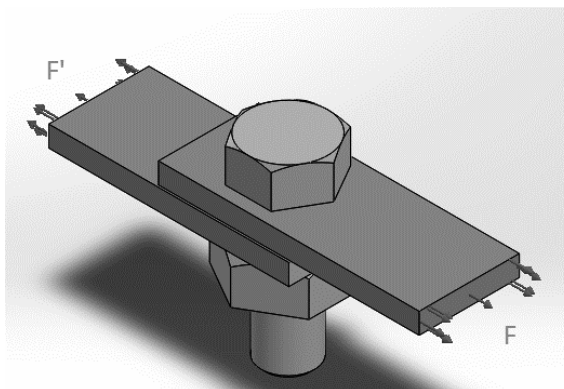


Figura 174.

Perno a cortante simple

Fuente: Autores

Si realizamos un corte imaginario en el perno, podemos identificar las cargas que están actuando sobre su sección, como se indica en la *Figura 175*; la fuerza F que ejerce una de las láminas de acero y una carga interna P que representa la resistencia interna que el material trata de contrarrestar antes de su ruptura.

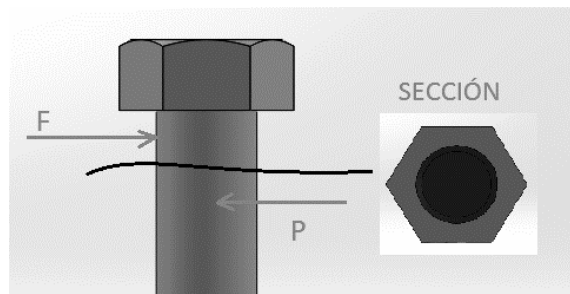


Figura 175.

Diagrama del cuerpo libre perno a cortante simple

Fuente: Autores

Mediante las ecuaciones de equilibrio se determina que:

$$\vec{+} \sum F_x = 0; \quad F = P$$

Esta fuerza interna genera un esfuerzo llamado esfuerzo de corte simple:

$$\tau = \frac{\text{FUERZA}}{\text{AREA}} = \frac{P}{A} \quad (5 - 9)$$

Esfuerzo cortante doble

Ahora se supone que existen tres láminas de acero unidas por un perno, dos de ellas ejercen una fuerza en el mismo sentido y la sobrante ejerce una fuerza en sentido contrario:

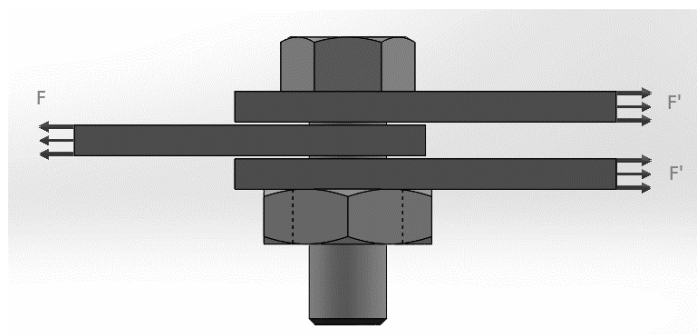


Figura 176.

Perno a cortante doble

Fuente: Autores

Las fuerzas F' van a ser la mitad de la fuerza F para que el sistema se encuentre en equilibrio, al realizar un corte imaginario en las partes críticas del perno se puede definir cuál es la carga interna que el material está soportando debido a la fuerza F y las reacciones F', obteniendo mediante las ecuaciones de equilibrio la carga P que actúa en cada corte del perno:

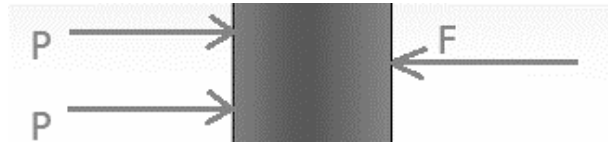


Figura 177.

Diagrama del cuerpo libre pernos a cortante doble

Fuente: Autores

$$\vec{\tau} \sum F_x = 0; \quad F = 2P$$

Esta fuerza interna genera un esfuerzo llamado esfuerzo de corte doble:

$$\tau = \frac{\text{FUERZA}}{\text{AREA}} = \frac{P}{2A} \quad (5 - 10)$$

Esfuerzo de aplastamiento

Un esfuerzo normal producido por la compresión de una superficie contra otra se denomina esfuerzo de aplastamiento. Si este esfuerzo es demasiado grande, puede aplastar o deformar localmente una o ambas superficies.

Vamos a tomar el ejemplo de cortante simple, al aplicar la fuerza F; la lámina de acero produce una reacción axial P, esta carga comprime al material de la lámina de acero, produciendo un aplastamiento debido a que los pernos generalmente se fabrican con tratamientos térmicos que endurecen su superficie.

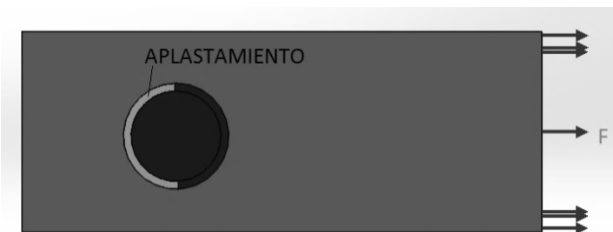


Figura 178.

Material sufriendo aplastamiento

Fuente: Autores

La determinación de este esfuerzo promedio de aplastamiento, está dada por el cociente de la carga aplicada por el área de la sección proyectada en el plano de aplicación de la fuerza:

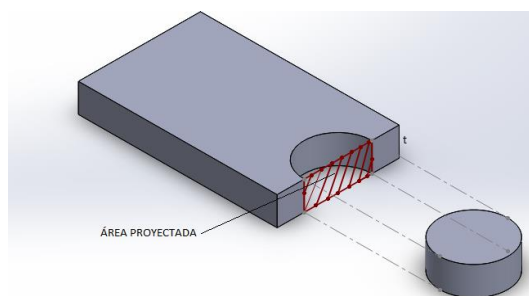


Figura 179.

Área proyectada para esfuerzo de aplastamiento

Fuente: Autores

$$\sigma_b = \frac{F}{A} = \frac{P}{t \cdot d} \quad (5 - 11)$$

Donde σ_b representa el esfuerzo de aplastamiento, P la carga interna en la lámina producida por la fuerza F , t el espesor de la lámina y d el diámetro del perno.

Ejemplo 5.7.

Se tiene un sistema que consiste en una ménsula de 10mm de espesor utilizada para uniformizar la contextura de alambres de acero, si se debe aplicar una carga F de 1000 N, determine el esfuerzo cortante y el de aplastamiento que se producen en el pasador B que tiene un diámetro de 5mm.

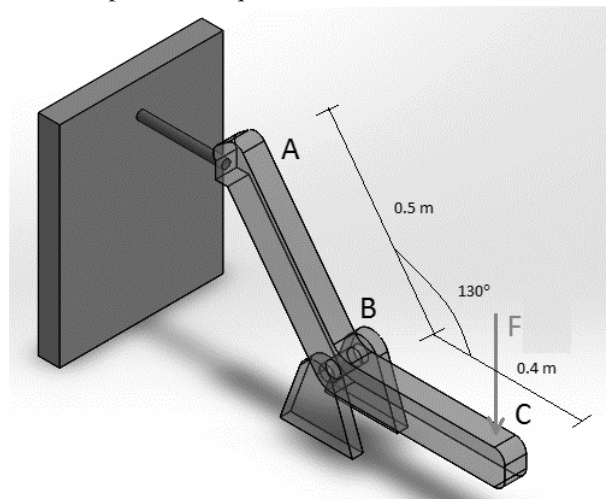


Figura 180.

Ejemplo 5.7.

Fuente: Autores

Solución:

Para determinar el esfuerzo cortante τ y el esfuerzo de aplastamiento σ_b , es necesario determinar la reacción que se produce en el punto B, partiendo del diagrama del cuerpo libre:

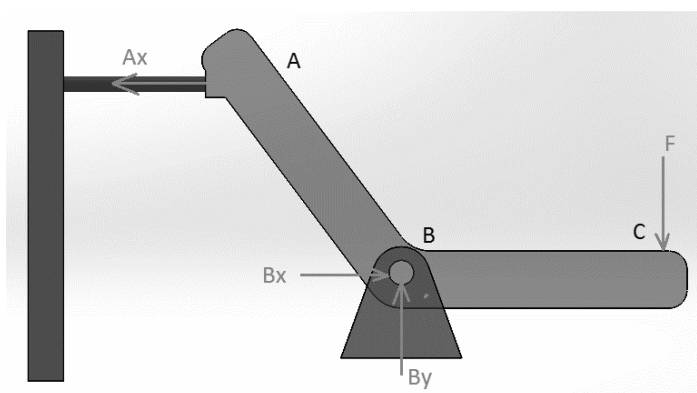


Figura 181.

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.7.

Fuente: Autores

$$\vec{+} \sum F_x = 0; \quad B_x - A_x = 0$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad B_y - F = 0$$

$$B_y = F = 1000 \text{ N}$$

$$\curvearrow + \sum M_A = 0;$$

$$B_x * 0.5 * \cos(40) + B_y * 0.5 * \sin(40) - F * (0.4 + 0.5 \sin(40)) = 0$$

$$B_x = 1044.32 \text{ N}$$

Es necesario determinar la resultante en el punto B para determinar el esfuerzo cortante:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \sqrt{1044.32^2 + 1000^2} = 1445.82 \text{ N}$$

El gráfico nos indica que existe cortante doble:

$$\tau = \frac{1445.82 \text{ N}}{2 * \frac{\pi * (0.005 \text{ m})^2}{4}} = 36817503.97 \text{ Pa} = 36817.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 36.8 \text{ MPa}$$

La fuerza de aplastamiento viene determinada por la fuerza resultante en B entre el área proyectada hacia el plano en donde la resultante de B es:

$$\sigma_b = \frac{1445.82 \text{ N}}{0.005 \text{ m} * 0.01 \text{ m}} = 28916400 \text{ Pa} = 28916.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 28.91 \text{ MPa}$$

Ejemplo 5.8.

Un barril lleno de un fluido newtoniano está suspendido con una cuerda de 0.25 in de diámetro en una viga de acero, a su vez la viga está apoyada en dos ángulos ancladas a la pared con pernos de 0.25 in. Si el peso del barril es de 200 lbs, determine el esfuerzo normal en la cuerda, el esfuerzo cortante que se produce en los pernos y el esfuerzo de aplastamiento sufrido en los ángulos.

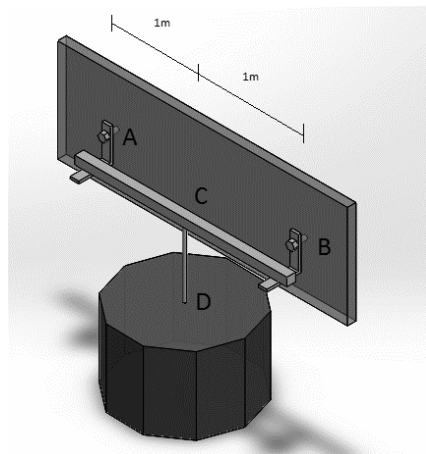


Figura 182.

Ejemplo 5.8.

Fuente: Autores

Solución:

En los puntos A y B existen reacciones con la misma magnitud debido al peso del barril, a su vez la cuerda sufre tracción de igual magnitud que el peso del barril, obteniendo el diagrama del cuerpo libre de la siguiente manera:

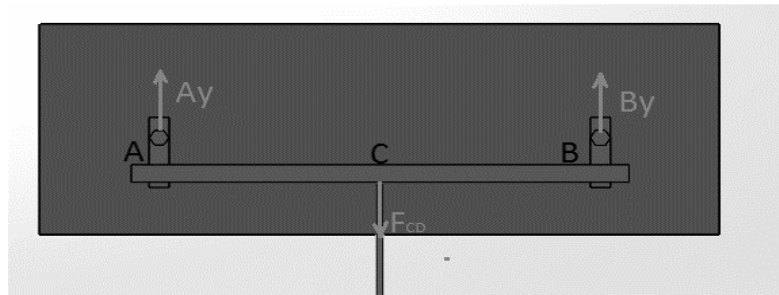
**Figura 183.**

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.8.

Fuente: Autores

$$F_{CD} = P = 200\text{lbs}$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0;$$

$$A_y + B_y = 200\text{ lbs}$$

$$\curvearrow + \sum M_A = 0; \quad -F_{CD} * 1m + B_y * 2m = 0$$

$$B_y = 100\text{ lbs}$$

$$A_y = 100\text{ lbs}$$

Es lógico que las reacciones sean de igual magnitud debido a la simetría de la geometría. Esfuerzo normal de la cuerda:

$$A_{CD} = \frac{\pi * \phi^2}{4}$$

$$A_{CD} = \frac{\pi * (0.25\text{in})^2}{4} = 0.04\text{ in}^2$$

El esfuerzo para la sección del tramo CD será determinado por la fuerza interna entre su área:

$$\sigma_{CD} = \frac{F_{CD}}{A_{CD}} = \frac{200\text{lbs}}{0.04\text{ in}^2} = 4074.76\text{ psi}$$

Esfuerzos cortantes en A y B:

Según la geometría del problema, solo existe un esfuerzo cortante simple en cada perno de anclaje, estos esfuerzos se determinan con las reacciones A_y y B_y respectivamente.

Sus áreas son iguales:

$$A_A = A_B = \frac{\pi * \phi^2}{4}$$

$$A_A = A_B = \frac{\pi * (0.25in)^2}{4} = 0.04 in^2$$

$$\tau_A = \tau_B = \frac{100lbs}{0.04 in^2} = 2500 psi$$

De igual manera, la fuerza de aplastamiento viene determinada por las reacciones A_y y B_y entre el área proyectada hacia el plano en donde están interviniendo las reacciones, cabe resaltar que el esfuerzo de aplastamiento tiene la misma magnitud en el punto A y B:

$$\sigma_b = \frac{100 lbs}{0.25 in * 0.04 in} = 10000 psi$$

5.2.10.5 Esfuerzos permisibles

En muchos problemas de ingeniería, las cargas soportadas por un componente de una máquina o estructura están razonablemente bien definidas; por ejemplo, los puntales inferiores de una estructura alta soportan el peso de material que forma los pisos superiores. Las tensiones que están presentes en un componente, en condiciones de trabajo normales, se denominan tensiones de trabajo; la relación de la tensión de fluencia, σ_Y del material a la tensión de trabajo más grande, σ_W en el componente es el factor de esfuerzo contra el rendimiento. El factor de esfuerzo en el rendimiento es entonces:

$$F_{ESF} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_W} \quad (5 - 12)$$

Si el material no tiene un límite de elasticidad bien definido, es más conveniente usar el esfuerzo de prueba σ_P ; el factor de estrés en la tensión de prueba es entonces:

$$F_P = \frac{\sigma_P}{\sigma_W} \quad (5 - 13)$$

Algunos autores se refieren al factor de esfuerzo definido anteriormente, como un "factor de seguridad". Es preferible, sin embargo, evitar cualquier referencia a tensiones "seguras", ya que el grado de seguridad en cualquier problema práctico es difícil de definir. Los autores actuales prefieren el término "factor de esfuerzo", ya que esto define más precisamente que el esfuerzo global se compara con el rendimiento o tensión de prueba del material.

Sin embargo, este factor de seguridad proporciona un diseño con costos elevados; para aplicaciones industriales se recomienda utilizar el cociente entre la resistencia última y el esfuerzo de trabajo que generalmente es el esfuerzo admisible del material, dicho factor también se lo puede determinar mediante la carga última entre la carga admisible:

$$F_S = \frac{\sigma_U}{\sigma_{adm}} \quad (5 - 14)$$

$$F_S = \frac{F_U}{F_{adm}} \quad (5 - 15)$$

$$F_S = \frac{\tau_U}{\tau_{adm}} \quad (5 - 16)$$

Las recomendaciones para identificar con el factor de seguridad que se va a trabajar son las siguientes:

1. Variaciones que ocurren en las propiedades de los materiales. La composición, resistencia y dimensiones de los materiales están sujetas a pequeñas variaciones durante la manufactura. Además, las propiedades pueden alterarse y pueden generarse esfuerzos residuales por efecto de calentamiento o deformación, que pueden ocurrir al material durante el almacenamiento, transporte o la construcción.
2. Número de ciclos de carga que pueden esperarse durante la vida de la estructura o máquina. Para la mayor parte de los materiales, el esfuerzo último decrece cuando el número de ciclos de carga aumenta. Este fenómeno se conoce como fatiga y si se le ignora puede producir alguna falla súbita.
3. Tipo de cargas que se consideran en el diseño o que pueden ocurrir en el futuro. Muy pocas cargas se conocen con completa certeza. La mayor parte de las cargas de diseño, son estimados de muy poca certidumbre. Además, cambios futuros en el uso pueden introducir cambios en el modo de carga. Para cargas dinámicas, cíclicas o de impulso se exigen mayores factores de seguridad.
4. Tipo de falla que puede ocurrir. Los materiales frágiles fallan súbitamente, usualmente sin aviso previo de que el colapso es inminente. Los materiales dúctiles, como el acero estructural, sufren deformaciones sustanciales antes de fallar, conocidas como fluencia, advirtiendo así que existe carga excesiva. Sin embargo, la mayor parte de las fallas por doblamiento o estabilidad son repentinas, sea frágil el material o no. Cuando existe la posibilidad de falla súbita, debe usarse un mayor factor de seguridad que cuando la falla está precedida por avisos evidentes.
5. Incertidumbre debido a los métodos de análisis. Todos los métodos de diseño están basados en hipótesis (simplificadas), que se traducen en que los esfuerzos calculados son sólo aproximaciones de los esfuerzos reales.
6. Deterioro que puede ocurrir en el futuro por mantenimiento deficiente o por causas naturales no prevenibles. Un factor de seguridad mayor se requiere en sitios donde la oxidación y decadencia general, son difíciles de controlar o aun de descubrir.
7. Importancia de un elemento con respecto a la seguridad de la estructura total. Los elementos rigidizadores o secundarios, pueden en muchos casos, diseñarse con un factor de seguridad más bajo que el usado para elementos principales.

Además de lo anterior, existe la consideración sobre el riesgo para la vida y la propiedad que una falla implicaría. Cuando una falla no implique riesgo para la vida y un riesgo mínimo para la propiedad, puede considerarse el uso de un menor factor de seguridad. Finalmente, está la consideración práctica de que, a menos que se efectúe un diseño cuidadoso con un factor de seguridad no excesivo, la estructura o máquina podrá o no realizar su función de diseño. Por ejemplo, algunos grandes factores de seguridad en aviación pueden tener un efecto inaceptable en el peso de los aviones.

Para la mayor parte de las aplicaciones estructurales y de máquinas, los factores de seguridad se establecen por especificaciones de diseño y códigos de construcción escritos por comités de ingenieros experimentados que trabajan con sociedades profesionales, -con industrias o con agencias federales, estatales o municipales. Ejemplos de tales especificaciones de diseño y códigos de construcción son:

1. Acero: American Institute of Steel Construction, Specifications for the Design and Erection of Structural Steel for Buildings.
2. Concreto: American Concrete Institute, Building Code Requirement for Reinforced Concrete.
3. Madera: National Forest Products Association, National Design Specifications for Stress-Grade Lumber and Its Fastenings.
4. Puentes para carreteras: American Association of State Highway Officials, Standard Specifications for Highway Bridges.

Ejemplo 5.9.

La cuerda AB está hecha de acero con una resistencia última a tensión de 400 MPa y forma un ángulo de 40° con la vertical. Determine el diámetro de la cuerda si se va a utilizar un factor de seguridad de 2 para las cargas mostradas en la *Figura 184*, P1=15 kN, P2=10 kN, q1=12kN.

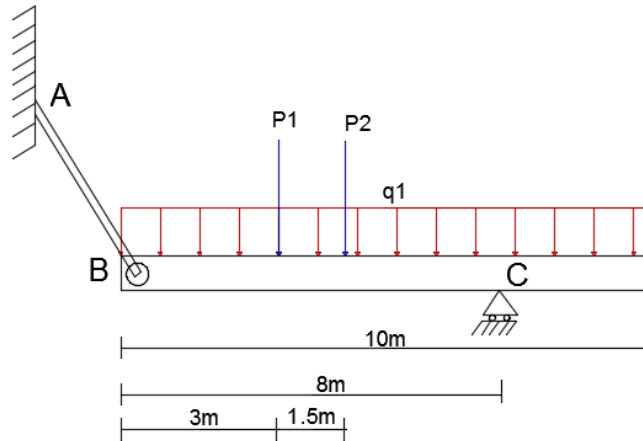


Figura 184.
Ejemplo 5.9.
Fuente: Autores

Solución:

Obtención del diagrama del cuerpo libre:

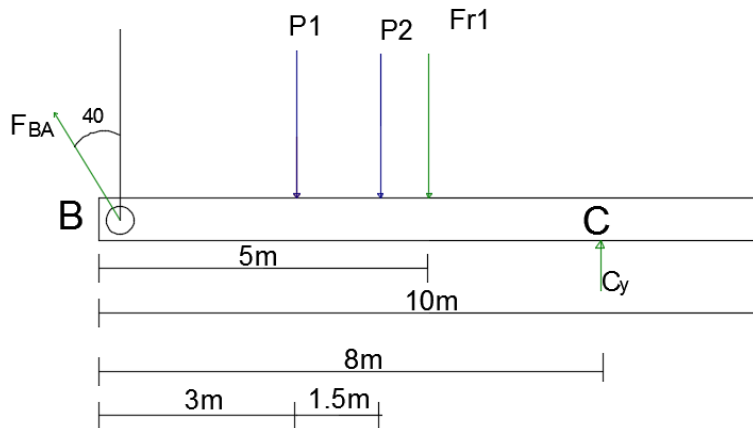


Figura 185.
Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.9.
Fuente: Autores

Para determinar el esfuerzo permisible utilizamos el factor de seguridad de 2:

$$\sigma_{Perm} = \frac{\sigma_{Ultimo}}{F_S} \quad \rightarrow \quad \sigma_{Perm} = \frac{400 \text{ MPa}}{2}$$

$$F_S = \frac{\sigma_{Ultimo}}{\sigma_{Permisible}} \quad \sigma_{Perm} = 200 \text{ MPa}$$

Se necesita determinar la fuerza interna que está actuando en la cuerda que es igual a la fuerza a tensión que está actuando en la misma:

$$\curvearrowright + \sum M_C = 0;$$

$$(F_{T1})(3) - (F_{BA} \cos 40)(8) + (P_1 * 5m) + (P_2 * 3.5m) = 0$$

$$F_{BA} = 76.69 \text{ kN}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{F_{BA}}{A}$$

Se determina el área de la sección transversal de la cuerda:

$$A = \frac{7692.67 \text{ N}}{200 \times 10^6 \text{ Pa}}$$

$$A = 0.0003834 \text{ m}^2$$

$$A = 3.83 \text{ cm}^2$$

$$A = \frac{\pi * \phi^2}{4}$$

A partir del área se puede obtener el diámetro:

$$\phi = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * 3.83 \text{ cm}^2}{\pi}} = 2.21 \text{ cm} = \frac{7}{8} \text{ in}$$

Ejemplo 5.10.

Se requiere construir un sistema para comprimir esponjas de aluminio previo a su fundición, para lo cual se debe aplicar una fuerza P en el extremo A, el elemento CD tiene una sección transversal rectangular de 15x30 mm y está unida al elemento AC mediante un pasador de 12 mm de diámetro. Si el esfuerzo cortante permisible en el pasador es de 200 Mpa determine:

- La máxima fuerza P que puede aplicarse en A.
- El esfuerzo de aplastamiento en C del elemento CD.
- El esfuerzo axial que se produce en CD.

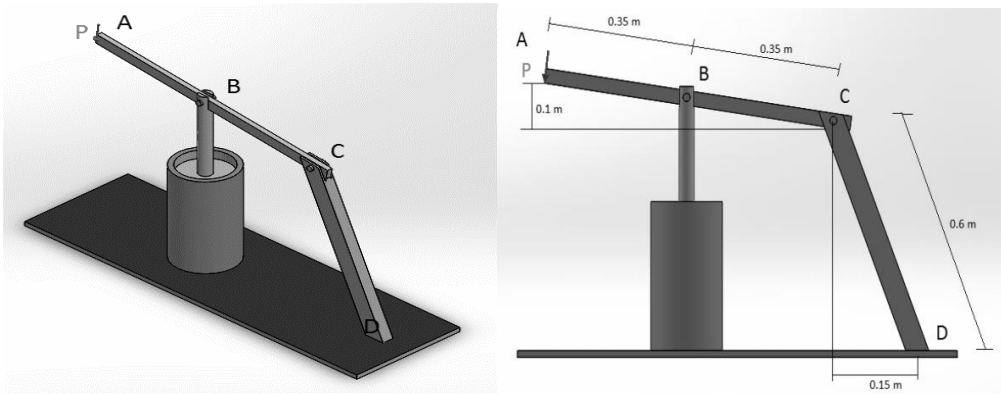


Figura 186.

Ejemplo 5.10.

Fuente: Autores

Solución:

Partimos del diagrama del cuerpo libre para obtener la reacción en el punto C y la fuerza interna que está actuando en el elemento CD:

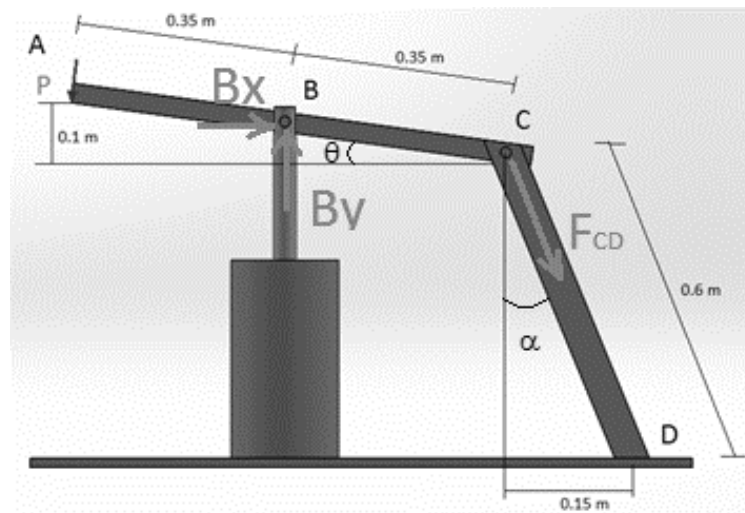


Figura 187.

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.10.

Fuente: Autores

Aislado el elemento ABC, se puede obtener la fuerza resultante del elemento CD y las reacciones en B:

$$\vec{+} \sum F_x = 0; \quad -P \operatorname{sen} \theta + B_x + F_{CD} \operatorname{sen} \alpha = 0$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -P \operatorname{cos} \theta + B_y - F_{CD} \operatorname{cos} \alpha = 0$$

$$\curvearrow + \sum M_B = 0;$$

$P(\operatorname{sen} \theta)^2 * 0.35m + P(\operatorname{cos} \theta)^2 * 0.35m + F_{CD} \operatorname{sen} \alpha * 0.35m \operatorname{sen} \theta - F_{CD} \operatorname{cos} \alpha * 0.35 \operatorname{cos} \theta = 0$
 Determinación de los ángulos α y θ :

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{0.15m}{0.6m}$$

$$\alpha = 14.48^\circ$$

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{0.1m}{0.7m}$$

$$\theta = 8.21^\circ$$

Mediante las ecuaciones de equilibrio estático, no es posible determinar las reacciones, al tener 3 ecuaciones y 4 incógnitas, por lo que se hace uso del esfuerzo permisible cortante máximo que se puede trabajar en el punto C:

$$\tau_{adm(C)} = \frac{C_{resultante}}{A_{pasador}}$$

$$\tau_{adm(C)} \cdot A_{pasador} = C_{resultante}$$

$$C_{resultante} = 200MPa \cdot \pi \cdot \frac{(12mm)^2}{4}$$

$$C_{resultante} = 22619.46 N$$

Esta es la máxima fuerza que se puede ejercer en el pasador C, por ende esta será igual a la fuerza máxima que debe soportar el elemento CD:

$$C_{resultante} = F_{CD} = 22619.46 N = 22.62 kN$$

a) Reemplazando en la ecuación de momentos en el punto B, se tiene que:

$$P(\operatorname{sen} 8.21^\circ)^2 \cdot 0.35m + P(\operatorname{cos} 8.21^\circ)^2 \cdot 0.35m + 22.62 kN \operatorname{sen}(14.48^\circ) \cdot 0.35m \operatorname{sen}(8.21^\circ) - 22.62 kN \operatorname{cos}(14.48^\circ) \cdot 0.35 \operatorname{cos}(8.21^\circ) = 0$$

La carga máxima P que puede aplicarse será:

$$P = 20868.83 N = 20.87 kN$$

b) El esfuerzo de aplastamiento está dado por:

$$\sigma_b = \frac{C_{resultante}}{A_{proyectada}}$$

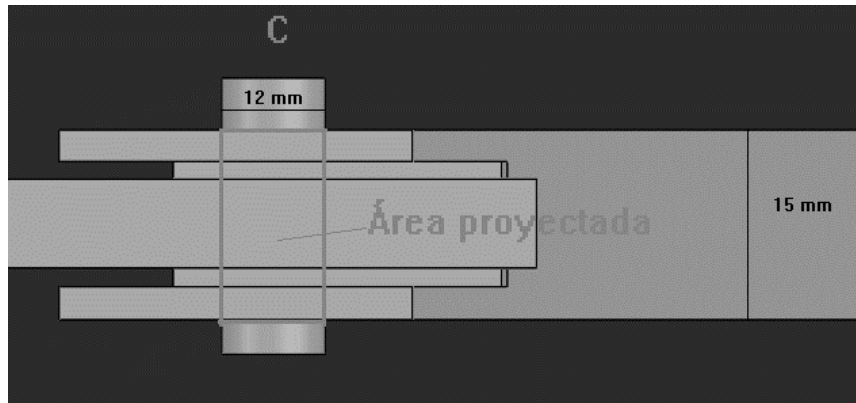


Figura 188.

Área proyectada para esfuerzo cortante Ejemplo 5.10.

Fuente: Autores

$$\sigma_b = \frac{22619.46 \text{ N}}{12\text{mm} \cdot 15\text{mm}}$$

$$\sigma_b = 125.66 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 125.66 \text{ Mpa}$$

c) El esfuerzo axial en el elemento CD, está dado por la fuerza interna que es igual a la resultante en el punto C, dividida para el área crítica que sufre tensión, es decir el área del elemento menos el área que ocupa el pasador:

$$\sigma_{CD} = \frac{C_{\text{resultante}}}{A_{CD}}$$

$$\sigma_{CD} = \frac{22619.46 \text{ N}}{(30\text{mm} * 15\text{mm}) - (12\text{mm} * 15\text{mm})}$$

$$\sigma_{CD} = 83.77 \text{ Mpa}$$

5.2.10.6 Deformación total y unitaria

Objetivos de aprendizaje

1. Comprender las descripciones cualitativas y cuantitativas de las propiedades mecánicas de los materiales.
2. Aprender la lógica de relacionar la deformación con las fuerzas externas.

El alambre ordinario y el cordón estirable de caucho de la *Figura 158*, tienen la misma longitud no deformada y están sometidos a las mismas cargas. Sin embargo, el caucho se deforma significativamente más, por lo que utilizamos cables de goma para atar el equipaje en la parte superior de un coche. Como muestra el ejemplo, antes de poder relacionar la deformación con las fuerzas aplicadas, primero debemos describir las propiedades mecánicas de los materiales.



Figura 189.

Elasticidad de materiales

Fuente: (Vable, 2006)

En la ingeniería, los adjetivos como elástico, dúctil o resistente, tienen significados muy específicos. Estos términos serán nuestra descripción cualitativa de los materiales. Nuestras descripciones cuantitativas serán las ecuaciones que relacionan esfuerzos y deformaciones. Los parámetros en los modelos de material se determinan por el método de mínimos cuadrados, para ajustar la mejor curva a través de observaciones experimentales. En este apartado, desarrollamos un modelo simple y aprendemos la lógica que relaciona la deformación con las fuerzas. En capítulos posteriores, aplicaremos esta lógica a elementos axiales, ejes y vigas y obtendremos fórmulas para tensiones y deformaciones.

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), especifica procedimientos de prueba para determinar las diversas propiedades de un material. Estas descripciones son pautas usadas por los experimentalistas para obtener resultados reproducibles para las propiedades del material. En esta sección, estudiamos las pruebas de tensión y compresión, que nos permiten determinar muchos parámetros relacionados con esfuerzos y deformaciones.

5.2.10.7 Ensayo de tensión

En la prueba de tensión, el espécimen estándar se coloca en una máquina de prueba de tracción, donde se agarra en cada extremo y se tira en la dirección axial. La *Figura 190* muestra dos tipos de geometría estándar: un espécimen de sección transversal rectangular y un espécimen de sección circular.

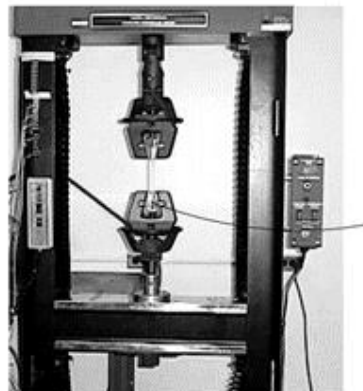


Figura 190.

Máquina para ensayos de tensión y probetas

Fuente: (Vable, 2006)

Se realizan dos marcas en la región central, separadas por la longitud de calibración L_0 . La deformación δ es el movimiento de las dos marcas. Para metales, como el aluminio o el acero, la ASTM recomienda una longitud de calibre $L_0 = 2 \text{ in.}$ y diámetro $d_0 = 0.5 \text{ in.}$ La deformación normal ϵ es la deformación δ dividida por L_0 .

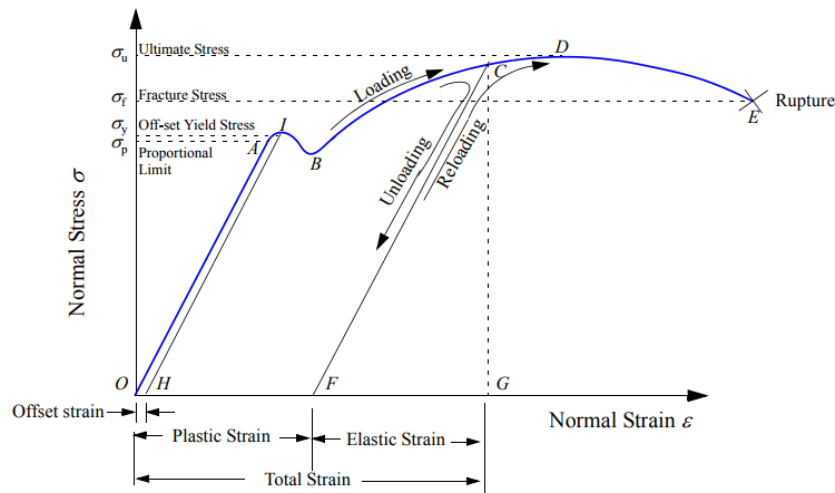


Figura 191.

Curva esfuerzo - deformación

Fuente: (Vable, 2006)

La elasticidad del agarre, la simetría del agarre, la fricción y otros efectos locales se asumen y se observa que mueren rápidamente con el aumento de la distancia desde los extremos. Esta disipación de los efectos locales se ve facilitada por el cambio gradual en la sección transversal. El espécimen está diseñado de manera que su región central se encuentre en un estado uniforme de tensión axial. La tensión normal se calcula dividiendo la fuerza aplicada \mathbf{P} por el área de sección transversal A_0 , que se puede encontrar a partir de la anchura o diámetro de la muestra.

La prueba de tensión puede realizarse controlando la fuerza \mathbf{P} y midiendo la correspondiente deformación δ . Alternativamente, podemos controlar la deformación δ mediante el movimiento de los mangos y medir la fuerza correspondiente \mathbf{P} . Se registran los valores de fuerza \mathbf{P} y deformación δ , a partir de los cuales se calculan el esfuerzo normal σ y la deformación normal ϵ . La *Figura 191*, muestra una curva típica esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) para el metal.

A medida que se aplica la fuerza, se obtiene inicialmente una línea recta (OA). El final de esta región lineal se denomina límite proporcional. Para algunos metales, la tensión puede entonces disminuir ligeramente (la región AB), antes de aumentar una vez más. La tensión más grande (punto D en la curva) se denomina tensión máxima. En un experimento controlado por la fuerza, la muestra se romperá repentinamente con el esfuerzo final. En un experimento controlado por desplazamiento, veremos una disminución en el estrés (región DE). La tensión en el punto de ruptura E, se llama fractura o tensión de ruptura.

5.2.10.8 Regiones elásticas y plásticas

Si cargamos la muestra hasta cualquier punto a lo largo de la línea OA o incluso un poco más y luego comenzamos a descargar, encontramos que volvemos a trazar la curva esfuerzo-deformación y retornamos al punto O. En esta región elástica, el material recupera su original cuando se retira la fuerza aplicada.

Sin embargo, si empezamos a descargar sólo después de llegar al punto C, bajaremos por la línea recta FC, que será paralela a la línea OA. En el punto F, la tensión es cero, pero la deformación es distinta de cero. C se encuentra así en la región plástica de la curva esfuerzo-deformación, en la que el material se deforma permanentemente y la deformación permanente en el punto F es la deformación plástica. La región en la que el material se deforma permanentemente, se denomina región plástica. La deformación total en el punto C, es la suma de la deformación plástica (OF) y una deformación elástica adicional (FG).

El punto que delimita el elástico de la región plástica se llama el límite elástico. La tensión en el límite de elasticidad se denomina esfuerzo de fluencia. En la práctica, el límite de elasticidad puede encontrarse en cualquier parte de la región AB, aunque para la mayoría de los metales está próximo al límite proporcional. Para muchos materiales, puede que ni siquiera esté claramente definido. Para estos materiales, se marca un valor prescrito de la tensión desplazada recomendado por ASTM para obtener el punto H en la *Figura 191*. Partiendo de H, dibujamos una línea (HI) paralela a la parte lineal (OA) de la curva esfuerzo-deformación. La tensión de deformación compensada correspondería a una deformación plástica en el punto I. Normalmente, la deformación offset se da como un porcentaje. Una cepa de 0,2% es igual a $\epsilon = 0,002$.

Debe enfatizarse que elástico y lineal son dos descripciones de materiales distintas. La *Figura 192 a.*, muestra la curva esfuerzo-deformación de un caucho blando que puede estirarse varias veces su longitud original y volver a su geometría original. El caucho blando es por lo tanto, material elástico pero no lineal.

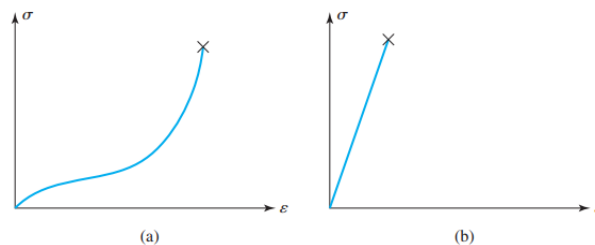


Figura 192.

Ejemplos de materiales no lineales. a) caucho blando, b) vidrio

Fuente: (Vable, 2006)

Materiales dúctiles y quebradizos

Los materiales dúctiles, como el aluminio y el cobre, pueden sufrir grandes deformaciones plásticas antes de la fractura. (El caucho blando puede sufrir grandes deformaciones, pero no es un material dúctil.) El vidrio, por otro lado, es quebradizo: presenta poca o ninguna deformación plástica como se muestra en la *Figura 192 b*). La ductilidad de un material se describe usualmente como el alargamiento porcentual antes de la ruptura. Los valores de alargamiento del 17% para el aluminio y del 35% para el cobre, antes de la ruptura reflejan las grandes tensiones plásticas que estos materiales experimentan antes de la ruptura, aunque también presentan una pequeña deformación elástica.

Materiales duros y blandos

Una dureza del material es su resistencia a las rasgaduras y a la indentación (no a su fuerza). En la prueba de Rockwell, la prueba de dureza más común, un penetrador duro de forma estándar se presiona en el material usando una carga especificada. La profundidad de la indentación se mide y se asigna una escala numérica para comparar la dureza de diferentes materiales.

Un material blando puede hacerse más duro incrementando gradualmente su límite de elasticidad, mediante endurecimiento por deformación. Como hemos visto, en el punto C de la *Figura 191*, el material tiene una deformación permanente incluso después de la descarga. Si el material se vuelve a cargar, el punto C se convierte en el nuevo límite de elasticidad, ya que se observará una deformación plástica adicional sólo

después de que el esfuerzo exceda este punto. El endurecimiento por deformación se utiliza, por ejemplo, para hacer las ollas y cacerolas de aluminio más duraderas. En el proceso de fabricación, conocido como el dibujo profundo, el aluminio sufre la deformación plástica grande. Por supuesto, a medida que aumenta el límite de elasticidad, la deformación plástica restante antes de la fractura disminuye, por lo que el material se vuelve más frágil.

Constantes de material

La ley de Hooke, da la relación entre el esfuerzo normal y la deformación para la región lineal:

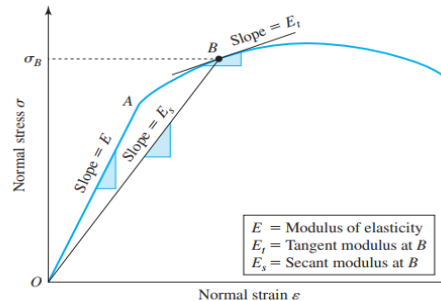


Figura 193. Módulo de elasticidad E para diferentes materiales

Fuente: (Vable, 2006)

Donde E se llama módulo de elasticidad o módulo de Young, representa la pendiente de la recta en una curva de tensión-deformación, como se muestra en la *Figura 193*.

En las regiones no lineales, la curva tensión-deformación se aproxima por una variedad de ecuaciones. La elección de la aproximación depende de la necesidad de realizar el análisis. Las dos constantes que se utilizan con frecuencia se muestran en la *Figura 193*. La pendiente de la tangente dibujada a la curva tensión-deformación a un valor de tensión dado se llama módulo tangente. La pendiente de la línea que une el origen al punto de la curva esfuerzo-deformación a un valor de tensión dado, se llama módulo secante.

Test de comprensión

Podemos simplificar en gran medida el análisis, asumiendo que el comportamiento material sea el mismo en tensión y compresión. Esta suposición de propiedades similares de tensión y compresión, funciona bien para los valores de constantes materiales (tales como E y ν). Por lo tanto, las fórmulas de tensión y deformación desarrolladas en este libro, pueden aplicarse a miembros en tensión y en compresión. Sin embargo, la resistencia a la compresión de muchos materiales quebradizos puede ser muy diferente de su resistencia a la tracción. En los materiales dúctiles también la inversión del esfuerzo de la tensión a la compresión en la región plástica, puede causar falla.

La *Figura 194a*, muestra los diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales quebradizos. Observe que los módulos de elasticidad (las pendientes de las líneas), son los mismos en tensión y compresión. Sin embargo, la resistencia a la compresión del hierro fundido es cuatro veces su resistencia a la tracción, mientras que el concreto puede soportar tensiones de compresión de hasta 5 ksi, pero tiene una resistencia a la tracción insignificante. Reforzar el hormigón con barras de acero puede ayudar porque las barras llevan la mayoría de las tensiones de tracción.

La *Figura 194b*, muestra los diagramas esfuerzo-deformación para un material dúctil tal como acero dulce. Si el ensayo de compresión se realiza sin descarga, entonces el comportamiento bajo tensión y compresión es casi idéntico: el módulo de elasticidad, el límite de elasticidad y el esfuerzo final son prácticamente los mismos. Sin embargo, si el material es cargado más allá del límite de elasticidad (punto A), hasta el punto B y

después descargado, el diagrama esfuerzo-deformación comienza a curvar después del punto C en la región de compresión.

Supongamos una vez más la dirección de carga inversa, pero comenzando en el punto D, que es al menos 2 $\sigma_{fluencia}$ debajo del punto B y terminando en el punto F, donde no hay carga aplicada. La deformación plástica es ahora menor que la del punto C. De hecho, es concebible que los ciclos de carga y descarga puedan devolver el material al punto O sin tensión plástica. ¿Significa eso que tenemos el mismo material que el que empezamos? ¡No! La estructura interna del material se ha alterado significativamente. La rotura del material por debajo del esfuerzo final por la inversión del ciclo de carga en la región plástica se denomina efecto Bauschinger. Por lo tanto, el diseño por lo general impide la carga cíclica en la región plástica. Incluso en la región elástica, la carga cíclica puede causar falla debida a la fatiga (Vable, 2006).

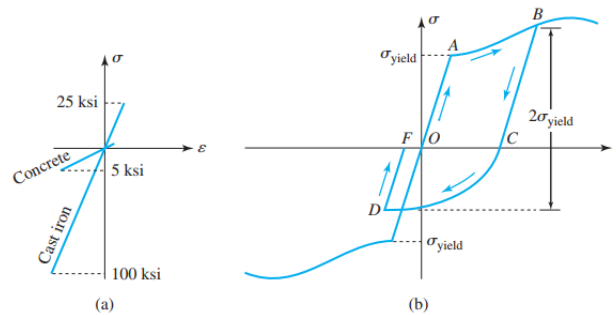


Figura 194.

Diferencias en compresión y tensión. a) Material frágil, b) Material dúctil

Fuente: (Vable, 2006)

Ejemplo 5.11.

Determine la deformación total del elemento mostrado en la Fig. 5.43., si el tramo AB tiene un diámetro de 25 mm y el tramo CE un diámetro de 12.5 mm. Ambos tramos están hechos de acero estructural (200 GPa).

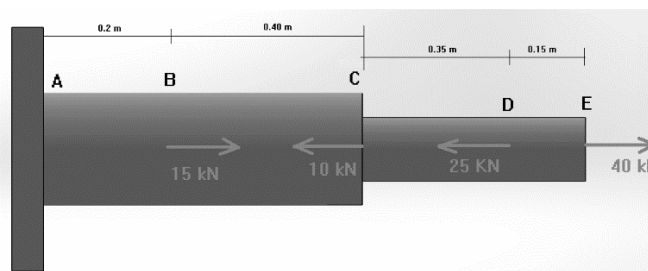


Figura 195.

Ejemplo 5.11.

Fuente: Autores

Solución:

Determinamos el área de cada sección:

$$A_{AB} = A_{BC} = \frac{\pi * (25mm)^2}{4} = 490.87 \text{ mm}^2 = 4.91 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{CD} = A_{DE} = \frac{\pi * (12.5mm)^2}{4} = 122.72 \text{ mm}^2 = 1.23 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

La determinación de la deformación total del elemento viene dado por la sumatoria de las deformaciones de cada tramo, si trabaja a tensión se sumará y si trabaja a compresión se restará, por lo que es necesario definir las cargas internas a las que están trabajando cada sección:

Tramo DE

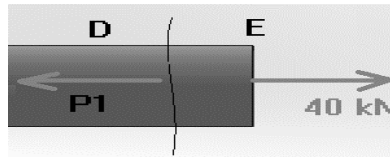


Figura 196.

Corte tramo DE Ejemplo 5.11.

Fuente: Autores

$$\vec{\uparrow} \sum F_x = 0; \quad 40 \text{ kN} - P_1 = 0$$

$$P_1 = 40 \text{ kN a tensión}$$

$$\delta_{DE} = \frac{P_1 * L_{DE}}{A_{DE} * E}$$

$$\delta_{DE} = \frac{40000 \text{ N} * 0.15 \text{ m}}{1.23 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 200 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 2.44 * 10^{-4} \text{ m} = 0.24 \text{ mm}$$

Tramo CD

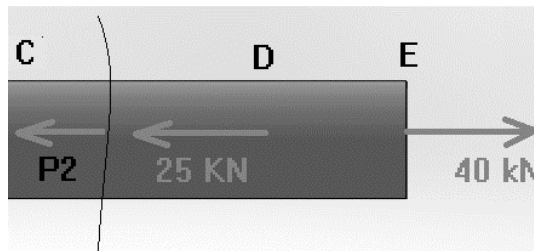


Figura 197.

Corte tramo CD Ejemplo 5.11.

Fuente: Autores

$$\vec{\uparrow} \sum F_x = 0; \quad 40 \text{ kN} - 25 \text{ kN} - P_2 = 0$$

$$P_2 = 15 \text{ kN a tensión}$$

$$\delta_{CD} = \frac{P_{CD} * L_{CD}}{A_{CD} * E}$$

$$\delta_{CD} = \frac{15000 \text{ N} * 0.35 \text{ m}}{1.23 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 200 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 2.13 * 10^{-4} \text{ m} = 0.21 \text{ mm}$$

Tramo BC

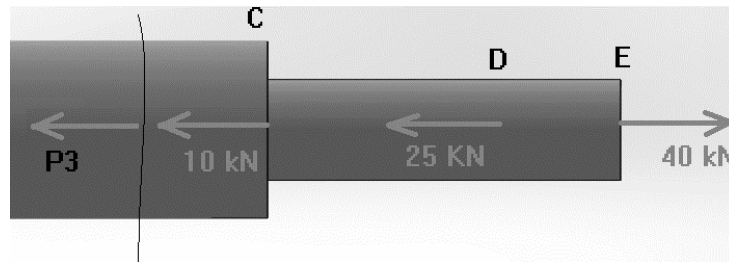


Figura 198.

Corte tramo BC Ejemplo 5.11.

Fuente: Autores

$$\vec{\uparrow} \sum F_x = 0; \quad 40 \text{ kN} - 25 \text{ kN} - 10 \text{ kN} - P_3 = 0$$

$$P_3 = 5 \text{ kN a tensión}$$

$$\delta_{BC} = \frac{P_{BC} * L_{BC}}{A_{BC} * E}$$

$$\delta_{BC} = \frac{5000 \text{ N} * 0.40 \text{ m}}{4.91 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 200 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 2.04 * 10^{-5} \text{ m} = 0.0204 \text{ mm}$$

Tramo AB

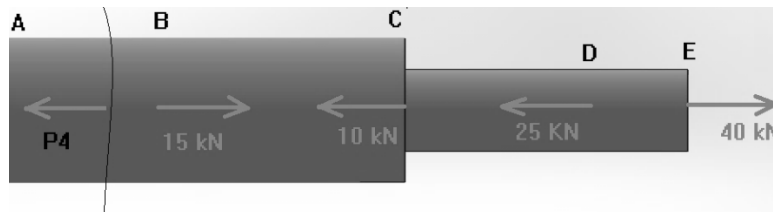


Figura 199.

Corte tramo AB Ejemplo 5.11.

Fuente: Autores

$$\vec{\uparrow} \sum F_x = 0; \quad 40 \text{ kN} - 25 \text{ kN} - 10 \text{ kN} + 15 \text{ kN} - P_4 = 0$$

$$P_4 = 20 \text{ kN a tensión}$$

$$\delta_{AB} = \frac{P_{AB} * L_{AB}}{A_{AB} * E}$$

$$\delta_{AB} = \frac{20000 \text{ N} * 0.20 \text{ m}}{4.91 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 200 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 4.07 * 10^{-5} \text{ m} = 0.0407 \text{ mm}$$

Todos los tramos están en tensión, así la deformación total del elemento será igual a la sumatoria de las deformaciones de los tramos:

$$\delta_T = \delta_{AB} + \delta_{BC} + \delta_{CD} + \delta_{DE}$$

$$\delta_T = 0.0407 \text{ mm} + 0.0204 \text{ mm} + 0.21 \text{ mm} + 0.24 \text{ mm}$$

$$\delta_T = 0.51 \text{ mm}$$

Ejemplo 5.12.

El siguiente sistema de elementos mecánicos es utilizado para suspender una carga de 40kN en el punto E, si el elemento CE se supone que es rígido, determine las deformaciones que sufren los tramos AC y BD que produce la carga y la nueva ubicación del punto E, además se sabe que dichos tramos están hechos de aluminio ($E=70\text{GPa}$) y que tienen una sección transversal de 450 mm^2 y 500 mm^2 respectivamente.

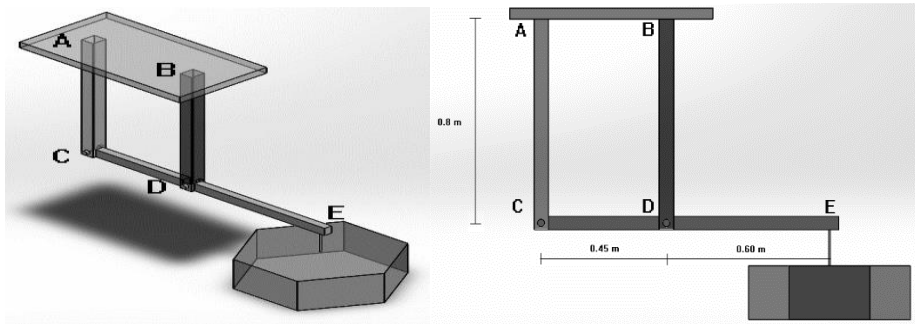


Figura 200.

Ejemplo 5.12.

Fuente: Autores

Solución:

La carga de 40 kN en el punto E, hace que el elemento AC se comprima y el elemento BD se tense debido a que el elemento CE es rígido; para determinar las reacciones que serán igual a las fuerzas internas que están trabajando en las dos barras, se aísla el elemento CE mediante un diagrama del cuerpo libre:

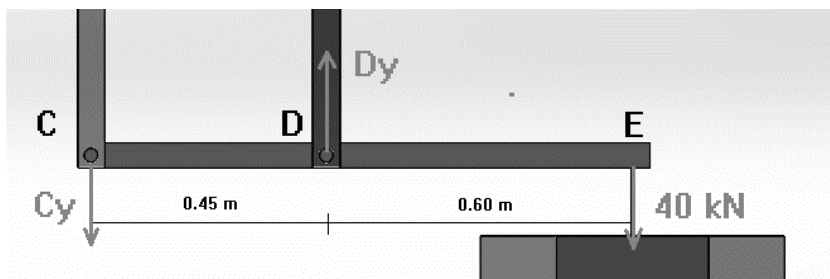


Figura 201.

Diagrama del cuerpo libre Ejemplo 5.12.

Fuente: Autores

$$\uparrow + \sum F_y = 0; \quad -C_y + D_y - 40\text{kN} = 0$$

$$\curvearrow + \sum M_D = 0; \quad C_y * 0.45 \text{ m} - 40\text{kN} * 0.6 \text{ m} = 0$$

$$C_y = 53.33 \text{ kN}$$

$$D_y = 93.33 \text{ kN}$$

$$C_y = F_{AC} = 53.33 \text{ kN}$$

$$D_y = F_{DB} = 93.33 \text{ kN}$$

Deformación del elemento AC

$$\delta_{AC} = \frac{F_{AC} * L_{AC}}{A_{AC} * E}$$

$$\delta_{AC} = \frac{53333 \text{ N} * 0.8 \text{ m}}{0.000450 \text{ m}^2 * 70 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

$$\delta_{AC} = 0.00135 \text{ m} = 1.35 \text{ mm}$$

Deformación del elemento DB

$$\delta_{DB} = \frac{F_{DB} * L_{DB}}{A_{DB} * E}$$

$$\delta_{DB} = \frac{93333 \text{ N} * 0.8 \text{ m}}{0.0005 \text{ m}^2 * 70 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

$$\delta_{DB} = 0.00213 \text{ m} = 2.13 \text{ mm}$$

Sabemos que el elemento AC se comprime y que el elemento DB se alarga, además el elemento CE es rígido, lo cual podemos determinar la nueva ubicación del punto E mediante la geometría de deformaciones:

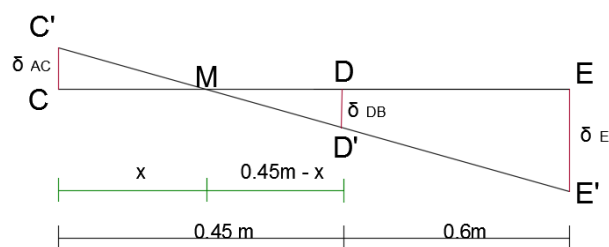


Figura 202.

Geometría de la deformación de la barra rígida CE Ejemplo 5.12.

Fuente: Autores

Mediante semejanza de triángulos se tiene que:

Triángulo MCC' y triángulo MDD'

$$\frac{CC'}{DD'} = \frac{CM}{MD}$$

$$\frac{\delta_{AC}}{\delta_{DB}} = \frac{x}{0.45m - x}$$

$$\frac{0.00135 m}{0.00213 m} = \frac{x}{0.45m - x}$$

$$x = 0.17 m$$

Triángulo MCC' y triángulo MEE'

$$\frac{CC'}{EE'} = \frac{CM}{ME}$$

$$\frac{\delta_{AC}}{\delta_E} = \frac{x}{0.45m - x + 0.6m}$$

$$\frac{0.00135 m}{\delta_E} = \frac{0.17m}{0.88 m}$$

$$\delta_E = 0.0069 m = 6.9 mm$$

5.2.10.9 Esfuerzos de temperatura

Cuando la temperatura de un componente aumenta o disminuye, el material se expande o se contrae respectivamente. Si esta expansión o contracción no se resiste de ninguna manera entonces los procesos se llevan a cabo libre de esfuerzo. Sin embargo, si se limitan los cambios en las dimensiones, se establecerán tensiones denominadas esfuerzos de temperatura dentro del material (Heran, 2000).

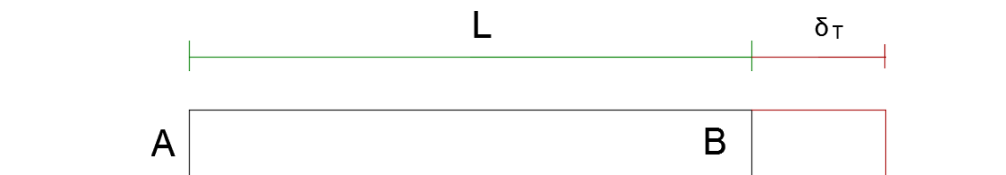


Figura 203.

Barra expuesta a altas temperaturas.

Fuente: Autores

Supongamos una barra **AB** de longitud **L**, a la cual se le ha expuesto a una temperatura mayor a la del ambiente, al tener los extremos libres se va a producir una deformación térmica δ_T , la cual es directamente proporcional a un coeficiente de expansión térmica α que depende de cada material, a la variación de temperatura Δt y a la longitud inicial del elemento **L**.

$$\delta_T = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (5-17)$$

La deformación unitaria viene dada por el cociente entre la deformación total producida y la longitud inicial:

$$\varepsilon = \frac{\delta_T}{L} = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot L}{L} = \alpha \cdot \Delta T \quad (5-18)$$

A partir de la ley de Hooke, se puede hacer analogía y determinar el esfuerzo por temperatura:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5-19)$$

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (5-20)$$

Ahora, si la barra está limitada a sufrir cambios en las dimensiones, se tiene un sistema indeterminado produciéndose un esfuerzo dentro del material:

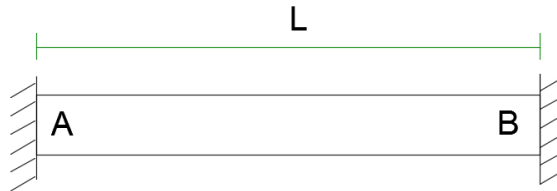


Figura 204.

Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones.

Fuente: Autores

Para poder resolver este sistema indeterminado, se aplica el principio de superposición, eliminando un extremo redundante:

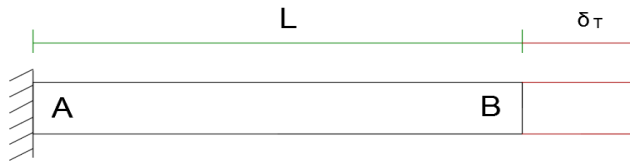


Figura 205.

Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, eliminación de un apoyo redundante.

Fuente: Autores

Pero en el punto B existe una reacción que también debe producir una deformación, dando como resultado una deformación total resultante de cero ya que tiene limitación en las dimensiones:

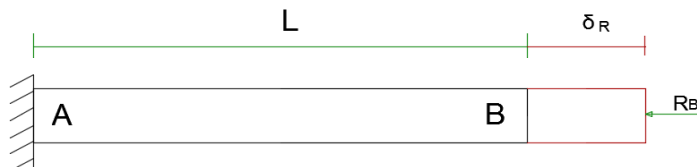


Figura 206.

Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, deformación producida por la reacción en el apoyo eliminado.

Fuente: Autores

$$\delta_T = \delta_R \quad (5-21)$$

Si reemplazamos las deformaciones se tiene que:

$$\alpha \cdot \Delta T \cdot L = \frac{R_B \cdot L}{A \cdot E} \quad (5-22)$$

Se simplifica la longitud de la barra L:

$$\alpha \cdot \Delta T \cdot E = \frac{R_B}{A} \quad (5-23)$$

Sabemos que fuerza entre área representa un esfuerzo, concluyendo que:

$$\sigma_T = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (5-24)$$

Ejemplo 5.13.

Para la barra mostrada en la *Figura 207*, determine el esfuerzo que se produce en el material, si inicialmente está a temperatura ambiente de 22 °C y repentinamente sufre una variación a 115 °C. La sección AB tiene un área de 20 cm² y la sección BC 12 cm². Utilice un coeficiente de expansión térmica del acero ($\alpha = 11.7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y $E = 200 \text{ GPa}$

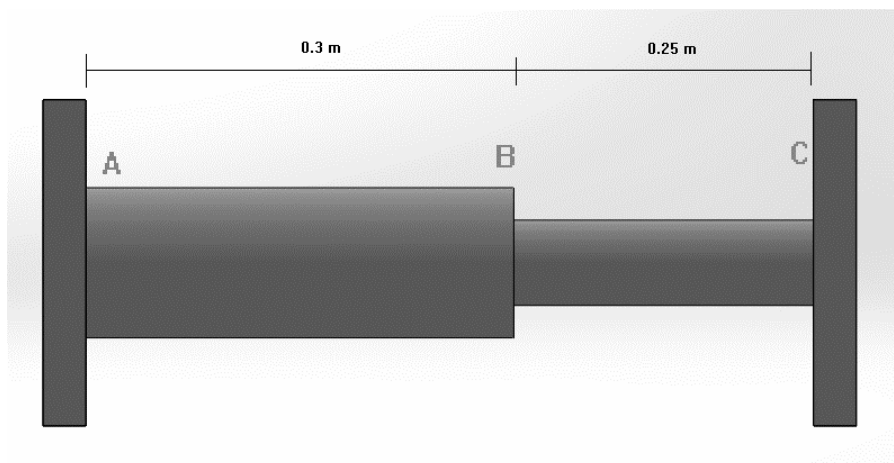


Figura 207.

Ejemplo 5.13.

Fuente: Autores

Solución:

Se tiene un sistema indeterminado, es necesario resolver por el principio de superposición, eliminamos el apoyo en C y se tendrá una deformación debido a la expansión térmica:

$$-R_A + R_C = 0$$

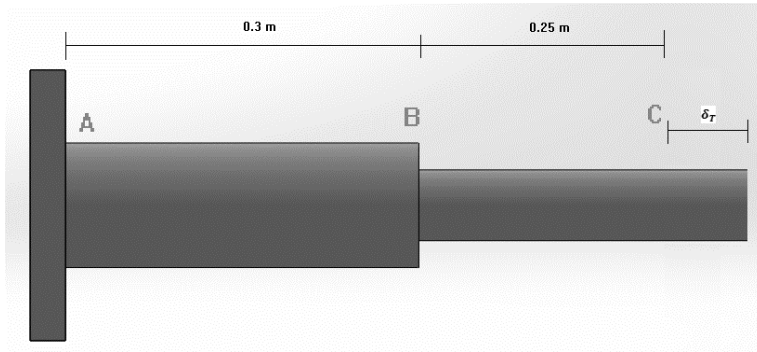


Figura 208.

Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, eliminación del apoyo redundante en C.

Fuente: Autores

$$\Delta T = T_f - T_o$$

$$\Delta T = 115^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 95^\circ\text{C}$$

La deformación térmica no depende del área de la sección transversal:

$$\delta_T = \alpha * \Delta T * L$$

$$\delta_T = 11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} * 95^\circ\text{C} * 0.55 \text{ m}$$

$$\delta_T = 0.00061 \text{ m} = 0.61 \text{ mm}$$

Producto de la reacción en C, tenemos una deformación igual a la deformación térmica por la restricción de variar las dimensiones, la deformación mecánica producida por la reacción se puede determinar seccionando la barra en dos tramos AB y BC:

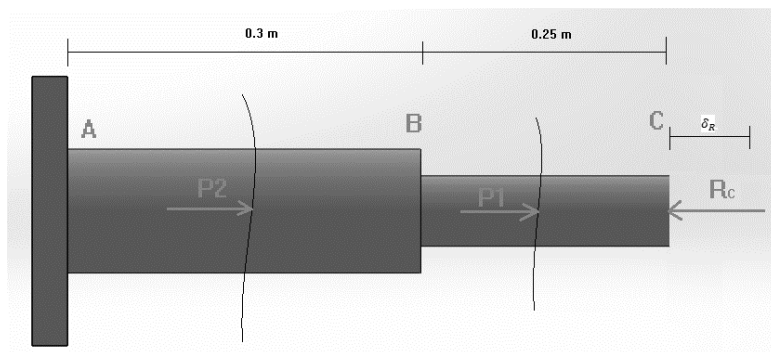


Figura 209.

Barra expuesta a altas temperaturas con restricción de las dimensiones, deformación producida por la reacción de C.

Fuente: Autores

Por equilibrio estático se tiene que:

$$R_C = P_1 = P_2$$

$$\delta_R = \frac{P_1 * L_{BC}}{A_{BC} * E} + \frac{P_2 * L_{AB}}{A_{AB} * E}$$

$$\delta_R = R_C \left(\frac{L_{BC}}{A_{BC} * E} + \frac{L_{AB}}{A_{AB} * E} \right)$$

Además, se sabe que las deformaciones tienen que ser iguales debido a que es un sistema restringido:

$$\delta_T = \delta_R$$

$$0.61 \text{ mm} = R_B \left(\frac{L_{BC}}{A_{BC} * E} + \frac{L_{AB}}{A_{AB} * E} \right)$$

Reemplazando valores se tiene que:

$$0.61 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = R_C \left(\frac{0.25 \text{ m}}{12 \text{ cm}^2 \cdot \frac{(1 \text{ m})^2}{(100 \text{ cm})^2} \cdot 200 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} + \frac{0.30 \text{ m}}{20 \text{ cm}^2 \cdot \frac{(1 \text{ m})^2}{(100 \text{ cm})^2} \cdot 200 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \right)$$

$$R_C = 340465.11 \text{ N} = 340.4 \text{ kN}$$

$$R_A = 340465.11 \text{ N} = 340.4 \text{ kN}$$

Las reacciones indican que es la fuerza interna a la que están soportando el material, entonces:

$$\sigma_{AB} = \frac{340.4 \text{ kN}}{20 \text{ cm}^2 \cdot \frac{(1 \text{ m})^2}{(100 \text{ cm})^2}} = 170.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{BC} = \frac{340.4 \text{ kN}}{12 \text{ cm}^2 \cdot \frac{(1 \text{ m})^2}{(100 \text{ cm})^2}} = 283.66 \text{ MPa}$$

5.3 Propiedades eléctricas

5.3.1 Introducción

“Las propiedades eléctricas son conocidas por generar un comportamiento especial en los materiales” (Crowell, 2009). Por ende, dichas capacidades determinan el comportamiento del material y en función de estas características se puede determinar el comportamiento conocido como dieléctrico, el cual no permite el flujo de corriente eléctrica a través del material.

Dentro de estas propiedades podemos encontrar algunos tipos que son muy interesantes por las características que los diferencian a cada uno, estos son:

- **Materiales óhmicos:** aquellos cuya curva Corriente (I)-Voltaje (V) es lineal; entre ellos dos grandes grupos: los conductores de resistividad mucho menor que $1 \Omega \text{ m}$ y los aislantes de resistividad mucho mayor que $1 \Omega \text{ m}$.
- **Los semiconductores:** aquellos materiales cuya curva Corriente (I)-Voltaje (V) es no lineal.

5.3.2 Ley de OHM

Considérese una longitud de alambre de cobre cuyos extremos están conectados a una batería, como se muestra en la *Figura 210*. Si se aplica una diferencia de potencial V , fluirá una corriente I que es proporcional a la resistencia R del alambre (Smith, 1993).

De acuerdo con la *ley de Ohm*, el flujo de **corriente eléctrica** I es proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del alambre, ó:

$$I = \frac{V}{R} \quad (5-21)$$

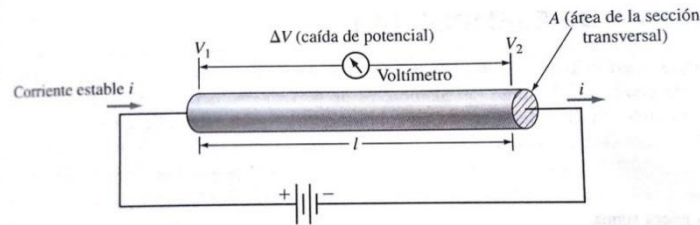


Figura 210.

Diferencia de potencial ΔV aplicado al espécimen de alambre metálico de área de sección transversal A .

Fuente: (Smith, 1993)

Donde:

V = Diferencia de potencial, V (voltios)

R = Resistencia del alambre, Ω (ohmios)

5.3.2.1 Resistividad eléctrica

La **resistencia eléctrica** R del alambre de un conductor eléctrico de la *Figura 210*, es directamente proporcional a su longitud l e inversamente proporcional a su área de sección transversal A . Estas cantidades están relacionadas por una constante del material llamada **resistividad eléctrica**, es la medida de la oposición que presenta un material al movimiento de los electrones, es decir la oposición de la composición del material al paso de la corriente eléctrica. Esto es:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5-22)$$

Las unidades para la resistividad eléctrica, que es una constante para un material a una temperatura particular, son **$\Omega \cdot m$** .

Tabla 24.

Conductividades eléctricas de algunos metales y no metales a temperatura ambiente.

Metales y Aleaciones	$\sigma(\Omega \cdot m)^{-1}$	No metales	$\sigma(\Omega \cdot m)^{-1}$
Plata	6.3×10^7	Grafito	10^5 (Promedio)
Cobre, pureza comercial	5.8×10^7	Germanio	2.2
Oro	4.2×10^7	Silicio	4.3×10^{-4}
Aluminio, pureza comercial	3.4×10^7	Polietileno	10^{-14}
		Poliestireno	10^{-14}
		Diamante	10^{-14}

5.3.2.2 Conductividad eléctrica

A menudo es más conveniente pensar en términos de paso de corriente eléctrica en vez de la resistencia y por ello la cantidad de **conductividad eléctrica** σ se define como el recíproco de la resistividad eléctrica:

$$\sigma = \frac{l}{\rho} \quad (5-23)$$

Las unidades para la conductividad eléctrica son $(\text{ohmmetro})^{-1} = (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$

5.3.2.3 Capacitancia eléctrica

La capacitancia eléctrica es la medida de la máxima acumulación de carga eléctrica de un determinado objeto. Todo objeto material posee una capacitancia asociada. Los dispositivos cuya propiedad de capacitancia eléctrica es considerable se denominan capacitores. La capacitancia se mide en Faradios (F) y equivale a 1Coulomb/Voltio. Depende de la forma y el tamaño del capacitor, de los conductores y de la naturaleza del material aislante.

Un capacitor acumula cargas, no puede acumular energía potencial eléctrica solamente, acumula también energía electromagnética. Un vehículo automotor posee batería y acumula carga. Un solenoide o bobina, también acumula energía potencial electromagnética y obviamente no es un capacitor.

Tabla 25.

Conductividad eléctrica a temperatura ambiente.

Material	Conductividad, σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
Metales y Aleaciones	
Aluminio recocido	35.36×10^6
Cobre recocido	58.00×10^6
Oro	41.0×10^6
Hierro	10.3×10^6
Plomo	4.84×10^6
Magnesio	22.4×10^6
Mercurio	1.04×10^6
Níquel (99.95%)	14.6×10^6
Níquel-cromo (66% Ni)	1.00×10^6
Platino	9.43×10^6
Plata	62.9×10^6
Acero (alambre)	$5.71-9.35 \times 10^6$
Wolframio	18.1×10^6
Zinc	16.90×10^6
Semiconductores	
Si	0.40×10^{-3}
Ge	2.0
GeAs	0.17×10^{-6}
InSb	17×10^3
SPb	38.4
Cerámicos, vidrios y polímeros	
Alúmina	$10^{-10} - 10^{-12}$
Vidrio de borosilicato	10^{-13}
Polietileno	$10^{-13} - 10^{-15}$
Nylon 66	$10^{-12} - 10^{-13}$

5.3.3 Portadores de carga y conducción

La conducción eléctrica en los materiales tiene lugar por medio de especies individuales, de escala atómica, denominadas **portadores de carga**. El ejemplo más simple de portadores de carga es el **electrón**, una partícula con una carga negativa de $1.602 \cdot 10^{-19} C$.

El **huevo electrónico** es un concepto más abstracto y consiste en la ausencia de un electrón en una nube de electrones. La ausencia de la carga negativa del electrón da al huevo electrónico una carga positiva efectiva de $1.602 \cdot 10^{-19} C$ en relación con su entorno.

Los huecos electrónicos juegan un papel primordial en el comportamiento de los materiales semiconductores. En los materiales iónicos, los aniones pueden servir como portadores de carga negativa y los cationes como portadores de carga positiva. La valencia de cada ion indica la carga, positiva o negativa, en múltiplos de $1.602 \cdot 10^{-19} C$.

5.3.4 Clasificación de los materiales según su conductividad

5.3.4.1 Conductores

Los materiales conductores son aquellos que **tienen altos valores de conductividad**. El efecto de la temperatura en la conductividad de los metales está representado en la *Figura 211*. En general, un incremento de la temperatura por encima de la temperatura ambiente produce una disminución de la conductividad. Ésta caída de la conductividad es debida principalmente, a la menor movilidad del electrón (Shackelford, 2005).

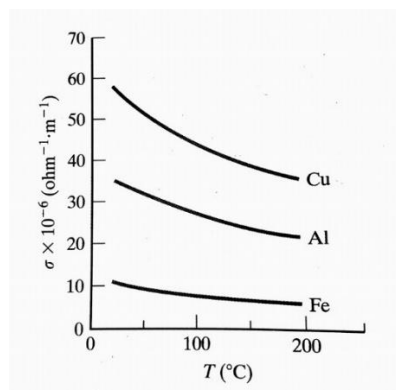


Figura 211.

Variación de la conductividad eléctrica de algunos metales con la temperatura.

Fuente: (Shackelford, 2005)

5.3.4.2 Aislantes

Los aislantes son materiales con **baja conductividad**. Es importante hacer notar que los materiales de baja conductividad son parte importante de la industria electrónica. Por ejemplo, aproximadamente el 80% del mercado de cerámicos industriales mundial pertenece a esta categoría, representando los cerámicos estructurales el 20% restante (Shackelford, 2005).

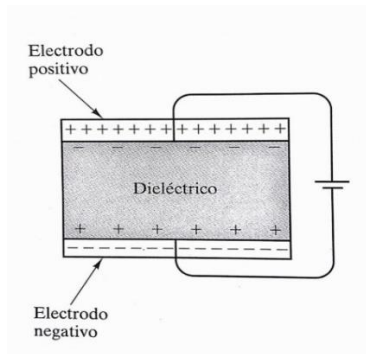


Figura 212.

Condensador de placas paralelas está formado por un aislante, o dieléctrico, entre dos electrodos metálicos

Fuente: (Shackelford, 2005)

5.3.4.3 Semiconductores

“Los semiconductores son materiales cuyas conductividades eléctricas están entre las de metales altamente conductores y aislantes con una conducción pobre” (Smith, 1993).

5.3.4.4 Semiconductores intrínsecos

Los semiconductores intrínsecos son semiconductores puros cuya conductividad eléctrica se determina mediante sus propiedades conductivas inherentes. El **Si** y el **Ge** puros elementales son materiales semiconductores intrínsecos. “Estos elementos, que están en el grupo IV-A en la tabla periódica, tienen la estructura cúbica de diamante con enlaces covalentes altamente direccionales” (Smith 1993).

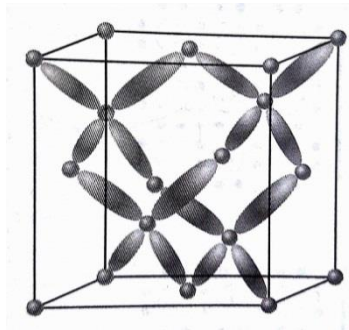


Figura 213.

Estructura del cristal cúbico de diamante.

Fuente: (Smith, 1993)

La conductividad eléctrica en semiconductores puros tales como los ya mencionados, se describe de manera cualitativa. Los electrones de enlace son incapaces de moverse a través de la red cristalina y por ello, de conducir electricidad a menos que se proporcione energía suficiente para excitarlos desde sus posiciones de enlace. Cuando se suministra una cantidad crítica de energía a un electrón de valencia para excitarlo más allá de su posición de enlace, éste se vuelve un electrón de conducción libre y deja detrás de él un “hueco” cargado positivamente en la red de cristal.

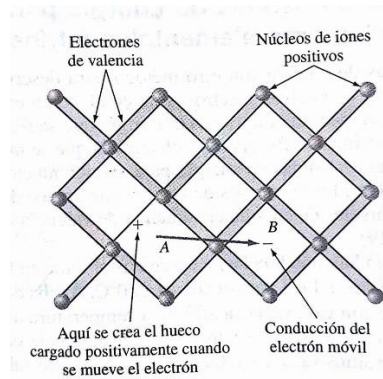


Figura 214.

Electrón excitado desde un enlace en A y movido hasta el punto B.

Fuente: (Smith, 1993)

5.3.4.5 Semiconductores extrínsecos

Los semiconductores extrínsecos son soluciones sólidas sustitucionales muy diluidas, en las cuales los átomos de impureza del soluto tienen diferentes características de valencia respecto de la red atómica del disolvente. “Las concentraciones de los átomos de impurezas agregados en estos semiconductores suelen encontrarse en el intervalo de 100 a 1000 partes por millón (ppm)”.

5.3.4.6 Semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo)

Los átomos de impureza de un elemento del grupo V-A, tal como el P, As y Sb cuando se agregan al silicio o germanio, proporcionan electrones que se ionizan con facilidad para la conducción eléctrica. Puesto que estos átomos de impureza del grupo V-A donan electrones de conducción cuando están presentes en cristales de silicio o germanio, recibe el nombre de *átomos de impurezas donadoras*. Los semiconductores de silicio o germanio que contienen átomos de impurezas del grupo V, reciben el nombre de semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo) puesto que la mayoría de los portadores de carga son electrones.

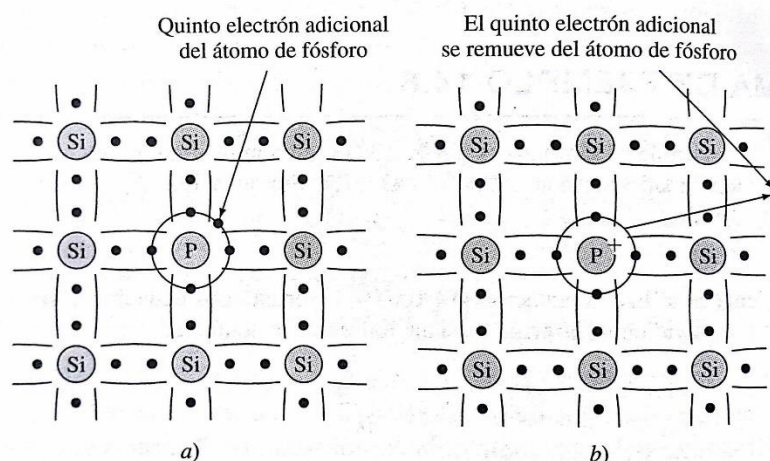


Figura 215.

Semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo).

Fuente: (Smith, 1993)

5.3.4.7 Semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo)

Cuando un electrón de valencia de un átomo de silicio cerca de un átomo de boro llena un hueco del electrón faltante en una banda de valencia de boro-silicio.

Este electrón se eleva al nivel de aceptor y crea un ion de boro negativo. En este proceso se crea un hueco de electrón en la red de silicio que actúa como un portador de carga positivo. Átomos de elementos de grupo III-A tales como B, Al y Ga proporcionan niveles de aceptor en semiconductores de silicio y reciben el nombre de *átomos aceptores*. Puesto que los portadores mayoritarios en estos semiconductores extrínsecos son huecos en la estructura de la banda de valencia, éstos se denominan semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo).

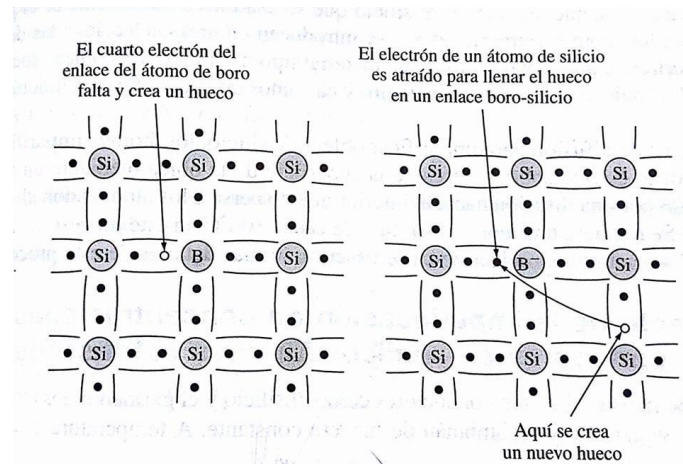


Figura 216.

Semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo).

Fuente: (Smith, 1993)

5.3.4.8 Materiales superconductores

Esta tendencia continúa hasta que la temperatura desciende bastante por debajo de la temperatura ambiente. “Aún a temperaturas extremadamente bajas (de unos pocos grados Kelvin), los metales típicos presentan una conductividad finita (la resistividad no es nula). Existen unos pocos materiales que constituyen una excepción” (Shackelford, 2005).

Al llegar a una determinada *temperatura crítica* T_c , la resistividad del mercurio se reduce bruscamente a cero, es decir, se convierte en superconductor. En las cercanías del cero absoluto (-273°C) todos los materiales presentan cero resistencia y se convierten en superconductores.

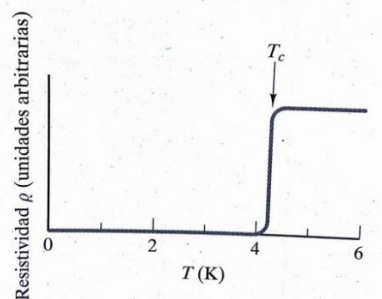


Figura 217.

La resistividad del mercurio desciende repentinamente a 0 a una temperatura crítica $T_c = 4.12$ K, por debajo de T_c el mercurio es superconductor.

Fuente: (Shackelford, 2005)

Temperatura crítica: temperatura por debajo de la cual la resistividad eléctrica de un material se aproxima a la del cero absoluto. Es la temperatura a la cual el material se vuelve superconductor. Por ejemplo, para el diboruro de magnesio (MgB_2) la temperatura crítica es 39 K. En 1987 se descubrió el $IBa_2Cu_3O_7$ con 93 K y

en 1988 el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ con 110 K. El récord lo tiene desde el 2000 el $\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ con 138 K.

5.3.4.9 Modelo de bandas de energía para aislantes

En los aislantes, los electrones están ligados firmemente a sus átomos de enlace mediante enlaces iónicos o covalentes y no tienen “libertad” para conducir electricidad a menos que se energicen en forma considerable. El modelo de bandas de energía para aislantes consiste en una banda de **valencia** llena inferior y una banda de **conducción** vacía superior. Estas bandas están separadas por una brecha de energía relativamente grande E_g . Para liberar un electrón de conducción, la partícula debe energizarse hasta “brincar” la brecha, la cual puede tener un valor tan grande como de 6 a 7 eV; tal es el caso, por ejemplo, el diamante puro. En el diamante, los electrones están firmemente ligados mediante enlaces covalentes tetraédricos sp^3 .

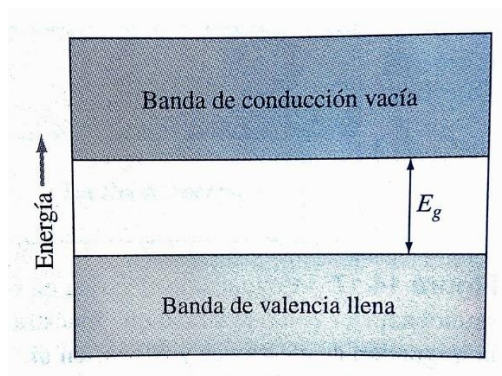


Figura 218.

Modelo de banda para energía aislante.

Fuente: (Smith, 1993)

5.3.4.10 Banda de valencia

Es la banda de energía que contiene a los electrones de valencia. En un conductor la banda de valencia es también la banda de conducción. La banda de valencia en un metal conductor no está llena y por ello, algunos electrones puede energizarse hasta niveles dentro de la banda de valencia y convertirse en electrones de conducción.

5.3.4.11 Banda de conducción

Los niveles de energía no están llenos en los cuales los electrones pueden excitarse para convertirse en electrones de conducción. En semiconductores y aislantes hay una brecha de energía entre la banda de valencia inferior llena y la banda de conducción superior vacía.

5.3.4.12 Dispositivos semiconductores

La capacidad de los fabricantes de semiconductores para poner circuitos eléctricos extremadamente complejos en un solo chip de silicio de casi 1 cm^2 o menos y alrededor de $200 \mu\text{m}$ de espesor, ha revolucionado el diseño y la manufactura de incontables productos.

5.3.4.13 Diodo rectificador

Una de las aplicaciones más importantes de los diodos de unión pn es convertir voltaje alterno en voltaje directo, proceso que se conoce como *rectificación*. Los diodos que se utilizan en este proceso reciben el nombre de diodos rectificadores.

5.3.4.14 Polarización inversa

Cuando se aplica voltaje a un dispositivo (diodo), los portadores de carga se alejan de la unión (los huecos, positivos hacia el electrodo negativo y los electrones negativos hacia el electrodo positivo. “Esta polarización inversa lleva con rapidez a una polarización total del diodo. La mayor parte de los portadores de carga de cada región son conducidos a los electrodos adyacentes y sólo puede fluir una mínima corriente” (Shackelford, 2005).

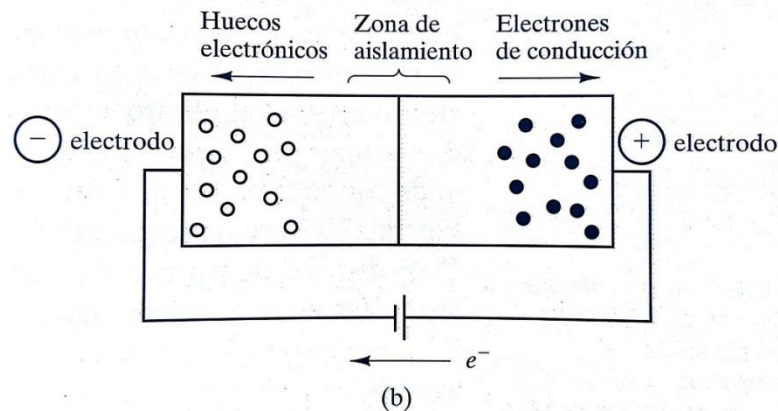


Figura 219.

Demostración de polarización inversa.

Fuente: (Shackelford, 2005)

5.3.4.15 Polarización directa

“La mayor parte de los portadores de carga de cada región fluyen hacia la unión donde continuamente se recombinan (cada electrón llena un hueco electrónico). Esto permite un flujo continuo de corriente en todo el circuito” (Shackelford, 2005).

El flujo de electrones en el circuito externo proporciona una fuente de huecos electrónicos en el electrodo positivo (al sacar electrones) y una fuente de electrones en el electrodo negativo.

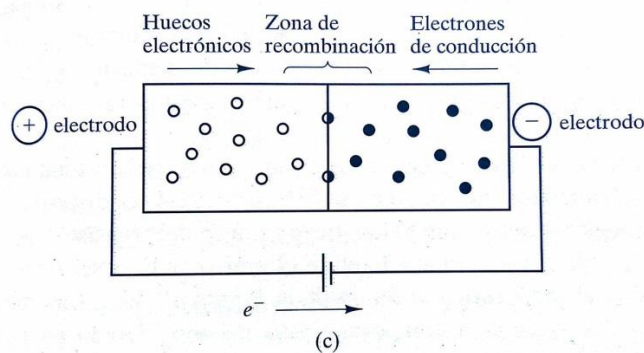


Figura 220.

Demostración de polarización directa.

Fuente: (Shackelford, 2005)

5.3.4.16 Transistor de unión bipolar

Este dispositivo consiste en un par de uniones p-n muy juntas. Las tres regiones del transistor se denominan: **emisor, base y colector**. “El transistor es un amplificador, ya que un ligero aumento en el voltaje del emisor produce un gran incremento en la corriente del colector” (Shackelford, 2005).

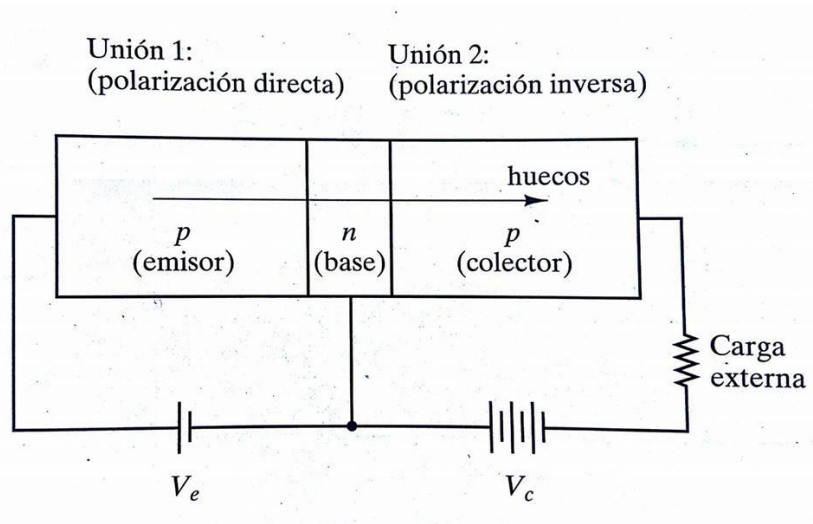


Figura 221.

Transistor de unión bipolar.

Fuente: (Shackelford, 2005)

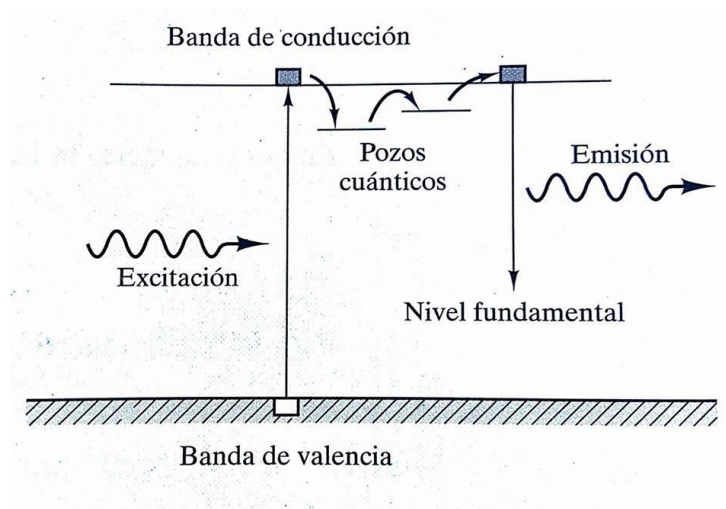


Figura 222.

Proceso de luminiscencia.

Fuente: (Shackelford, 2005)

El tiempo es un factor para distinguir dos tipos de luminiscencia:

- **Fluorescencia:** si ocurre la reemisión rápidamente (en menos de 10 nanosegundos), el fenómeno se llama fluorescencia.
- **Fosforescencia:** si la reemisión ocurre por tiempos más largos (en más de 10 nanosegundos), el fenómeno se llama fosforescencia.

Se puede asignar una terminología adicional, basada en la fuente de energía que conduce al estado excitado a los átomos. Por ejemplo, cuando la fuente son fotones es **fotoluminiscencia** y para una fuente de electrones el término es **electroluminiscencia**.

5.4 Propiedades magnéticas

5.4.1 Introducción

El magnetismo surge como resultado de cargas en movimiento, ya sea a nivel atómico o en una escala mayor. Este movimiento de carga establece un campo magnético. La mayoría de los materiales no interactúan con el campo magnético en el que se colocan en gran medida, pero ciertas clases de materiales interactúan de forma considerable. Estos materiales, llamados materiales ferromagnéticos, son predominantemente aleaciones de hierro, cobalto y níquel. Los materiales magnéticos a menudo se clasifican en duros o blandos.

Al principio, distinguir las propiedades magnéticas puede parecer una tarea desalentadora debido a las diferencias sutiles entre algunos de los términos. La tarea se complica por las diferencias básicas en los dos sistemas de unidades SI y CGS-EMU. Las grandes diferencias en los valores de las propiedades cuando se miden en los dos sistemas de unidades también pueden causar confusión (Moosbrugger, 2000).

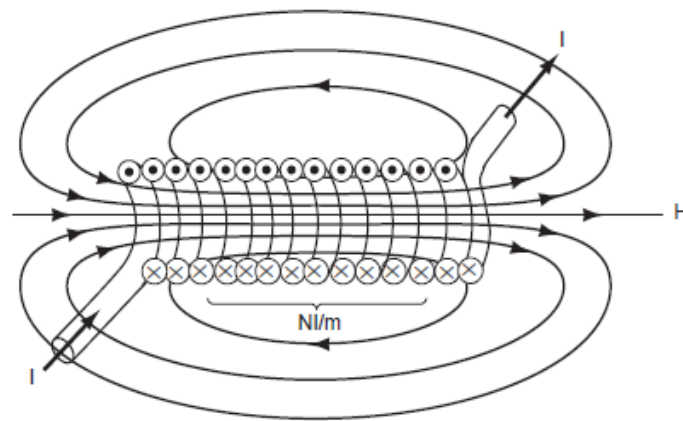


Figura 223.

Campo magnético en un solenoide largo. Si $NI/m=79.57747 \text{ A/m}$, el campo en el centro del solenoide sería 1 Oe.

Fuente: (Moosbrugger, 2000)

5.4.2 Materiales magnéticamente blandos

Son aquellos que se magnetizan fácilmente en un campo magnético relativamente bajo y que se magnetizan con la misma facilidad con un pequeño indicio magnético residual. Estas características no se adaptan a su uso en circuitos C.A. La base de los transformadores, motores y generadores que son campos magnéticos inducidos variables en el tiempo. Relés, electroimanes y blindaje magnético aliado son otras aplicaciones de estos materiales. Las fuerzas coercitivas para estos materiales son generalmente de 016 a 400 Am (0 002-5 Oe) H.

Las propiedades magnéticas de importancia para las aplicaciones de pérdida de CA incluyen lo siguiente (Moosbrugger, 2000):

Pérdida de núcleo magnético (P_C) . Es el poder de potencia activa (vatios) gastado por unidades de masa de material magnético en el que hay un cíclico, normalmente sinusoidal, variando la inducción a una inducción máxima especificada como (B_{max}) a una frecuencia especificada (f). La pérdida del núcleo está compuesta por corrientes de Foucault y pérdidas por histéresis. La pérdida del núcleo usualmente es informada a frecuencias de potencia, 50 y 60 Hz, y en la frecuencia más alta, 400 Hz, que se utilizan a bordo de un avión.

Las pérdidas de histéresis son un componente de la pérdida del núcleo. La pérdida de histéresis (W_h) se puede determinar como la potencia consumida para una sola trayectoria lenta alrededor de la curva de histéresis (Moosbrugger, 2000).

5.4.3 Materiales magnéticamente duros

El primer contacto que los humanos tuvieron con las propiedades magnéticas ocurrió con imanes naturales. Las primeras piedras fueron descubiertas por los chinos y luego por los griegos. Estas piedras se encontraron en la ciudad griega de Magnesia, de allí el nombre imán. Los imanes permanentes son “permanentes” ya que estos materiales retendrán el campo magnético inducido después de que se elimine el campo de magnetización. Los imanes permanentes perderán la magnetización a medida que aumente su temperatura. Hasta cierto punto esta pérdida es lineal y el cambio es reversible. A medida que se acerca la temperatura de Curie (T_c), el flujo magnético se aproxima a cero. Si bien está más allá del rango operativo, la temperatura Curie es una indicación de estabilidad térmica. Generalmente, cuanto más alto es T_c más estable térmicamente es el material (Moosbrugger, 2000).

Para imanes permanentes, el segundo cuadrante de la curva B-H es de interés y se denomina curva de desmagnetización. Esta curva es importante para comparar la calidad de los materiales magnéticos permanentes.

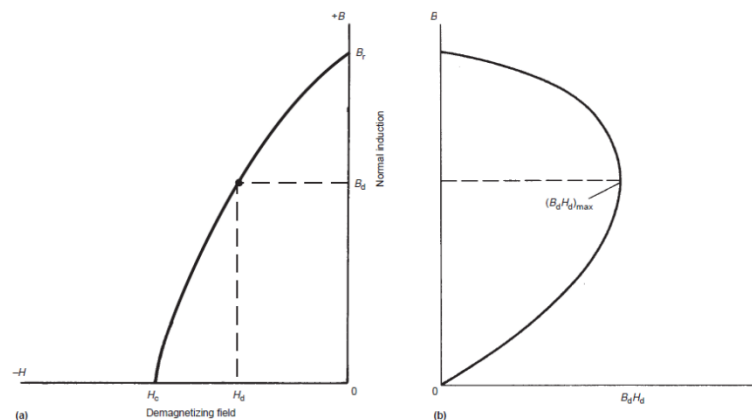


Figura 224.

A) Curva de desmagnetización y b) curva de productos energéticos para un imán permanente.

Fuente: (Moosbrugger, 2000)

5.4.4 Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética es un término genérico que representa una cantidad de diferentes propiedades medidas. ASTM A 340-96, “símbolos y definiciones relacionados con las pruebas magnéticas”, es una fuente esencial para cualquier persona que realice pruebas de permeabilidad o intente interpretarlas. El estándar enumera 9 permeabilidades de CA y 12 permeabilidades de CC. La permeabilidad magnética dc (μ), es la relación entre la inducción magnética B y la intensidad de campo magnético H, en condiciones definidas. Expresa la relación entre B y H en la expresión

$$B = \mu H \quad (5-24)$$

Si una barra de hierro virgen estaba colocada en el solenoide, el campo H podría controlarse con los mismos valores que antes, ya que dependen solo de la corriente. El campo B ahora sería mucho más grande, y la curva B contra H sería diferente. La curva ahora no es recta, y B alcanzará algún valor máximo.

Debido a la no linealidad de los materiales magnéticos, la permeabilidad magnética debe darse a un valor establecido de B o H. Como se señaló anteriormente, la permeabilidad magnética del espacio libre (vacío), μ_0 es la permeabilidad relativa de un material que se coloca en el campo H, Y $B = \mu_0 \mu_r H$; por lo tanto $\mu = \mu_0 \mu_r$ (Moosbrugger, 2000).

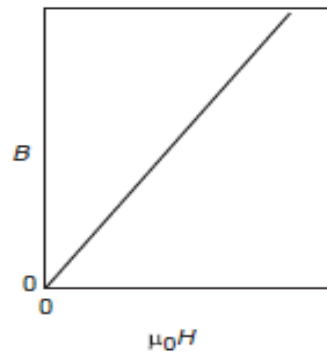


Figura 225.

Curva de B -versus- H curva de solenoide.

Fuente: (Moosbrugger, 2000)

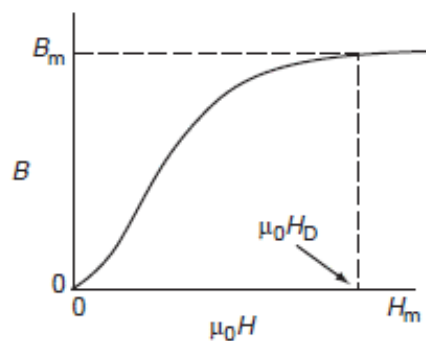


Figura 226.

Curva de B -versus- curva de H para una barra de hierro virgen en el campo de solenoide.

Fuente: (Moosbrugger, 2000)

5.4.4.1 Permeabilidad relativa (μ_r)

En cualquiera de los sistemas, la permeabilidad relativa es un número puro (sin unidades) y, por lo tanto, idéntico en valor. Los materiales ferromagnéticos tienen valores de permeabilidad relativa del orden de 10^2 a 10^6 .

Los materiales no magnéticos tendrán permeabilidad (μ_r) sobre el orden de 1.00000 ± 0.00001 ; por lo tanto, la diferencia entre B y H es 1 parte en 10^{-5} . Un parámetro más conveniente para usar en este caso es la susceptibilidad magnética (k).

5.4.4.2 Susceptibilidad (K):

La naturaleza de la capacidad de un material para interactuar con un campo magnético es expresada como susceptibilidad (K), que está estrechamente relacionada con la permeabilidad (Moosbrugger, 2000).

$$K = \mu_r - 1 \quad (5-25)$$

5.4.5 Fundamentos magnéticos

La temperatura Curie (T_C) es la temperatura a la que los materiales ferromagnéticos ya no pueden ser magnetizados por fuerzas externas y la temperatura a la que pierden su magnetismo residual. Por encima de esta temperatura, los ferromagnéticos se convierten en paramagnéticos (Moosbrugger, 2000).

5.4.5.1 Diamagnetismo

Langevin descubrió por primera vez la teoría del diamagnetismo en 1905. Amplió algunos de los trabajos anteriores de Ampere, Weber y Lenz. Un electrón se mueve alrededor de un núcleo en un átomo de una manera que es equivalente a la corriente en un bucle. El resultado es que los materiales diamagnéticos pueden repeler los campos magnéticos. Experimentalmente, se verifica que los materiales diamagnéticos tienen permeabilidad magnética relativa inferior a la unidad, inducción magnética negativa y susceptibilidad magnética negativa, prácticamente independiente de la temperatura.

Las sustancias son, en su gran mayoría, diamagnéticas, puesto que todos los pares de electrones con espín opuesto contribuyen débilmente al diamagnetismo y sólo, en los casos en los que hay electrones desaparejados existe una contribución paramagnética (o más compleja) en sentido contrario. Son materiales diamagnéticos: el agua, el hidrógeno, los gases nobles, el cloruro de sodio, el cobre, el oro, el silicio, el germanio, el grafito, el bronce y el azufre.

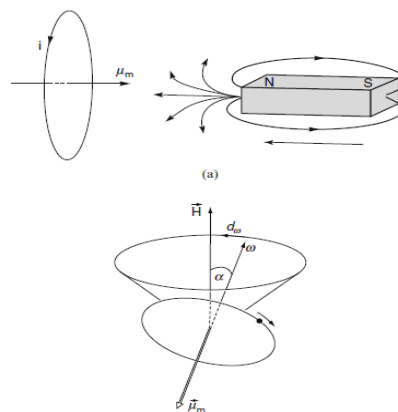


Figura 227.

Explicación del diamagnetismo. a) Inducción de una corriente en una pieza de alambre en forma de lazo moviendo un imán de barra hacia el lazo de alambre. La corriente en el circuito causa un campo magnético que se dirige opuesto al campo magnético del imán. b) Precesión de un electrón en órbita en un campo magnético externo.

Fuente: (Hummel, 2016)

5.4.5.2 Paramagnetismo

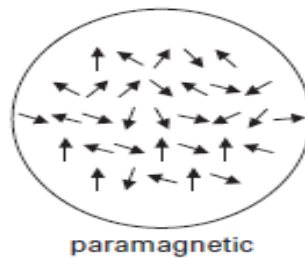
La primera medida de la susceptibilidad magnética en material paramagnético fue hecha por Curie en 1895. Descubrió que la susceptibilidad magnética variaba inversamente con la temperatura:

$$X_m = C/T \quad (5-26)$$

Donde C es la constante de Curie. La primera teoría que explicaba la medida de Curie fue propuesta por Langevin en 1905. Él asumió que el momento magnético neto de átomos y moléculas es el mismo en materiales paramagnéticos. El momento magnético es aleatorio en ausencia de campo magnético, y por lo tanto la magnetización del espécimen es cero. Cuando se aplica un campo magnético, el momento magnético tiende hacia la dirección del campo magnético aplicado. La energía del momento del campo aplicado está dada por (Tang, 2010):

$$E = -mH \cos \theta \quad (5-27)$$

El paramagnetismo en sólidos se atribuye, en gran medida, a un efecto magnético que resulta de los electrones que giran alrededor de sus propios ejes (Hummel, 2016).



paramagnetic

Figura 228.

Paramagnetismo

Fuente: (Tang, 2010)

5.4.5.3 Ferromagnetismo

En los materiales ferromagnéticos, los momentos magnéticos dentro de los dominios se alinean paralelos a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie. A temperaturas (por encima de la temperatura Curie) los materiales ferromagnéticos cambian a un estado paramagnético. Por ejemplo, la temperatura Curie de hierro (Fe) es 770 °C, la del níquel (Ni) es 358°C, y la del cobalto (Co) es 1131°C (Tang, 2010).

No hubo comprensión teórica del ferromagnetismo hasta que Weiss propuso su hipótesis del campo molecular. Weiss, supuso que cualquier momento magnético atómico m_j se vio afectado por un campo efectivo debido a otro momento m_j . Asumió que el campo en la dirección de m_j . Puede ser expresado como:

$$H_{ij} = \alpha_{ij} m_j \quad (5-28)$$

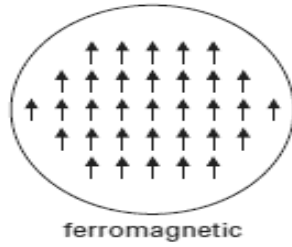


Figura 229.

Ferromagnetismo

Fuente: (Tang , 2010).

Los materiales interactúan con los campos magnéticos de diferentes maneras. Los materiales **ferromagnéticos** son fuertemente atraídos por la fuente del campo. Los materiales **paramagnéticos** estarán orientados paralelamente a un campo fuerte, mientras que los materiales **diamagnéticos** se orientarán hacia un campo fuerte (Moosbrugger, 2000).

Referencias

- A., S. P. (2010). *Fundamentals of corrosion mechanisms, causes and preventative methods*. Nueva York, Estados Unidos: Taylor.
- Alarcón, J. (s.f.). *Química de materiales*. Retrieved from <https://www.uv.es/~uimcv/Castellano/ModuloMatCeramicos/Unidad%205.pdf>
- Alec, G. (2010). *Corrosion for everybody*. Nueva York, Estados Unidos: Springer.
- Alien, W. (2012). *Naukas*. Retrieved from <http://naukas.com/2012/02/02/la-magia-de-los-diagramas-de-fases-o-como-puede-haber-hielo-a-mas-de-100oc/>
- Anderson, J. C. (2003). *Materials science for engineers* (5ta. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Taylor.
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México, México: International Thonsom Editores.
- ASM Internacional. (2004). *Metalografía y microestructuras* (1era ed.), New York, Estados Unidos: ASM Internacional.
- Avner, Sydney H. (1966). *Introducción a la metalurgia física*. México, México: McGraw- Hill.
- Bacon, D. H. (2011). *Introduction to dislocations* (5ta. ed.). Great Britain: Elsevier.
- Ballesteros, M. N. (2004). Tecnología de proceso y transformación de materiales. En: M. N. Ballesteros, *Tecnología de proceso y transformación de materiales* (pp. 101-103). Barcelona, España: Edicions UPC.
- Barsoum, M. W. (2003). *Fundamentals ceramics*. Philadelphia, Estados Unidos: MPG Books.
- Bayan, V. C. (2011). *Corrosion chemistry*. New York, Estados Unidos: Scrivener- Wiley.
- Beer, F. P. (2010). *Mecánica de materiales*. México, México: McGraw-Hill Companies.
- Borisenko, E. B. (2000). *Cristallization&materials science of odern artificial&natural crystals*. Moscú, Rusia: JW.
- Cahn, R., & Haasen, P. (1996). *Physical metallurgy*. North-Holland: Elsevier Science B.V.
- Callister, W. D. (2000). *Fundamentals of materials science and engineering*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Callister, W. (2002). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona, España: Reverté.
- Callister, William, J. D. (2007). *Materials science*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Callister, William D., J. D. (2008). *Fundamentals of materials science and engineering*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Callister, William, J. D. (s.f.). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Barcelona, España: Reverté.
- Carter, C. Barry, N. M. (2007). *Ceramic materials science and engineering*. New York, Estados Unidos: Springer.
- Carter, C. Barry & M. Grant Norton. (2007). *Materiales cerámicos, ciencia e ingeniería* (7ma. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Springer - Verlag.
- Case, John, A. H. (1999). *Strength of materials and structures*. New York: Great Britain.

- Chilingar G. Mourhatch R., A.-Q. G. (2008). *The fundamentals of corrosion and scaling for petroleum and environmental engineers*. Gulf Publishing Company.
- Crowell. (2009). *Ingeniería de materiales*.
- Cussler, E. (2007). *Diffusion mass transfer in fluid*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Domone, P., & Illston, J. (2010). *Construction materials*. New York, Estados Unidos: Spon Press.
- Educativa.catedu.es*. (2018). Retrieved from http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/750/4910/html/51_regla_de_las_fases.html
- F., J. (1998). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. México, México: Prentice Hall.
- Fitzgerald, R. W. (2007). *Mecánica de materiales*. México, México: Alfaomega Grupo Editor.
- Gerling, Heinrich. (1979). Moldeo y conformación. En: H. Gerling, *Moldeo y conformación* (pp. 29-44). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Glicksman, M. E. (2011). *Principles of solidification-an introduction to modern casting and crystal growth concept*. New York, Estados Unidos: Springer .
- Gordo, A. G., & Piris, N. M. (2012). Ciencia de materiales para ingenieros. En: A. G. Gordo, & N. M. Piris, *Ciencia de materiales para ingenieros* (pp. 166-170). Madrid, España: Pearson Educación.
- Grimval, G. (1999). *Thermophysical properties of materials* . North-Holland: Elsevier.
- Groza, J., Shackelford, J., Lavernia, E., & Powers, M. (2007). *Materials processing handbook*. New York, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
- Hall, P. (1998). *Introducción a la ciencia de materiales para ingeniero* (4ta. ed.).
- Hasse, S. (2005). Casting and structural defects. *Guss- und Gefügefehler*.
- Hayden, W., & Moffatt, G. (1965). The Structure and Properties of Materials, Vol II. In *The Structure and Properties of Materials, Vol II* (p. 2). New York, Estados Unidos: Copyright.
- Heran, E. J. (2000). *Mechanics of materials 1, an introduction to the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials*. Great Britain: Butterworth Heinemann.
- Hibbeler, B. R. (2006). *Mecánica de materiales*. México, México: Pearson Educación.
- Higgins, R. A. (1993). *Engineering metallurgy*. Great Britain: Arnold a member of the Hodder Headline Group.
- Höland, W., & Beall, G. (2002). *Glass-Ceramic technology*. United States of America: The American Ceramic Society.
- Hummel, R. (2016). *Electronic properties of materials*. Gainesville, Estados Unidos: Rhines Hall.
- J., F. (2018). *Ciencia de los materiales II*. Retrieved from <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiCivFrOrZAhXKneAKHZtwBI0QFgiXATAI&url=https%3A%2F%2Fmateriales.wikispaces.com%2Ffile%2Fview%2FAlotropia.doc%2F62187830%2FAlotropia.doc&usg=AOvVaw2w8VEF6aJ7lmNAXv>
- Kakani, S. L., & Kakani, A. (2004). *Material science*. New York, Estados Unidos: New Age International.
- Kalpakjian, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México, México: Pearson.

- Kasap, S. O. (2006). *Principles of electronic materials and devices*. New York, Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies.
- Krauss, G. (2005). *Aceros: procesamiento, estructura y rendimiento*. Madrid, España: A.S.M. International.
- Markov, I. V. (2003). *Crystal growth for beginners*. World Scientific.
- Mitchell, B. S. (2004). *An introduction to materials engineering and science*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Mittemeijer, E. J. (2010). *Fundamentals of materials science*. New York, Estados Unidos: Springer.
- Modenesi, P. P. (2006). Universidade Federal de Minas Gerais. In P. P. Modenesi, *Universidade Federal De Minas Gerais* (p. 1). Brasil: Belo Horizonte.
- Moosbrugger, C. (2000). *Electrical and magnetic properties of metals*. New York, Estados Unidos: Technical Editor.
- Mullin, J. W. (2001). *Cristalización* (4ta ed.). Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- Newell, J. (2016). *Ciencia de materiales-aplicaciones en ingeniería*. México, México: Grupo Alfaomega.
- Nicodemi, A. C. (2004). *Unifying concepts in granular media and glasses*. Napoli, Italy: Elsevier.
- Nishizawa, T. (2008). *Thermodynamics of microstructures*. ASM International.
- O'Reilly, B. C. (2003). *Solidification and casting*. Oxford, Reino Unido: IoP.
- Pacini, Roberto. (2015, Julio 31). *Soldargen*. Retrieved from <https://soldargen.blogspot.com/2015/07/soldabilidad-de-materiales-disimiles.html>
- Pilkey, W. D. (2005). *Fórmulas for stress, strain and structural matrices*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Port, H. M.-R. (1993). *The nalco guide to cooling water system failure analysis*. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Revie W., U. H. (2008). *Corrosion and corrosion control*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Rice, R. W., y Virginia, A. (2003). *Ceramic fabrication technology*. New York, Estados Unidos: Marcel. Dekker.
- Roberge, P. R. (2007). *Corrosion inspection and monitoring*. Ontario, Canadá: Wiley- Interscience.
- Salazar, J. (2007). *Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería*. Bogotá, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Manizales.
- Sastri V., G. E. (2007). *Corrosion prevention and protection*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros*. Madrid, España: Pearson Educación.
- Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. En: J. F. Shackelford, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros* (p. 299). Madrid, España: Pearson Educacion.
- Shewmon, P. (1984). *Difusión en sólidos*. Ohio, Estados Unidos.

- Schroeter, E. W. (2006). In vivo development of retinal ON-bipolar cell axonal terminals visualized in nrx: MYFP transgenic zebrafish. *Vis. Neurosci*, 23.
- Shulz, B. (2003). *Introducción a la metalurgia*. Santiago de Chile, Chile.
- Singh, R. (2006). *Introduction to basic manufacturing process and workshop technology*. Ansari Road: New Age International.
- Serguéi Brin, L. P. (1998, Septiembre 27). *Google*. Retrieved from www.google.com
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (1993). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México, México: McGraw-Hill.
- Smith, William F., J. H. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. México, México: Mcgraw-Hill Interamericana Editores
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F., México: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Smith, William F., Javad Hashemi. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. En: J. H. William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (pp. 204-205). México, México: McGraw-Hill.
- Smith, William, J. H. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. (4ta ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Smith, W. (2011). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (3ra. ed.). Madrid, España: Mc.Graw Hill.
- Sons, J. W. (1983). *Topics in metallurgical thermodynamics*. Canadá: United States of America.
- Tang, D., y Jen Lee, Y. (2010). *Magnetic memory*. Cambridge, Inglaterra: MagIC Technologies
- Tilley, R. (2006). *Cristales y estructuras cristalinas* (1era ed.). Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons.
- uniovi.es*. (2012). Retrieved from <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/MaterialesCeramicosEstructura.Cristalina.2011.2012.pdf>
- Vable, M. (2006). *Mechanics of materials*. Michigan, Estados Unidos: Michigan Technological University.
- Verhoeven, J. (1995). *Fundamentals of physical metallurgy*. México, México: Limusa.
- Wang, F. E. (2005). *Bonding theory for metals and alloys*. Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Science.
- Weng, Y. (2003). *Ultra-fine grained steel*. New York, Estados Unidos: Springer.
- Wisley. (1964). *Solidification of metals*.
- Zangari, Y. D. (2011). *Theory and practice of metal*. New York, Estado Unidos: Springer.

CIDE 
EDITORIAL 

ISBN: 978-9942-759-88-7



9789942759887