

## Portada Externa de Tesis

Ingeniería de Materiales: Guía del Maestro  
Angel Frías Hernández

2013



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil

Ingeniería de Materiales: Guía del Maestro.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Ingeniero Civil

Presenta

Angel Frías Hernández

Querétaro, Qro. Septiembre 2013



## **Portada Interna de Tesis**

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil

Ingeniería de Materiales: Guía del Maestro

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Ingeniero Civil

**Presenta:**

Angel Frías Hernández

**Exp. 124288**

**Dirigido por:**

Dra. Janet Ledesma García

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Septiembre, 2013.  
México

## **RESUMEN**

En ingeniería no solo se necesita conocer los distintos materiales utilizados en la construcción de obras, sino también saber cómo responden éstos a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión o la flexión. Los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con una fuerza contraria, cuando se vence esta fuerza excedimos su límite de dureza (en la que el material pierde su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa). Esta guía de maestro pretende lograr que el alumno adquiera una formación profunda sobre las propiedades químicas, físicas, aplicación y comportamiento de los materiales más utilizados en la construcción, así como de pruebas experimentales para determinarlas. Por medio de la guía queremos proporcionar al estudiante una orientación para desarrollar la capacidad para comprender y utilizar el proceso de desarrollo de materiales, que involucra desde la identificación y caracterización de la materia prima hasta la obtención de un producto final de material específico, bajo el esquema de diseño y elaboración del mismo. También que el alumno cuente con el conocimiento del comportamiento y características de los materiales, así como el tipo de materiales que son necesarios para la construcción de determinados productos. Proporcionar los conocimientos necesarios para que el alumno sea capaz de planear, diseñar y organizar nuevos proyectos de investigación para la creación de nuevos procesos o procedimientos con el fin de obtener nuevos materiales. Formar profesionistas líderes, analíticos, creativos, capaces de realizar actividades de: diseño, investigación, desarrollo, control, evaluación, innovación y solución de problemas en la ciencia y tecnología de los materiales metálicos, cerámicos y poliméricos, con habilidades para interrelacionarse social y profesionalmente en un mundo globalizado en los sectores industrial, educativo y de servicios, comprometidos con la conservación y preservación del medio ambiente.

## DEDICATORIAS

Dedico en primer lugar este trabajo a mi mama “Margarita Hernández Saavedra”, aunque ella se encuentre allá arriba en el reino de los cielos, se encuentra orgullosa de mi, su sueño de contar con un hijo el cual tuviera una carrera profesional se ha hecho realidad, desde antes de que mi mama falleciera ella deposito su confianza en mí para ser yo el encargado de cumplir su sueño; después de un largo tiempo lo he podido hacer realidad, tal vez el camino fue largo, cansado y agotador, pero bien valió la pena, y ahora puedo gritar a los cuatro vientos que cumplí con el sueño de mi mama y lo más importante que no la defraude.

En segundo lugar este trabajo va dedicado para toda mi familia materna, la familia Hernández Saavedra, esa gran y excepcional familia que tengo y la cual me tuvo confianza, paciencia y sobre todo me entrego su apoyo incondicional en las buenas y en las malas durante este largo y difícil camino para llegar a obtener el título de ingeniero civil, desde lo más profundo de mi ser les doy las gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

De una manera muy especial quiero agradecerle a mi directora de proyecto la Dra. Janet Ledesma García, por su valiosa guía y asesoramiento para concluir con este trabajo, le agradezco de todo corazón todo el apoyo que me brindo, su paciencia, su atención, sus atinados comentarios, sugerencias y opiniones, su buen trato, pero sobre todo le agradezco que aceptara ser mi directora de proyecto, de antemano mil gracias por todo su tiempo que me brindo.

Agradezco a la Dra. Hilda Romero Zepeda por brindarme toda su atención siempre de una forma atenta y amable para poder concluir con este trabajo.

Agradezco a todos los profesores de la Universidad Autónoma de Querétaro que me impartieron sus conocimientos y experiencias en el transcurso de mi vida estudiantil, les doy las gracias, no tengo nada que reprocharles sino todo lo contrario.

Agradezco a todas las personas que conocí a lo largo de mi carrera, las cuales de alguna manera directa o indirecta colaboraron para concluir mi carrera.

## ÍNDICE

	Página
Introducción	1
UNIDAD 1 CONSTITUCIÓN DE LA MATERIA	2
1.1 Concepto de materia y material	2
1.1.1 Materia	2
1.1.2 Material	2
1.2 Estados físicos de los materiales	3
1.3 Relación entre estructura y propiedades de los materiales	5
1.3.1 Estructura de los Materiales	5
1.3.2 Propiedades de los materiales	6
1.3.2.1 Temperatura	6
1.3.2.2 Corrosión	7
1.3.2.3 Fatiga	8
1.3.2.4 Rapidez de deformación	8
1.3.3 Tipos de materiales	9
1.3.3.1 Materiales	9
1.3.3.2 Metales	9
1.3.3.3 Cerámicas y vidrios	10
1.3.3.4 Polímeros	13
1.3.3.5 Compuestos	14
1.3.3.6 Semiconductores	15
1.4 Enlaces químicos intramoleculares: covalente, iónico y metálico.	17
1.4.1 Enlace iónico	17
1.4.1.1 Radio de ionización	21
1.4.1.2 Número de coordinación	22
1.4.2 Enlace covalente	24
1.4.3 Enlace metálico	28
1.5 Enlaces químicos inter-moleculares: puentes de hidrogeno, van der waals, electrostático.	29
1.5.1 Puentes de hidrógeno	29
1.5.2 Enlace de Van der Waals	29
1.5.3 Electrostático	31
UNIDAD 2 CRISTALOGRAFÍA	33
2.1 Estructura cristalina	33
2.2 Celda unitaria y parámetro de red	35
2.2.1 Celda unitaria	35
2.2.2 Parámetro de red	38
2.3 Sistemas cristalinos y redes de Bravais	39
2.3.1 Sistemas cristalinos	39
2.3.2 Redes de Bravais	41

	Página
2.4 Ley de Bragg	43
2.4.1 Difracción de rayos-x	43
2.4.2 Ley de Bragg	46
2.5 Estructura no cristalina-imperfecciones	47
2.5.1 La solución sólida-imperfección química	49
2.5.2 Defectos puntuales-imperfección “cerodimensional”	53
2.5.2.1 Producción térmica de los defectos puntuales	56
2.5.2.2 Defectos puntuales y difusión de estado sólido	59
2.6 Propiedades físicas: densidad, capilaridad, porosidad, solubilidad.	70
2.6.1 Densidad	70
2.6.2 Capilaridad	71
2.6.3 Porosidad	72
2.6.3.1 Porosidad másica y volumétrica	73
2.6.4 Solubilidad	73
2.6.4.1 Efecto de la temperatura en la solubilidad	77
2.6.4.1.1 Solubilidad de los sólidos y la temperatura	77
2.6.4.1.2 Cristalización fraccionada	79
2.6.4.1.3 La solubilidad de los gases y la temperatura.	79
2.6.4.2 Efecto de la presión en la solubilidad de los gases	81
2.7 Microscopia electrónica	83
2.8 Propiedades mecánicas: cohesión, elasticidad, plasticidad, tenacidad y resistencia, deformación.	88
2.8.1 Cohesión	88
2.8.2 Elasticidad	89
2.8.3 Plasticidad	91
2.8.4 Tenacidad y resistencia	92
2.8.4.1 Tenacidad	92
2.8.4.2 Resistencia	92
2.8.5 Deformación	93
2.8.5.1 Relación entre esfuerzo y deformación	94
2.8.5.2 Cálculo de la deformación	95
UNIDAD 3 MATERIALES METÁLICOS	97
3.1 Aleaciones ferrosas	97
3.1.1 Aceros al carbono y de alta aleación	98
3.1.2 Aceros de alta aleación	103
3.1.3 Hierros fundidos	108
3.1.4 Aleaciones solidificadas rápidamente	113
3.2 Aleaciones no ferrosas	115
3.2.1 Aleaciones de aluminio	115
3.2.2 Aleaciones de magnesio	119
3.2.3 Aleaciones de titanio	120
3.2.4 Aleaciones de cobre	122

	Página
3.2.5 Latones	124
3.2.6 Bronces	125
3.2.7 Aleaciones de níquel	125
3.2.8 Súper-aleaciones	126
3.2.8.1 Súper-aleaciones base níquel	126
3.2.8.2 Súper-aleaciones base cobalto	127
3.2.9 Aleaciones de zinc	127
3.2.10 Aleaciones de plomo	128
3.2.11 Aleaciones de estaño	128
3.2.12 Metales refractarios	129
3.2.13 Metales preciosos	130
3.3 Propiedades físicas, químicas y mecánicas	130
3.3.1 Ductilidad	130
3.3.2 Deformación elástica	130
3.3.3 Deformación plástica	130
3.3.4 Conductividad térmica	131
3.3.5 Maleabilidad	131
3.3.6 Conductividad eléctrica	131
3.3.7 Tenacidad	132
3.4 Aplicaciones	132
3.5 Corrosión	134
3.5.1 Tipos de corrosión	137
3.5.1.1 Ataque corrosivo uniforme o general	138
3.5.1.2 Corrosión de dos metales o galvánica	138
3.5.1.3 Corrosión por picaduras	139
3.5.1.4 Corrosión por agrietamiento	140
3.5.1.5 Corrosión intergranular	141
3.5.1.6 Corrosión bajo tensión	143
3.5.1.6.1 Mecanismo del agrietamiento debido a la corrosión por esfuerzos.	144
3.5.1.7 Corrosión por erosión	146
3.5.1.8 Daño por cavitación	146
3.5.1.9 Corrosión por desgaste	147
3.5.1.10 Fugas selectivas	147
3.6 Inhibidores de corrosión	148
3.6.1 Inhibidores anódicos	149
3.6.2 Inhibidores catódicos	149
3.6.3 Revestimientos orgánicos	149
3.6.4 Revestimientos inorgánicos	150
3.6.5 Revestimientos metálicos	150



	Página
UNIDAD 4 CERÁMICOS Y VIDRIOS	151
4.1 Cerámicos	151
4.1.1 Tipos, composición y usos	152
4.2 Vidrios	154
4.2.1 Estructura de los vidrios	155
4.2.2 Tipos, composición y usos	156
4.2.2.1 Vidrio de soda-cal	156
4.2.2.2 Vidrios de borosilicato	158
4.2.2.3 Vidrios de plomo	158
4.3 Propiedades químicas, físicas, térmicas y eléctricas	158
4.3.1 Cerámicos	158
4.3.1.1 Tenacidad	159
4.3.1.2 Dureza	159
4.3.1.3 Conductividad térmica	159
4.3.1.4 Propiedades eléctricas	159
4.3.2 Vidrios	160
4.3.2.1 Punto de fusión	160
4.3.2.2 Densidad	160
4.3.2.3 Expansión térmica	160
4.4 Proceso de fraguado de cerámicos tradicionales	161
4.4.1 Fraguado y endurecimiento	162
4.4.2 Falso fraguado	163
4.5 Concreto: composición y propiedades, fabricación, transporte y puesta en obra (precauciones)	163
4.5.1 Composición	164
4.5.2 Propiedades	166
4.5.2.1 Trabajabilidad	167
4.5.2.2 Resistencia y durabilidad	167
4.5.3 Fabricación	168
4.5.4 Transporte	171
4.5.5 Puesta en obra y precauciones	171
4.5.6 Efecto de la temperatura	172
4.5.6.1 Desprendimiento de calor	172
4.5.6.2 Acción de hielo	173
4.5.6.3 Acción del calor	173
4.5.6.4 Aireación del cemento	173
4.5.7 Agentes químicos	174
4.5.7.1 Sustancias perjudiciales al cemento Portland	174
4.5.8 Aditivos	174
4.5.8.1 Aditivos acelerantes	175
4.5.8.2 Aditivos retardantes	176
4.5.8.3 Aditivos reductores de agua	176
4.6 Cerámicos con alta resistencia térmica: materiales refractarios	177

	Página
4.6.1 Materiales refractarios	177
4.6.2 Tipos de refractarios	178
4.6.2.1 Refractarios ácidos	178
4.6.3 Usos de los materiales refractarios	179
4.7 Cristales líquidos y cuasicristales	179
4.7.1 Fase líquido-cristalina nemática	182
4.7.2 Fases líquido-cristalinas esmécticas	182
4.7.3 Fase líquido-cristalina colestérica	183
4.7.4 Aplicaciones	184
UNIDAD 5 MATERIALES POLIMÉRICOS	185
5.1 Materiales poliméricos	185
5.2 Clasificación de los polímeros	185
5.2.1 Termoplásticos	187
5.2.2 Termoestables	188
5.2.3 Elastómeros	189
5.3 Termoplásticos de uso general y sus aplicaciones	189
5.3.1 Polietileno	189
5.3.2 Policloruro de vinilo y copolímeros	190
5.3.3 Polipropileno	190
5.3.4 Poliestireno	191
5.3.5 Poliacrilonitrilo	191
5.3.6 Estireno-acrilonitrilo (SAN)	191
5.3.7 Abs	192
5.3.8 Polimetil metacrilato (PMMA)	192
5.3.9 Fluoroplasticos	192
5.3.10 Poliamidas (naylor)	193
5.3.11 Policarbonato	194
5.3.12 Resinas de fenileno a base de oxido	194
5.3.13 Acetales	194
5.3.14 Poliésteres termoplásticos	195
5.3.15 Polisulfona	195
5.3.16 Sulfuro de polifenileno (PPS)	196
5.3.17 Polieterimida	196
5.4 Termoestables o termofijos y sus aplicaciones	197
5.4.1 Fenólicos	197
5.4.2 Resinas epóxicas	198
5.4.3 Poliésteres insaturados	198
5.4.4 Resinas amínicas (ureas y melaninas)	199
5.5 Elastómeros	200
5.5.1 Caucho natural	200
5.5.2 Caucho estireno-butadieno (SBR)	200
5.5.3 Cauchos de nitrilo	200

	Página
5.5.4 Policloropreno (neopreno)	201
5.6 Propiedades químicas, térmicas y mecánicas.	201
UNIDAD 6 MATERIALES SEMICONDUCTORES	204
6.1 Fundamentos de los semiconductores	204
6.2 Semiconductores intrínsecos	205
6.3 Semiconductores extrínsecos	209
6.3.1 Semiconductores tipo $n$	210
6.3.2 Semiconductores tipo $P$	214
6.3.3 Compuestos semiconductores	215
6.3.4 Semiconductores estequiométricos	215
6.3.5 Semiconductores imperfectos o no estequiométricos	216
6.4 Propiedades químicas y físicas	217
6.5 Aplicaciones	218
6.5.1 Termistores	218
6.5.2 Transductores de presión	219
6.5.3 Rectificadores (dispositivos de unión tipo p-n)	219
6.5.4 Transistores de unión bipolar	221
6.5.5 Transistores de efecto de campo	223
UNIDAD 7 MATERIALES NUEVOS	225
7.1 Investigación y desarrollo de nuevos materiales	225
7.1.1 Metales transparentes	227
7.1.2 Aluminio transparente	228
7.1.3 Concreto traslúcido	228
7.2 Materiales ambientalmente amigables	229
7.3 Conciencia ecológica, social y cultural	232
BIBLIOGRAFÍA	234

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.2-1	Representación microscópica de un sólido, un líquido, un gas y el plasma.	3
1.3-1	Por lo general el aumento de la temperatura reduce la resistencia de un material. Los polímeros solo son adecuados para bajas temperaturas. Algunos materiales compuestos, como los de carbono-carbono, las aleaciones especiales y los cerámicos, tienen propiedades excelentes a altas temperaturas.	7
1.3-2	Comparación esquemática de la estructura a escala atómica de (A) una cerámica cristalina y (B) un vidrio no cristalino. Los círculos vacíos representan átomos de un no metal, y los círculos llenos representan átomos de un metal.	12
1.4-1	Enlace iónico entre los átomos de sodio y cloro. La transferencia de electrones de Na hasta Cl genera un catión ( $Na^+$ ) y un anión ( $Cl^-$ ). El enlace iónico se debe a la atracción coulombica entre los iones de carga opuesta.	17
1.4-2	Grafica de la fuerza de Coulomb (ecuación 2.2-1) para un par $Na^+ - Cl^-$ .	19
1.4-3	Curva de fuerza neta de enlace para un par $Na^+ - Cl^-$ que muestra una longitud de enlace $a_0 = 0.28 \text{ nm}$ .	20
1.4-4	Comparación de (a) un modelo planetario para el par $Na^+ - Cl^-$ con (b) un modelo de esferas rígidas y (c) un modelo de esferas flexibles.	21
1.4-5	Apilamiento regular de iones $Na^+$ y $Cl^-$ en el NaCl sólido. Esto es indicativo de la naturaleza no direccional del enlace iónico.	22
1.4-6	Ilustración del enlace covalente en una molécula de gas de cloro, $Cl_2$ , con (A) un modelo planetario comparado con (B) la densidad real del electrón y (C) un esquema de "punto electrón" y (D) un esquema de "línea de enlace".	24
1.4-7	(A) Una molécula de etileno ( $C_2H_4$ ) se compara con (B) una molécula de polietileno $(-C_2H_4-)_n$ que resulta de la conversión del doble enlace $C=C$ en dos enlaces sencillos $C - C$ .	25

Figura		Página
1.4-8	Representación esquemática de una estructura como “espagueti” del polietileno sólido.	26
1.4-9	Estructura tridimensional de enlace en el sólido covalente, carbono (diamante). Cada átomo de carbono (C) tiene cuatro enlaces covalentes para otros cuatro átomos de carbono.	27
1.4-10	Configuración tetraédrica de los enlaces covalentes con carbón. El ángulo de enlace es 109.5.	27
1.4-11	Enlace metálico que consiste de una “nube” o “gas” de electrones. Se muestra un corte imaginario a través de la cara frontal de la estructura cristalina del cobre, revelando núcleos de ion $Cu^{2+}$ enlazados mediante los electrones de valencia deslocalizados.	28
1.4-12	“Puente de hidrogeno”. Este enlace secundario se forma entre dos dipolos permanentes en moléculas de agua adyacentes.	31
1.4-13	Electronegatividades de los elementos	32
2.1-1	Comparación de las estructuras cristalinas del aluminio y magnesio.	33
2.1-2	Varias unidades estructurales que describen esquemáticamente la estructura cristalina. La unidad estructural más simple es la celda unidad.	34
2.2-1	Una celda unitaria y su extensión en tres dimensiones. Las esferas negras representan átomos o moléculas.	36
2.2-2	Los siete tipos de celdas unitarias. El ángulo $\alpha$ está definido por las aristas b y c, el ángulo $\beta$ mediante las aristas a y c, y el ángulo $\gamma$ mediante las aristas a y b.	36
2.2-3	Los catorce tipos de redes de Bravais, agrupados en siete sistemas cristalinos.	37
2.2-4	Definición de los parámetros de red y su aplicación en los sistemas cristalinos cúbico, ortorrómbico y hexagonal.	38

Figura		Página
2.4-1	Red de difracción para la luz visible. Las estrías en la placa de vidrio actúan como centros de dispersión de luz.	43
2.4-2	Espectro de la radiación electromagnética. La radiación X representa la zona con longitud de onda en torno a 0.1 nm.	44
2.4-3	Geometría del proceso de difracción de la radiación X. La estructura cristalina es una red de difracción tridimensional. La ley de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ) describe la condición de difracción.	45
2.5-1	Representación bidimensional del cuarzo cristalino y del vidrio de cuarzo no cristalino. Las pequeñas esferas representan al silicio. En realidad, la estructura del cuarzo es tridimensional. Cada átomo de Si está enlazado de manera tetraédrica a cuatro átomos de O.	48
2.5-2	Formación de una solución líquida de agua y alcohol. La mezcla tiene lugar a escala molecular.	50
2.5-3	Solución sólida de níquel en cobre, vista a lo largo de un plano (100). Se trata de una solución sólida sustitucional en la que átomos de cobre han sido sustituidos por átomos de níquel en sus posiciones de la red fcc.	50
2.5-4	Ordenamiento de la solución sólida en el sistema de aleación $AuCu_3$ . (A) Por encima de $\sim 390^\circ C$ , hay una distribución aleatoria de los átomos de $Au$ y $Cu$ en las posiciones de la red fcc. (B) Por debajo de $\sim 390^\circ C$ los átomos de $Au$ ocupan preferentemente las posiciones de las esquinas en la celda unidad, según una red de Bravais cúbica simple.	52
2.5-5	Solución sólida intersticial de carbono en hierro $\alpha$ . El átomo de carbono es bastante pequeño para introducirse, con alguna deformación, en el intersticio (o hueco) entre átomos de hierro adyacentes, en esta estructura tan importante en la industria del acero.	53

Figura		Página
2.5-6	Dos defectos puntuales comunes en estructuras de metales o de semiconductores elementales son la vacante y el intersticial.	54
2.5-7	Dos estructuras comunes de defectos puntuales en estructuras de compuestos son el defecto de shottky y el defecto de frenkel. Note la similitud con las estructuras de la figura 2.5-6.	55
2.5-8	Grafica típica de Arrhenius de datos comparados con la ecuación 2.5-2. La pendiente es igual a $-Q/R$ y la intercepción (a $1/T = 0$ ) es $\ln C$ .	57
2.5-9	. La migración atómica se produce por un mecanismo de migración de vacantes. Obsérvese que la dirección de flujo global del material (el átomo) es opuesta a la dirección del flujo de vacantes.	60
2.5-10	Difusión por un mecanismo intersticial, donde se ve la naturaleza aleatoria del movimiento de migración atómico.	60
2.5-11	Interdifusión de materiales a y b. Aunque cualquier átomo dado de A o de B tiene la misma probabilidad de "moverse" en cualquier dirección aleatoria (véase figura 2.5-10), la variación de la composición química causa un flujo neto de átomos del material a hacia el material b, y viceversa.	61
2.5-12	Geometría de la primera ley de Fick (ecuación 2.5-5)	62
2.5-13	Solución de la segunda ley de Fick (ecuación 2.5-7) para el caso de un sólido semi infinito; concentración superficial constante de la especie difusora $C_s$ ; concentración volumétrica inicial $C_0$ , y coeficiente de difusión constante $D$ .	63
2.5-14	Grafica maestra que resume todos los resultados de difusión de la figura 2.5-13 en una sola curva.	65

Figura		Página
2.5-15	“Curvas de saturación” similares a la de la figura 2.5-14 para diversas geometrías. El parámetro $C_m$ es la concentración promedio de la especie difusora dentro de la muestra. De nuevo, la concentración $C_s$ y el coeficiente de difusión $D$ se suponen constantes.	66
2.5-16	Gráfica de Arrhenius de la difusividad del carbono en hierro $\alpha$ sobre un intervalo de temperaturas. Vea también las figuras relacionadas 2.5-5 y 2.5-10 y otros datos de difusión metálica en la figura 2.5-17.	68
2.5-17	Gráfica de Arrhenius da datos de difusividad para diversos sistemas metálicos.	69
2.6-1	Ascenso o depresión por capilaridad en un tubo.	72
2.6-2	Enfoque molecular del proceso de disolución, el cual se esquematiza como constituido por tres etapas: primero, las moléculas de disolvente y del soluto están separadas (etapas 1 y 2). Después, las moléculas del disolvente y del soluto se mezclan (etapa 3).	75
2.6-3	Dependencia de la solubilidad de algunos compuestos iónicos en agua, con respecto a la temperatura.	78
2.6-4	Dependencia de la solubilidad del $O_2$ gaseoso en agua con respecto de la temperatura. Observe que la solubilidad disminuye con el incremento en la temperatura. La presión del gas sobre la disolución es de 1 atm.	80
2.6-5	Interpretación molecular de la ley de Henry. Cuando la presión parcial del gas sobre la disolución se incrementa de A) a B).	82
2.7-1	Micrografía óptica típica de una estructura de grano. 100x. El material es acero al bajo carbono. Las fronteras de grano han sido ligeramente “pintadas” con una solución química para que reflejen la luz en forma de diferente a los granos pulidos, apareciendo con un contraste distintivo.	83



Figura		Página
2.7-2	Semejanza en el diseño de (A) un microscopio óptico y (B) un microscopio electrónico de transmisión (TEM). El microscopio electrónico utiliza solenoides para producir lentes magnéticas en lugar de las lentes de vidrio del microscopio óptico.	84
2.7-3	La base de la formación de la imagen en el TEM es el contraste de difracción. Las diferencias estructurales en la muestra hacen que diferentes fracciones (i) del haz incidente sean difractadas hacia el exterior, produciendo variaciones luminosas en una pantalla de observación.	85
2.7-4	Esquema del diseño de un microscopio electrónico de barrido (SEM).	86
2.7-4B	Un MEE comercial.	87
2.8-1	Barra.	90
2.8-2	Barra sujeta a una carga de axial de tensión (P).	93
2.8-3	Barra sometido a una fuerza axial P.	95
3.1-1	Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: (A) fundición gris, (B) fundición blanca, (C) fundición maleable, (D) fundición dúctil o nodular y el (E) hierro con grafito compactado.	109
3.1-2	(A) Esquema y (B) microfotografía del grafito en hojuelas en la fundición de hierro gris (100x).	111
3.1-3	Efecto de la velocidad de enfriamiento o del tamaño de la fundición sobre las propiedades a tensión de dos fundiciones de hierro gris.	112
3.5-1	Ejemplos de corrosión: A) barco oxidado, B) una vasija de plata empañada y C) la estatua de la libertad cubierta con pátina antes de su restauración en 1986.	135

Figura		Página
3.5.2	El proceso electroquímico implicado en la formación de herrumbre. Los iones $H^+$ los proporciona el $H_2CO_3$ , que se forma cuando el $CO_2$ se disuelve en agua.	137
3.5-3	(A) Representación esquemática de la precipitación de carburo de cromo en fronteras de grano en un acero inoxidable tipo 304 sensibilizado. B) Sección transversal en fronteras de grano que muestra ataque por corrosión intergranular adyacente a las fronteras de grano.	142
3.5-4	Grietas por corrosión por esfuerzo en un tubo.	144
3.5-5	Formación de una grieta por corrosión por esfuerzos en un metal mediante disolución anódica.	145
4.2-1	Representación esquemática de A) un tetraedro de silicio-oxígeno, B) una sílice cristalina ideal (cristobalita) en la que el tetraedro tiene un orden de largo alcance y C) un vidrio de sílice sencillo en el que el tetraedro no tiene un orden de largo alcance.	155
4.3-1	Variación del volumen con la temperatura en un material que puede ser amorfo o cristalino.	161
4.5-1	Fraguado del concreto.	166
4.5-2	Diferencia entre cohesivo y no cohesivo.	167
4.5-3	Segregación del concreto.	172
4.7-1	Esquema que muestra el orden que se presenta en los cristales líquidos. (A) moléculas sin ningún tipo de orden. (B) moléculas en capas y alineadas perpendicularmente a las capas. (C) moléculas en capas, con alineamiento paralelo a las capas. (D) alineamiento cristalino bidimensional con capas desfasadas.	180
4.7-2	Esquema del ordenamiento de un cuasicristal.	181
4.7-3	El ordenamiento en las fases líquido-cristalinas comparado con un líquido normal (no cristalino).	182

Figura 4.7-4	(A) ordenamiento en un cristal liquido colestérico. Las moléculas de capas sucesivas están orientadas con un ángulo característico respecto a las de las capas adyacentes a fin de evitar interacciones desfavorables. El resultado es un eje tipo tornillo, como se aprecia en (B).	Página 183
5.2-1	Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. Nótese que la ramificación puede ocurrir en cualquier tipo de polímero (por ejemplo, termoplásticos, termoestables y elastómeros). (A) polímero lineal no ramificado: obsérvese que las cadenas no forman líneas rectas y no están conectadas. Se muestran diferentes cadenas poliméricas mediante diferentes tonos y diseños para mostrar claramente que cada una de las cadenas no está conectada con otra. (B) polímero lineal ramificado: las cadenas no están conectadas; sin embargo, tienen ramificaciones. (C) polímero termoestable sin ramificación: las cadenas están conectadas entre sí mediante enlaces covalentes, pero no tienen ramificación. Los puntos de unión resaltan mediante círculos rellenos. (D) polímero termoestable que tiene ramificación y cadenas interconectadas mediante enlaces covalentes. Las distintas cadenas y ramificaciones aparecen en diferentes tonos para distinguirlas con mayor claridad. Los sitios donde las cadenas están realmente enlazadas aparecen con círculos rellenos.	186
6.2-1	Distribución de electrones y huecos en las bandas de valencia y de conducción (A) en el cero absoluto y (B) una temperatura elevada.	206
6.2-2	Conductividad eléctrica en función de la temperatura, para semiconductores en comparación con metales.	208

Figura		Página
6.3-1	<p>Sección reducida de la tabla periódica de los elementos. El silicio, en el grupo IV A, es un semiconductor intrínseco. Añadiendo una pequeña cantidad de fósforo, del grupo V A, se obtienen electrones extras (no necesarios para los enlaces con los átomos de silicio). Como resultado, el fósforo es un dopante tipo n (su adición produce portadores de carga negativa). De forma similar, el aluminio, del grupo III A, es un dopante de tipo p con una deficiencia de electrones de valencia, lo que conlleva la formación de portadores de carga positiva (huecos electrónicos).</p>	210
6.3-2	<p>Cuando un átomo dopante con una valencia superior a cuatro se le agrega al silicio, se introduce un electrón adicional y se crea un estado de energía donador. Ahora los electrones se excitan con mayor facilidad para pasar a la banda de conducción.</p>	211
6.3-3	<p>Efecto de la temperatura en la conductividad del silicio dopado con fósforo. A bajas temperaturas, la conductividad aumenta, ya que más electrones donadores entran en la banda de conducción. A temperaturas moderadas, ocurre el agotamiento de donadores. A temperaturas más elevadas, se hace importante la semiconducción intrínseca. (A) Diagrama esquemático y (B) trazo de Arrhenius.</p>	213
6.3-4	<p>Cuando un átomo dopante con una valencia menor a 4 es sustituido en una red de silicio, se crea un hueco de electrón en la estructura y aparece un nivel de energía de aceptante justo por encima de la banda de valencia. Se requiere de poca energía para excitar los huecos de electrones y ponerlos en movimiento.</p>	214
6.3-5	<p>Los átomos de zinc intersticiales pueden ionizarse y producir electrones adicionales, creando un semiconductor imperfecto de tipo n en el ZnO.</p>	216
6.3-6	<p>Dos iones <math>Fe^{3+}</math> y un hueco reemplazan tres iones de <math>Fe^{2+}</math> manteniendo un equilibrio de cargas general pero creando un nivel de aceptante. El resultado es un semiconductor imperfecto tipo p.</p>	217

Figura		Página
6.5-1	Comportamiento de un dispositivo de unión p-n. (A) Se provoca el equilibrio al concentrarse electrones del lado n y huecos del lado p, (B) una polarización positiva hará que fluya una corriente y (C) una polarización negativa no permitirá que fluya corriente.	219
6.5-2	(A) Característica de corriente voltaje en una unión p-n. Note la diferencia de escalas en el primer y tercer cuadrante. (B) Si se aplica una señal alterna, ocurre una rectificación y solo la mitad de la señal de entrada pasara a través del rectificador.	220
6.5-3	(A) Circuito para un transistor de unión bipolar n-p-n. La entrada crea una polarización directa y otra inversa que hace que los electrones se muevan alejándose del emisor, a través de la base y hacia el colector, creando una salida amplificada. (B) Esquema de la sección transversal del transistor.	222
6.5-4	Transistor de efecto de campo semiconductor de oxido metálico n-p-n.	224
7.1-1	Campo de aplicación de los nuevos materiales.	225
7.1-2	Metales transparentes.	227
7.1-3	Aluminio transparente.	228
7.1-4	Concreto traslucido.	229

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.4-1	Número de coordinación de enlazamiento iónico.	23
1.4-2	Energías de enlace y longitudes de enlace para enlaces covalentes representativos.	30
2.3-1	Los siete sistemas cristalinos.	40
2.3-2	Características de los siete sistemas cristalinos	41
2.4-1	Reglas de reflexión de la difracción de rayos-X para las estructuras comunes de metales.	47
2.5-1	Composición y propiedades de los tres tipos de vidrio.	49
2.5-2	La función de error.	64
2.5-3	Datos de difusividad para varios sistemas metálicos (véase ecuación 2.5-9).	70
2.6-3	Reglas de solubilidad para compuestos iónicos comunes en agua a 25°C.	77
3.1-1	Clasificación de los aceros según su composición.	99
3.1-2	Sistema AISI-SAE de designación de aceros al carbono y de baja aleantes.	100
3.1-3	Especificaciones de la ASTM para placas de acero al carbono de calidad estructural	102
3.1-4	Composición de algunos aceros inoxidable normales y especiales.	105
3.1-5	Algunas aleaciones ferrosas amorfas.	114
3.2-1	Designaciones de las aleaciones de aluminio.	117
3.2-2	Designaciones de temple para aleaciones de aluminio.	118
3.2-3	Clasificación del cobre y las aleaciones de cobre.	124
4.2-1	Composición de algunos vidrios.	157
4.5-1	Compuestos principales del cemento portland.	164

Tabla		Página
4.5-2.	Limites de composición aproximados para cemento portland.	165
5.2-1	Comparación de las tres categorías principales de polímeros.	187
5.6-1	Algunas propiedades de termoplásticos selectos de uso general.	202
6.2-1	Estructura electrónica y conductividad eléctrica de los elementos del grupo IVA a 25°C.	205
6.3-1	Espacios de energía de donadores y aceptantes en electrón volts cuando se dopan semiconductores de silicio y de germanio.	212
6.3-2	Brechas de energía y movilidades de compuestos semiconductores.	215
7.2-1	Características de los materiales ecológicos.	231

## INTRODUCCIÓN

La asignatura de Ingeniería de Materiales 234 es fundamental en la estructura curricular del programa de ingeniería civil ING08, ya que el alumno se encontrará con cursos posteriores en donde, sin una comprensión de los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en la intimidad de los materiales no asimilará de la manera más adecuada sus aplicaciones y complicaciones en el uso de ellos. En forma general, los estudiantes de ingeniería civil no conocen las propiedades físicas, químicas y físico-químicas de los materiales, lo cual es fundamental en la elección y aplicación de ellos en las diferentes obras de construcción y proyectos constructivos. El desconocimiento de las características fisicoquímicas de los materiales y los procesos de ingeniería asociados a su uso, permite la aplicación de los materiales por una cuestión de diseño, apariencia sin conocer el comportamiento y propiedad del mismo en diferentes zonas geográficas, condiciones ambientales como la humedad. Usualmente se emplean los materiales tradicionales pero en la actualidad existen gran variedad de propiedades nuevas en materiales tanto para construcción u otras áreas de gran importancia social y económica de un país que nos permiten desarrollar productos con mejores propiedades mecánicas, resistencia química, conductividad térmica entre otro. Es necesario por tanto, abordar temas que involucran el desarrollo de nuevas aleaciones metálicas con propiedades mecánicas superiores a las conocidas, o bien materiales más ligeros pero que superan la resistencia de un acero como los nanotubos de carbón o materiales que se han aplicado en la industria aeronáutica. Los conocimientos básicos sobre la caracterización y tratamiento de los fenómenos de corrosión de los materiales metálicos es fundamental en el curso, ya que las pérdidas económicas por corrosión en la industria química, petrolera etc. representa un alto porcentaje del producto interno bruto de un país.



## **UNIDAD 1. CONSTITUCIÓN DE LA MATERIA**

### **1.1 CONCEPTO DE MATERIA Y MATERIAL**

#### **1.1.1 Materia**

La materia es todo aquello que ocupa un lugar dentro del espacio y tiene una masa. Dentro de la materia se incluye todo aquello que se puede ver y tocar, como ejemplos podríamos citar el agua, la tierra, árboles, rocas, etc; y todo aquello que de cierta forma no se puede ver ni tocar como el aire y el oxígeno que respiramos. Así pues, todo en el universo tiene una conexión “química”. Los químicos distinguen varios subtipos de materia con base en su composición y propiedades. La clasificación de la materia incluye sustancias, mezclas, elementos y compuestos, además de los átomos y moléculas (Chang R, 2007).

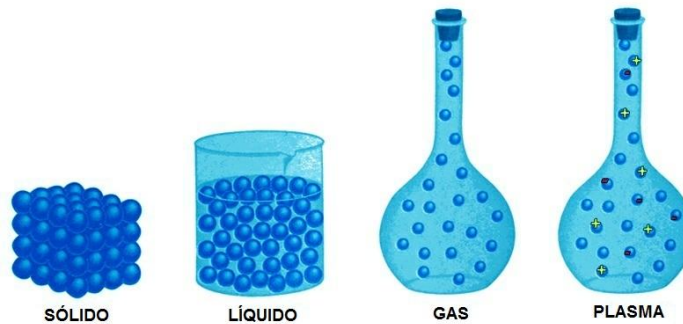
#### **1.1.2 Material**

Un material es un elemento que puede transformarse y agruparse en conjunto, pero no se limita a la materia prima; El material puede incluir, elaborados componentes, piezas, conjuntos, subconjuntos, combustibles, lubricantes, refrigerantes, agentes de limpieza, así como herramientas pequeñas y accesorios que se pueden consumir directa o indirectamente y que dichos materiales tienen una aplicación útil (Vable M, 2006).

## 1.2 ESTADOS FÍSICOS DE LOS MATERIALES

Las sustancias existen y se encuentran en tres estados: sólido, líquido y gaseoso, siendo estas las más comunes y conocidas por el hombre aunque también se conocen en otros dos estados que no son frecuentemente encontrados en la literatura: el plasma y el gel (Chang R, 2007).

Como se puede observar en la figura 1.2-1, los gases difieren de los líquidos y sólidos en la distancia que existe entre las moléculas.



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 1.2-1. Representación microscópica de un sólido, un líquido, un gas y el plasma.

- a) Estado sólido: En el estado sólido, las moléculas se mantienen juntas de una manera ordenada y con una libertad de movimiento muy restringida que es casi nula.
- b) Estado líquido: En el estado líquido las moléculas de un líquido permanecen cerca unas de otras, sin que se mantenga entre ellas una posición rígida, por lo que pueden moverse y de esta forma adquirir la forma del recipiente que los contenga.
- c) Estado gaseoso: En un gas, las moléculas se encuentran separadas entre sí por distancias mayores en comparación al tamaño de las moléculas mismas.

- d) Plasma: El plasma es un gas ionizado, donde los átomos que lo componen se han apartado de algunos de sus electrones. De aquí que se puede decir que el plasma es muy parecido al gas pero está compuesto por aniones (iones con carga negativa) y cationes (iones con carga positiva), que se encuentran libres y separados entre sí, por eso es un excelente conductor. Un ejemplo muy claro de este estado y que a diario lo vemos es el Sol.

En la baja Atmósfera terrestre, cualquier átomo que pierde un electrón (esto quiere decir cuando es alcanzado por una partícula cósmica rápida), se dice que está ionizado. Pero esto cambia conforme las altas temperaturas, todo es muy diferente. Entre más caliente se encuentre el gas, sus átomos y moléculas se mueven más rápido (ley de los gases ideales) y a muy altas temperaturas las colisiones entre estos átomos, los cuales se mueven muy rápido, son lo suficiente violentas para liberar los electrones. En la atmósfera solar, una gran parte de los átomos están permanentemente “ionizados” por dichas colisiones por lo que el gas se comporta como un plasma. A diferencia de los gases fríos (aire a temperatura ambiente), los plasmas conducen la electricidad y son fuertemente influidos por los campos magnéticos. Entre los estados de la materia es posible realizar conversiones sin que la composición de la sustancia cambie. Como un ejemplo tenemos que al calentar un sólido en este caso un cubo de hielo este se funde y se convierte en líquido (agua) a esta conversión se le conoce como fusión y la temperatura a la que ocurre se llama punto de fusión. Ahora bien si este líquido lo seguimos calentando lo convertimos en gas y a esta conversión se le llama ebullición y la temperatura a la que ocurre se le llama punto de ebullición. Por otra parte, tenemos que si enfriamos un gas este se condensa hasta llegar al estado líquido y aparte si este líquido se enfría ahora se congelara regresando a su forma sólida (Chang R, 2007).

## 1.3 RELACIÓN ENTRE ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

### 1.3.1 Estructura de los Materiales

Dentro de un material su composición y su estructura tienen una influencia profunda en sus propiedades y dentro de su comportamiento. Esta estructura de los materiales la podemos examinar y describir en cinco niveles diferentes:

- 1.- macroestructura
- 2.- microestructura
- 3.- nanoestructura
- 4.- arreglos atómicos de corto y largo alcance
- 5.- estructura atómica

La microestructura de un material es la estructura a una escala de longitud aproximadamente de  $\sim 10$  a  $1000 \text{ nm}$ . Esta escala de longitud no es más que la longitud o intervalo de dimensiones características donde se describen las propiedades de un material o los fenómenos que se puedan presentar en los materiales. La microestructura en un caso normal comprende propiedades como lo son: el tamaño promedio del grano, la distribución de dicho tamaño, la orientación de los granos, así como otras propiedades relacionadas con los defectos de los materiales. La estructura del material a nivel macroscópico se conoce como macroestructura.

Esta macroestructura cuenta con escala de longitud  $\sim > 1000 \text{ nm}$ . La porosidad, recubrimientos superficiales y las microgrietas las cuales pueden ser internas o externas se encuentran entre las propiedades que constituyen la macroestructura. Ahora bien dichas propiedades y comportamiento de los materiales a estos niveles “micro” pueden tener mucha variación, en comparación con los que tienen a nivel “macro” o en volumen. Para comprender la estructura a nanoescala o conocida mejor como nanoestructura (la estructura y las propiedades de los materiales a una nanoescala o escala de longitud de  $\sim 1-100 \text{ nm}$ ) y la microestructura son

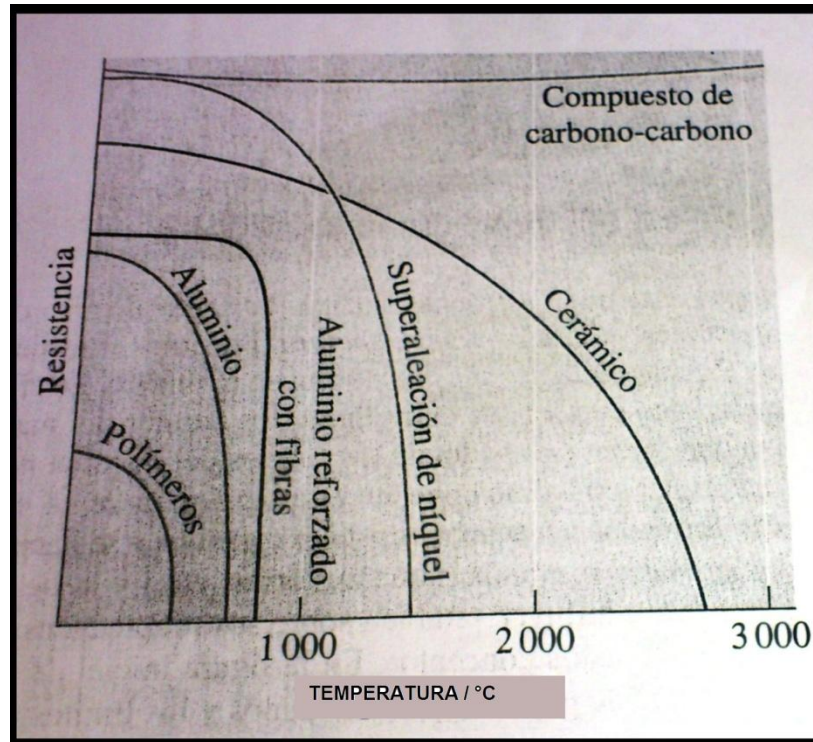
ramas que han recibido considerable atención. El término de nanotecnología se utiliza para describir el conjunto de tecnologías que está basado en fenómenos físicos, químicos y biológicos los cuales suceden a nanoescala. También es de suma importancia comprender la estructura atómica y la forma en que los enlaces atómicos producen distintos arreglos atómicos o iónicos en los materiales. En la estructura atómica se incluyen todos los átomos y sus arreglos, los cuales constituyen los bloques estructurales de la materia y con estos bloques estructurales emergen todos lo nano, micro y macroniveles de estructura. Las perspectivas que se obtienen al comprender la estructura atómica y las configuraciones de enlace de átomos y moléculas serán esenciales a la hora de seleccionar materiales de ingeniería. El termino estructura nos indica el arreglo atómico de un material; la estructura que se encuentra a escala microscópica se le llama microestructura como lo mencionamos anteriormente. Dichos arreglos se pueden considerar en distintas escalas: desde algunas unidades angstrom hasta un milímetro. Las relaciones que se presentan entre la estructura y las propiedades de los materiales fabricados en forma de componentes están influidas con frecuencia por el entorno al que el material se expone durante su uso. Dicha exposición puede ser a bajas o altas temperaturas, corrosión, oxidación, esfuerzos cíclicos, impacto súbito, etc. todos estos efectos se deben tomar en cuenta a la hora del diseño, para asegurar que los componentes no fallen en forma inesperada (Askeland y Phulé, 2006).

### **1.3.2 Propiedades de los materiales**

#### **1.3.2.1 Temperatura**

Cuando se presentan cambios de temperatura se pueden llegar a modificar profundamente las propiedades de los materiales, en la figura 1.3-1 se presenta una grafica donde se ve como el aumento de temperatura reduce la resistencia de los materiales. Los materiales que pueden sufrir cambios en sus propiedades son os metales y las aleaciones ya que estos se endurecieron con ciertos tratamientos

térmicos o técnicas de formado y ante estos cambios de temperatura pueden perder repentinamente su resistencia.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.3-1. Por lo general el aumento de la temperatura reduce la resistencia de un material. Los polímeros solo son adecuados para bajas temperaturas. Algunos materiales compuestos, como los de carbono-carbono, las aleaciones especiales y los cerámicos, tienen propiedades excelentes a altas temperaturas.

Las altas temperaturas también funden o carbonizan los polímeros y también cambian la estructura de las cerámicas. Por otro lado, las bajas temperaturas pueden hacer que un metal o un polímero fallen por fragilidad, aun cuando las cargas aplicadas sean bajas (Askeland y Phulé, 2006).

### 1.3.2.2 Corrosión

La corrosión afecta a la mayoría de los metales y los polímeros ya que estos reaccionan con oxígeno u otros gases y en especial si están a temperaturas altas.

La corrosión no es más que el desgaste estructural sufrido en los materiales, principalmente metales debido a una reacción de oxidación en presencia de oxígeno como consecuencia del intemperismo al que se somete dicho material. Los metales y las cerámicas se pueden desintegrar, y los polímeros y las cerámicas sin óxidos se pueden oxidar (Askeland y Phulé, 2006).

### **1.3.2.3 Fatiga**

Otro de las propiedades que se deben tener en cuenta es la fatiga, ya que los componentes se deben diseñar de tal forma que la carga en el material no sea suficiente para causar su deformación permanente. Ahora bien por otro lado, cuando un material se carga y descarga n número de veces, se pueden formar pequeñas grietas y, si estas llegan a crecer, dicho material falla. Cuando se presenta esta falla se llama “falla por fatiga”. Por eso a la hora de diseñar componentes que están sujetos a cargas dinámicas, uno debe considerar la posibilidad que se presente una falla por fatiga (Askeland y Phulé, 2006).

### **1.3.2.4 Rapidez de deformación**

Es sabido que el *silly putty*®, un polímero basado en la silicona, se puede estirar mucho si se tensa con lentitud (pequeña rapidez de deformación). Ahora bien si lo tensamos con rapidez (mayor rapidez de deformación), se rompe. Dentro de los materiales metálicos muchos pueden tener un comportamiento muy parecido al *silly putty*. Así, que para la hora de diseñar, se debe tomar en cuenta la rapidez de deformación y su valor. También en muchos casos, pueden estar interrelacionados los efectos de fatiga, así como el de esfuerzo y corrosión, y otros factores externos pueden afectar el funcionamiento del material (Askeland y Phulé, 2006).

### **1.3.3 Tipos de materiales**

#### **1.3.3.1 Materiales**

Los materiales se dividen en 5 categorías principales, descritas a continuación.

#### **1.3.3.2 Metales**

Los metales poseen una estructura cristalina donde sus átomos están dispuestos de una manera ordenada. Los metales poseen energías de ionización que son bajas y por esa razón tienden a formar iones positivos con relativa facilidad. De esta manera los metales se oxidan cuando participan en reacciones químicas esto debido a que pierden electrones aparte de que muchos metales se oxidan con varias sustancias como son el  $O_2$  y los ácidos. Los metales están compuestos por sustancias inorgánicas las cuales están compuestas por uno o más elementos metálicos pero también pueden contener elementos no metálicos. Como ejemplos de elementos metálicos tenemos cobre, hierro, aluminio, níquel y titanio. También los materiales metálicos pueden contener elementos no metálicos como pueden ser carbono, nitrógeno y oxígeno. De manera general podemos decir que los metales exhiben ese lustre brillante característico de ellos, son muy buenos conductores eléctricos y térmicos, son maleables, esto quiere decir que los podemos golpear hasta formar delgadas láminas, son dúctiles de manera que los podemos estirar hasta formar un alambre con ellos. Todos los metales son sólidos a temperatura ambiente a excepción del mercurio el cual es un líquido (punto de fusión=  $-39^\circ\text{C}$ ). Existen dos metales los cuales se funden a temperaturas relativamente mayores a la del medio ambiente, el cesio se funde a una temperatura de  $28.4^\circ\text{C}$  mientras que el galio lo hace a  $29.8^\circ\text{C}$ , aunque la mayoría de los materiales son resistentes a las altas temperaturas, como ejemplo de esto tenemos al cromo el cual se funde a  $1900^\circ\text{C}$  (Brown, 2004; Smith y Hashemi, 2006).

El peso de los materiales metálicos empleados por el hombre está constituido por más del 90 por ciento de aleaciones férreas. Esta gran familia de materiales de ingeniería cuenta con un amplio rango de microestructuras y propiedades asociadas. Dentro de la ingeniería la mayoría de los diseños requieren soportar



cargas estructurales o transmisión de potencia y con esto implica el uso de aleaciones férreas. Dentro de la ingeniería el material característico que asocia el público en general es el acero estructural. Este versátil material de construcción cuenta con varias características o propiedades que se consideran como metálicas. El acero es resistente y se puede amoldar a las formas necesarias. Aparte cuenta con una gran facilidad de deformación permanente (ductilidad) que es un factor importante el cual le permite deformarse un poco frente a cargas grandes y súbitas. Otra de las características del acero es el “lustre metálico” característico de la superficie recién cortada del acero tiene, además la varilla de acero como otros metales comparten una característica fundamental: son buenos conductores de corriente eléctrica (Shackelford, 1995).

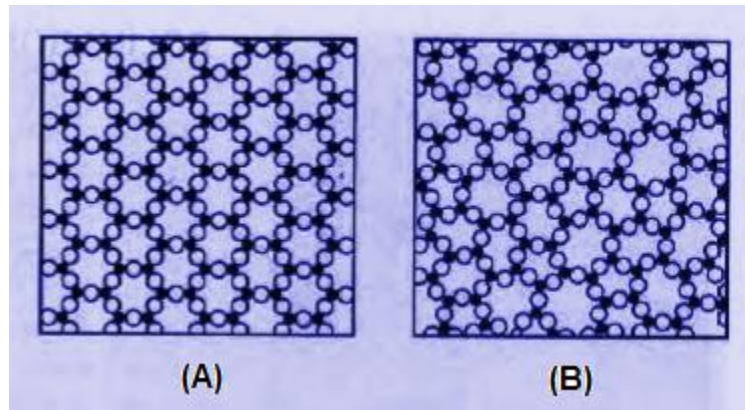
### **1.3.3.3 Cerámicas y vidrios**

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos los cuales están formados por elementos metálicos y no metálicos donde químicamente están enlazados entre sí. Estos materiales cerámicos o cerámicas como se les conoce pueden ser cristalinos, no cristalinos o bien ser una mezcla de los dos. Los materiales cerámicos no cristalinos incluyen al vidrio así como unos cuantos materiales más con estructuras amorfas. Los materiales cerámicos pueden llegar a tener una estructura de red covalente, enlaces iónicos o bien una combinación de ambos. Dichos materiales pueden adoptar diversas formas químicas como silicatos (sílice,  $SiO_2$ , con óxidos metálicos), óxidos (oxígeno y metales), carburos (carbono y metales), nitruros (nitrógeno y metales) y aluminatos (aluminia,  $Al_2O_3$ , con óxidos metálicos) . Como ejemplos de materiales cerámicos tenemos las ollas de barro, tabiques refractarios, aislantes de las bujías y la porcelana. La mayoría de dichos materiales presentan una gran dureza y una alta resistencias a temperaturas altas pero su desventaja es que son muy frágiles, esto quiere decir, que tienen poco o casi nula deformación antes de su fractura. Entre las ventajas de estos materiales cerámicos están las de aplicaciones industriales, por su peso ligero, su gran dureza y resistencia, su resistencia al desgaste y al calor, poca fricción y sus propiedades aislantes. Debido a sus propiedades aislantes, con la gran resistencia

al calor con la que cuentan y al desgaste de muchos materiales cerámicos, estas características los vuelven muy útiles en recubrimientos de hornos para tratamientos térmicos así como fusión de metales como podría ser el acero. Las aplicaciones de estos materiales cerámicos son limitadas ya que solo se hacen en las industrias aeronáutica, metalúrgica, automotriz, biomédica y algunas otras. Las dos grandes desventajas de las cerámicas son la dificultad que se tiene para elaborar productos terminados y su elevado costo y la otra es su fragilidad ya que comparadas con los metales tienen baja tenacidad (Brown, 2004; Smith y Hashemi, 2006).

Es bien sabido que el aluminio (Al), es un metal común, pero el óxido de aluminio, ( $Al_2O_3$ ) es muy característico de una familia fundamentalmente distinta de materiales para ingeniería que en este caso son las cerámicas. El óxido cuenta con dos ventajas principales con respecto al Al metálico. Una de ellas es que el  $Al_2O_3$  químicamente es estable en una gran variedad de ambientes enérgicos, en los cuales se podría llegar a oxidar o presentar corrosión. La segunda ventaja con la que cuenta es que el  $Al_2O_3$ , cerámico tiene un punto de fusión bastante elevado el cual es de  $2020^{\circ}C$ , en comparación con el del Al metálico, el cual es de  $660^{\circ}C$ . Estas características hacen que el  $Al_2O_3$  sea un refractario bastante común, que quiere decir con esto, que a las altas temperaturas es un material muy resistente, el cual se usa mucho en la construcción de hornos. Si bien las cerámicas son muy resistentes a las altas temperaturas dentro de sus propiedades más desfavorables se encuentra: su fragilidad. Mientras que por otro lado otros metales como el aluminio tienen la propiedad de ser dúctiles, característica que les permite soportar grandes cargas de impacto sin romperse o presentar fracturas, el óxido de aluminio y otros materiales cerámicos no cuentan con ella. Así que don esto quedan eliminados de la selección cuando se trata de muchas aplicaciones estructurales. Aún así las cerámicas junto con los metales tienen una característica estructural muy parecida a escala atómica dicha característica es la de ser cristalinos, lo que quiere decir que los átomos que los forman están apilados y unidos en una distribución regular y repetitiva. Los materiales de tipo metálico y de tipo cerámico cuentan con diferencias entre sí una de ellas es que,

mediante técnicas bastantes sencillas de procesamiento, muchas cerámicas se pueden llegar a fabricar en forma no cristalina; esto quiere decir que, sus átomos están apilados en conjuntos irregulares y aleatorios. Como se observa en la figura 1.3-2. El Vidrio es el nombre que se les da a los sólidos no cristalinos cuyas composiciones son comparables con las de cerámicas cristalinas.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.3-2. Comparación esquemática de la estructura a escala atómica de (A) una cerámica cristalina y (B) un vidrio no cristalino. Los círculos vacíos representan átomos de un no metal, y los círculos llenos representan átomos de un metal.

La mayor parte de los vidrios comunes son silicatos. Los vidrios comparten con las cerámicas cristalinas, la propiedad de ser frágiles. Son materiales técnicos importantes por otras propiedades con las que cuentan, tal como su capacidad de transmitir luz visible, así como radiación ultravioleta e infrarroja (Shackelford J.F, 1995).

### 1.3.3.4 Polímeros

En la naturaleza podemos llegar a encontrar muchas sustancias que cuentan con una masa molecular muy alta la cual puede llegar hasta los millones de una. En las plantas abunda el almidón y la celulosa; las proteínas así como los ácidos nucleicos se encuentran tanto en plantas como animales. Jons Jakob berzelius utilizo el termino polímero (que proviene del griego polys, “muchos” y meros, “partes”) para nombrar las sustancias moleculares con alta masa molecular que son formadas por la polimerización que es la unión de monómeros, moléculas con baja masa molecular. La mayoría de estos materiales poliméricos están formados de largas cadenas o redes moleculares que frecuentemente están basadas en compuestos orgánicos (precursores que contienen carbono). Viéndolo de otra manera los materiales poliméricos no son cristalinos, aunque algunos cuentan con mezclas de regiones cristalinas y no cristalinas. La resistencia y la ductibilidad de estos materiales variaran considerablemente. Debido a su naturaleza de su estructura interna, la mayoría de los poliméricos son malos conductores de electricidad. Sin embargo algunos de estos materiales son muy buenos aislantes y se les da el uso de aislantes eléctricos. Una de las maneras en que más se utilizan los materiales poliméricos es en la fabricación de DVD (disco de video digital). De manera general podemos decir que los poliméricos tienen bajas densidades y temperaturas de ablandamiento o de descomposición muy bajas (Brown, 2004; Smith y Hashemi, 2006).

Los polímeros, estos materiales artificiales forman una rama muy especial dentro de la química orgánica. El nombre común y alternativo con el que se nombra esta categoría es el de plásticos, el cual describe la gran conformabilidad de muchos polímeros durante su fabricación. El “mer” o monómero en un plástico es una molécula única de hidrocarburo, por ejemplo, una molécula de etileno, ( $C_2H_4$ ). Los polímeros son moléculas de cadena larga formada por muchos monómeros unidos entre sí. El polímero comercial más común es el polietileno  $-(C_2H_4)_n-$ , siendo n desde 100 a 1000, aproximadamente. Dentro de los plásticos hay muchos importantes, como el polietileno, que son solo compuestos de hidrogeno y carbono. Algunos otros como los acrílicos contienen oxigeno, los nailons o nylons

contienen nitrógeno, los plásticos que se conocen como fluorados tienen flúor, y en el caso de las siliconas contienen silicio. Como el nombre lo implica, los “plásticos” por lo regular con los metales comparten la propiedad mecánica de la ductilidad. Con diferencia de las cerámicas frágiles, los plásticos (polímeros), con frecuencia, respecto a los metales, son buenas alternativas de baja densidad y de bajo costo en algunas aplicaciones de diseño estructural. Dentro de las propiedades importantes de estos polímeros relacionadas con el enlazamiento se encuentran menor resistencia, en comparación con la de los metales, un punto de fusión menor y mayor reactividad química comparándolos con los vidrios y cerámicas. No obstante, los polímeros son materiales útiles y versátiles (Shackelford J.F, 1995).

#### **1.3.3.5 Compuestos**

Un material compuesto puede estar definido por dos o más materiales (constituyentes o fases) integrados para formar un nuevo material. Los constituyentes conservarán sus propiedades y el nuevo compuesto tendrá propiedades distintas a las de cada uno de ellos. En su mayoría estos materiales compuestos constan de un material específico de relleno que a su vez sirve de refuerzo, y a la vez una resina aglomerante con el objetivo de lograr las características y propiedades deseadas. Los componentes no pueden disolverse entre sí pero se pueden identificar gracias a la interfaz que existe entre ellos. Hay muchos tipos de materiales compuestos, pero los que más predominan son los fibrosos (compuestos o fibras en una matriz) y los particulados (partículas o compuestos en una matriz) (Smith y Hashemi, 2006).

Como vimos en las tres categorías pasadas de materiales técnicos estructurales estos contienen varios elementos y compuestos con los que se pueden clasificar en base a su enlazamiento químico. Si bien estas tres categorías representan para los ingenieros un gran surtido de materiales estructurales de donde seleccionar, ni la naturaleza ni la tecnología moderna permiten que se reduzcan a ellas las opciones. Contamos a nuestra disposición un gran importante conjunto de materiales, que nos representan una combinación de componentes individuales de

dichas categorías. El mejor ejemplo que tenemos en este caso es el plástico reforzado con fibra de vidrio. Este plástico está compuesto de fibras de vidrio embebidas en una matriz de polímero en un invento que es muy reciente, pero en que en pocos años ha llegado a ser un material familiar. Este plástico reforzado con fibra de vidrio es muy característico de los buenos materiales compuestos, y este presenta lo mejor de sus componentes; contiene las mejores propiedades de cada componente y como un producto es superior a cualquiera de sus ingredientes por separado. La alta resistencia con la que cuentan las fibras de vidrio de pequeño diámetro combinada con la ductilidad de la matriz de polímero nos produce un material fuerte, el cual es capaz de resistir la carga normal necesaria en un material estructural. Como un excelente ejemplo tenemos la madera que es un material natural que cuenta con propiedades mecánicas útiles, estas se deben a que estructura esta reforzada con fibras. Como ejemplo de material compuesto tenemos el concreto con agregados, donde la arena y la grava refuerzan una matriz complicada de cemento de silicato (Shackelford J.F, 1995).

#### **1.3.3.6 Semiconductores**

Los semiconductores son elementos que se comportan como un conductor o aislante, dependiendo de diversos factores tales como el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que lo incide así como la temperatura ambiente a la que se encuentre. Los semiconductores que son aquellos materiales donde sus conductividades eléctricas están entre las de metales altamente conductores y la de los aisladores con una conducción pobre. Los semiconductores intrínsecos son aquellos semiconductores puros donde su conductividad eléctrica se determina en base a sus propiedades conductivas inherentes. Los elementos químicos como el silicio y el germanio puros son materiales semiconductores intrínsecos. Dichos elementos cuentan con la estructura cubica de diamante con enlaces covalentes altamente direccionales. Los orbitales de enlace híbridos  $sp^3$  tetraédricos los cuales consisten en pares de electrones mantendrán unidos a los átomos dentro de una red cristalina. Aquí en esta estructura cada átomo de silicio o germanio aportan cuatro electrones de valencia (Smith y Hashemi, 2006).

Como vimos anteriormente los polímeros son materiales técnicos muy sobresalientes los cuales han tenido un gran impacto en la sociedad contemporánea, por otra parte los semiconductores son relativamente invisibles, pero su impacto social no se ve afectado ya que es del mismo orden. Un grupo parcialmente pequeño de elementos y compuestos cuentan con una propiedad eléctrica importante, dicha propiedad es la semiconducción, una propiedad donde no son ni buenos conductores eléctricos, aunque de igual forma no son buenos aisladores eléctricos. En pocas palabras podemos decir que, la capacidad que tienen para conducir electricidad es intermedia. Los semiconductores, estos no se ajustan en cualquiera de los cuatro tipos de materiales estructurales basados en el enlazamiento atómico. Como anteriormente vimos, los metales, inherentemente, son buenos conductores de electricidad. Los malos conductores son los no metales, así como las cerámicas y los polímeros, pero, por otro lado son buenos aislantes (Shackelford J.F, 1995).

## 1.4 ENLACES QUÍMICOS INTRAMOLECULARES: COVALENTE, IÓNICO Y METÁLICO.

### 1.4.1 Enlace iónico

El enlace iónico o también conocido como enlazamiento iónico es el resultado de transferencia o paso de electrones de un átomo a otro. Como vemos en la figura 1.4-1 es un ejemplo para el caso del enlace entre el sodio y el cloro.

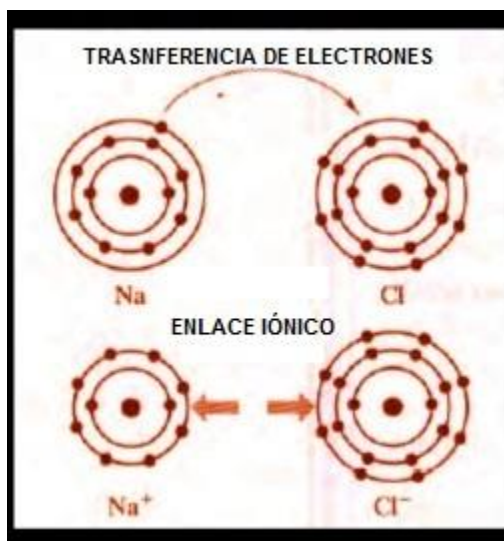


Figura 1.4-1. Enlace iónico entre los átomos de sodio y cloro. La transferencia de electrones de Na hasta Cl genera un catión ( $Na^+$ ) y un anión ( $Cl^-$ ). El enlace iónico se debe a la atracción coulombica entre los iones de carga opuesta.

Aquí vemos que las especies con carga, se llaman  $Na^+$  y  $Cl^-$ , las cuales reciben el nombre de iones, y de ahí se origina el nombre de “enlace iónico”. El  $Na^+$  que es el ion positivo se llama catión, y por otro lado el ion negativo que es el  $Cl^-$ , recibe el nombre de anión. Este enlace es el resultado de atracción electrostática, coulombiana o de coulomb que se da entre las especies con carga opuesta.

Es importante resaltar que el enlace iónico es no direccional. Un  $Na^+$  que cuente con carga positiva atraerá a cualquier  $Cl^-$  adyacente por igual en todas direcciones. En esta parte nos conviene dar un ejemplo de la naturaleza de la



fuerza de enlazamiento para el enlace iónico, ya que la atracción electrostática obedece a una relación sencilla y conocida que es la siguiente,

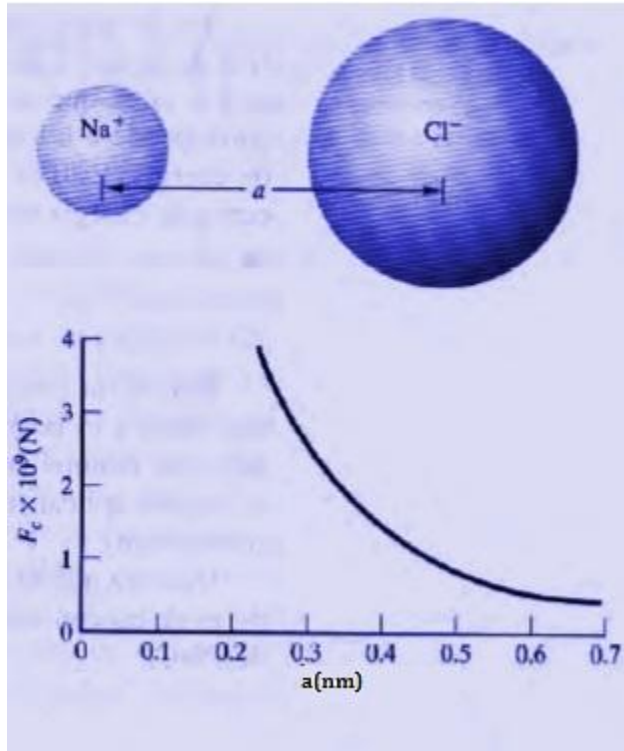
$$F_c = \frac{-K}{a^2} \quad (\text{Ecuación 1.4-1})$$

En esta ecuación  $F_c$  es igual a la fuerza de atracción electrostática que hay entre dos iones de carga opuesta, la distancia entre los centros de los iones es  $a$ , y  $K$  estará expresada por la siguiente ecuación:

$$K = k_0(Z_1q)(Z_2q) \quad (\text{Ecuación 1.4-2})$$

En esta ecuación  $Z_i$  es la valencia del ion cargado (esto quiere decir, que para el  $Na^+$  es +1 y para el  $Cl^-$  será de -1),  $q$  es la carga de un electrón ( $0.16 \times 10^{-18} C$ ), y la constante de proporcionalidad ( $9 \times 10^9 V \cdot m/C$ ) es  $k_0$ .

Si observamos la figura 1.4-2 encontramos una gráfica de la ecuación 1.4-1. Aquí observamos que la fuerza electrostática de atracción aumenta de manera dramática a medida que la separación que hay entre los centros iónicos ( $a$ ) disminuye.



Fuente: (Shackelford, 1995).

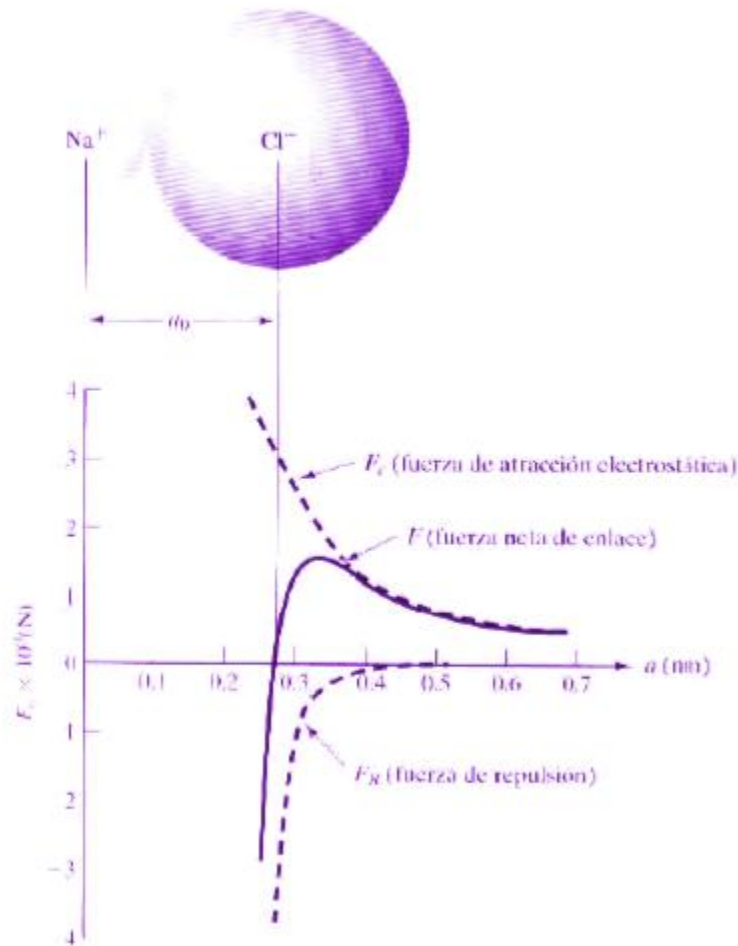
Figura 1.4-2. Grafica de la fuerza de Coulomb (ecuación 2.2-1) para un par  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ .

Con esto nos implica que la longitud de enlace ( $a$ ) para el caso ideal debería de ser cero. De hecho, las longitudes de enlace definitivamente no son cero. ¿A qué se debe esto? se debe a que cuando se tratan de acercar más y más dos iones de carga opuesta, o para aumentar la atracción de coulomb, hay una fuerza de repulsión ( $F_R$ ) que se opone y esto se debe al traslape de los campos eléctricos de igual signo (que en este caso son negativos) de cada ion, y también que se trata de acercar entre si dos núcleos de carga positiva. La fuerza repulsiva, como función de ( $a$ ) obedece a una relación exponencial:

$$F_R = \lambda e^{-a/\rho} \text{ (Ecuación 1.4-3)}$$

Para esta ecuación  $\lambda$  y  $\rho$  son constantes y se determinan experimentalmente para determinado par de iones. La curva de fuerza neta de enlazamiento para un par de

iones la vemos en la figura 1.4-3, en donde la fuerza neta de enlazamiento,  $F = F_C + F_R$ , esta graficada en función de ( $a$ ).



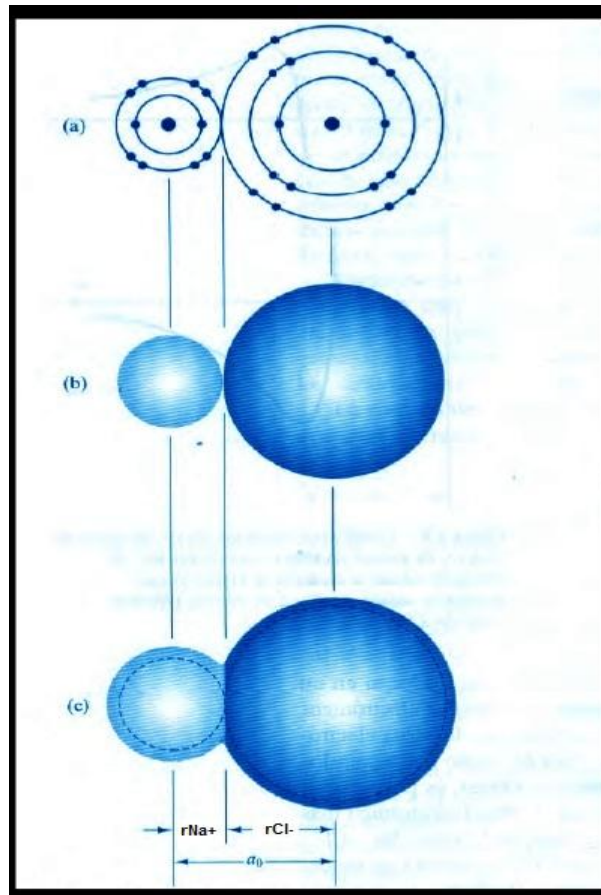
Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-3. Curva de fuerza neta de enlace para un par  $Na^+ - Cl^-$  que muestra una longitud de enlace  $a_0 = 0.28 \text{ nm}$ .

La longitud de equilibrio del alcance,  $a_0$ , está en el punto en el cual se equilibran exactamente las fuerzas de atracción y repulsión,  $F_C + F_R = 0$ . Cabe señalar que la fuerza electrostática que corresponde a la ecuación 1.4-1 domina cuando los valores de  $a$  son grandes, pero por otro lado la fuerza de repulsión que corresponde a la ecuación 1.4-3 predomina cuando los valores de  $a$  son pequeños (Shackelford J.F, 1995).

### 1.4.1.1 Radio de ionización

La ionización es un factor importante sobre los radios efectivos de una especie atómica considerada la pérdida o ganancia de un electrón con un átomo neutro cambia su radio. Un radio iónico o también llamado radio atómico es el radio que corresponde a la densidad electrónica media en el orbital externo. Como vemos en la figura 1.4-4 se comparan tres modelos de un par de iones  $Na^+ - Cl^-$ .



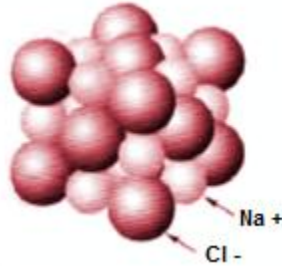
Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-4. Comparación de (a) un modelo planetario para el par  $Na^+ - Cl^-$  con (b) un modelo de esferas rígidas y (c) un modelo de esferas flexibles.

Aunque también en la figura 1.4-4a tenemos un modelo planetario sencillo de los dos iones. Comparándolo con la figura 1.4-4b, en donde nos muestra un modelo de esfera dura de ese par. Aquí la densidad electrónica real en los orbitales externos del  $Na^+$  y el  $Cl^-$  se extiende más hacia afuera de lo que se ve en la esfera dura. Este modelo de esfera suave lo podemos observar en la figura 1.4-4c (Shackelford J.F, 1995).

### 1.4.1.2 Número de coordinación

En la figura 1.4-5 tenemos una estructura, la estructura del NaCl, donde vemos que 6  $Na^+$  rodean a cada  $Cl^-$ , y viceversa.







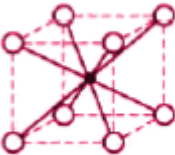
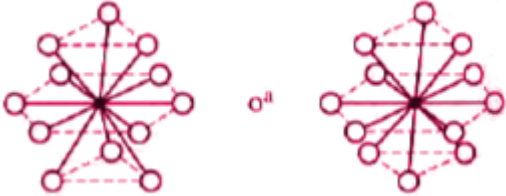
Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-5. Apilamiento regular de iones  $Na^+$  y  $Cl^-$  en el NaCl sólido. Esto es indicativo de la naturaleza no direccional del enlace iónico.

En esta estructura para cada ion, el número de coordinación (NC), será 6; esto se debe a que cada uno tiene 6 vecinos inmediatos. Por otro lado para los compuestos iónicos se puede calcular el número de coordinación de un modo sistemático, esto se realiza tomando en cuenta el número máximo de los iones mayores, que son de carga contraria y que pueden estar en contacto con el ion menor. Aquí el número de coordinación, depende directamente de los tamaños relativos de los iones de carga opuesta. El tamaño relativo está caracterizado por la relación de radio que es ( $r/R$ ), en donde  $r$  es igual al radio del ion menor, y  $R$  será el radio del ion mayor. Como observamos en la tabla 1.4-1 se resume la relación que existe entre el número de coordinación y la relación de radio.

Cuando aumenta  $r/R$  hasta 1.0, es posible un número de coordinación de 12 (Shackelford, 1995).

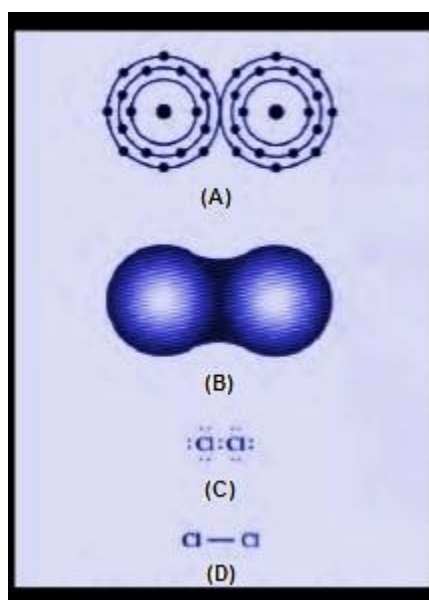
Tabla 1.4-1. Número de coordinación de enlazamiento iónico.

Número de coordinación	Relación entre radios $r/R$	Geometría de coordinación
2	$0 < \frac{r}{R} < 0.155$	
3	$0.155 \leq \frac{r}{R} < 0.225$	
4	$0.225 \leq \frac{r}{R} < 0.414$	
6	$0.414 \leq \frac{r}{R} < 0.732$	
8	$0.732 \leq \frac{r}{R} < 1$	
12	1	

Fuente: (Shackelford, 1995).

### 1.4.2 Enlace covalente

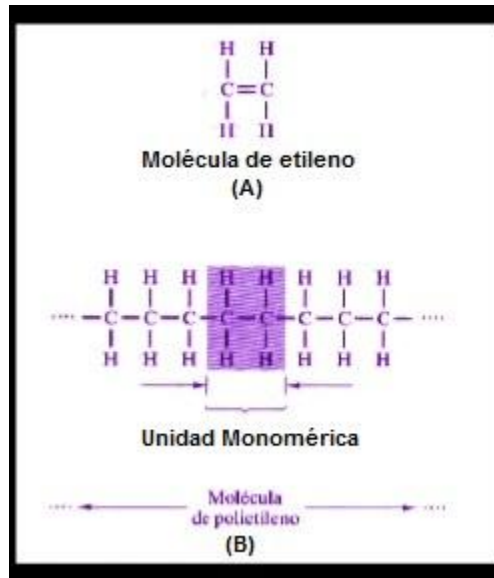
Anteriormente vimos que el enlace iónico es no direccional, sin embargo ahora tenemos un enlace que es altamente direccional: el enlace covalente. La palabra o el nombre “covalente” proviene de la distribución compartida, cooperativa, de electrones de valencia entre 2 átomos adyacentes. Como podemos ver en la figura 1.4-6 tenemos este tipo de enlace para el caso de una molécula de cloro gaseoso,  $Cl_2$ , como se ve en el inciso (a), el modelo planetario en comparación con (b) la densidad electrónica real, que claramente está concentrada a lo largo de una recta, entre los dos núcleos de  $Cl$ . En las partes (c) y (d) observamos las notaciones taquigráficas comunes, como la de “electrones” que son los puntos y las “líneas de enlazamiento” donde por medio de una raya representa un par de electrones compartidos (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-6. Ilustración del enlace covalente en una molécula de gas de cloro,  $Cl_2$ , con (A) un modelo planetario comparado con (B) la densidad real del electrón y (C) un esquema de “punto electrón” y (D) un esquema de “línea de enlace”.

En la figura 1.4-7A tenemos una clara representación de enlaces mediante rayas, aquí vemos otro caso de otra molécula covalente, como lo es la del etileno ( $C_2H_4$ ).

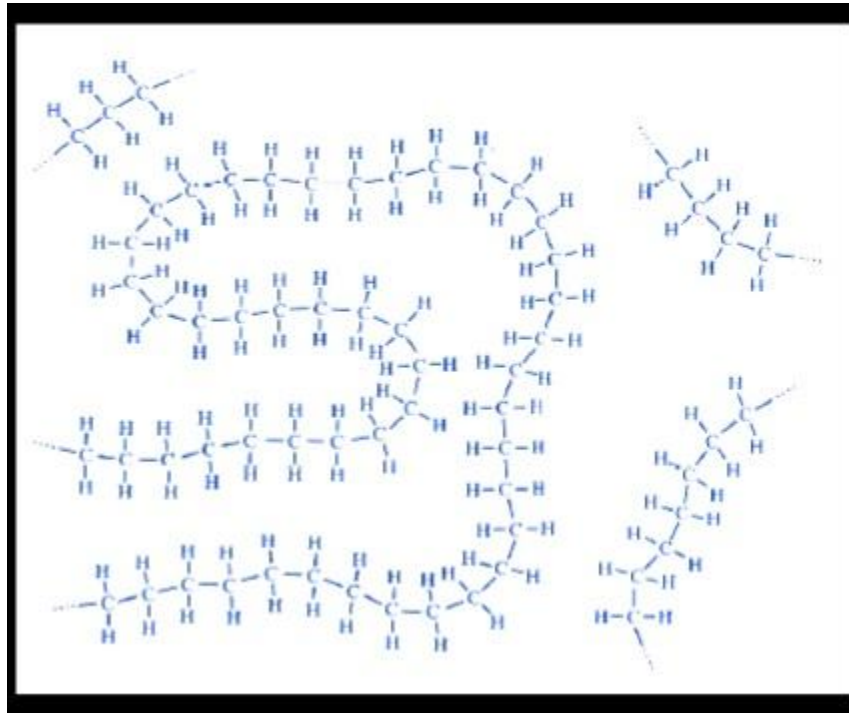


Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-7. (A) Una molécula de etileno ( $C_2H_4$ ) se compara con (B) una molécula de polietileno  $(-C_2H_4-)_n$  que resulta de la conversión del doble enlace  $C=C$  en dos enlaces sencillos  $C - C$ .

Debemos distinguir la doble raya entre los dos átomos de carbono, la cual significa un doble enlace, doble ligadura, o una distribución covalente compartida de dos pares de electrones de valencia. Ahora bien si convertimos el doble enlace a dos enlaces sencillos, se pueden enlazar moléculas de etileno entre sí, produciendo así una molécula de cadena larga, de polietileno (figura 1.4-7B). Estas moléculas poliméricas, donde cada unidad de  $C_2H_4$  es un monómero o un “mer”, (forma abreviada que se usa en ingles) son las bases estructurales de los polímeros. Hay que darse cuenta que las moléculas de cadena larga cuentan con la flexibilidad suficiente para llenar un espacio tridimensional a causa de su estructura retorcida que es tan complicada. Esta estructura la observamos en la figura 1.4-8 que es muy semejante al “espagueti” (Shackelford, 1995).

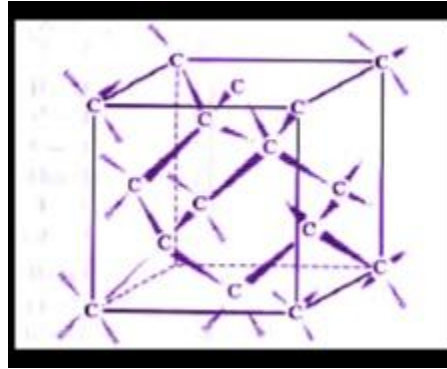




Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-8. Representación esquemática de una estructura como "espagueti" del polietileno sólido.

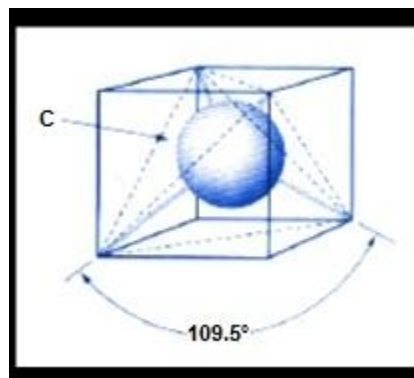
Aquí es importante señalar y darse cuenta que los enlaces fuertes, covalentes están representados mediante rayas entre C y C y entre C y H. dentro de las secciones adyacentes de las largas cadenas moleculares solo cuentan con enlaces débiles o secundarios. Aquí los enlaces secundarios son los que funcionan como un eslabón débil, o "fusible" que es el que causa bajas resistencias así como bajos puntos de fusión de los polímeros normales. Como sabemos el diamante, el cual cuenta con una dureza sumamente alta y tiene un punto de fusión superior a los 3,500°C, cuenta con enlace covalente entre cada par adyacente de átomos de C como lo vemos en la figura 1.4-9 (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-9. Estructura tridimensional de enlace en el sólido covalente, carbono (diamante). Cada átomo de carbono (C) tiene cuatro enlaces covalentes para otros cuatro átomos de carbono.

Dentro de los sólidos covalentes otra característica importante es el *ángulo de enlace*, el cual está determinado por la naturaleza direccional de la distribución compartida del átomo de valencia. En la figura 1.4-10 se muestra lo anterior para un átomo característico de carbono, el cual tiende a formar cuatro enlaces igualmente espaciados (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

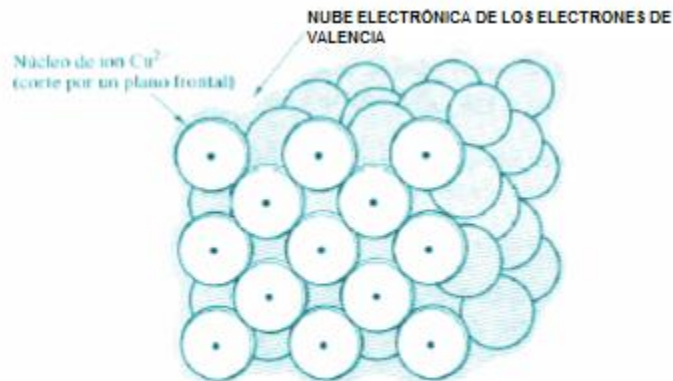
Figura 1.4-10. Configuración tetraédrica de los enlaces covalentes con carbón. El ángulo de enlace es 109.5.

Esta configuración tetraédrica posee un ángulo entre enlaces igual a  $109.5^\circ$ , este puede variar un poco esto debido a las diversas especies con las que se establece la ligadura, y esto debido a los enlaces dobles, etcétera. Pero de manera general,

los ángulos de enlace en los que está involucrado el carbono se acercan al ideal de  $109.5^\circ$  como vemos en la figura 1.4-10 (Shackelford, 1995).

### 1.4.3 Enlace metálico

Sabemos que en el enlace iónico interviene una transferencia de electrones, y esta era adireccional, por otra parte en el enlace covalente intervenía la distribución compartida de electrones y este era direccional. Ahora en el tercer enlace primario que veremos en esta sección, que es el enlace metálico, en el cual interviene una distribución compartida de electrones, pero esta es adireccional. Para este caso, se dice que los electrones de valencia están deslocalizados; esto quiere decir, que es probable que estén asociados con cualquiera de un gran número de átomos adyacentes. En los metales característicos, esta deslocalización se relaciona con todo el material, y esto ocasiona una “nube” de electrones o un gas de electrones como lo vemos en la figura 1.4-11. El “gas” móvil es la base de la alta conductividad eléctrica de los metales (Shackelford, 1995).



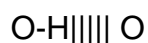
Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-11. Enlace metálico que consiste de una “nube” o “gas” de electrones. Se muestra un corte imaginario a través de la cara frontal de la estructura cristalina del cobre, revelando núcleos de ion  $Cu^{2+}$  enlazados mediante los electrones de valencia deslocalizados.

## 1.5 ENLACES QUÍMICOS INTER-MOLECULARES: PUENTES DE HIDROGENO, VAN DER WAALS, ELECTROSTÁTICO.

### 1.5.1 Puentes de hidrógeno

Es un enlace relativamente débil entre un átomo de H unido a otro átomo electronegativo y otro átomo que es, por lo general también electronegativo y tiene uno o más pares de electrones no compartidos que le permiten actuar como una base. Tal interacción será más fuerte si tanto X como Y son elementos del segundo periodo de la tabla periódica los principales donadores de protones son: el enlace N-H, O-H, F-H y los puentes de hidrogeno más comunes son:



(Shackelford, 1995; Brown, 2004)

### 1.5.2 Enlace de Van der Waals

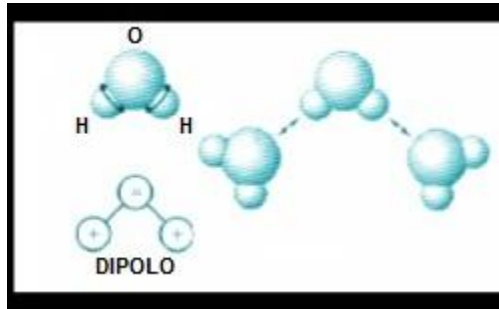
Dentro de un determinado material técnico a principal causa de cohesión puede ser uno o varios de los tres enlazamientos que se describieron con anterioridad. Como podemos observar en la tabla 1.4-2, las energías características de un enlazamiento primario van de los 200 a 700 kJ/mol ( $\approx$  50 a 170 Kcal/mol). De esta forma es posible obtener cierto enlazamiento, con energías menores, sin que se presente transferencia o distribución compartida de electrones. A esto se le conoce como el enlazamiento secundario o enlace de *Van der Waals* (Shackelford, 1995).

Tabla 1.4-2. Energías de enlace y longitudes de enlace para enlaces covalentes representativos.

<i>Energía de enlace<sup>a</sup></i>			Longitud del enlace nm
Enlace	Kcal/mol	kJ/mol	
$C - C$	88 <sup>b</sup>	370	0.154
$C = C$	162	680	0.130
$C \equiv C$	213	890	0.120
$C - H$	104	435	0.110
$C - N$	73	305	0.150
$C - O$	86	360	0.140
$C = O$	128	535	0.120
$C - F$	108	450	0.140
$C - Cl$	81	340	0.180
$O - H$	119	500	0.100
$O - O$	52	220	0.150
$O - Si$	90	375	0.160
$N - H$	103	430	0.100
$N - O$	60	2150	0.120
$F - F$	38	160	0.140
$H - H$	104	435	0.074

Fuente: (Shackelford, 1995).

Aquí tenemos que el mecanismo de enlazamiento secundario es parecido al iónico, debido a la atracción de cargas opuestas. Aunque si bien existe una diferencia clave y es que no se transfieren electrones. Esta atracción dependerá de las distribuciones asimétricas de carga positiva y de carga negativa dentro de cada unidad atómica o molecular que se enlaza. A esta asimetría de carga se le llamara dipolo. Existen dos tipos de enlazamiento secundario según los dipolos (1) temporales, o (2) permanentes. Las energías de enlazamiento secundario son algo mayores cuando se trata de unidades moleculares que contienen *dipolos permanentes*. Para tener un ejemplo claro podemos usar el de el puente de hidrogeno, el cual une a moléculas adyacentes de agua,  $H_2O$  el cual se ilustra en la figura 1.4-12.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 1.4-12. “Puente de hidrogeno”. Este enlace secundario se forma entre dos dipolos permanentes en moléculas de agua adyacentes.

Debido a su naturaleza direccional que tiene la distribución compartida de electrones en los enlaces  $O - H$  covalentes, los átomos de H se vuelven centros de carga positiva, y los átomos de O de carga negativa en las moléculas de  $H_2O$ . Cuando hay una mayor separación de carga en una de esas moléculas polares produce un momento dipolar mayor. Este momento dipolar es el resultado de la carga por la distancia entre centros de cargas opuestas. En donde la energía en este caso es mayor, en este caso de 21 kJ/mol, o 5 kcal/mol. Cuando el enlazamiento secundario se da entre las cadenas poliméricas adyacentes en plásticos como el polietileno es de este tipo (Shackelford, 1995).

### 1.5.3 Electrostático

Para estimar si un enlace dado es covalente no polar, covalente polar o iónico utilizamos una cantidad llamada electronegatividad. La electronegatividad la vamos a definir como la capacidad de un átomo en una molécula para atraer electrones hacia sí. Cuanto más grande sea la electronegatividad de un átomo, su capacidad para atraer electrones será mayor. La electronegatividad de un átomo en una molécula está relacionada con su energía de ionización así como con su afinidad electrónica, que son propiedades de los átomos aislados. La energía de ionización es la que mide la fuerza con la que el átomo se aferra a sus electrones y por otro lado la afinidad electrónica es una medida de la fuerza con la que un átomo atrae electrones adicionales. Cuando un átomo tiene una afinidad electrónica muy negativa y cuenta con una energía de ionización elevada este

atraerá electrones de otros átomos y además este se resistirá a perder los suyos; esto quiere decir que será muy electronegativo. Las estimaciones numéricas de la electronegatividad se basan en diversas propiedades y no solo se basa en la energía de ionización y la afinidad electrónica. El químico estadounidense Linus Pauling (1901-1994) desarrollo la primera escala de electronegatividad la que es de más amplio uso, este químico baso su escala en datos termoquímicos. En la figura 1.4-13 tenemos los valores de electronegatividad de Pauling para muchos de los elementos, aunque dichos valores no tiene unidades. Dentro de los elementos más electronegativos se encuentra el flúor que cuenta con una electronegatividad de 4.0. El cesio que es el elemento menos electronegativo, cuenta con una electronegatividad de 0.7. De esta manera sabemos que Los valores para los demás elementos estarán entre estos dos valores (Brown, 2004; Chang, 2007).

Grupo (Vertical)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Período (Horizontal)																		
1	H 2,20																	He
2	Li 0,98	Be 1,57											B 2,04	C 2,55	N 3,04	O 3,44	F 3,98	Ne
3	Na 0,93	Mg 1,31											Al 1,61	Si 1,90	P 2,19	S 2,57	Cl 3,16	Ar
4	K 0,82	Ca 1,0	Sc 1,36	Ti 1,54	V 1,63	Cr 1,66	Mn 1,55	Fe 1,83	Co 1,88	Ni 1,91	Cu 1,90	Zn 1,65	Ga 1,81	Ge 2,01	As 2,18	Se 2,55	Br 2,96	Kr 3,00
5	Rb 0,82	Sr 0,95	Y 1,22	Zr 1,33	Nb 1,6	Mo 2,16	Tc 1,9	Ru 2,2	Rh 2,28	Pd 2,20	Ag 1,93	Cd 1,69	In 1,78	Sn 1,8	Sb 2,05	Te 2,1	I 2,66	Xe 2,60
6	Cs 0,79	Ba 0,89	*	Hf 1,3	Ta 1,5	W 2,36	Re 1,9	Os 2,2	Ir 2,2	Pt 2,28	Au 2,54	Hg 2,00	Tl 1,62	Pb 2,33	Bi 2,02	Po 2,0	At 2,2	Rn 2,2
7	Fr 0,7	Ra 0,9	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
LANTÁNIDOS	*	La 1,1	Ce 1,12	Pr 1,13	Nd 1,14	Pm 1,13	Sm 1,17	Eu 1,2	Gd 1,2	Tb 1,1	Dy 1,22	Ho 1,23	Er 1,24	Tm 1,25	Yb 1,1	Lu 1,27		
ACTÍNIDOS	**	Ac 1,1	Th 1,3	Pa 1,5	U 1,38	Np 1,36	Pu 1,28	Am 1,13	Cm 1,28	Bk 1,3	Cf 1,3	Es 1,3	Fm 1,3	Md 1,3	No 1,3	Lr 1,3		

Fuente:(Chang, 2007).

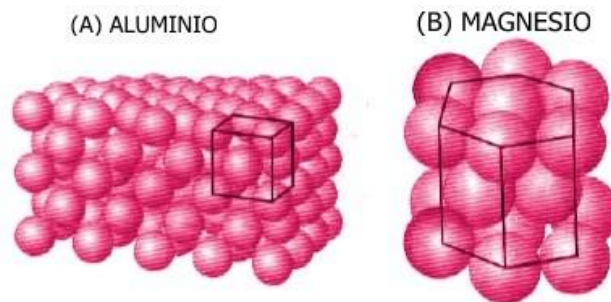
Figura 1.4-13. Electronegatividades de los elementos

## UNIDAD 2. CRISTALOGRAFÍA

La mayoría de los materiales de ingeniería esta estructura es cristalina; esto quiere decir que los átomos de dicho material están dispuestos de una forma regular y repetitiva, ordenados periódicamente.

### 2.1 ESTRUCTURA CRISTALINA

Una red no es más que una colección de puntos los cuales se llaman puntos de red, estos se encuentran ordenados en un patrón periódico de tal modo que los alrededores de cada punto de la red son idénticos. Una red puede ser uni, bi o tridimensional. En la ciencia e ingeniería de materiales se determina el concepto de “red” para describir los arreglos de átomos o de iones. Un grupo que puede constar de uno, dos o más átomos, los cuales estén ubicados en determinada forma entre sí, y asociados con cada punto de red, Por consiguiente para obtener una estructura cristalina se realiza sumando la red y la base; esto quiere decir que: estructura cristalina= red + base (Askeland y Phulé, 2006). Dentro de la estructura cristalina su característica central es ser regular y repetitiva. Esta repetición se hace evidente cuando se realiza la inspección de un modelo típico de un arreglo cristalino de átomos como se ve en la figura 2.1-1 (Shackelford, 1995).



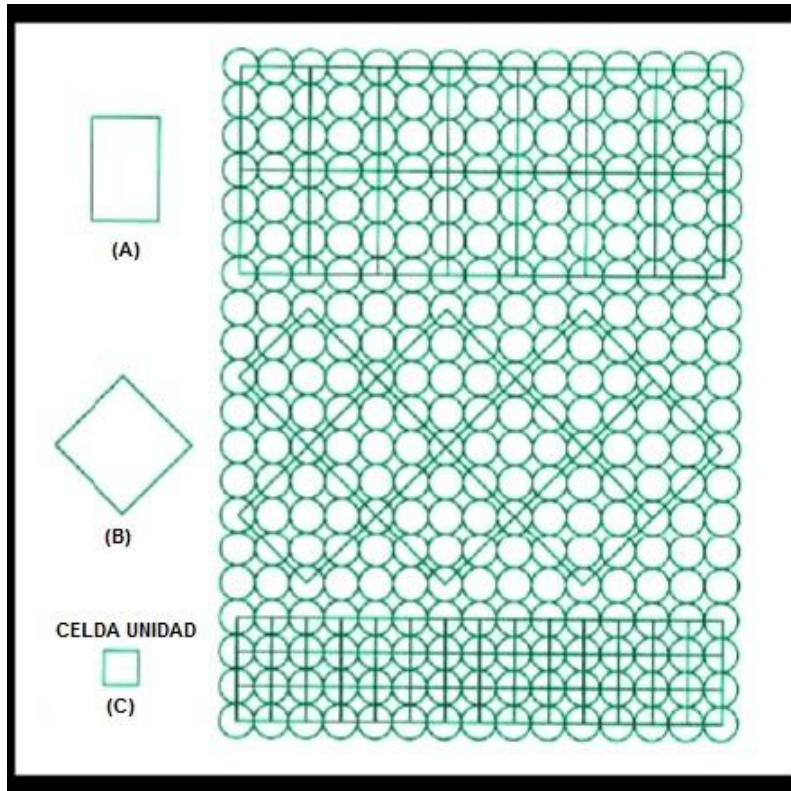
Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.1-1. Comparación de las estructuras cristalinas del aluminio y magnesio.

Así bien cualquier estructura que sea cristalina puede describirse como un patrón que es formado por la repetición de diversas “unidades estructurales” (figura 2.1-2). En la práctica de manera general se selecciona la estructura más simple como



unidad estructural representativa. Esta selección es conocida como una celda unitaria (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.1-2. Varias unidades estructurales que describen esquemáticamente la estructura cristalina. La unidad estructural más simple es la celda unitaria.

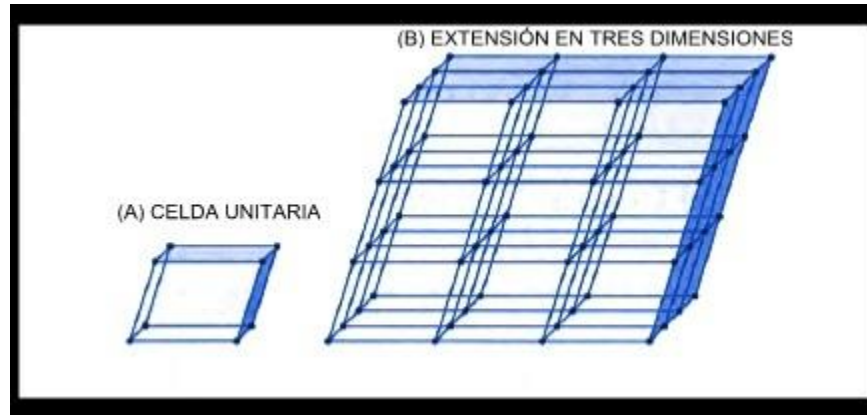
Los fundamentos de la geometría del cristal son comunes en todos los materiales cristalinos. Se deben identificar los siete sistemas cristalinos y así mismo los catorce retículos de cristal. Cada una de las miles de estructuras de cristales que se encuentran en materiales naturales y artificiales se pueden clasificar dentro de estos pocos sistemas y retículos. Dentro de una determinada estructura, debemos conocer como describir las posiciones de los átomos, así como las direcciones y los planos del cristal. Se sabe que la mayoría de las estructuras de los metales corresponden a uno de los tres tipos simples. Mientras tanto que los compuestos de cerámica, que cuentan con una amplia variedad de composiciones químicas, tienen de igual manera una muy amplia variedad de las estructuras cristalinas, de las cuales algunas son bastante sencillas pero en su mayoría son bastantes

complejas como es el caso de los silicatos. Compartiendo características con las cerámicas y los vidrios se encuentran los polímeros. En estos sus estructuras cristalinas son muy complejas y por otro lado debido a su complejidad, el material no se cristaliza fácilmente y los polímeros comunes pueden tener del 50% al 100% de su volumen no cristalino. Los semiconductores elementales como el silicio tienen una estructura característica la cual se conoce como “cubica de diamante”, por otro lado los semiconductores compuestos presentan estructuras que son similares a las de algunos compuestos cerámicos simples (Shackelford, 1995).

## **2.2 CELDA UNITARIA Y PARÁMETRO DE RED**

### **2.2.1 Celda unitaria**

La celda unitaria es la unidad estructural repetida de un sólido cristalino. En la figura 2.2-1 se observa una celda unitaria y su extensión en tres dimensiones. En esta imagen se describe que cada esfera representa un átomo, ion o molécula y a partir de ahí se le denomina como punto reticular. Sin embargo en muchos cristales este punto en realidad no contiene dicha partícula; pero en su lugar, puede haber varios átomos, iones o moléculas distribuidos de forma idéntica alrededor de cada punto reticular. Ahora, para simplificar se supone que cada punto reticular se encuentra ocupado por un solo átomo. Este caso se presenta en la mayoría de los metales.



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 2.2-1. Una celda unitaria y su extensión en tres dimensiones. Las esferas negras representan átomos o moléculas.

De esta manera cada sólido cristalino se representa con uno de los siete tipos de celdas unitarias que se observan en la figura 2.2-2.

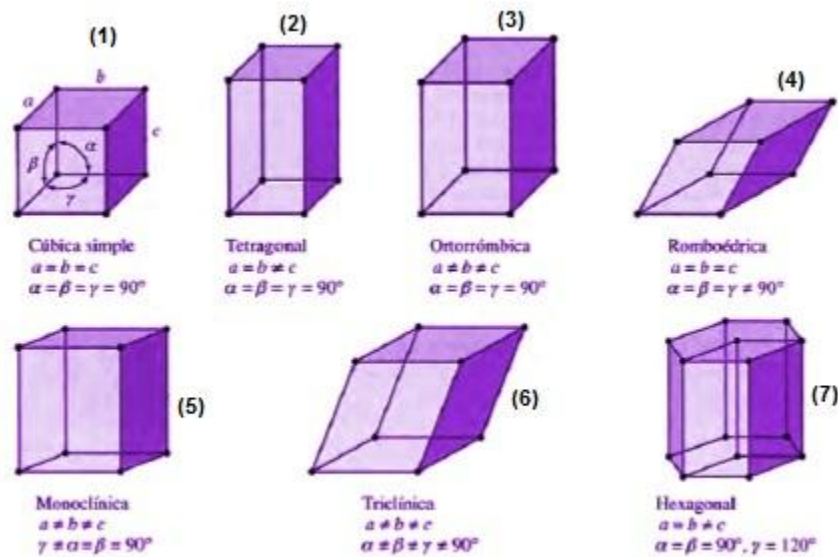
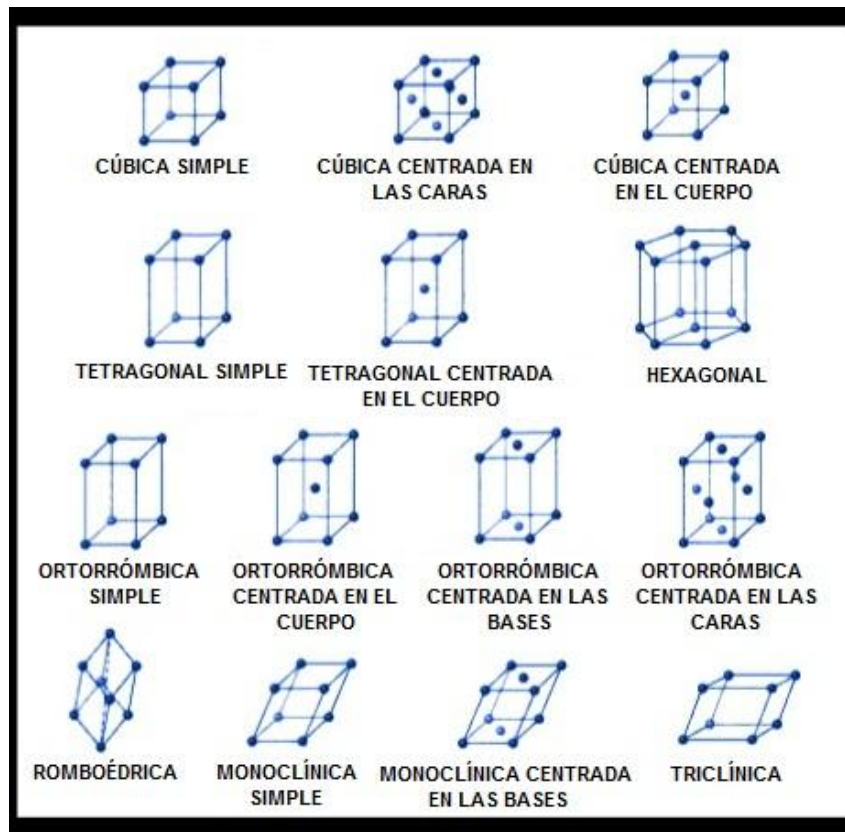


Figura 2.2-2. Los siete tipos de celdas unitarias. El ángulo  $\alpha$  está definido por las aristas  $b$  y  $c$ , el ángulo  $\beta$  mediante las aristas  $a$  y  $c$ , y el ángulo  $\gamma$  mediante las aristas  $a$  y  $b$ . Fuente: (Chang, 2007).

Dentro de la celda unitaria cubica su geometría es particularmente simple porque todos sus lados así como sus ángulos son iguales. Cualquiera de las celdas unitarias que se repitan en el espacio tridimensional forman una estructura reticular que es característica de un sólido cristalino (Chang, 2007).

La celda unitaria no es más que la subdivisión de una red que sigue conservando las características generales de toda la red. En la figura 2.2-3 se muestran las distintas celdas unitarias (Askeland y Phulé, 2006).

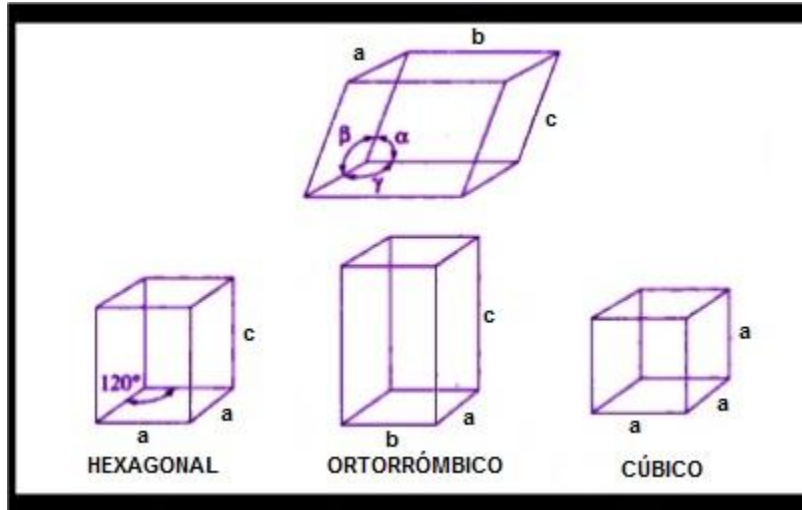


Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Figura 2.2-3. Los catorce tipos de redes de Bravais, agrupados en siete sistemas cristalinos.

### 2.2.2 Parámetro de red

Los parámetros de red, que son los encargados de describir el tamaño y la forma de las celdas unitarias, incluyen las dimensiones de las aristas de la celda unitaria y los ángulos entre estas como se observa en la figura 2.2-4.



Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Figura 2.2-4. Definición de los parámetros de red y su aplicación en los sistemas cristalinos cúbico, ortorrómbico y hexagonal.

En un sistema cristalino cubico, es necesario contar con la longitud de uno de los lados del cubo para describir en forma completa la celda (se suponen ángulos de 90°, a menos que se diga otra cosa). Esta longitud se denomina como parámetro de red  $a$  o algunas veces se le llama  $a_0$ . La longitud se expresara en nanómetros (nm) o en unidades angstrom (Å), donde:

$$1 \text{ nanometro (nm)} = 10^{-9}m = 10^{-7}cm = 10\text{Å}$$

$$1 \text{ angstrom (Å)} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10}m = 10^{-8}cm$$

Para definir el tamaño y la forma de celdas unitarias complicadas se requieren varios parámetros de red. Para una celda unitaria ortorrómbica es necesario especificar las dimensiones de sus tres lados:  $a_0$ ,  $b_0$  y  $c_0$ . Mientras que las celdas unitarias hexagonales requieren dos dimensiones,  $a_0$  y  $c_0$ , y el ángulo de 120°

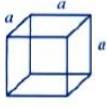
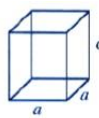
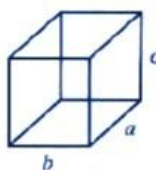

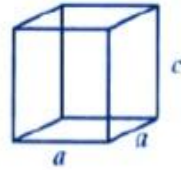
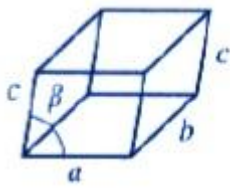
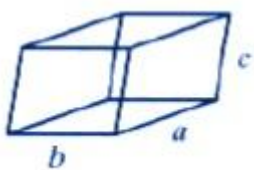
entre los ejes  $a_0$ . Sin embargo la celda más complicada es la triclinica, que se describe con tres longitudes y tres ángulos (Askeland y Phulé, 2006).

## **2.3 SISTEMAS CRISTALINOS Y REDES DE BRAVAIS**

### **2.3.1 Sistemas cristalinos**

La celda unitaria no es más que la subdivisión de una red que sigue conservando las características generales de toda la red. Al aplicar celdas unitarias idénticas se puede construir toda la red. Hay siete arreglos únicos, llamados sistemas cristalinos ver figura 2.2-3 y tabla 2.3-1, que llenan el espacio tridimensional. Son los sistemas cubico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrico o trigonal, hexagonal, monoclinico y triclinico (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

Tabla 2.3-1. Los siete sistemas cristalinos.

Tabla. 2.3-1. Los siete sistemas cristalinos		
Cúbico	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Ortorrómbico	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Romboédrico	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Monocíclico	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclínico	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Fuente: (Shackelford, 1995).

### 2.3.2 Redes de Bravais

Aunque existen siete sistemas cristalinos, hay un total de 14 arreglos distintos de puntos de red. Son arreglos únicos que se llaman redes de Bravais, las cuales reciben este nombre en honor del francés Auguste Bravais (1811-1863), quien fue uno de los primeros cristalógrafos. Se identifican 14 tipos de redes de Bravais los cuales están agrupados en siete sistemas cristalinos (figura 2.2-3 y tabla 2.3-2).

Tabla 2.3-2. Características de los siete sistemas cristalinos

Estructura	Ejes	Ángulos entre ejes	Volumen de la celda unitaria
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos iguales a $90^\circ$	$a^3$
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos iguales a $90^\circ$	$a^2c$
Ortorrómbica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos iguales a $90^\circ$	$abc$
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de $90^\circ$ . Un ángulo de $120^\circ$	$0.886a^2c$
Romboédrica o trigonal	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno es de $90^\circ$	$a^3\sqrt{1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha}$
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de $90^\circ$ . Un ángulo ( $\beta$ ) no es igual a $90^\circ$	$Abc \sin \beta$
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ningún ángulo es igual a $90^\circ$	$abc\sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma}$

Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Aquí los puntos de red se encuentran en las esquinas de las celdas unitarias, aunque en algunos casos, los encontramos en las caras o en el centro de la celda unitaria. Se puede observar que para el sistema cristalino cubico existen redes de Bravais cubica simple (SC, simple cubic) cubica centrada en las caras (FCC, face-



centered cubic) y cubica centrada en el cuerpo (BCC, body-centered cubic). En forma parecida, en el sistema cristalino tetragonal existen las redes tetragonal simple y tetragonal centrada en el cuerpo (Askeland y Phulé, 2006).

*“Se puede expresar cualquier otro arreglo de átomos con las 14 redes de Bravais. Obsérvese que el concepto de red es matemático y que no se hace mención de los átomos, moléculas o iones. Solo cuando se toma una red de Bravais y se comienza a definir la base (es decir, uno o más átomos asociados con cada punto de red), se puede describir una estructura cristalina” (Askeland y Phulé, 2006).*

Como un ejemplo si se considera la red cubica centrada en las caras y se supone que cada punto de red tiene un átomo, se obtiene una estructura cristalina cubica centrada en las caras. Solo hay 14 redes de Bravais, sin embargo se pueden obtener muchas bases más. La estructura cristalina se obtiene sumando red y base, de esta forma se tienen cientos de estructuras cristalinas distintas. Muchos materiales distintos pueden tener la misma estructura cristalina. Un ejemplo de esto sería el cobre y el níquel que tienen la estructura cristalina cubica centrada en las caras (Askeland y Phulé, 2006).

## 2.4 LEY DE BRAGG

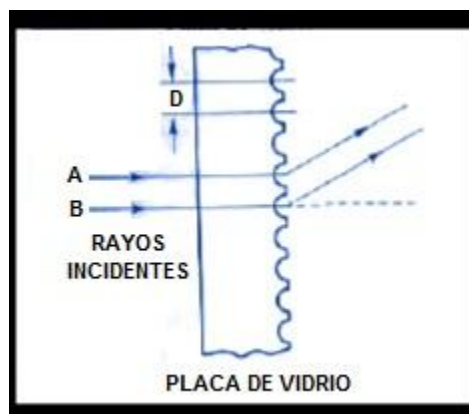
### 2.4.1 Difracción de rayos-x

La difracción de rayos-x consiste en una poderosísima herramienta experimental usada por ingenieros de materiales para identificar estas estructuras.

*“La difracción de rayos-x se refiere a la dispersión de los rayos-x por las unidades de un sólido cristalino. Con los patrones de dispersión (o difracción) es posible deducir el ordenamiento de las partículas en la red solida” (Chang, 2007).*

La difracción es el resultado que se produce de la dispersión de la radiación que a su vez se produce por un arreglo regular de centros dispersores en donde el espaciamiento es aproximadamente igual al de una longitud de onda de radiación. Como un ejemplo tenemos que estrías separadas aproximadamente  $1\ \mu\text{m}$  de separación, provocan la difracción de la luz visible que es la radiación electromagnética y que esta cuenta con una longitud de onda justo por debajo de  $1\ \mu\text{m}$ .

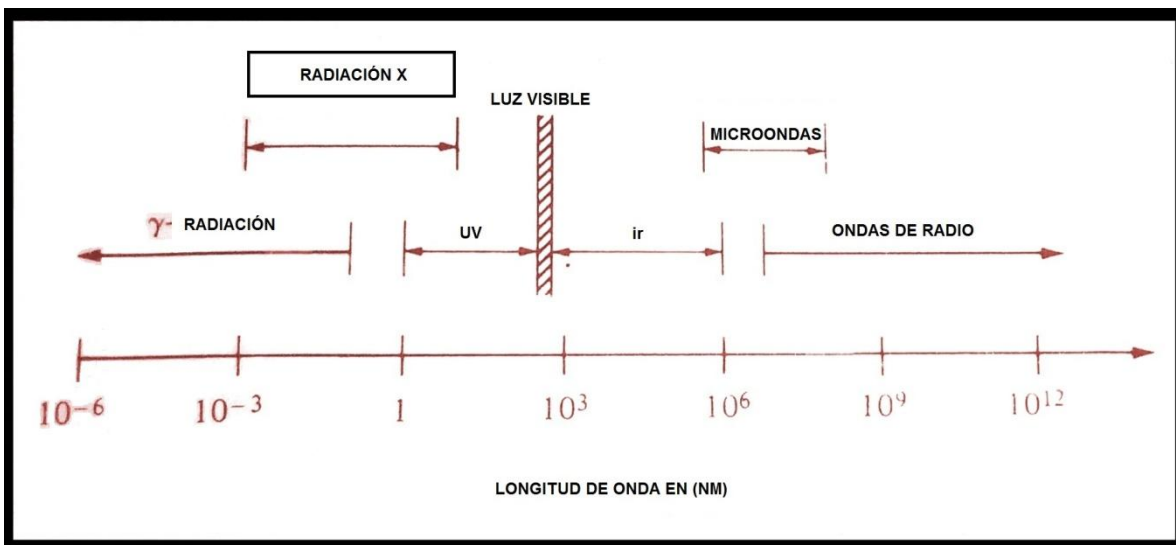
Esta red de difracción provoca que la luz sea dispersada con una fuerte intensidad y en unas pocas direcciones específicas como se ve en la figura 2.4-1.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.4-1. Red de difracción para la luz visible. Las estrías en la placa de vidrio actúan como centros de dispersión de luz.

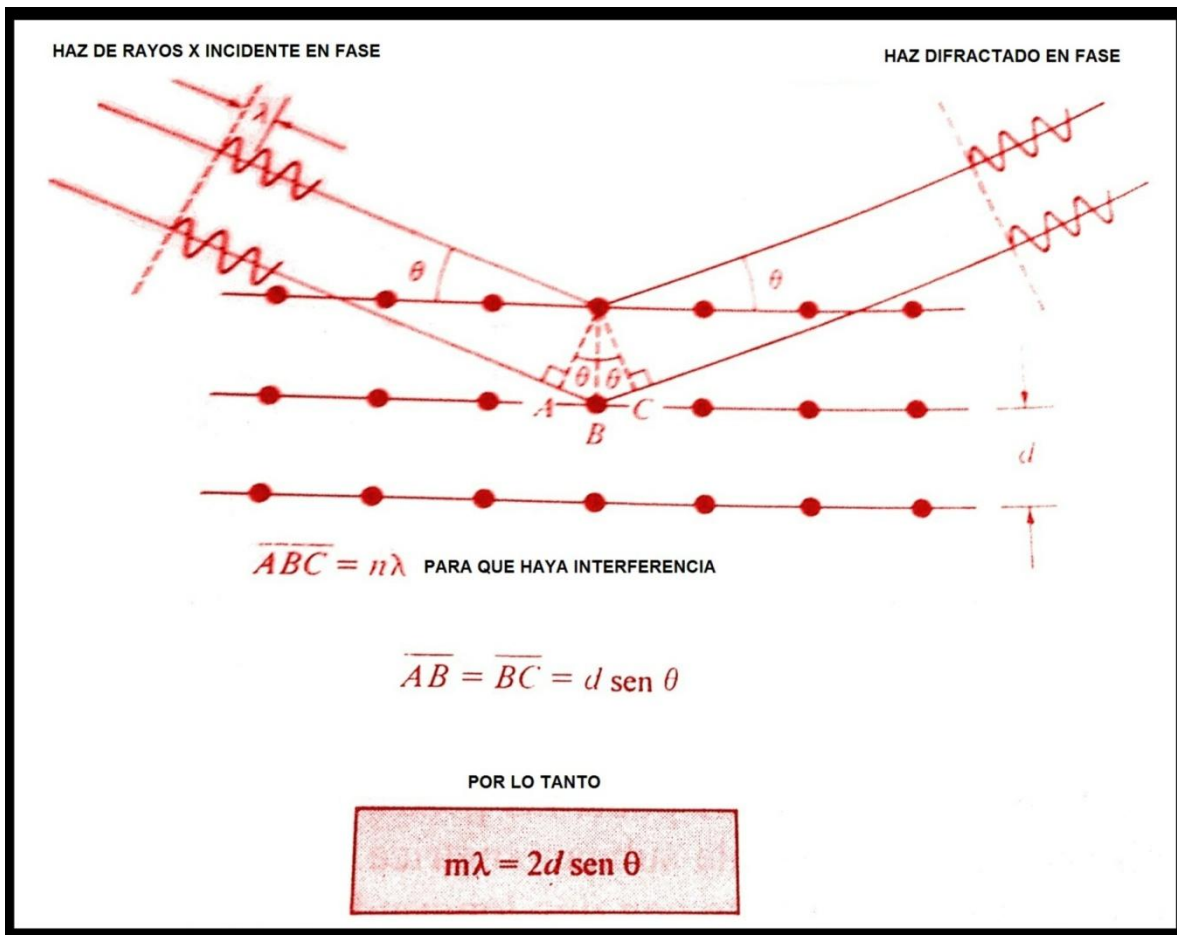
La dirección precisa de la dispersión se da en función del espaciamiento exacto entre las estrías de la red de difracción. Los átomos y los iones tienen un tamaño del orden de 0.1 nm, y con esto se puede pensar que las estructuras de cristales son como redes de difracción pero estas serían a una escala subnanométrica. Como podemos ver en la figura 2.4-2, la radiación-x es la parte del espectro electromagnético con una longitud de onda en este rango (comparándola con el rango de 1000 nm para la longitud de onda de la luz visible). Con esto podemos decir que, la difracción de rayos-x no es más que un monitor directo de la estructura cristalina (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.4-2. Espectro de la radiación electromagnética. La radiación X representa la zona con longitud de onda en torno a 0.1 nm.

Para los rayos-x, los átomos serán los centros de dispersión. La estructura de los cristales es una red de difracción tridimensional. El apilamiento repetido de planos de cristal actúa de la misma forma que las estrías paralelas en la figura 2.4-1. Para un retículo simple de cristal, la condición para difracción la encontraremos en la figura 2.4-3. Ahora bien para que la difracción ocurra, los haces de rayos-x dispersados por planos adyacentes del cristal deben estar en fase. De otra manera, se presentaría una interferencia destructiva de las ondas y no observaremos prácticamente nada de la intensidad dispersada (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.4-3. Geometría del proceso de difracción de la radiación X. La estructura cristalina es una red de difracción tridimensional. La ley de Bragg ( $n\lambda = 2d \text{ sen } \theta$ ) describe la condición de difracción.

*“Dentro de la geometría precisa para la interferencia constructiva (ondas dispersadas en fase), la diferencia en la longitud de la trayectoria entre los haces de rayos-x adyacentes es algún número entero ( $n$ ) de longitudes de onda ( $\lambda$ ) de radiación. La relación que demuestra esta condición es la ecuación de Bragg” (Shackelford, 1995).*

$$N\lambda = 2d \sin \theta \text{ (Ecuación 2.4-1)}$$

Donde

\*d es el espaciamiento entre los planos adyacentes del cristal

\* $\theta$  es el ángulo de dispersión, como se describe en la figura 2.4-3. Este ángulo  $\theta$  se le conoce como el ángulo de Bragg y al ángulo  $2\theta$  se le conoce como el ángulo de difracción porque este ángulo es medido experimentalmente.

La magnitud del espaciamiento interplanar d y que se observa en la ecuación 2.4-1, es una función directa de los índices de Miller para el plano. Para un sistema cúbico, la relación será más o menos simple (Shackelford, 1995).

### **2.4.2 Ley de Bragg**

La ley de Bragg que corresponde a la (Ecuación 2.4-1) es una condición suficiente pero a su vez no necesaria para la difracción. En esta ecuación se define la condición de difracción para las celdas unitarias primitivas, ahora ¿Cuáles son esas celdas unitarias primitivas?, pues son aquellas redes de Bravais que tienen sus puntos reticulares situados únicamente en las esquinas de la celda unitaria, como lo tiene una cúbica simple y una tetragonal simple. Las estructuras de cristal no primitivas que son aquellas donde sus átomos están en sitios reticulares adicionales localizados a lo largo de una arista, dentro de una cara o en el interior de la celda unitaria. Los centros de dispersión adicionales pueden provocar que ocurra dispersión fuera de fase en determinados ángulos de Bragg. El resultado es que no ocurre parte de la difracción que se predice la ecuación de Bragg ecuación 2.4-1. Un ejemplo de este efecto se muestra en la tabla 2.4-1, en la cual encontramos las reglas de reflexión para las estructuras de metal comunes. Esta tabla nos muestra cuales conjuntos de índices de Miller no producen difracción como la que predice la ley de Bragg:

*“Reflexión es un término casual ya que lo que aquí se describe es la difracción y no una verdadera reflexión” (Shackelford, 1995).*

Tabla 2.4-1. Reglas de reflexión de la difracción de rayos-X para las estructuras comunes de metales.

Reglas de reflexión de la difracción de rayos-X para las estructuras comunes de metales		
Estructura del cristal	La difracción no ocurre cuando:	La difracción ocurre cuando:
Cúbica centrada en el cuerpo (BCC)	$h+k+l =$ número impar	$h+k+l =$ número par
Cúbica centrada en la cara (FCC)	$h, k, l$ mezclado (números par e impar)	$h, k, l$ no mezclados (todos son números par o todos son números impar)
Hexagonal de empaquetado compacto (HCP)	$(h+2k)=3n, l$ impar ( $n$ es un entero)	Todos los otros casos

Fuente: (Shackelford, 1995).

Hay muchas formas para usar la difracción de rayos x, como ejemplos:

\*Se utiliza para medir la estructura de los cristales de los materiales de ingeniería.

\*se utiliza para determinar la estructura de un nuevo material.

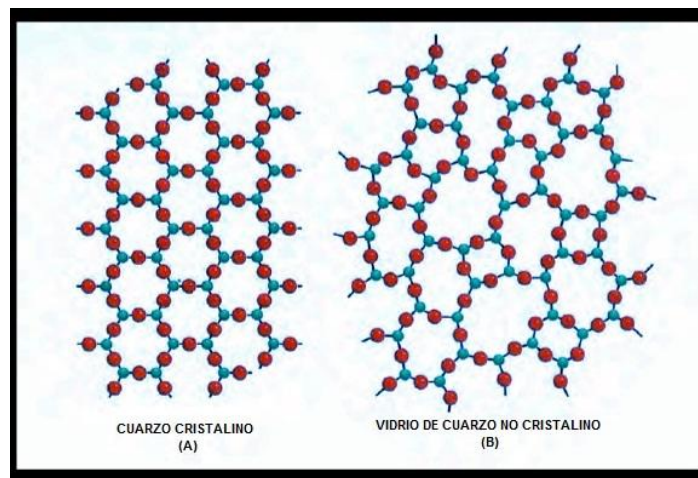
\*O bien puede usarse la estructura conocida de un material común como una fuente de identificación química.

La difracción de rayos-x es la herramienta estándar experimental para analizar las estructuras de cristales. La disposición atómica regular sirve como una red de difracción subnanométrica para la radiación-x (con una longitud de onda subnanométrica). El uso de la ley de Bragg junto con las reglas de reflexión permiten una medición precisa del espaciamiento interplanar de la estructura de los cristales. Tanto los materiales de un solo cristal como los policristalinos (o pulverizados) pueden analizarse de esta manera (Shackelford, 1995).

## 2.5 ESTRUCTURA NO CRISTALINA-IMPERFECCIONES

Cuando los sólidos se encuentran en forma cristalina son más estables. Pero cuando, un sólido se forma con rapidez, así como cuando un líquido se enfría muy

rápido, sus átomos o moléculas no tienen tiempo de alinearse por sí mismos y quedarán fijos en posiciones distintas a las de un cristal ordenado; los sólidos formados de esta manera se llaman sólidos amorfos. El vidrio que es un sólido amorfo, carece de una distribución tridimensional regular de átomos. El vidrio es un material muy valioso y versátil de la civilización y también uno de los más antiguos ya que hay artículos de vidrio que datan del año 1000 a.c. El vidrio es un producto del resultado de fusión de materiales inorgánicos ópticamente transparente el cual se ha enfriado a un estado rígido sin cristalizar. En pocas palabras, significa que el vidrio es una mezcla fundida de dióxido de silicio ( $SiO_2$ ), como su principal componente, además de compuestos como óxido de sodio ( $Na_2O$ ), óxido de boro ( $B_2O_3$ ) así como óxidos de metales de transición que son los que le confieren color y otras propiedades. En ciertos aspectos, el vidrio se comportará más como un líquido que como un sólido. El vidrio carece de un ordenamiento periódico regular según lo demuestran los estudios de difracción de rayos x. En la actualidad existen alrededor de 800 tipos de vidrio de uso común. En la figura 2.5-1 se muestra una representación bidimensional del cuarzo cristalino y del vidrio de cuarzo amorfo.



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 2.5-1. Representación bidimensional del cuarzo cristalino y del vidrio de cuarzo no cristalino. Las pequeñas esferas representan al silicio. En realidad, la estructura del cuarzo es tridimensional. Cada átomo de Si está enlazado de manera tetraédrica a cuatro átomos de O.

Por otra parte la tabla 2.5-1 indica la composición y propiedades de los vidrios de cuarzo, Pyrex y cal sodada.

Tabla 2.5-1. Composición y propiedades de los tres tipos de vidrio.

Composición y propiedades de tres tipos de vidrio		
Nombre	composición	Propiedades y usos
Vidrio de cuarzo puro	100% $SiO_2$	Expansión térmica baja, transparente a un amplio margen de longitudes de onda. Utilizado en la investigación óptica
Vidrio Pyrex	$SiO_2$ , 60 – 80% $B_2O_3$ , 10 – 25% $Al_2O_3$ , <i>pequeña cantidad</i>	Expansión térmica baja; transparente a la radiación visible e infrarroja pero no a la radiación ultravioleta. Se usa principalmente en laboratorios y en la fabricación de utensilios para cocinas domésticas.
Vidrio cal sodada	$SiO_2$ , 75% $Na_2O$ , 15% $CaO$ , 10%	Atacado fácilmente por sustancias químicas y sensible a los impactos térmicos. Transmite la luz visible, pero absorbe radiación ultravioleta. Se utiliza principalmente para ventanas y botellas.

Fuente: (Chang, 2007).

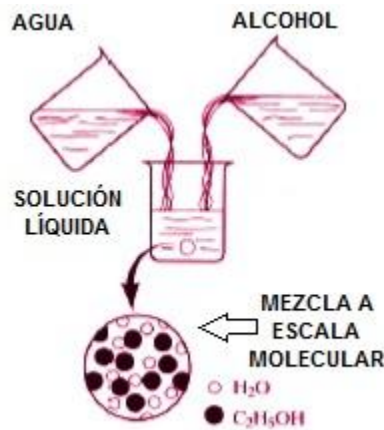
*“En gran medida el color del vidrio se debe a la presencia de iones metálicos (como óxidos). Por ejemplo, el vidrio verde contiene óxido de hierro (III),  $Fe_2O_3$ , u óxido de cobre (II),  $CuO$ ; el vidrio amarillo contiene óxido de uranio (IV),  $UO_2$ ; el vidrio azul contiene óxidos de cobalto (II) y de cobre (II),  $CoO$  y  $CuO$ , y el vidrio rojo contiene pequeñas partículas de oro y cobre. La mayoría de los iones mencionados se derivan de los metales de transición” (Chang, 2007).*

### 2.5.1 La solución sólida-imperfección química

Es muy difícil evitar que haya al menos alguna contaminación de los materiales prácticos. Inclusive los productos semiconductores que son de alta pureza cuentan con un nivel mensurable de átomos de impurezas. Muchos de estos materiales de ingeniería contienen cantidades significativas de diferentes componentes. Como

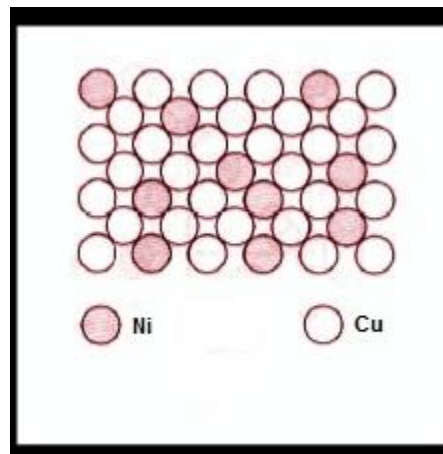


ejemplo de esto lo constituyen las aleaciones comerciales de metales. Como resultado de ello todos los materiales que el ingeniero ocupa de manera diaria son de hecho soluciones sólidas. Una solución sólida es equivalente a una solución líquida como el sistema alcohol-agua que se muestra en la figura 2.5-2.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-2. Formación de una solución líquida de agua y alcohol. La mezcla tiene lugar a escala molecular.



Fuente: (Shackelford, 1995).

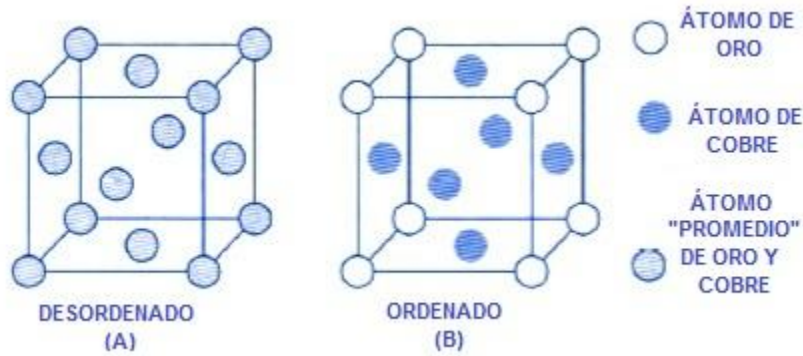
Figura 2.5-3. Solución sólida de níquel en cobre, vista a lo largo de un plano (100). Se trata de una solución sólida sustitucional en la que átomos de cobre han sido sustituidos por átomos de níquel en sus posiciones de la red fcc.

En este caso la solubilidad completa del alcohol es el resultado del mezclado molecular completo. Un resultado similar se observa en la figura 2.5-3, donde una solución líquida de cobre y níquel compartiendo una estructura cristalina fcc. En este caso el níquel es la sustancia que se encuentra disuelta en el cobre, ya que este actúa como un solvente. Esta configuración en particular, comúnmente es conocida como solución sólida por sustitución ya que los átomos de níquel se encuentran sustituyendo a los átomos de cobre en los lugares correspondientes de la estructura fcc. Esta configuración se presentara cuando el tamaño de los átomos no difiera mucho. El sistema alcohol-agua que se observa en la figura 2.5-2 se compone por dos líquidos que son por completo solubles entre sí en todas las proporciones. Para que esta mezcla completa ocurra en soluciones sólidas metálicas, los dos metales a utilizar deberán ser muy similares, tomando en cuenta lo que se establece en las reglas de Hume-Rothery:

- 1.- Menos de, aproximadamente, 15% de diferencia en el radio atómico.
- 2.- La misma estructura del cristal
- 3.- El átomo debe contar con la habilidad para atraer un electrón (Electronegatividad similares)
- 4.- Valencias iguales

Si una o más de las mencionadas reglas de Hume-Rothery no se cumplen, solo es posible una solubilidad parcial. Como un ejemplo, menos del 2% atómico de silicio es soluble en aluminio (Shackelford, 1995).

En la figura 2.5-3 se muestra una solución sólida aleatoria. Ahora bien, algunos de los sistemas forman soluciones sólidas ordenadas, y como un ejemplo la aleación de  $AuCu_3$ , (figura 2.5-4). A temperaturas superiores a los 390°C, la agitación térmica mantiene una distribución aleatoria de los átomos de Au y Cu entre los sitios fcc, mientras que a temperaturas inferiores a los 390°C, los átomos de Cu ocupan de preferencia las posiciones del centro de las caras, y los átomos de Au



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-4. Ordenamiento de la solución sólida en el sistema de aleación  $AuCu_3$ .

(A) Por encima de  $\sim 390^\circ C$ , hay una distribución aleatoria de los átomos de  $Au$  y  $Cu$  en las posiciones de la red fcc. (B) Por debajo de  $\sim 390^\circ C$  los átomos de  $Au$  ocupan preferentemente las posiciones de las esquinas en la celda unidad, según una red de Bravais cúbica simple.

ocuparan las esquinas de la celda unitaria. El ordenamiento puede producir una nueva estructura del cristal similar a la de algunas de las estructuras de los compuestos cerámicos. Para la aleación de  $AuCu_3$  a bajas temperaturas, la estructura está basada en una red de Bravais cubica simple (Shackelford, 1995). Cuando el tamaño de los átomos difiere en gran medida, la substitución del átomo más pequeño en un sitio de la estructura del cristal podría ser inestable desde el punto de vista energético. Para estos casos es más estable para el átomo pequeño acomodarse en alguno de los espacios (intersticios) que existen entre los átomos adyacentes de la estructura del cristal. Como un ejemplo de una solución sólida intersticial lo encontramos en la figura 2.5-5, en donde observamos el carbono disuelto intersticialmente en  $\alpha$ -Fe (Shackelford, 1995).



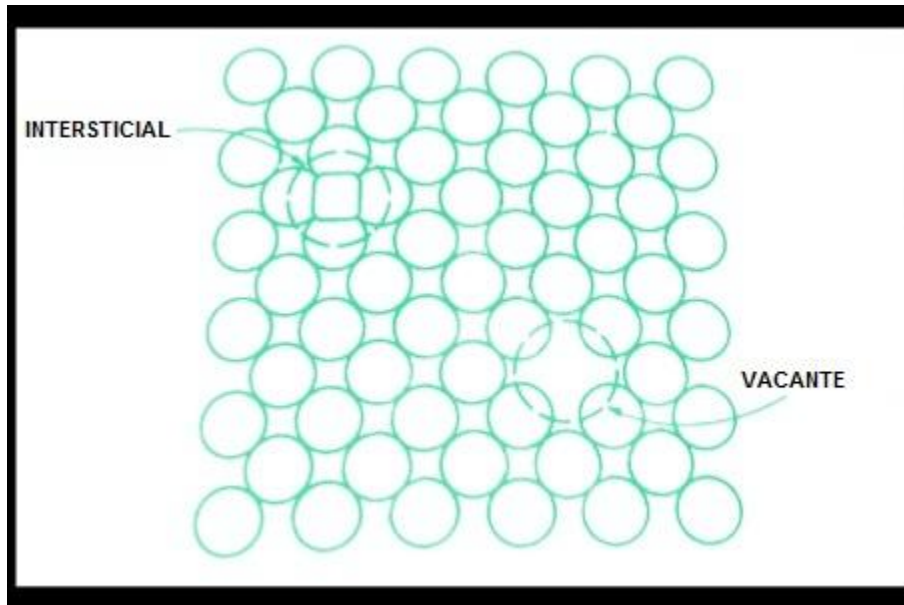
Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-5. Solución sólida intersticial de carbono en hierro  $\alpha$ . El átomo de carbono es bastante pequeño para introducirse, con alguna deformación, en el intersticio (o hueco) entre átomos de hierro adyacentes, en esta estructura tan importante en la industria del acero.

*“Esta solución intersticial constituye una fase dominante en los aceros. Aunque es más estable que una configuración por sustitución de los átomos de C en los sitios de la red del Fe, la estructura intersticial de la figura 2.5-5 produce un esfuerzo local considerable en la estructura del cristal del  $\alpha$ -Fe, y menos del 0.1 al % de C es soluble en el  $\alpha$ -Fe” (Shackelford, 1995).*

### 2.5.2 Defectos puntuales-imperfección “cerodimensional”

Los defectos estructurales se encuentran en los materiales reales independientemente de sus impurezas químicas. En la figura 2.5-6 se pueden ver los dos tipos comunes de defectos puntuales que están asociados con los sólidos elementales. La vacante simplemente es un sitio libre que fue dejado por un átomo dentro de la estructura del cristal (Shackelford, 1995).

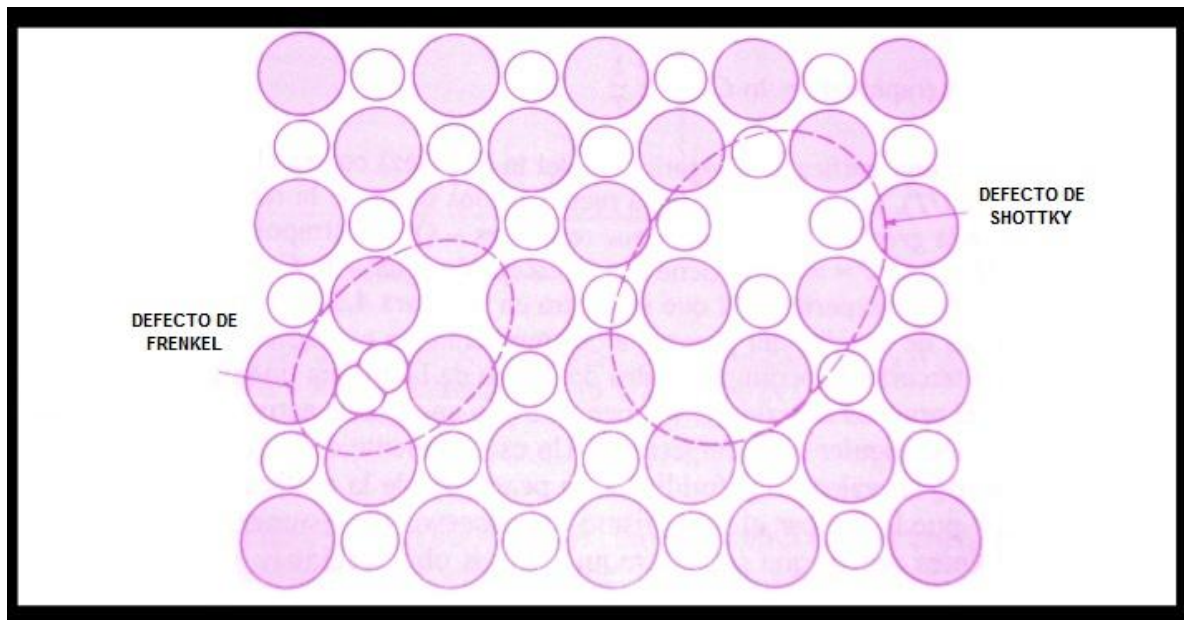


Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-6. Dos defectos puntuales comunes en estructuras de metales o de semiconductores elementales son la vacante y el intersticial.

*El intersticial (o intersticialidad) es un átomo que ocupa un lugar intersticial que no es normalmente ocupado por un átomo en la estructura perfecta del cristal o un átomo extra insertado en la estructura perfecta del cristal de tal manera que dos átomos ocupan posiciones cercanas a un solo sitio atómico de la estructura perfecta del cristal (Shackelford, 1995).*

Las vacantes pueden producirse en los compuestos esto como una respuesta a las impurezas químicas y las composiciones no estequiométricas. Aunque si bien es cierto que estas vacantes pueden ocurrir independientemente de esos factores químicos. En la figura 2.5-7 se encuentran los análogos de la vacante y del intersticial para los compuestos (Shackelford, 1995).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-7. Dos estructuras comunes de defectos puntuales en estructuras de compuestos son el defecto de shottky y el defecto de frenkel. Note la similitud con las estructuras de la figura 2.5-6.

*“El defecto de Schottky consiste de una vacante que deja un par de iones con cargas opuestas. Este apareamiento es necesario para mantener localmente la neutralidad de carga dentro de la estructura del cristal del compuesto. El defecto de Frenkel es una combinación vacante-intersticio” (Shackelford, 1995).*

### 2.5.2.1 Producción térmica de los defectos puntuales

Dentro de la ciencia y la ingeniería hay un gran número de procesos que comparten una característica común; la rapidez del proceso aumenta exponencialmente en función de la temperatura. La rapidez de las deformaciones por cedencia en materiales estructurales así como la capacidad de difusión de los elementos en las aleaciones de metales y la conductividad eléctrica de los semiconductores son algunos ejemplos.

Para describir estos procesos, se harán por medio de la siguiente ecuación

$$rapidez = Ce^{-Q/RT} \text{ (Ecuación 2.5-1)}$$

Donde

C: Constante pre-exponencial que es independiente de la temperatura

Q: energía de activación

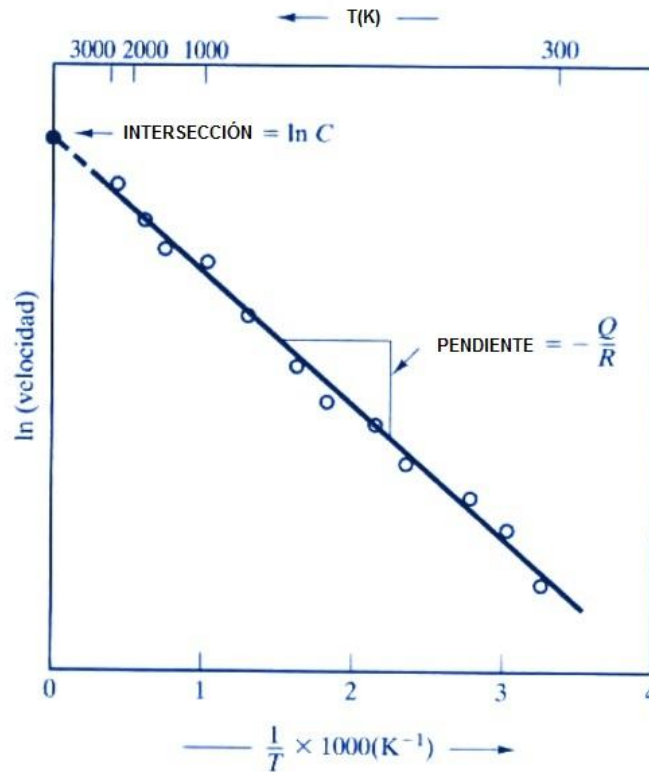
R: constante universal de los gases

T: temperatura absoluta

Esta ecuación es conocida generalmente como ecuación de Arrhenius. Al momento en el que nosotros despejamos el logaritmo de ambos lados de la Ecuación 2.5-1 obtendremos una nueva ecuación:

$$\ln(rapidez) = \ln C - \frac{Q}{R} \frac{1}{T} \text{ (Ecuación 2.5-2)}$$

En una gráfica semi-logarítmica del  $\ln(rapidez)$  contra  $(1/T)$  que es el recíproco de la temperatura absoluta, obtendremos una línea recta para los datos de la rapidez. La pendiente que resulta de la gráfica de Arrhenius es  $-Q/R$ . Si se extrapola la gráfica hasta  $T = \infty$  obtendremos una intercepción igual a  $\ln C$ . El resultado experimental se muestra en la figura 2.5-8. Conocer las magnitudes de rapidez del proceso a dos temperaturas cualquiera permite determinar la rapidez a una tercera temperatura estando dentro del rango de la gráfica lineal. De igual forma si se conoce la rapidez del proceso a cualquier temperatura y también la energía de activación (Q), se puede determinar la rapidez a cualquier otra temperatura. Para tener una apreciación del porque los datos de la rapidez muestran el comportamiento característico que se observa en la figura 2.5-8, se tendrá que explorar el concepto de activación de energía Q. En la ecuación 2.5-1



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-8. Grafica típica de Arrhenius de datos comparados con la ecuación 2.5-2. La pendiente es igual a  $-Q/R$  y la intercepción (a  $1/T = 0$ ) es  $\ln C$ .

la energía de activación ( $Q$ ) tiene unidades de energía por mol. Con esto es posible escribir de nueva cuenta la Ecuación 2.5-1 dividiendo  $Q$  y  $R$  por el número de Avogadro ( $N_{av}$ ), y entonces se obtiene la siguiente ecuación:

$$rapidez = Ce^{-q/kT} \text{ (Ecuación 2.5-3)}$$

Donde

( $q=Q/N_{av}$ ) que es la energía de activación por unidad de escala atómica (átomo, electrón, iones, etc.)

( $k=R/N_{av}$ ) que es la constante de Boltzmann ( $13.8 \times 10^{-24} J/K$ ). Ahora bien la Ecuación 2.5-3 conlleva a una comparación con el extremo de alta energía de la distribución de Maxwell-Boltzmann que nos habla de las energías moleculares en gases.

$$P \propto e^{-\Delta E/kT}$$

Donde:



P será la probabilidad de encontrar alguna molécula en un nivel de energía superior a  $\Delta E$  a la energía en promedio característica de una temperatura T en particular. Aquí es donde se encuentra la naturaleza de la energía de activación, que es la barrera de energía que se debe superar mediante la activación térmica (Shackelford, 1995).

Por último, los efectos puntuales se presentan como un resultado directo de la vibración térmica de la estructura del cristal. Cuando aumenta la temperatura, la intensidad de la vibración térmica aumenta, cuando se presenta este incremento aumenta la probabilidad de una desorganización estructural (defectos puntuales). A una cierta temperatura, en un material su energía térmica se mantendrá fija, pero esto es solo un valor promedio ya que la energía térmica de los átomos individuales tendrá una variación dentro de un amplio intervalo así como lo indica la distribución de maxwell-Boltzmann. A cierta temperatura una fracción de los átomos del sólido cuentan con suficiente energía térmica para producir defectos puntuales. Ahora bien dentro de la distribución de Maxwell-Boltzmann una consecuencia importante es que dicha fracción aumenta exponencialmente con la temperatura absoluta. Como resultado de esto se tiene que, la concentración de defectos puntuales incrementara exponencialmente con la temperatura; como se ve en la ecuación 2.5-4.

$$\frac{n_{defectos}}{n_{sitios}} = C e^{-\frac{E_{defecto}}{kT}} \text{ Ecuación 2.5-4}$$

Donde:

$n_{defectos}/n_{sitios}$  .- Es la razón entre los defectos puntuales y los sitios del retículo del cristal ideal

$C$  .- Constante preexponencial

$E_{defecto}$  .- Energía necesaria para crear un solo defecto puntual dentro de la estructura del cristal

$k$  .- Constante de Boltzmann

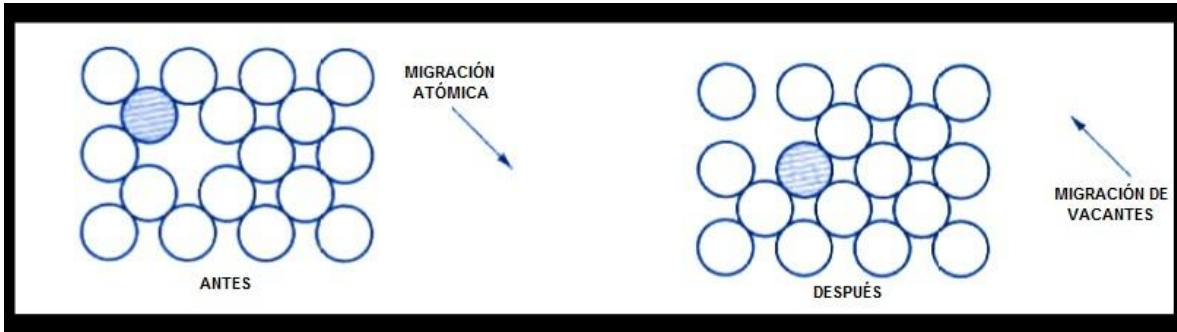
$T$  .- Temperatura absoluta

La sensibilidad a la temperatura de la producción de defectos puntuales dependerá del tipo de defecto que se esté considerando; esto quiere decir que; la

energía  $E_{defecto}$  necesaria para producir una vacante en una estructura de cristal dada es diferente a la energía  $E_{defecto}$  que se necesita para producir una intersticialidad (Shackelford, 1995).

### **2.5.2.2 Defectos puntuales y difusión de estado sólido**

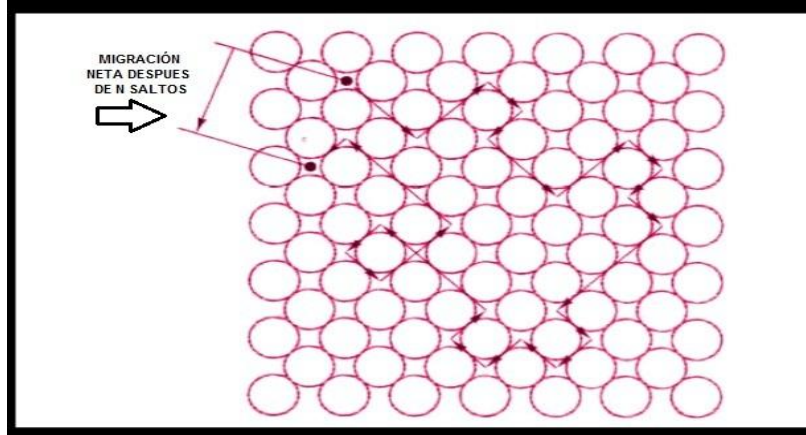
Cuando se deja caer una gota de tinta dentro de un vaso con agua se observa una demostración simple de la difusión, esto quiere decir, materiales mezclándose a escala molecular, pero en si la difusión no está limitada a materiales diferentes. En temperatura ambiente, las moléculas de  $H_2O$  en el agua pura están en un continuo movimiento desplazándose a través del líquido siendo esto un ejemplo de autodifusión. Este movimiento de escala atómica es rápido y fácil de visualizar en los líquidos. Sin embargo es más difícil visualizarlo en los sólidos rígidos. Pero a pesar de esto sí ocurre la difusión en el estado sólido. Existe una diferencia básica entre la difusión del estado líquido y la difusión de estado sólido, dicha diferencia viene siendo la lentitud de la difusión en los sólidos. De acuerdo a las estructuras de los cristales, es muy difícil la difusión de átomos o iones a través de dichas estructuras generalmente “cerradas”. De hecho, la energía necesaria para “comprimir” la mayor parte de los átomos o iones a través de las estructuras de cristal perfectas es tan alta como para hacer que la difusión sea casi imposible. Para llevar a cabo la práctica de la difusión de estado sólido, de manera general se requiere de la existencia de defectos puntuales. Ahora bien en la figura 2.5-9 se observa cómo la migración atómica es posible mediante el mecanismo de migración de vacantes. Es importante saber y tener siempre en cuenta que la dirección general del flujo de material será opuesta a la dirección del flujo de las vacantes.



Fuente: (Shackelford, 1995).

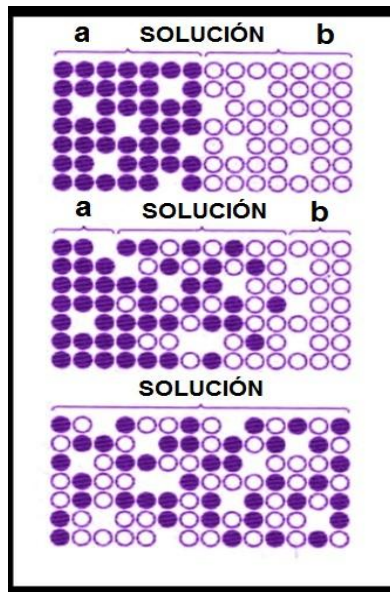
Figura 2.5-9. La migración atómica se produce por un mecanismo de migración de vacantes. Obsérvese que la dirección de flujo global del material (el átomo) es opuesta a la dirección del flujo de vacantes.

En la figura 2.5-10 se observa la difusión mediante el mecanismo de intersticialidad y se observa la naturaleza del movimiento aleatorio de la migración atómica. Esta aleatoriedad no excluye el flujo neto de material cuando se presenta una variación general de la composición química. Este caso, que se presenta con frecuencia, se observa en la figura 2.5-11.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-10. Difusión por un mecanismo intersticial, donde se ve la naturaleza aleatoria del movimiento de migración atómico.

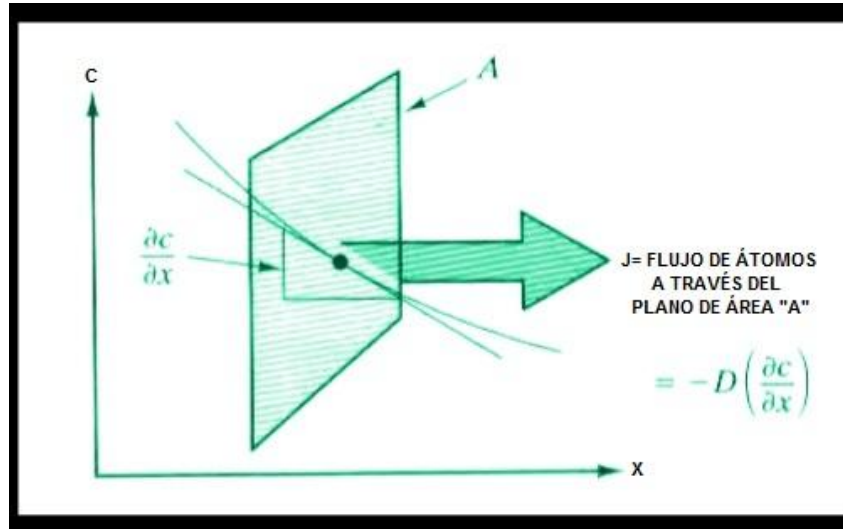


Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-11. Interdifusión de materiales a y b. Aunque cualquier átomo dado de A o de B tiene la misma probabilidad de “moverse” en cualquier dirección aleatoria (véase figura 2.5-10), la variación de la composición química causa un flujo neto de átomos del material a hacia el material b, y viceversa. Aunque cada átomo del sólido A tiene igual probabilidad de moverse aleatoriamente en cualquier dirección, la concentración inicial de A en el lado izquierdo del sistema, causará que ese movimiento aleatorio produzca un flujo neto de átomos de A hacia el interior del sólido B. De igual manera, el sólido B se difunde hacia el interior del sólido A. El tratamiento matemático formal de este flujo por difusión empieza con una expresión conocida como la primera ley de Fick.

$$J_x = -D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) \text{ (Ecuación 2.5-5)}$$

Donde  $J_x$  es el flujo de la especie que se difunde en la dirección x debido a un gradiente de concentración ( $\partial c / \partial x$ ). El coeficiente de proporcionalidad, D, se le conoce como coeficiente de difusión o difusividad.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-12. Geometría de la primera ley de Fick (ecuación 2.5-5).

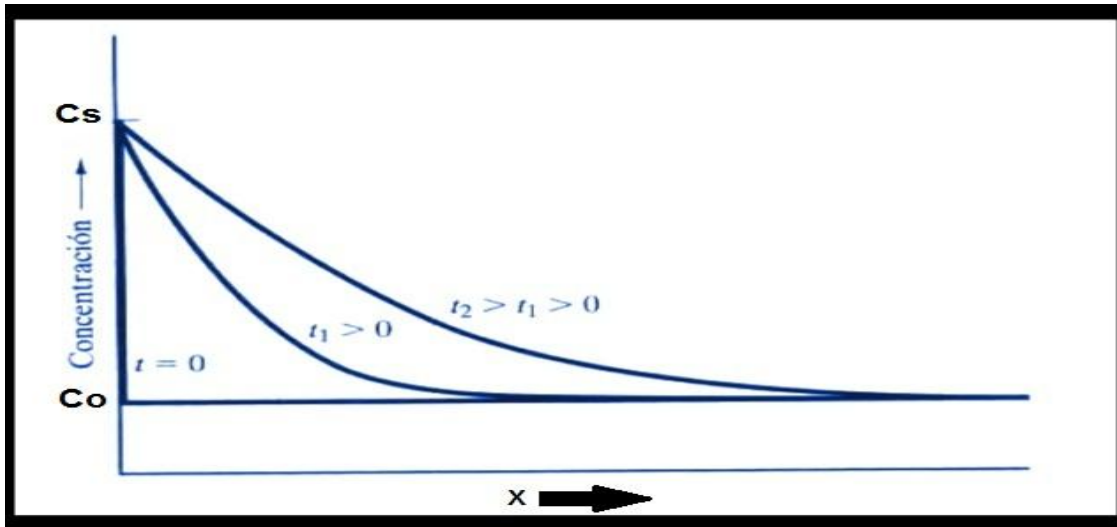
La geometría de la Ecuación 2.5-5 se encuentra en la figura 2.5-12 mientras tanto la figura 2.5-11 nos hace un recordatorio: el gradiente de concentración en un punto específico de la ruta de difusión cambia con el tiempo,  $t$ . Esta condición transitoria se representa por medio de una ecuación diferencial de segundo orden y esta a su vez se conoce como la segunda ley de Fick.

$$\frac{\partial c_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c_x}{\partial x} \right) \text{ (Ecuación 2.5-6)}$$

En muchos de los problemas prácticos, podemos suponer  $D$  es independiente de  $c$ , lo que nos lleva a una versión simplificada de la Ecuación 2.5-6

$$\frac{\partial c_x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_x}{\partial x^2} \text{ (Ecuación 2.5-7)}$$

La figura 2.5-13 muestra una aplicación común de la Ecuación 2.5-7, la difusión de un material hacia el interior de un sólido semi-infinito mientras que la concentración en la superficie de la especie difusora  $C_s$ , permanece constante.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-13. Solución de la segunda ley de Fick (ecuación 2.5-7) para el caso de un sólido semi infinito; concentración superficial constante de la especie difusora  $C_s$ ; concentración volumétrica inicial  $C_0$ , y coeficiente de difusión constante  $D$ .

Para este sistema se tienen dos ejemplos uno de ellos sería la saturación de materiales con gases atmosféricos reactivos y el segundo sería la aplicación de un revenimiento metálico sobre otro metal. La solución de esta ecuación diferencial con las condiciones de fronteras dadas es

$$\frac{c_x - c_0}{c_s - c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (\text{Ecuación 2.5-8})$$

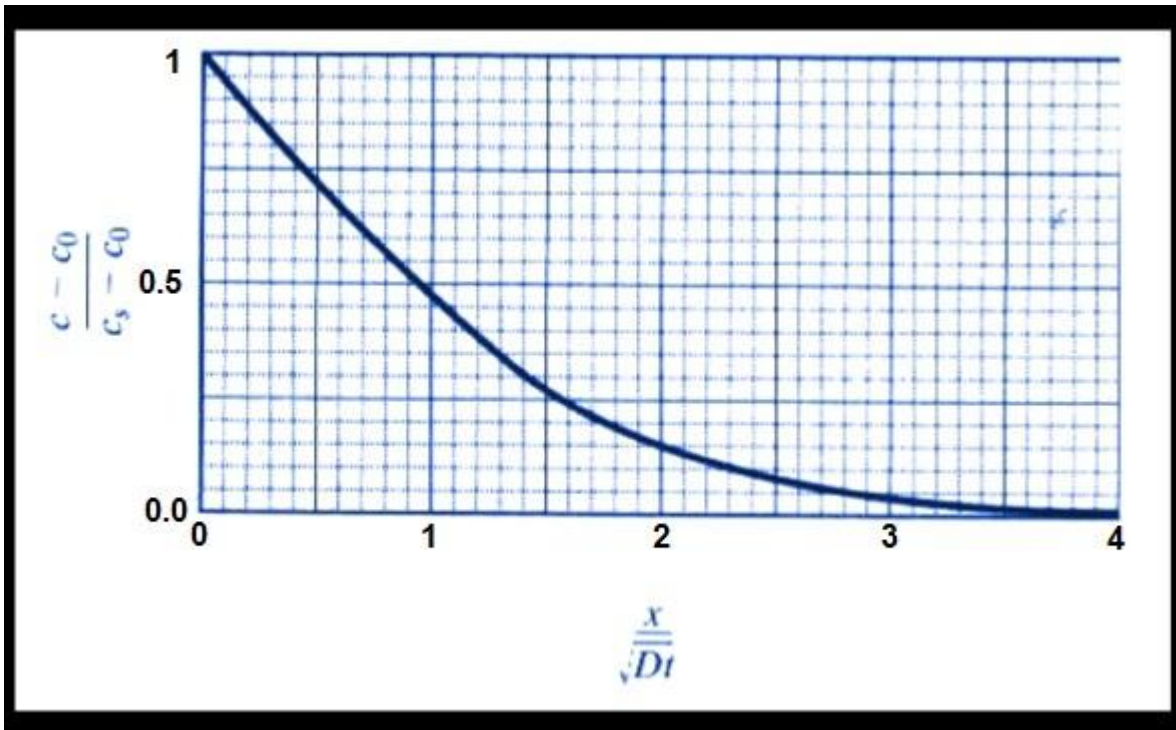
En esta ecuación  $c_0$  es la concentración volumétrica inicial de la especie difusora y por otro lado, erf se refiere a la función de error gaussiana, cuyos valores se encuentran en tablas matemáticas, como ejemplo en la tabla 2.5-2 tenemos algunos valores representativos.

Tabla 2.5-2. La función de error.

Tabla 2.5-2. La función error			
z	erf(z)	z	erf(z)
0.00	0.0000	0.70	0.6788
0.01	0.0113	0.75	0.7112
0.02	0.0226	0.80	0.7421
0.03	0.0338	0.85	0.7707
0.04	0.0451	0.90	0.7969
0.05	0.0564	0.95	0.8209
0.10	0.1125	1.00	0.8427
0.15	0.1680	1.10	0.8802
0.20	0.2227	1.20	0.9103
0.25	0.2763	1.30	0.9340
0.30	0.3286	1.40	0.9523
0.35	0.3794	1.50	0.9661
0.40	0.4284	1.60	0.9763
0.45	0.4755	1.70	0.9838
0.50	0.5205	1.80	0.9891
0.55	0.5633	1.90	0.9928
0.60	0.6039	2.00	0.9953
0.65	0.6420		

Fuente: (Shackelford, 1995).

Una consecuencia importante de este análisis es el resultado que está representado por medio de la Ecuación 2.5-8, permite que todos los perfiles de difusión de la figura 2.5-13 puedan dibujarse en una sola grafica maestra, (figura 2.5-14). Esta grafica permite tener una determinación rápida del tiempo que será necesario para que ocurra una saturación relativa del sólido en función de  $x$ ,  $D$  y  $t$ .

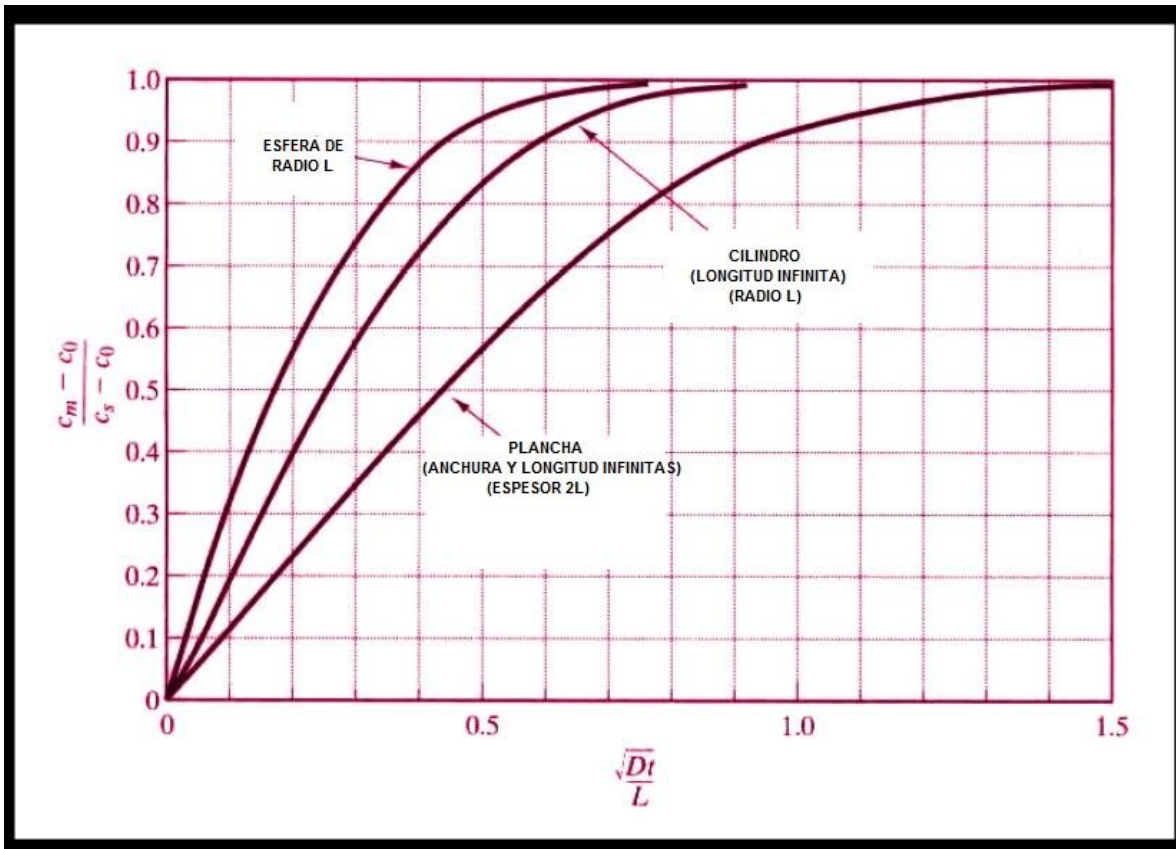


Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-14. Grafica maestra que resume todos los resultados de difusión de la figura 2.5-13 en una sola curva.

En la figura 2.5-15 muestra que hay varias curvas de saturación similares para varias geometrías. Es importante tomar en cuenta que estos resultados no son más que unos pocos del gran número de soluciones que se han ido obteniendo por medio de los científicos de materiales para muchas geometrías de difusión en varios procesos prácticos.





Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-15. “Curvas de saturación” similares a la de la figura 2.5-14 para diversas geometrías. El parámetro  $C_m$  es la concentración promedio de la especie difusora dentro de la muestra. De nuevo, la concentración  $C_s$  y el coeficiente de difusión  $D$  se suponen constantes.

Durante el análisis matemático de la difusión que se bosquejo antes se supone implícitamente una temperatura fija. Por medio del análisis previo acerca de la dependencia que tiene la difusión con respecto a los defectos puntuales, podríamos esperar una fuerte dependencia de la difusividad con respecto a la temperatura, en analogía con la Ecuación 2.5-4, es este precisamente el caso.

En la ecuación de Arrhenius:

$$D = D_0 e^{-q/kT}$$

Los datos de difusividad son quizá los ejemplos que más se conocen.

Donde

$D_0$  Es una constante pre-exponencial

$q$  la energía de activación para el movimiento de defectos.

En general,  $q$  es diferente a la  $E_{defecto}$  de la Ecuación 2.5-4.

$E_{defecto}$  Representa la energía necesaria para la formación de defectos, y por otro lado  $q$  representa la energía que es necesaria para el movimiento de esos defectos a través de la estructura del cristal ( $E_{movimiento\ de\ defecto}$ ) esto da lugar a la difusión intersticial. Dentro del mecanismo de vacantes, la formación de vacantes es una parte fundamental del proceso de difusión (véase figura 2.5-9) y

$$q = E_{defecto} + E_{movimiento\ de\ defecto}.$$

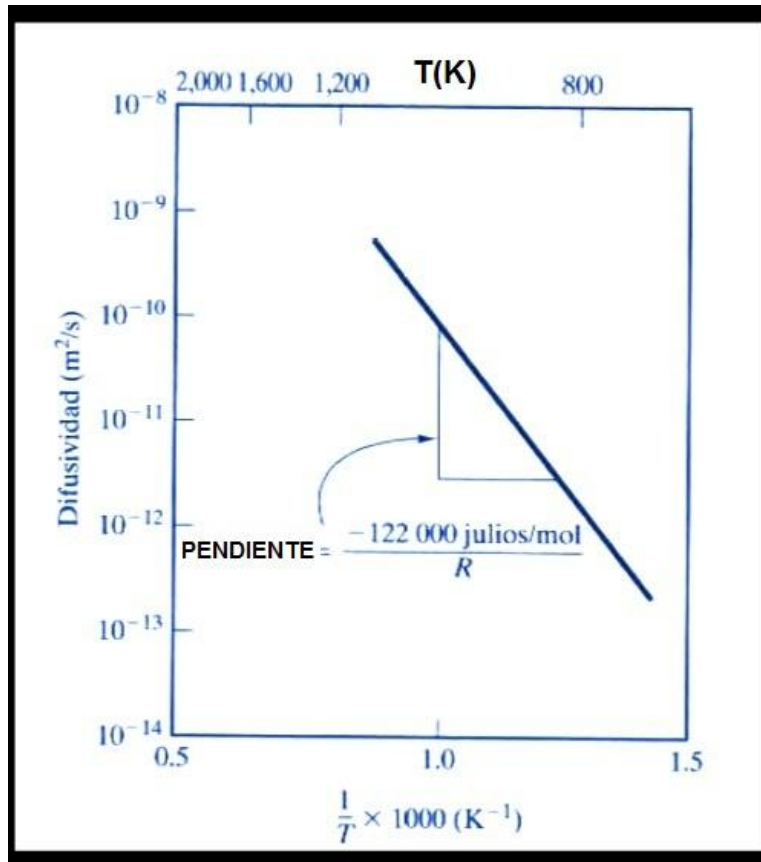
Con más frecuencia los datos de difusividad se tabulan en función de cantidades molares, que es igual a una energía de activación,  $Q$ , por mol de la especie difusora:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \text{ (Ecuación 2.5-9)}$$

Donde

$R$ .- es la constante universal de los gases.

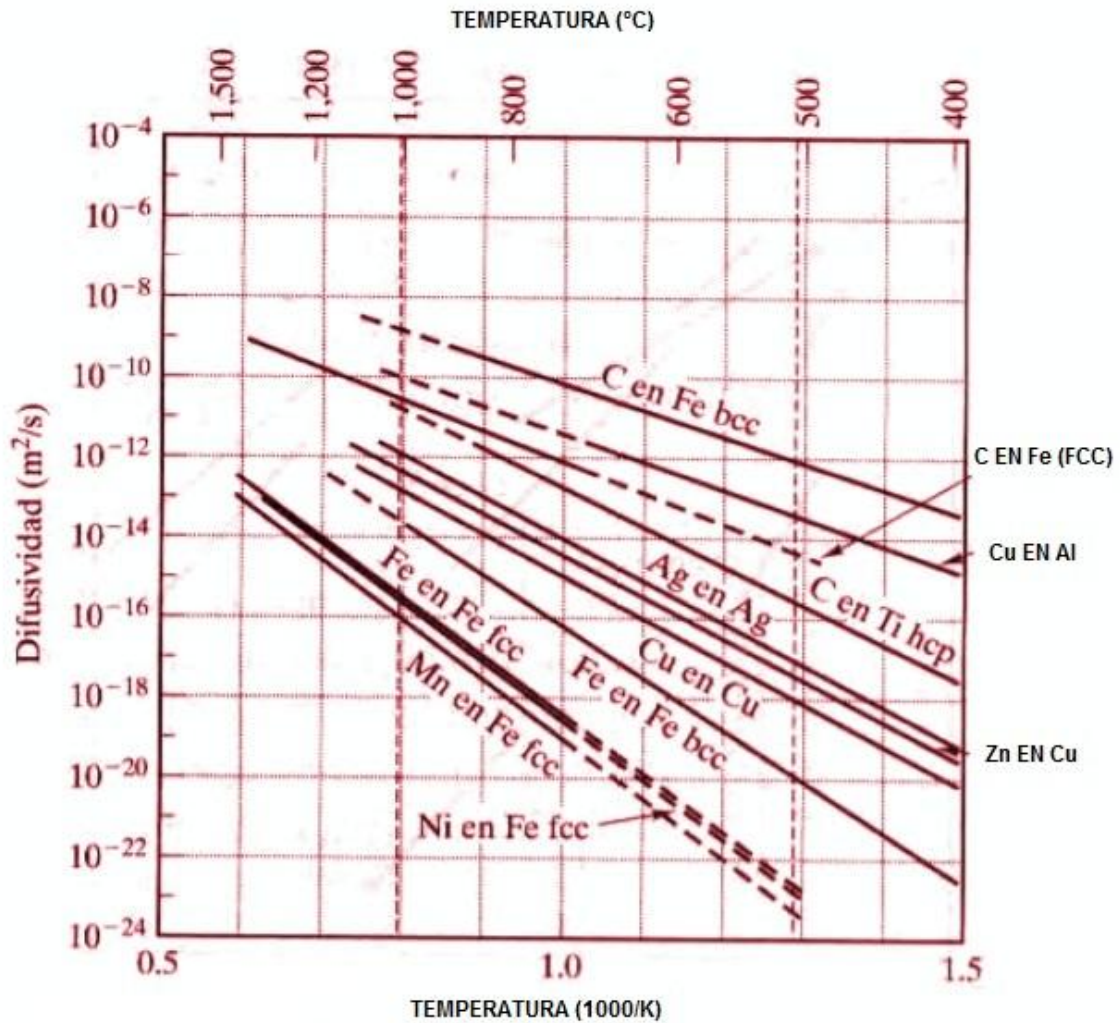
En la figura 2.5-16 encontramos una grafica de Arrhenius de la difusividad del carbono en el  $\alpha$ -Fe sobre un intervalo de temperaturas.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-16. Gráfica de Arrhenius de la difusividad del carbono en hierro  $\alpha$  sobre un intervalo de temperaturas. Vea también las figuras relacionadas 2.5-5 y 2.5-10 y otros datos de difusión metálica en la figura 2.5-17.

Este es un claro ejemplo sobre un mecanismo de intersticialidad como el que se observó en la figura 2.5-10.



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.5-17. Gráfica de Arrhenius da datos de difusividad para diversos sistemas metálicos.

En la figura 2.5-17 se encuentran los datos de difusividad para varios sistemas metálicos, y por otro lado en la tabla 2.5-3 se dan los parámetros de Arrhenius para estos datos (Shackelford, 1995).

Tabla 2.5-3. Datos de difusividad para varios sistemas metálicos (véase ecuación 2.5-9).

Tabla 2.5-3. Datos de difusividad para varios sistemas metálicos				
Soluto	Disolvente	$D_0(m^2/s)$	$Q(kJ/mol)$	$Q(kcal/mol)$
Carbono	Hierro fcc	$20 \times 10^{-6}$	142	34.0
Carbono	Hierro fcc	$220 \times 10^{-6}$	122	29.3
Hierro	Hierro fcc	$22 \times 10^{-6}$	268	64.0
Hierro	Hierro fcc	$200 \times 10^{-6}$	240	57.5
Níquel	Hierro fcc	$77 \times 10^{-6}$	280	67.0
Manganeso	Hierro fcc	$35 \times 10^{-6}$	191	67.5
Cinc	Cobre	$34 \times 10^{-6}$	191	45.6
Cobre	Aluminio	$15 \times 10^{-6}$	126	30.2
Cobre	Cobre	$20 \times 10^{-6}$	197	47.1
Plata	Plata	$40 \times 10^{-6}$	184	44.1
Carbono	Titanio hcp	$511 \times 10^{-6}$	182	43.5

Fuente: (Shackelford, 1995).

## 2.6 PROPIEDADES FÍSICAS: DENSIDAD, CAPILARIDAD, POROSIDAD, SOLUBILIDAD.

### 2.6.1 Densidad

La densidad dentro de las propiedades de los materiales es de las más importantes ya que esta determina el peso de la estructura o componente. La densidad está relacionada con la estructura cristalina de los materiales. La densidad de un sólido dependerá de tres importantes factores como lo son: la masa atómica media de sus átomos o iones, el tamaño atómico o iónico y por ultimo su estructura cristalina o visto de otra forma la manera como están empaquetados (Mangonon, 2001).

*“La gran cantidad de diversidad de densidades en los materiales se surge principalmente de la masa atómica (de 1, en el hidrogeno, a 207, en el plomo) y de la fracción volumétrica de empaquetamiento” (Mangonon, 2001).*

Dentro de los materiales pesados dentro de la ingeniería están los metales que son densos porque se componen de átomos pesados y su empaquetamiento es más o menos compacto. Los materiales que tienen baja densidad son los polímeros porque consisten de átomos ligeros, que son principalmente carbono e hidrogeno, en una red lineal, bi o tridimensional, empaquetados de manera ligera

(laxa). Así mismo las cerámicas también son de baja densidad porque estas contienen átomos de C, O o N, y contienen fracciones de empaquetamiento más pequeñas en comparación a las de los metales. En los sólidos su densidad mínima es aproximadamente de  $1 \text{ Mg/m}^3$ , y dicha densidad se alcanza con los átomos más ligeros empaquetados en una estructura abierta. Si bien es cierto existen materiales con densidades menores que este valor, estos materiales son las espumas que contienen una proporción sustancial de espacio de poros (Mangonon, 2001).

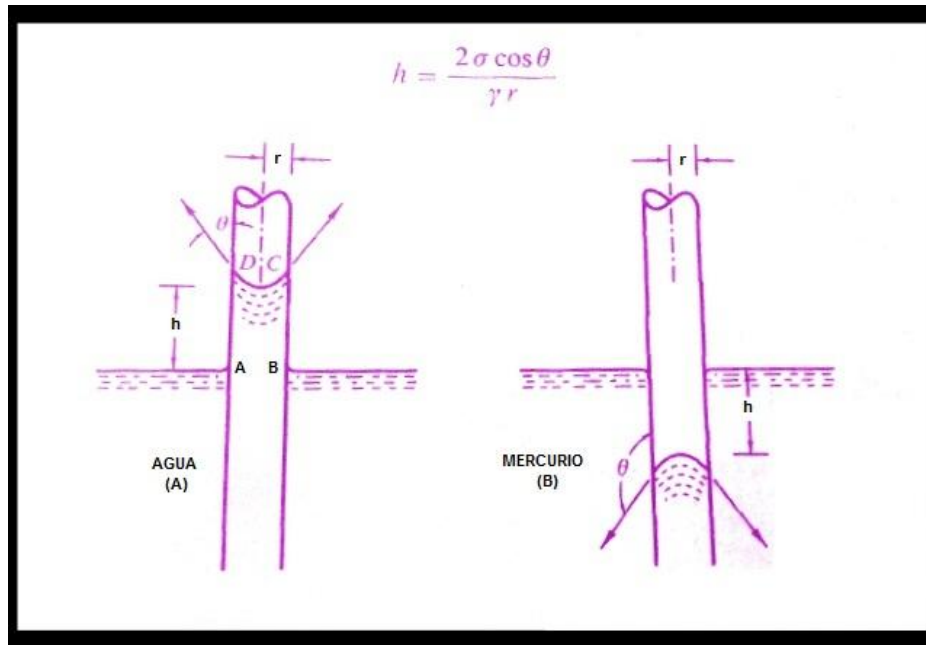
### 2.6.2 Capilaridad

La elevación o descenso de un líquido en un tubo capilar o en situaciones análogas tales como en medios porosos se producen por la tensión superficial, dependiendo de las magnitudes relativas de la cohesión del líquido y de la adhesión del líquido a las paredes del tubo. Cuando la adhesión es mayor que la cohesión los líquidos ascenderán en tubos que mojan (adhesión > cohesión) y cuando la cohesión es mayor que la adhesión los líquidos descienden en tubos que no mojan (cohesión > adhesión). La capilaridad será importante en tubos donde su diámetro sea menor a 10mm, y para tubos que tienen diámetros mayores de 12mm el efecto de la capilaridad es despreciable (Giles, Evett y Cheng, 1994).

*“La capilaridad es un proceso de los fluidos el cual depende de su tensión superficial y esta, a su vez, depende de la cohesión del líquido la cual le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar” (Giles, Evett y Cheng, 1994).*

En la figura 2.6-1 se observa de manera clara el ascenso o depresión por capilaridad en un tubo, y este viene dado por:

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{\gamma r}$$



Fuente: (Giles, Evett y Cheng, 1994).

Figura 2.6-1. Ascenso o depresión por capilaridad en un tubo.

Donde  $h$  será la altura del ascenso por capilaridad o depresión,  $\sigma$  es la tensión superficial,  $\theta$  el ángulo de mojado (vea la figura 2.6-1),  $\gamma$  es el peso específico del líquido y  $r$  es el radio del tubo (Giles, Evett y Cheng, 1994).

Nota: si el tubo se encuentra limpio,  $\theta$  es  $0^\circ$  para el agua y  $140^\circ$  para el Hg.

### 2.6.3 Porosidad

La porosidad de un material es la capacidad que tiene este material, tanto de absorber líquidos como el de absorber gases. La porosidad se puede definir también como el tamaño y número de poros en un filtro o una membrana impermeable (Askeland y Phulé, 2006).

### 2.6.3.1 Porosidad másica y volumétrica

La porosidad másica o la capacidad de absorción de agua se puede medir con la siguiente fórmula:

$$P_m = \frac{m_s - m_o}{m_o} \cdot 100\%$$

Donde:

( $m_o$ ) Es la masa de una porción cualquiera de material (seco)

( $m_s$ ) Es la masa de la porción después de haber sido sumergida en agua

Esta última ecuación se puede usar para estimar la porosidad volumétrica o la proporción de huecos:

$$P_v = \frac{V_o}{V_T} = \frac{\rho_m}{\rho_m + \frac{\rho_f}{P_m}}$$

Donde:

( $\rho_m$ ) Es la densidad del material (seco).

( $\rho_f$ ) Es la densidad del agua

( $P_v$ ) Es la proporción de huecos (expresada en tanto por uno)

(Askeland y Phulé, 2006).

### 2.6.4 Solubilidad

Las atracciones intermoleculares que se encargan de mantener juntas a las moléculas en líquidos y sólidos cuentan con otra función importante en la formación de disoluciones. Cuando una sustancia que en este caso es el soluto se disuelve en otra que es el disolvente, las partículas de soluto se dispersan en el disolvente. Estas partículas de soluto ocupan posiciones que antes eran ocupadas por moléculas de disolvente. Ahora bien la facilidad con que la una



partícula de soluto reemplaza a una molécula de disolvente dependerá de la fuerza relativa de tres tipos de interacciones; estos tres tipos son los siguientes:

Interacción disolvente-disolvente

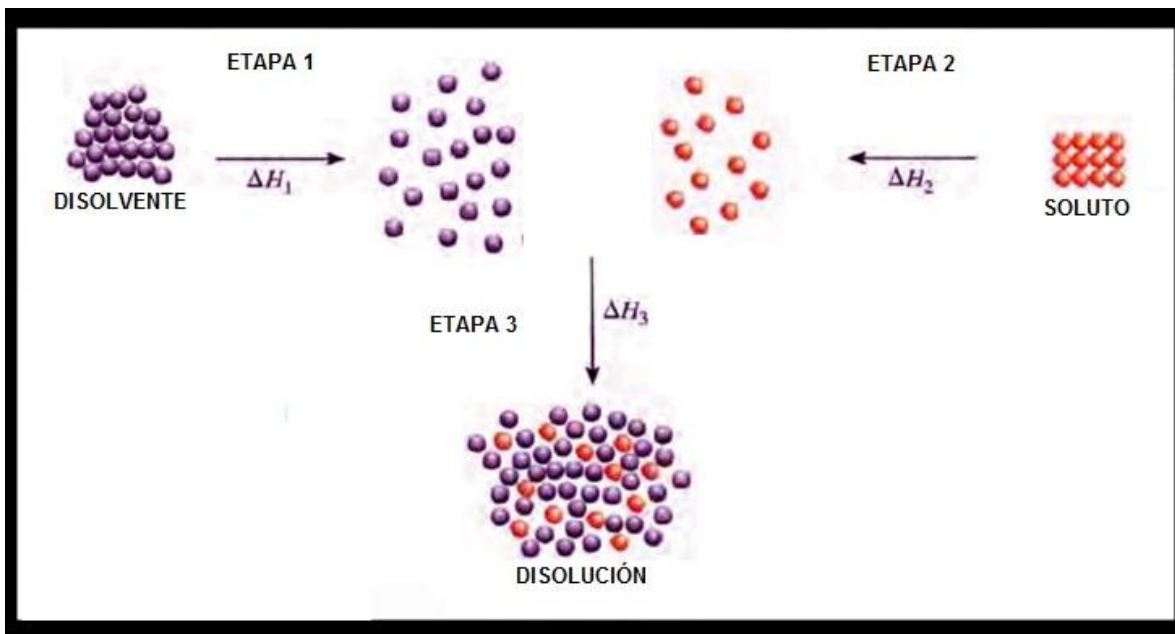
Interacción soluto-soluto

Interacción disolvente-soluto

De una manera simplificada decimos que el proceso de disolución ocurre en tres etapas diferentes (figura 2.6-2). En la primera etapa ocurre la separación de las moléculas del disolvente, mientras tanto que en segunda etapa implica la separación de las moléculas del soluto. Para estas etapas se requiere energía para romper las fuerzas de atracción intermoleculares; y por esta situación, son endotérmicas. En la tercera etapa las moléculas del disolvente junto con las moléculas de soluto se mezclan, y este proceso puede ser exo o endotérmico. El calor de disolución  $\Delta H_{disol}$  se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta H_{disol} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

En esta parte si la atracción soluto-disolvente es mayor que la disolvente-disolvente y la atracción soluto-soluto, este proceso de disolución será favorable o exotérmico ( $\Delta H_{disol} < 0$ ) . si la interacción soluto-disolvente es más débil que las otras dos interacciones que son disolvente-disolvente y soluto-soluto, dicho proceso de disolución será endotérmico ( $\Delta H_{disol} > 0$ ) .



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 2.6-2. Enfoque molecular del proceso de disolución, el cual se esquematiza como constituido por tres etapas: primero, las moléculas de disolvente y del soluto están separadas (etapas 1 y 2). Después, las moléculas del disolvente y del soluto se mezclan (etapa 3).

Podemos decir que hasta cierto punto resulta sorprendente el hecho de que un soluto pueda disolverse en un disolvente si la atracción entre sus propias moléculas es más fuerte que la atracción soluto-disolvente. El proceso de disolución, así como en todos los procesos físicos y químicos, se rige por medio de dos factores. El primero de ellos es el factor energético, en el cual se determina si un proceso de disolución es exo o endotérmico. En el segundo factor hace referencia a la tendencia hacia el desorden inherente a todos los procesos naturales. De cierta manera podemos decir que al igual que las cartas de una baraja se mezclan al momento de barajarse, cuando se mezclan las moléculas de soluto y disolvente para así formar una disolución, se presenta un incremento de aleatoriedad, o desorden. En estado puro, el disolvente y el soluto poseen cierto grado de orden, que se caracteriza por la disposición más o menos regular de átomos, moléculas o iones en el espacio tridimensional. Gran parte de este orden se destruye cuando el

soluto se disuelve en el disolvente (figura 2.6-2). Por lo tanto, el proceso de disolución es acompañado por aumento del desorden. Este aumento se da en el desorden del sistema, y con esto favorece la solubilidad de una sustancia, inclusive si el proceso de disolución es endotérmico. La solubilidad es una medida de la cantidad de soluto la cual se disolverá en cierto disolvente y a una temperatura específica. Aquí se puede utilizar el dicho “lo semejante disuelve a lo semejante” y es que este, es de gran ayuda para poder predecir la solubilidad de una sustancia en determinado disolvente. El significado de esta expresión es que, es probable que dos sustancias cuyas fuerzas intermoleculares son del mismo tipo y magnitud sean solubles entre sí. Como un ejemplo tenemos que, tanto el tetracloruro de carbono  $CCl_4$  así como el benceno  $C_6H_6$  son líquidos no polares, por lo tanto las únicas fuerzas intermoleculares presentes en estas sustancias son las fuerzas de dispersión. Cuando se mezclan estos líquidos tetracloruro de carbono y benceno, de una manera rápida se disuelven uno en otro, ya que las fuerzas de atracción entre las moléculas de  $CCl_4$  y de  $C_6H_6$  son muy parecidas en magnitud a las fuerzas que se dan entre moléculas de  $CCl_4$  y entre las moléculas de  $C_6H_6$ . Se dice que dos líquidos si son completamente solubles entre sí en todas proporciones son miscibles. Los alcoholes, como lo es el metanol, etanol, y 1,2-etilenglicol, son miscibles con agua porque estos forman puentes de hidrogeno con las moléculas de agua. Las reglas que se encuentran en la tabla 2.6-1 nos permiten predecir la solubilidad en agua de un compuesto iónico. De una manera general, es posible predecir que los compuestos iónicos serán más solubles en disolventes polares, tales como lo son el agua, el amoniaco líquido y el fluoruro de hidrógeno líquido, que en los disolventes no polares, como lo son el benceno y el tetracloruro de carbono. Esto se debe a que las moléculas de los disolventes no polares carecen de un momento dipolar, y por esa característica no pueden solvatar a los iones  $Na^+$  y  $Cl^-$ . (Solvatación: proceso mediante el cual iones o moléculas se rodean por moléculas del disolvente, y estas se encuentran distribuidas de una forma específica. Cuando decimos que el disolvente es agua, a este proceso le llamaremos hidratación (Chang, 2007).

Tabla 2.6-3. Reglas de solubilidad para compuestos iónicos comunes en agua a 25°C.

Tabla 2.6-3. Reglas de solubilidad para compuestos iónicos comunes en agua a 25°C	
Compuestos solubles	Excepciones
Compuestos que contienen iones de metales alcalinos ( $Li^+$ , $Na^+$ , $K^+$ , $Rb^+$ , $Cs^+$ ) y el ion amonio ( $NH_4^+$ ) Nitratos ( $NO_3^-$ ), bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ) y cloratos ( $ClO_3^-$ ) Halogenuros ( $Cl^-$ , $Br^-$ , $I^-$ ) Sulfatos ( $SO_4^{2-}$ )	Halogenuros de $Ag^+$ , $Hg_2^{2+}$ , y $Pb^{2+}$ Sulfatos de $Ag^+$ , $Ca^{2+}$ , $Sr^{2+}$ , $Ba^{2+}$ , $Hg_2^{2+}$ y $Pb^{2+}$
Compuestos insolubles	Excepciones
Carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ), fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ), cromatos ( $Cr_2^{2-}$ ) y sulfuros ( $S^{2-}$ ) Hidróxidos ( $OH^-$ )	Compuestos que contienen iones de metales alcalinos y el ion amonio  Compuestos que contienen iones de metales alcalinos y el ion $Ba^{2+}$

Fuente: (Chang, 2007).

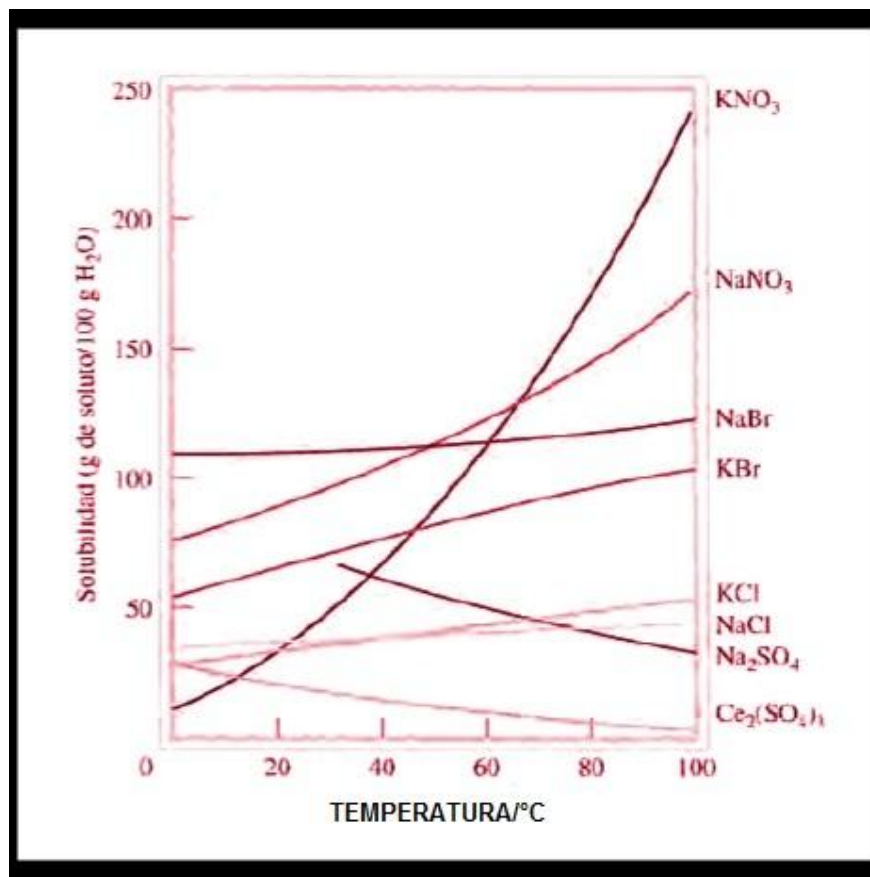
*“Las interacciones intermoleculares que predominan entre los iones y los compuestos no polares son las interacciones ion-dipolo, que son mucho más débiles que las interacciones ion-dipolo. Como consecuencia, los compuestos iónicos por lo general son muy poco solubles en disolventes no polares” (Chang, 2007).*

#### 2.6.4.1 Efecto de la temperatura en la solubilidad

La solubilidad está definida como la cantidad máxima de soluto que se disuelve en determinada cantidad de un disolvente a una temperatura específica. Como se sabe la temperatura afecta a la solubilidad de la mayor parte de las sustancias y analizaremos el efecto que tiene la temperatura sobre la solubilidad de los sólidos y los gases (Chang, 2007).

##### 2.6.4.1.1 Solubilidad de los sólidos y la temperatura

Como se puede observar en la figura 2.6-3 en la cual se muestra la dependencia de la solubilidad de algunos compuestos iónicos en agua que tienen con respecto a la temperatura.



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 2.6-3. Dependencia de la solubilidad de algunos compuestos iónicos en agua, con respecto a la temperatura.

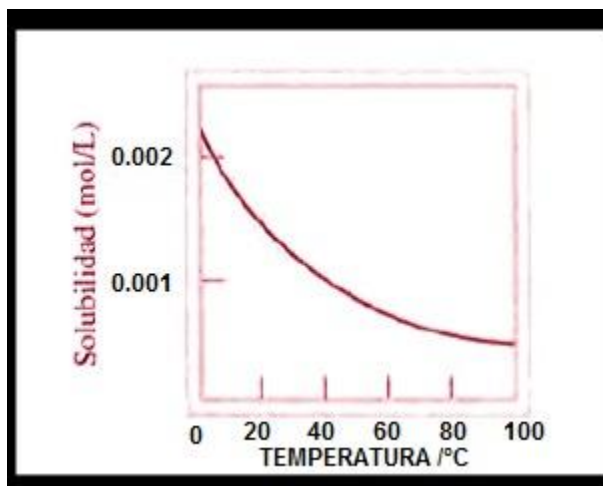
En la mayoría de los casos, la solubilidad de una sustancia sólida aumentará con la temperatura. Pero, no hay una correlación clara entre el signo de  $\Delta H_{disol}$  y la variación de la solubilidad con respecto a la temperatura. Como ejemplo, el proceso de disolución del  $CaCl_2$  es exotérmico mientras que el del  $NH_4NO_3$  es endotérmico. Pero para ambos compuestos la solubilidad aumenta al incrementarse la temperatura. De manera general, el efecto que tiene la temperatura sobre la solubilidad se debe determinar en forma experimental (Chang, 2007).

#### **2.6.4.1.2 Cristalización fraccionada**

La dependencia de la solubilidad de un sólido con respecto a la temperatura varía de manera considerable, como lo se muestra en la figura 2.6-3. La solubilidad de  $NaNO_3$  aumenta rápidamente con un incremento en la temperatura, mientras que la de  $NaCl$  casi no cambia. Esta gran variación proporciona una forma para obtener sustancias puras a partir de mezclas. Con esto se puede definir que la cristalización fraccionada es la separación de una mezcla de sustancias en componentes puros esto con base a sus diferentes solubilidades. En el laboratorio muchos de los compuestos sólidos, inorgánicos y orgánicos, que se utilizan se purifican mediante la cristalización fraccionada. Este método funciona mejor si el compuesto el cual se va a purificar tiene una curva de solubilidad con una gran pendiente, esto quiere decir que, es mucho más soluble a altas temperaturas que a bajas. De distinta manera, gran parte del compuesto permanecerá disuelto a medida que la disolución se enfría. Por otro lado la cristalización fraccionada funciona bien si la cantidad de impurezas presentes en la disolución es relativamente pequeña (Chang, 2007).

#### **2.6.4.1.3 La solubilidad de los gases y la temperatura**

La solubilidad de los gases en el agua casi siempre disminuye al aumentar la temperatura (véase figura 2.6-4). Cuando se calienta agua en un recipiente, en este podemos se observan burbujas de aire que se van formando en las paredes del recipiente antes de que hierva el agua.



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 2.6-4. Dependencia de la solubilidad del  $O_2$  gaseoso en agua con respecto de la temperatura. Observe que la solubilidad disminuye con el incremento en la temperatura. La presión del gas sobre la disolución es de 1 atm.

Cuando la temperatura comienza a incrementar, las moléculas de aire disuelto comienzan a “salir” de la disolución inclusive antes de que el agua comience a hervir (Chang, 2007).

*“La disminución de la solubilidad del oxígeno molecular en agua caliente tiene una relación directa con la contaminación térmica, es decir, el aumento de la temperatura del ambiente (en particular, acuífero) a temperaturas que resultan dañinas para los seres que lo habitan” (Chang, 2007).*

Por otra parte en un deporte popular como es la pesca, el conocimiento de la variación de la solubilidad de los gases con la temperatura sirve de ayuda. Durante el verano en un día con mucho calor, los pescadores con experiencia seleccionan una zona profunda en un río o lago para pescar. Esto se debe a que en las regiones más profundas el contenido de oxígeno es mayor, además de ser las más frías y el mayor número de peces se encontraran ahí (Chang, 2007).

#### 2.6.4.2 Efecto de la presión en la solubilidad de los gases

La presión externa no afectará y no tiene influencia sobre la solubilidad de los sólidos y líquidos, pero sin embargo afecta mucho la solubilidad de los gases. La relación cuantitativa que hay entre la solubilidad de los gases y la presión se da por medio de la ley de Henry, dicha ley establece que la solubilidad de un gas en un líquido será proporcional a la presión del gas sobre la disolución:

$$c \propto P$$

$$c = kp$$

Donde:

(c) Concentración molar (mol/L) del gas disuelto;

(P) Presión (en atmosferas) del gas sobre la disolución y,

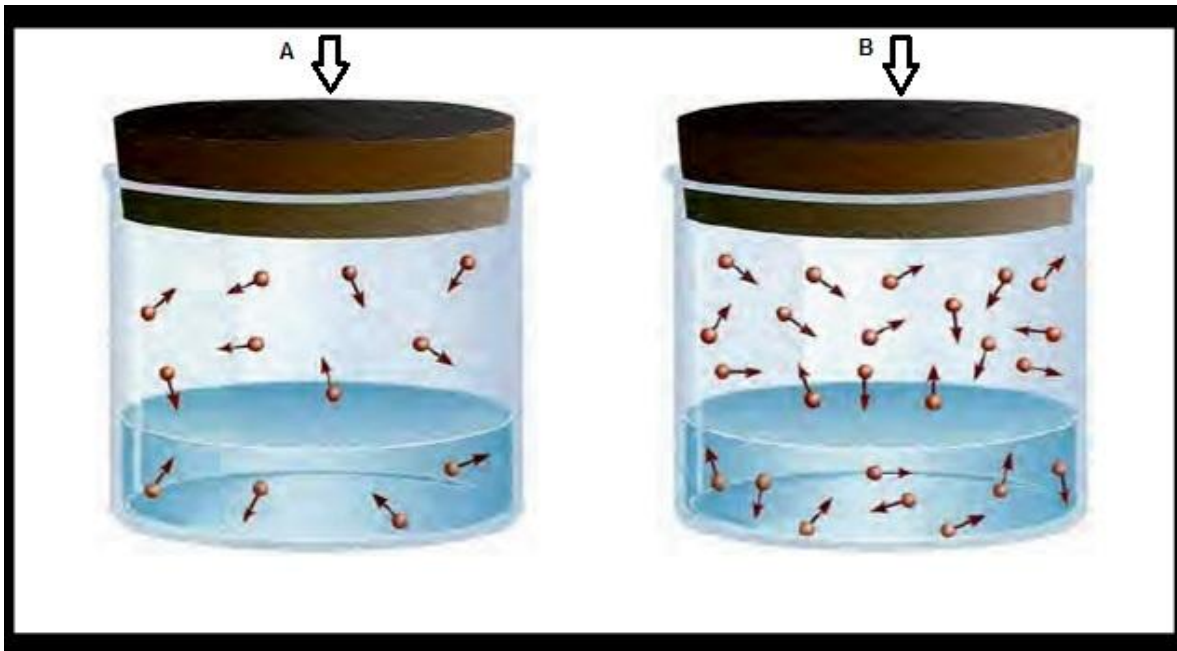
Para un gas determinado, k es una constante que dependerá de la temperatura.

Las unidades de la constante k son  $mol/L \cdot atm$ .

De esto podemos decir que, cuando la presión del gas es de 1 atm, c es numéricamente igual a k. si hay varios gases presentes, P es la presión parcial.

La cantidad de un gas que se disuelve en un disolvente dependerá de la frecuencia de colisión de las moléculas del gas contra la superficie del líquido y que éstas queden atrapadas en la fase condensada. Suponiendo que se tiene un gas en un equilibrio dinámico con una disolución (véase figura 2.6-5A).





Fuente: (Chang, 2007).

Figura 2.6-5. Interpretación molecular de la ley de Henry. Cuando la presión parcial del gas sobre la disolución se incrementa de A) a B).

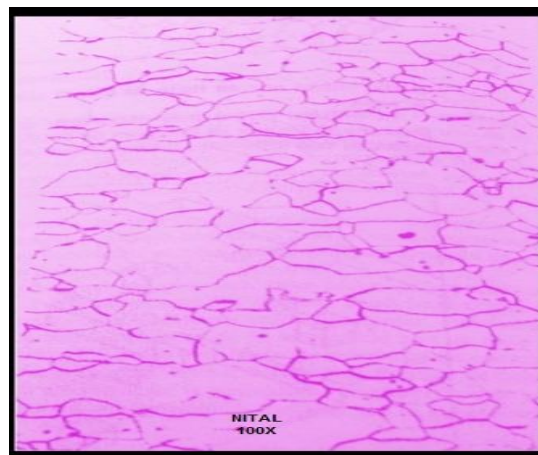
Aquí se puede observar que el número de moléculas de gas que entran a la disolución siempre será igual al número de moléculas disueltas que pasan a la fase gaseosa. Ahora bien si la presión parcial del gas es mayor como se ve en figura 2.6-5B, aquí se disuelven más moléculas en el líquido porque hay más cantidad de moléculas que chocan con la superficie del líquido (Chang, 2007).

*“Este proceso continúa hasta que la concentración de la disolución es de nuevo tal que el número de moléculas que salen de la disolución por segundo es igual al número de las que entran a ella. Debido al aumento de la concentración de moléculas, tanto en la fase gaseosa como en la disolución, este número es mayor en b) que en a), en donde la presión parcial es menor” (Chang, 2007).*

Para entender un poco más la ley de Henry se muestra el siguiente ejemplo: la efervescencia que se produce cuando se abre una botella de bebida gaseosa. Antes de sellar dicha botella con la bebida gaseosa, esta se somete a presión con una mezcla de aire y  $CO_2$  saturada con vapor de agua. Debido a la gran presión

parcial del  $CO_2$  en la mezcla gaseosa, la cantidad de este gas que se disolverá en la bebida es mucho mayor que la que se disolvería en condiciones atmosféricas normales. Al momento de destapar la botella se escapan los gases hasta que la presión de la botella iguala de cierta forma a la presión atmosférica y la cantidad de  $CO_2$  que permanece en la bebida es determinada solo por la presión parcial atmosférica normal del  $CO_2$ , que es 0.0003 atm. Lo que causa la efervescencia es el exceso de  $CO_2$  disuelto a la hora de salir de la disolución (Chang, 2007).

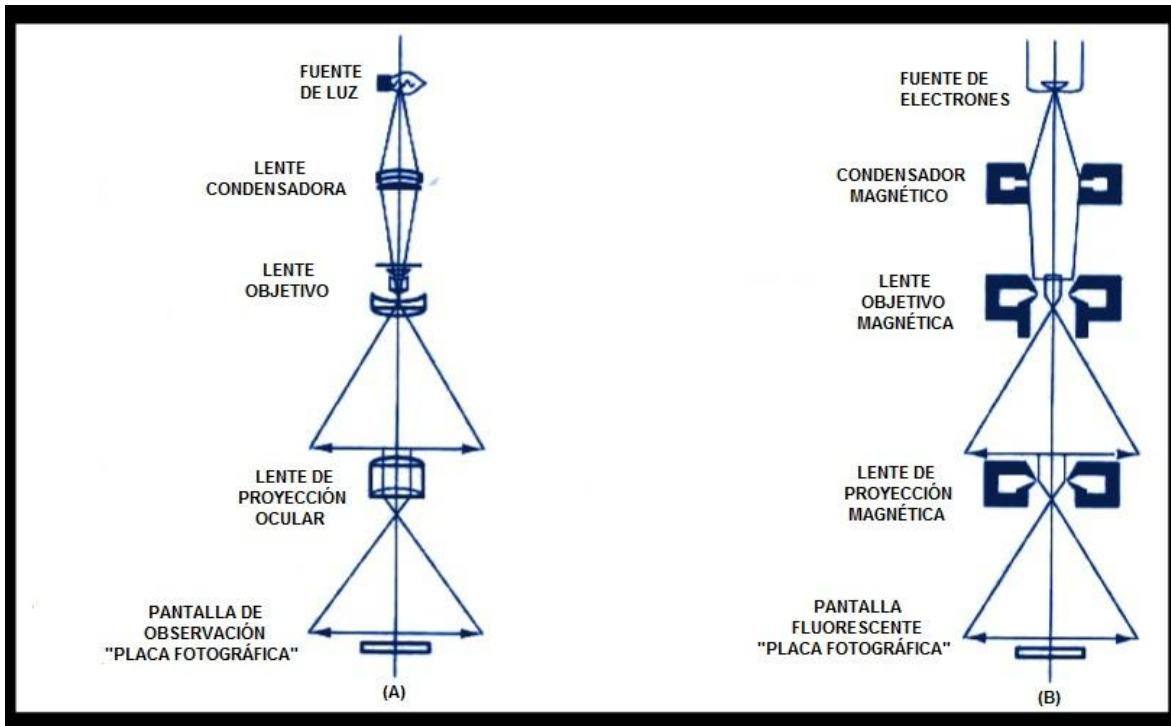
## 2.7 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.7-1. Micrografía óptica típica de una estructura de grano. 100x. El material es acero al bajo carbono. Las fronteras de grano han sido ligeramente “pintadas” con una solución química para que reflejen la luz en forma de diferente a los granos pulidos, apareciendo con un contraste distintivo.

En la figura 2.7-1 se muestra el ejemplo de una forma común de inspección experimental de un material de ingeniería como es el acero al bajo carbono, en la fotografía se observa la estructura de grano tomada con un microscopio óptico. El microscopio óptico es la herramienta de reconocimiento más reciente que es el microscopio electrónico. Anteriormente se describió que la difracción de rayos x es la herramienta estándar para medir la estructura cristalina ideal. A lo largo de las últimas décadas el microscopio electrónico se ha convertido en la herramienta estándar para caracterizar los rasgos micro-estructurales.

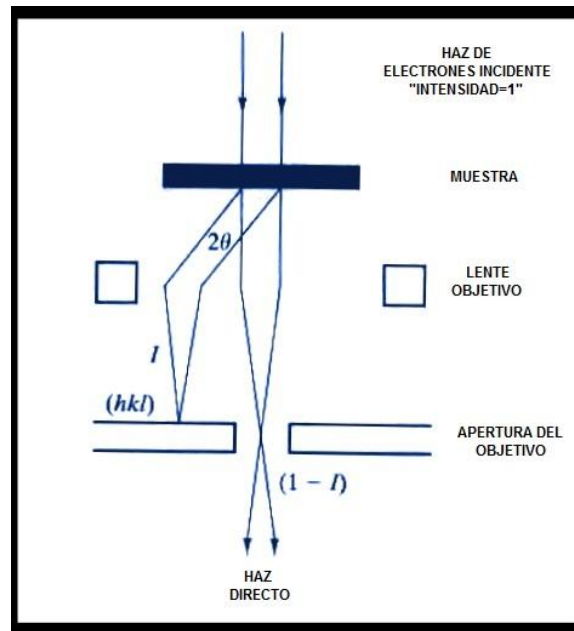


Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.7-2. Semejanza en el diseño de (A) un microscopio óptico y (B) un microscopio electrónico de transmisión (TEM). El microscopio electrónico utiliza solenoides para producir lentes magnéticas en lugar de las lentes de vidrio del microscopio óptico.

A pesar de que en la mayoría de los laboratorios de ingeniería de materiales se utilizan una gran diversidad de microscopios electrónicos y de instrumentos a fines, en esta sección describiremos solamente dos tipos principales de microscopios electrónicos como lo son el de transmisión y el de exploración. El diseño del microscopio electrónico de transmisión (MET) es muy semejante al de un microscopio óptico convencional (véase figura 2.7-2) y esto se hace posible gracias a la naturaleza ondulatoria del electrón. Para este tipo de microscopios (MET) que funcionan con un voltaje constante de 100 KeV, la longitud de onda de la luz visible del haz de electrones será de  $\lambda$ , de  $3.7 \times 10^{-3} \text{ nm}$ , la cual es cinco órdenes de magnitud más pequeña que la luz visible la cual va de 400 a 700 nm y se utiliza en la microscopia óptica. Los resultados que se obtienen con todo esto, son que los detalles estructurales significativamente pequeños se pueden resolver

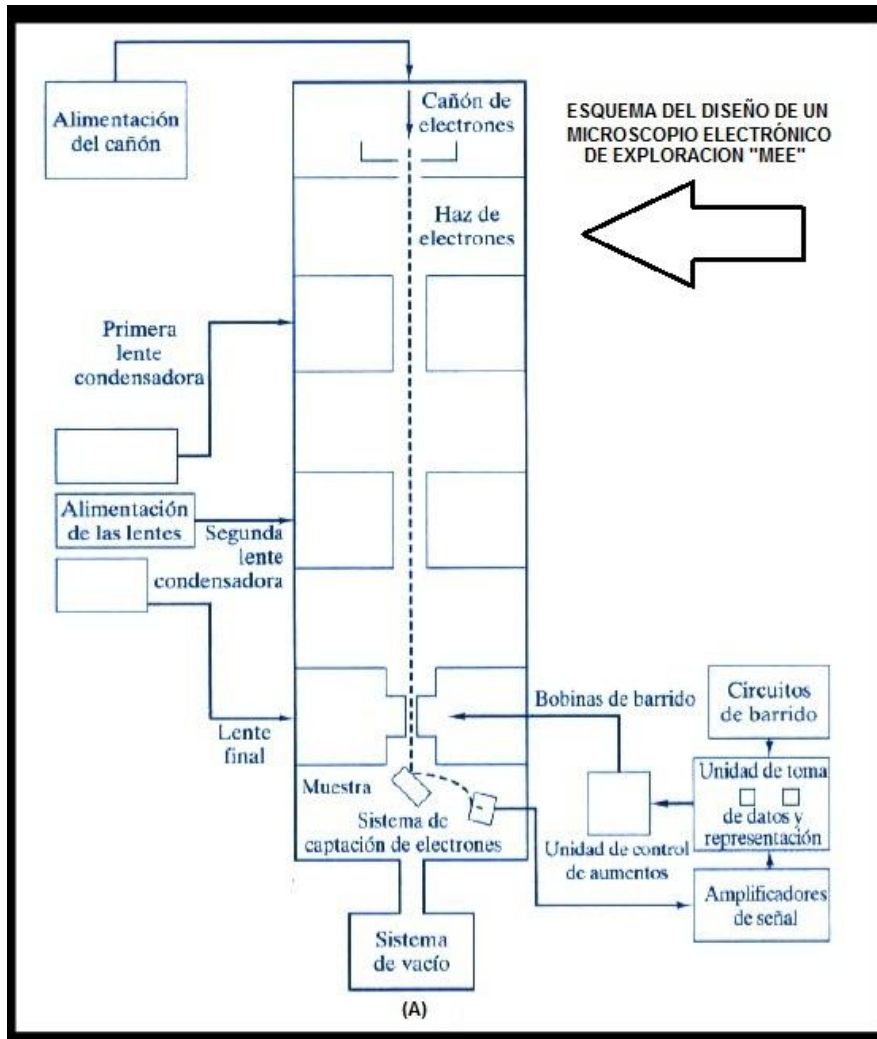
utilizando el microscopio electrónico de transmisión (MET), ya que en la microscopia óptica las ampliificaciones practicas pueden llegar a ser de 2000x, mientras que las ampliificaciones con el microscopio electrónico de transmisión se pueden llegar hasta las 100,000x. En la microscopia por transmisión de electrones la imagen es el resultado del contraste de difracción (figura 2.7-3).



Fuente: (Shackelford, 1995).

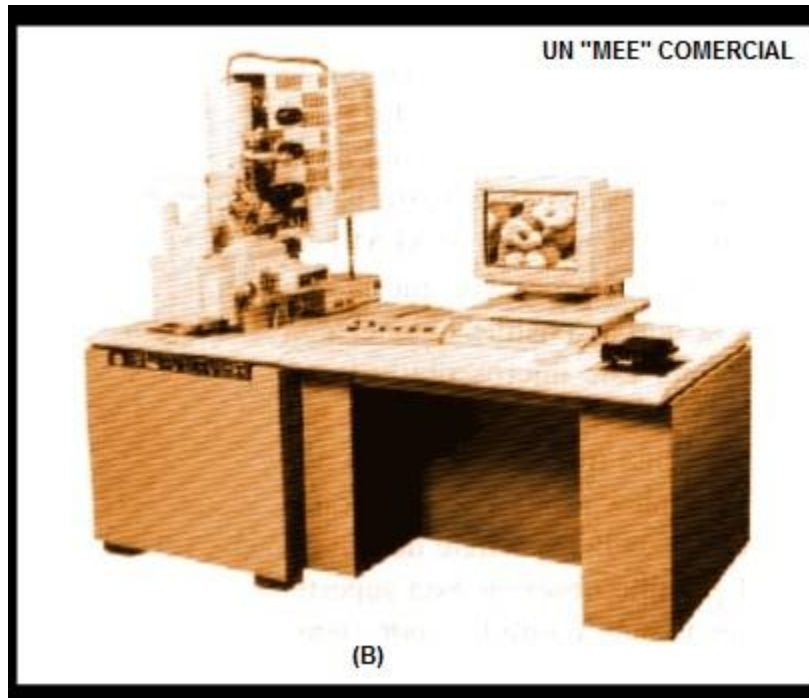
Figura 2.7-3. La base de la formación de la imagen en el TEM es el contraste de difracción. Las diferencias estructurales en la muestra hacen que diferentes fracciones ( $i$ ) del haz incidente sean difractadas hacia el exterior, produciendo variaciones luminosas en una pantalla de observación.

Una aplicación muy frecuente del microscopio electrónico de transmisión es la de identificar diversas estructuras de dislocación, así como la de obtener imágenes de estructuras de fronteras de grano. En la figura 2.7-4 se muestra el microscopio electrónico de exploración (MEE) el cual obtiene sus imágenes estructurales con un método muy diferente al que usa el microscopio electrónico de transmisión (MET).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.7-4. Esquema del diseño de un microscopio electrónico de barrido (SEM).



Fuente: (Shackelford, 1995).

Figura 2.7-4B. Un MEE comercial.

En el microscopio electrónico de exploración la superficie de la muestra es explorada de manera repetida por un haz de electrones el cual es muy angosto ( $diam \approx 1\mu m$ ). Con las pequeñas variaciones que se presentan en la topografía se presentan marcadas variaciones en la intensidad del haz de electrones secundarios expulsados de la superficie de la muestra. Dicho haz de electrones secundarios se despliega a través de una pantalla de televisión donde el patrón de barrido esta sincronizado con la exploración de la superficie de la muestra por el haz de electrones. Ahora la amplificación que se puede obtener con el microscopio electrónico de exploración se encuentra limitada por el diámetro del haz pero aun así es mucho mayor que la que se puede alcanzar con el microscopio óptico pero es menor que la amplificación del microscopio electrónico de transmisión. El microscopio electrónico de exploración es muy útil para realizar reconocimientos muy convenientes de estructuras de grano. La profundidad de campo de este microscopio permite la inspección de la superficie sin importar si cuenta con irregularidades, en cambio en el microscopio óptico es necesario que la superficie

sea plana y pulida. Otra característica de este microscopio es que nos permite monitorear variaciones químicas a escala micro-estructural. Aparte de expulsar los electrones secundarios, el haz de electrones incidente genera rayos x con una longitud de onda característica que permite identificar la composición elemental del material bajo estudio (Shackelford, 1995).

## **2.8 PROPIEDADES MECÁNICAS: COHESIÓN, ELASTICIDAD, PLASTICIDAD, TENACIDAD Y RESISTENCIA, DEFORMACIÓN.**

Para seleccionar un material son muy importantes conocer sus características físicas del comportamiento del material cuando se somete a esfuerzos. Estas características son conocidas como propiedades mecánicas del material. Los materiales aparte de contar con propiedades mecánicas, poseen otras propiedades como son las propiedades químicas, eléctricas, térmicas, ópticas, entre otras. Las propiedades mecánicas, tales como rigidez, ductilidad, resistencia, tenacidad, plasticidad y maquinabilidad, por mencionar algunas, son las que se encargan de describir el comportamiento del material cuando este se somete a cargas. Estas propiedades describen las características y afectaciones de funcionamiento de los miembros de los sistemas estructurales (Fitzgerald, 1996).

### **2.8.1 Cohesión**

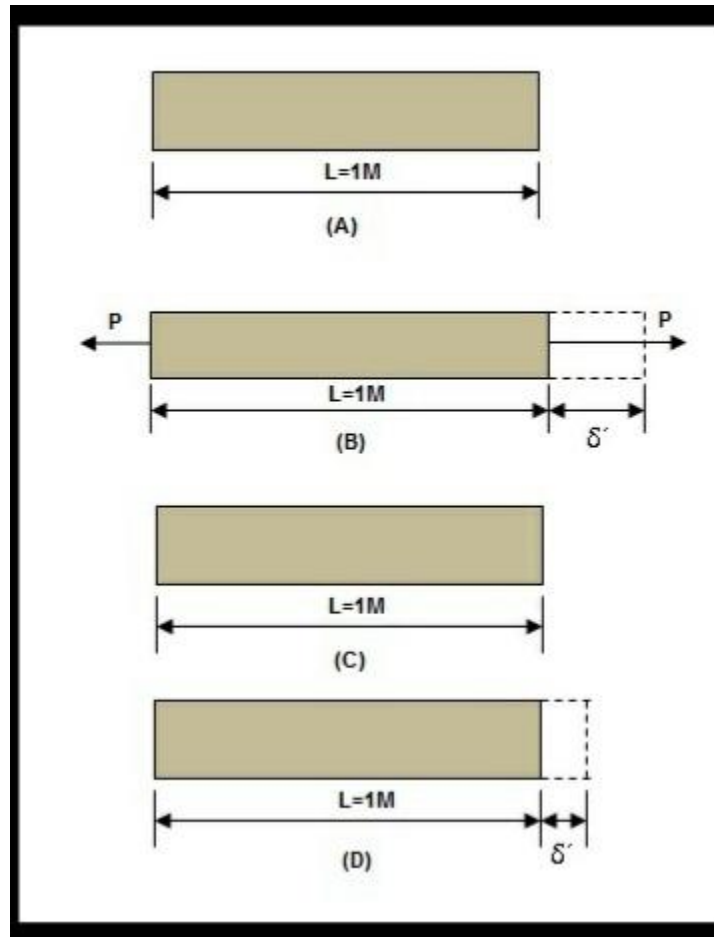
Para entender el término de cohesión, primero se tiene que definir que es la adhesión. La adhesión es una propiedad de la materia la cual permite que se unan y plasmen dos superficies de iguales o diferentes sustancias cuando estas entran en contacto, las cuales se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.

La adhesión siempre jugará un papel muy importante en muchos aspectos dentro de las técnicas de construcción tradicionales. Un ejemplo de este se puede decir que es la adhesión que existe entre el ladrillo y el cemento. La cohesión no es más que una fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo y la adhesión es la interacción que existe entre las superficies de distintos cuerpos (Levine, 2004).

### 2.8.2 Elasticidad

Dentro de la mecánica de materiales es muy importante el concepto de elasticidad. Muchas veces se tiene el concepto falso de que un cuerpo es elástico cuando este puede estirarse una gran longitud sin romperse, como un ejemplo de esto sería el de una banda de caucho. Pero sin embargo, en mecánica de materiales esta definición no es correcta. La definición correcta consiste en: Elasticidad: propiedad que hace que un cuerpo que se ha deformado debido a fuerzas deformadoras regrese a su forma original cuando las fuerzas deformadoras que actuaban en el, han sido removidas. Como un ejemplo de esto tenemos lo siguiente, consideremos la barra que se muestra en la figura 2.8-1. Suponiendo que esta barra era de 2m de longitud antes de aplicar una carga y esta se estiro una cantidad  $\delta$  debido a la aplicación de la carga (P). Ahora bien, si la barra al momento de quitar la carga (p) regresa a su longitud original de 2m como se ve en la figura 2.8-1c, se puede decir que el material es perfectamente elástico con la carga que se aplicó. Pero si la barra no logra recuperar su longitud original después de haberle quitado la carga (p), como se muestra en la figura 2.8-1d, se dice que el material es parcialmente elástico. La deformación  $\delta'$  recibe el nombre deformación permanente; porque esta permanece después de que hemos quitado la carga (p).





Fuente: (Fitzgerald, 1996).

Figura 2.8-1. Barra.

Con esta definición, tenemos que casi todos los materiales de ingeniería como lo son: el acero, aluminio, vidrio, concreto, madera, etc., se pueden considerar como materiales elásticos (Fitzgerald, 1996).

*“A los esfuerzos normales a lo que se usan los materiales, generalmente se consideran como perfectamente elásticos. Sin embargo, si los esfuerzos en un cuerpo llegan a ser demasiado grandes, el cuerpo nunca regresará a sus dimensiones originales” (Fitzgerald, 1996).*

### **2.8.3 Plasticidad**

La plasticidad es la propiedad mecánica de un material anelástico, natural, artificial, biológico o de otro tipo, que le permite deformarse permanente e irreversiblemente cuando este se somete a tensiones por encima de su rango elástico (límite elástico). Dentro de los metales, la plasticidad se explica en términos de desplazamientos irreversibles de dislocaciones. Dentro de los materiales elásticos, así como en muchos metales dúctiles, un pequeño esfuerzo uniaxial de tracción lleva consigo un comportamiento elástico. Esto quiere decir con pequeños incrementos en la tensión de tracción (esfuerzo interno) habrá pequeños incrementos en la deformación, y de esta forma si la carga se vuelve cero de nuevo el cuerpo recuperara su forma original, esto quiere decir, que tendremos una deformación completamente reversible. Por otro lado, existe un límite, el cual se llama límite elástico, donde dice que si cierta función homogénea de las tensiones supera dicho límite entonces al momento de desaparecer la carga quedan deformaciones y entonces el cuerpo no vuelve a su forma original. Es decir, aparecen deformaciones no-reversibles. Este tipo de comportamiento elasto-plástico se encuentra en la mayoría de los metales conocidos, así como en muchos otros materiales. Existe también el comportamiento perfectamente plástico el cual es menos frecuente, y este implica la aparición de deformaciones irreversibles por mínima que sea la tensión, los materiales que se aproximan mucho a un comportamiento perfectamente plástico son la arcilla de modelar y la plastilina. A diferencia del comportamiento elástico el cual es termodinámicamente reversible, aquel cuerpo que se deforma plásticamente también experimentara cambios de entropía, como son los desplazamientos de las dislocaciones. Dentro del comportamiento plástico parte de la energía mecánica se disipa internamente, en lugar de transformarse como energía potencial elástica. Microscópicamente, en la escala de la red cristalina de los metales, la plasticidad se dice que es una consecuencia de que existan ciertas imperfecciones en la red las cuales se conocen como dislocaciones (Lambe y Whitman, 1991).

## **2.8.4 Tenacidad y resistencia**

### **2.8.4.1 Tenacidad**

Los materiales que se usan como miembros que están sujetos al impacto de cargas dinámicas deben tener la capacidad de absorber la energía y el choque de las cargas. Las propiedades que describen la capacidad de un material para absorber energía son la resiliencia y la tenacidad. La resiliencia de un material es la capacidad de absorber energía en el intervalo elástico de esfuerzos, mientras tanto se dice que la tenacidad es la capacidad que tiene de absorber energía en el intervalo inelástico de esfuerzos (Fitzgerald, 1996).

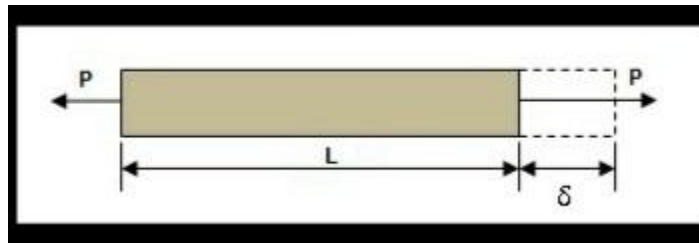
### **2.8.4.2 Resistencia**

La resistencia mecánica de un material es la que determinara la cantidad de fuerza o la cantidad de carga que dicho material pueda soportar antes de ceder. En el diseño el criterio de falla que se utiliza puede ser diferente para los distintos tipos de materiales y, de aquí, que existan múltiples criterios de resistencia. En el caso de los materiales como metales y polímeros termoplásticos, el criterio de diseño que se usa está fundamentado en el esfuerzo de fluencia, pero, debido a que estos materiales pudieron haber experimentado un trabajo en frío o una deformación plástica previa, las resistencias de estos materiales a la cedencia puede variar desde el esfuerzo de fluencia en el caso de un material recocido, hasta el esfuerzo de fluencia para algún material que ha sido endurecido por deformación. En la mayoría de los fines de diseño, se supone que el esfuerzo de fluencia será el mismo que cuando se aplica tensión a cuando se aplica compresión. En el caso de la cerámica y el concreto que son materiales frágiles, el criterio de falla será el esfuerzo a la trituración por compresión y no por tensión, donde este es alrededor de 15 veces más pequeño que por compresión. Como los materiales frágiles se comportan elásticamente hasta la fractura, el esfuerzo máximo de fluencia tomara el lugar del esfuerzo de fluencia. En dichos materiales, su esfuerzo máximo de fluencia es muy variable debido a la presencia de defectos de diversos tamaños. Por esto es necesario incorporar una función de probabilidad, en las cerámicas y los materiales frágiles. Para el caso de los

elastómeros, su criterio de falla es el esfuerzo al desgarre, y en los materiales compuestos, el esfuerzo en la falla (Mangonon, 2001).

### 2.8.5 Deformación

Otra de las propiedades mecánicas de los materiales es la deformación, para definir este término se considerará una barra sujeta a una carga axial de tensión (P), como se observa en la figura 2.8-2.



Fuente: (Fitzgerald, 1996).

Figura 2.8-2. Barra sujeta a una carga de axial de tensión (P).

Cuando se aplica dicha carga, en la barra se desarrolla un esfuerzo unitario que es igual a  $\sigma=P/A$ . Además debido a la aplicación de esta carga, la barra se alargará ligeramente. En resistencia de materiales, estos cambios de longitud que se presentan son conocidos como deformaciones (aunque también se pueden llamar elongaciones, o contracciones). Por lo tanto se puede decir que la deformación es, el cambio de longitud de una parte (Fitzgerald, 1996).

También se tiene que definir que es la deformación total y la deformación unitaria, ya que estas se necesitan para solucionar diversos problemas. La deformación total será el cambio total de longitud del miembro que es la dimensión  $\delta$  que aparece en la figura 2.8-2. Para calcular dicha deformación total se dará más adelante un método. Ahora bien la deformación unitaria quedara definida como el cambio de longitud por unidad de longitud y expresándola algebraicamente, la deformación unitaria será:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \text{ (Ecuación 2.8-1)}$$

Donde

$\epsilon$ = deformación unitaria en plg/plg o en m/m.

$\delta$ = deformación total (cambio total de longitud) en plg o en m.

L= longitud original en plg o en m.

(Fitzgerald, 1996).

### 2.8.5.1 Relación entre esfuerzo y deformación

En el siglo diecisiete, el científico inglés Robert Hooke publicó un artículo donde se establece que el esfuerzo será directamente proporcional a la deformación unitaria, esto quiere decir que, un cuerpo elástico se estira de forma proporcional a la fuerza que se ejerce sobre él. Este hecho se conoce como la Ley de Hooke y de una manera matemática se puede expresar como  $\sigma \propto \epsilon$ , esto significa que si tenemos una barra la cual está sujeta a una carga de tensión de 150 lb, esta se alargara una determinada cantidad, pero si incrementamos la carga a 300 lb, dicho alargamiento se duplicará. Todo esto se puede convertir en una ecuación si se adiciona una constante de proporcionalidad. Dicha constante de proporcionalidad fue calculada por un científico inglés de nombre Thomas Young a principios del siglo diecinueve (1802) y se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young. El módulo de elasticidad (E) se usa para los diversos materiales que se utilizan en la ingeniería (Fitzgerald, 1996).

Al momento de introducir el módulo de elasticidad en la Ley de Hooke,  $\sigma \propto \epsilon$  se convierte en una útil e importante ecuación que se expresa como:

$$\sigma = E\epsilon \text{ (Ecuación 2.8-2)}$$

Donde:

(E) Es el módulo de elasticidad ( $lb/plg^2$ ), o ( $N/m^2$ ), o Pa.

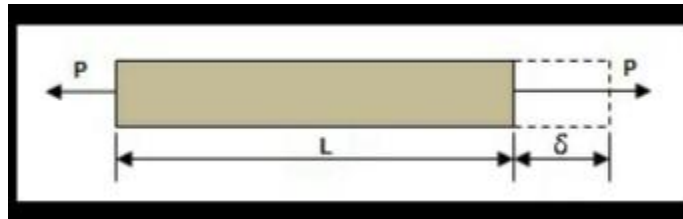
( $\epsilon$ ) Es la deformación unitaria en ( $plg/plg$ ), o ( $m/m$ ).

( $\sigma$ ) Es el esfuerzo unitario en ( $lb/plg^2$ ), o ( $N/m^2$ ), o Pa.

(Fitzgerald, 1996).

### 2.8.5.2 Cálculo de la deformación

Si se somete una barra a una fuerza exterior axial ( $P$ ), como se ve en la figura 2.8-3, dicha barra se deformará o alargará. Dicha deformación se puede demostrar experimentalmente ya que la deformación ( $\delta$ ) será directamente proporcional a la carga ( $P$ ) y a la longitud ( $L$ ), e inversamente proporcional al área de la sección transversal  $A$ .



Fuente: (Fitzgerald, 1996).

Figura 2.8-3. Barra sometido a una fuerza axial  $P$ .

Esto de una manera es razonable, ya que la Ley de Hooke nos dice que a mayor carga, mayor será la deformación, y a mayor longitud de varilla, más moléculas se presentan en cada fibra. Por lo tanto, el alargamiento acumulado de cada fibra será mayor. La deformación es inversamente proporcional al área, que quiere decir esto, que a medida que aumenta el área, habrá más fibras para soportar la carga, y por consiguiente cada fibra soportara una menor parte de dicha carga.

*Para convertir esta proporción en una ecuación, debe incluirse la constante de proporcionalidad, esta constante es el inverso del módulo de elasticidad de Young (Fitzgerald, 1996).*

De esta manera la ecuación para la deformación total de una barra cargada axialmente se expresa de la siguiente forma

$$\delta = \frac{PL}{AE'} \quad (\text{Ecuación 2.8-3})$$

Donde

$\delta$ = deformación total en plg o m

P= carga aplicada en lb, o N

L= longitud en plg o m

A= área de la sección transversal en  $plg^2$  o  $m^2$

E= módulo de elasticidad en  $lb/plg^2$  o  $N/m^2$  o  $Pa$

La ecuación 2.8-3 es exactamente la misma que la ecuación 2.8-2, pero esta tiene una forma más conveniente de resolver problemas que involucran cambios de longitud. Para mostrar la correlación entre dichas ecuaciones, se puede sustituir  $\sigma=P/A$  y  $\epsilon=\delta/L$  en la ecuación 2.8-2, como se indica a continuación:

$$\sigma = \epsilon E$$

$$\frac{P}{A} = \frac{\delta E}{L}$$

$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

(Fitzgerald, 1996).

## UNIDAD 3. MATERIALES METÁLICOS

### 3.1 ALEACIONES FERROSAS

El hombre utiliza una gran cantidad de materiales metálicos para construcción de los cuales el 90% de su peso son aleaciones ferrosas. Estas representan una familia muy extensa de materiales de ingeniería las cuales tienen un amplio rango de microestructuras así como sus propiedades. Dentro de la ingeniería la mayor parte de los diseños de ingeniería involucran a las aleaciones ferrosas ya que se requiere del soporte estructural de cargas o de transmisión de potencia (Shackelford, 1995).

Principalmente los materiales metálicos se eligen para aplicaciones en ingeniería en virtud de sus atributos. Tales atributos como son su capacidad que tienen para satisfacer los requisitos de ingeniería del componente o pieza a utilizar con sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales se deben en gran parte a sus enlaces atómicos así como a la disposición de sus átomos (estructura cristalina). Otra de las ventajas de los materiales metálicos es que se pueden tratar térmicamente para obtener propiedades mecánicas deseables. De esta forma pueden ser deformados y fabricados para obtener otra forma del producto final pero a un costo lo más bajo posible. De manera general clasificaremos a los materiales metálicos en ferrosos y no ferrosos. Dentro de los materiales ferrosos se encuentran los aceros y los hierros colados o de fundición, mientras que en los materiales no ferrosos se encuentran el resto de los metales y aleaciones. En cada grupo los materiales los materiales se clasifican y se les dan ciertas designaciones en base a la Norma E 527 de la American Society for Testing and Materials (ASTM), el Sistema Unificado de Numeración de Metales y Aleaciones (UNS, por sus siglas en inglés) (Mangonon, 2001).

Desde otro punto de vista, las aleaciones se dividen en dos extensas categorías las cuales se basan en la cantidad de carbono presente en la composición de la aleación. El acero comprende entre 0.05 y 2.0% de peso de carbono (C); mientras que los hierros fundidos comprenden entre 2.0 y 4.5% de peso de carbono (C) (Shackelford, 1995).



Como su nombre lo dice los hierros fundidos se producen principalmente como piezas fundidas a diferencia de los aceros los cuales se producen como productos forjados esto quiere decir que son deformados y después conformados respecto al moldeo, aunque también se producen piezas fundidas de acero. En los hierros fundidos, la forma preferente del carbono es el grafito elemental, mientras que en los aceros el carbono se encuentra de manera combinada como ejemplo carburo de hierro o cementita (Mangonon, 2001).

Ahora bien dentro de los aceros se hará una distinción de si se usa o no una cantidad significativa de elementos aleables que sean distintos del carbono. Una composición que sea del 5% de peso total de adiciones que sean distintas del carbono servirá como un límite arbitrario entre los aceros de baja y de alta aleación. Estas adiciones que se realizan, se seleccionan con cuidado ya que puede representar un notorio incremento en el costo del material. Esto solo se justificara con el mejoramiento esencial de las propiedades como pueden ser una mejor resistencia estructural o una mayor y mejor resistencia a la corrosión (Shackelford, 1995).

### **3.1.1 Aceros al carbono y de alta aleación**

En su mayoría, las aleaciones ferrosas se encuentran dentro de esta categoría. Esto se debe por obvias razones ya que son de un precio moderado ya que carecen de grandes cantidades de elementos aleables y aparte que son muy dúctiles para poderlas moldear con facilidad y como resultado de esto obtenemos un producto resistente y durable (Shackelford, 1995).

Los aceros se agrupan y se clasifican de acuerdo a sus características comunes. Una clasificación muy común se basa en su composición, y después se clasifican en base a su esfuerzo de fluencia o a máximo de fluencia. Los aceros también los podemos clasificar en base a sus métodos de tratamiento o acabados, también de acuerdo a su tamaño y forma (Mangonon, 2001).

Los aceros de manera general se clasifican de acuerdo al contenido de carbono y su contenido de aleantes como se muestra en la tabla 3.1-1. Estos aceros de acuerdo a su contenido de carbono se clasifican como de bajo carbono, de

carbono medio y de carbono alto o alto carbono; en la tabla 3.1-1 también se muestran los límites de composición.

Tabla 3.1-1. Clasificación de los aceros según su composición.

CONTENIDO DE CARBONO	CONTENIDO DE ALEACION
BAJO CARBONO, MENOS DE 0.25%	Carbono simples, sin elementos de aleación, salvo Mn hasta 1.65%
CARBONO MEDIO, 0.25-0.55%	Baja aleación, contenido total de aleantes <5%
ALTO CARBONO, más de 0.55% aceros para herramientas y aceros inoxidables	Alta aleación, contenido total de aleantes >5%

Fuente: (Mangonon, 2001).

De acuerdo al contenido de aleantes podemos tener aceros al carbono simples cuando no se adicionan elementos de aleantes, excepto manganeso el cual puede agregarse hasta en 1.65%, silicio hasta 0.60% y cobre hasta 0.60%. El silicio y el cobre que son de la composición no son agregados de manera intencional si no que estos son resultado del reciclado de la chatarra. Como un ejemplo de esto se puede dar el de un automóvil que cuente con radiador de cobre. Cuando agregamos otros elementos de aleación, tales como manganeso en más del 1.65%, níquel, cromo y molibdeno, el material resultante se conoce como acero de baja aleación si el contenido total de aleantes es menos de 5%, si su contenido de aleantes es de más de 5% entonces reciben el nombre de aceros de alta aleación. En esta categoría de los aceros de alta aleación encontramos los aceros para herramientas así como los aceros inoxidables los cuales describiremos más adelante. De otra manera cuando no hay presencia de aleantes, a excepción de manganeso hasta en 1.65%, los aceros serán de bajo carbono, de carbono medio y de alto carbono.

Por otro lado los aceros al carbono simples así como los de baja aleantes se designan con respecto al sistema AISI (American Iron and Steel Institute)- SAE (Society of Automotive Engineers) el cual da la codificación y designación de los aceros (tabla 3.1-2) (Mangonon, 2001).

Tabla 3.1-2. Sistema AISI-SAE de designación de aceros al carbono y de baja aleantes.

TABLA 3.1-2. Sistema AISI-SAE de designación de aceros al carbono y de baja aleantes					
Números y dígitos	Tipo de acero y contenido nominal de aleantes	Números y dígitos	Tipo de acero y contenido nominal de aleantes	Números y dígitos	Tipo de acero y contenido nominal de aleantes
Aceros al carbono		Aceros al níquel-cromo-molibdeno		Aceros al cromo	
10XX(a)	Carbono simples (1.00% de Mn max)	43XX	Ni 1.82; Cr 0.50 Y 0.80; Mo 0.25	50XXX	Cr 0.50
11XX	resulfurados			51XXX	Cr 1.02
12XX	Resulfurados y refosforados	43BVXX	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 Y 0.25; V 0.03 mín	52XXX	Cr 1.45
15xx	Carbono simples (1.00-1.65% de Mn max)	47XX	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 Y 0.35	Aceros al cromo-vanadio	
		81XX	Ni 0.30, Cr 0.40; Mo 0.12	61XX	Cr 0.60, 0.80 Y 0.95; V 0.10 Y 0.15 mín
Aceros al manganeso		86XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20		
13XX	Mn 1.75	87XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25	Acero al tungsteno-cromo	
		88XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35	72XX	W 1.75; Cr 0.75
Aceros al níquel		93XX	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12	Aceros al silicio-manganeso	
23XX	Ni 3.50	94XX	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12	92XX	Si 1.40 Y 2.00; Mn 0.65, 0.82 Y 0.85; Cr 0.00 Y 0.65
25XX	Ni 5.00	97XX	Ni 0.55; Cr 0.20; Mo 0.20	Aceros de baja aleantes y alta resistencia	
Aceros al níquel-cromo		98XX	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25	9xx	Diversos grados o calidades SAE
31XX	Ni 1.25; Cr 0.65 Y 0.80	Aceros al níquel-molibdeno			
32XX	Ni 1.75; Cr 1.07	46XX	Ni 0.85 Y 1.82; Mo 0.20 Y 0.25	Aceros al boro	
33XX	Ni 3.50; Cr 1.50 Y 1.57	48XX	Ni 3.50; Mo 0.25	XXBXX	La "B" denota un acero al boro
34XX	Ni 3.00; Cr 0.77			Aceros al plomo	
				XXLXX	La "L" denota un acero al plomo
Aceros al molibdeno		Aceros al cromo			
40XX	Mo 0.20 Y 0.25	50XX	Cr 0.27, 0.40, 0.50 Y 0.65		
44XX	Mo 0.40 Y 0.52	51XX	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 Y 1.05		
Aceros al cromo-molibdeno		(a) XX o XXX, los dos o tres últimos dígitos de estas designaciones, indican el porcentaje de carbono después de dividirlos entre 100, salvo el caso del 9XX de las calidades SAE. Las XX de las calidades SAE designan el esfuerzo de fluencia mínima en Ksi.			
41XX	Cr 0.50, 0.80 Y 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25 Y 0.30				

Fuente: (Mangonon, 2001).

En este sistema los dos primeros dígitos indican el tipo de adiciones aleantes que se le hacen al acero. Se asigna el número "10" a los aceros que son al carbono simples con manganeso (Mn) hasta en 1.00%, por otro lado el número "15" se asigna a los aceros al carbono simples con manganeso (Mn) hasta en un 1.65%. Como lo señalamos antes estos aceros pueden contener hasta silicio (Si) en un 0.60% y cobre (Cu) también en un 0.60% (Mangonon, 2001).

En la tabla 3.1-2 también tenemos indicados los códigos prefijos de dos dígitos los cuales son para diferentes adiciones de aleantes. También observamos que los últimos dos o tres dígitos, XX o XXX, los cuales al dividirlos entre 100, nos dan el peso nominal del carbono. [De esta tabla la única excepción serán las XX de 9XX, así como las diversas calidades SAE de aceros de baja aleantes y alta resistencia (BAAR; o HSLA por sus siglas en ingles). En estos aceros BAAR (HSLA) las XX representan el esfuerzo de fluencia mínimo con el que deben contar los aceros en kips (K libras) por pulgada cuadrada (ksi)]. Las letras intermedias que se encuentran entre los dos primeros dígitos de cada designación así como las XX o XXX ultimas, estas representan especiales adiciones. Como ejemplo podemos dar el del 43BVXX es un acero al níquel-cromo-molibdeno además que cuenta con adiciones especiales de boro (B) y vanadio (V). Mediante la letra L representamos los aceros al plomo, dicha letra se encuentra situada entre los dos primeros y los dos o tres últimos dígitos. La letra H se asigna al final de los códigos de designación y esto es para los aceros que deben cumplir con requisitos de endurecimiento y reciben el nombre de aceros H. Sin embargo aparte de los principales elementos aleantes que el acero contiene, también presenta concentraciones residuales de fosforo, azufre y silicio. Hablando en términos de costos, los de más bajo precio y los cuales constituyen una base para comparar costos son los aceros 10XX los cuales son de bajo carbono y se les conoce como aceros dulces. Dentro de las especificaciones, las más completas y la que son de un uso más extendido son las especificaciones de la ASTM, en donde las designaciones son diferentes a las que se utilizan en el sistema AISI-SAE. Principalmente estas especificaciones están enfocadas a un producto específico, de manera general se orientan al rendimiento del producto final manufacturado,

considerando un amplio margen de flexibilidad respecto a la composición química del acero. En la ASTM una designación es un número elegido arbitrariamente, el cual lleva como prefijo la letra “A” la cual se utiliza para designar los materiales ferrosos. Dichas especificaciones o designaciones han sido adoptadas por la ASME (American Society of Mechanical Engineers) y estas llevan como prefijo la letra “S”. Como un ejemplo de las designaciones de la ASTM un código AXYZ convertido al código de la ASME queda como SAXYZ, en donde XYZ es un número arbitrario. Dentro de la tabla 3.1-3 se encuentra una lista de ejemplos de especificaciones para placas de acero al carbono las cuales son de calidad estructural (Mangonon, 2001).

Tabla 3.1-3. Especificaciones de la ASTM para placas de acero al carbono de calidad estructural.

Especificaciones de la ASTM para placas de acero al carbono de calidad estructural	
Especificación	Tipo de acero y condición
Acero al carbono	
A36	Placas, varillas y perfiles de acero al carbono
A131	Placas, varillas, perfiles y remaches para barcos de acero al carbono y BAAR (HSLA)
A283	Placas de acero al carbono de resistencia a la tensión baja o intermedia
A284	Placas de acero al carbono-silicio de esfuerzo máximo de fluencia baja o intermedia para piezas de maquinas y construcción en general
A440	Placas, varillas y perfiles de acero al carbono de alto esfuerzo máximo de fluencia
A529	Placas, varillas, perfiles y tablestacado de acero al carbono con un esfuerzo de fluencia mínimo de 290 MPa (42 Ksi)
A573	Placas de acero al carbono para aplicaciones que requieren tenacidad a temperaturas atmosféricas
A678	Placas de acero al carbono templadas y revenidas
A709	Placas, varillas y perfiles de acero al carbono, de aleantes y BAAR (HSLA) para puentes

Fuente: (Mangonon, 2001).

### **3.1.2 Aceros de alta aleación**

Los aceros de alta aleación son aquellos cuando su contenido total de aleantes es de más del 5% y en esta categoría se encuentran los aceros para herramientas así como los aceros inoxidable (Mangonon, 2001).

Como lo habíamos mencionado las adiciones de aleación se deben realizar con cuidado y con una justificación ya que pueden ser costosas. Sin embargo hay casos en donde los diseños de ingeniería así lo requieren y de esta forma justifican las composiciones de alta aleación, esto es adiciones totales diferentes del carbono mayores del 5% de su peso. Por ejemplo los aceros inoxidable requieren contener adiciones de aleación para prevenir el daño causado por una atmosfera corrosiva. Mientras tanto los aceros que se utilizan para herramientas requieren de adiciones de aleación para que estas pueden obtener la suficiente dureza para aplicaciones de maquinado. Por otro lado las llamadas super-aleaciones estas requieren contener adiciones de aleaciones para proporcionar estabilidad para aplicaciones que son utilizadas a altas temperaturas como las paletas de las turbinas (Shackelford, 1995).

Los aceros inoxidable se sabe son más resistentes a la decoloración y a la herrumbre que los aceros al carbono de baja aleación y esto se debe a la presencia de cromo (Shackelford, 1995).

Los aceros inoxidable (AI o SS, por sus siglas en inglés) están caracterizados por tener la adición de 10.5% en peso de cromo (Cr) al hierro como mínimo. La mayoría de los aceros inoxidable, tienen un contenido máximo de cromo el cual es de alrededor del 30% y de hierro tienen un contenido mínimo de 50%. Por lo general, el carbono se encuentra presente en una proporción de 0.03% hasta un máximo de 1.2% en ciertas calidades martensíticas. La característica de inoxidable que presentan los AI se debe a la formación de una capa superficial de óxido la cual es rica en cromo y muy adherente, cuando dicha capa se rompe esta tiene la capacidad de regenerarse de inmediato en presencia de oxígeno. También se agregan otros elementos para mejorar características específicas tales elementos son: cobre, molibdeno, níquel, silicio, titanio, aluminio, selenio, nitrógeno, azufre y niobio (Mangonon, 2001).

En la tabla 3.1-4 se encuentran las designaciones por parte del UNS (Uniform Numbering System; Sistema de Numeración Uniforme) y AISI (American Iron and Steel Institute) y la composición de algunos aceros inoxidable normales y especiales. En los estados unidos, los aceros inoxidable se designan por el ANSI mediante números, con base en el UNS o a veces por medio de marcas registradas las cuales son asignadas por los productores de la especialidad. La designación proporcionada por el ANSI es la más antigua y la que tiene un uso más extendido y esta consiste en un número de tres dígitos. Las calidades 200 y 300 serán austeníticas, mientras que las calidades 400 son ferríticas o martensíticas. El sistema UNS es de reciente adopción y contiene un mayor número de aceros inoxidable ya que este incorpora a todos los de reciente creación. La designación del UNS asigna la letra S seguida de un número de 5 dígitos. Cuando los aleantes tienen un número del AISI, entonces los 3 primeros números de la designación del UNS corresponden al número de AISI, mientras que los dos últimos números indican modificaciones a la calidad. Como ejemplo tenemos que “00” es igual a sin modificación e indica la calidad AISI básica. Cuando se tienen contenidos altos de níquel (*de ~25 a 35% de Ni*), se designará la letra N seguida de 5 dígitos. Como ejemplo tenemos el N08020 para el caso de aleaciones austeníticas (Mangonon, 2001).

Los aceros inoxidable se dividen en cinco grupos presentados en la tabla 3.1-4. Los primeros cuatro se basan en la microestructura de sus aleaciones: ferrítica, martensítica, austenítica y dúplex (ferrítica más austenítica), y el último grupo que se basa en el endurecimiento por precipitación (EP). Los aceros inoxidable ferríticos cuentan con estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC, por sus siglas en inglés) como la que tiene el hierro a temperatura ambiente así como a temperaturas altas. Debido a esto no se pueden endurecer por tratamiento térmico. Su esfuerzo de fluencia con recocido varía entre 275 y 350 MPa (40 y 50 ksi). Debido a que cuentan con escasa tenacidad limitan su manufacturabilidad así

Tabla 3.1-4. Composición de algunos aceros inoxidable normales y especiales.

Composición de algunos aceros inoxidable normales y especiales											
UNS	AISI	Composición, % en peso máx.									
designaciones	tipos	C	Ma	Si	P	S	Cr	Ni	MO	N	OTROS
Aleaciones ferríticas											
S40500	405	0.08	1.00	1.00	0.040	0.030	11.50-14.50	...	...	...	0.10-0.30 Al
S43000	430	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00-18.00	...	...	...	...
Aleaciones martensíticas											
S41000	410	0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	11.50-13.00	...	...	...	...
S42000	420	0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	12.00-14.00	...	...	...	...
S44004	440C	0.95-1.20	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00-18.00	...	0.75	...	...
Aleaciones austeníticas											
S20161	Gall-Tough	0.15	4.00-6.00	3.00-4.00	0.040	0.40	15.00-18.00	4.00-6.00	...	0.08-0.20	...
S21800	Nitronic 60	0.10	7.00-9.00	3.50-4.50	0.040	0.030	16.00-18.00	7.00-9.00	...	0.08-0.20	...
S30400	304	0.08	2.00	1.00	0.45	0.030	18.00-20.00	8.00-10.50	...	...	...
S30403	304L	0.03	2.00	1.00	0.45	0.030	18.00-20.00	8.00-12.00	...	...	...
N08020	20 Cb-3	0.07	2.00	1.00	0.45	0.35	19.00-21.00	32.00-38.00	2.00-3.00	...	8 x C-1.00 Nb; 3.00-4.00 Cu
Duplex alloys											
S32950	7-Mo Plus	0.03	2.00	0.60	0.35	0.010	26.0-29.0	3.50-5.20	1.00-2.50	0.15-0.35	...
Aleaciones endurecibles por precipitación											
S17400	17-4Ph	0.07	1.00	1.00	0.040	0.030	15.50-17.50	3.00-5.00	...	...	0.15-0.45 Nb; 3.00-4.00 Cu
S45500	Custom 455	0.05	0.50	0.50	0.040	0.030	11.00-12.50	7.50-9.50	0.50	...	0.10-0.50 Nb; 1.50-2.50 Cu 0.80-1.40 Ti

Fuente: (Mangonon, 2001).



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

como el tamaño de sección deseable. Entre sus principales ventajas se encuentran que cuentan con buena resistencia así como ductilidad moderada, estas se deben al endurecimiento por solución sólida así como del endurecimiento por deformación. También ofrecen resistencia al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo por cloruros, corrosión atmosférica y oxidación, todo esto a un costo relativamente bajo (Mangonon, 2001).

Esta clase de aceros inoxidable ferríticos tienen un contenido de cromo (Cr) entre 10.5 y 30%, así como pequeñas cantidades de algunos elementos formadores de austenita tales como el carbono, níquel y nitrógeno. La utilización de estos aceros dependerá del contenido de cromo. Aleaciones que cuentan con poco cromo (<11%) cuentan con una resistencia regular a la corrosión así como a la oxidación y tienen una buena manufacturabilidad a bajo costo, estas aleaciones se utilizan extensamente en los sistemas de escape de los vehículos automotores. Las aleaciones con un contenido intermedio de cromo el cual va de 16 a 18% son utilizadas para fabricar adornos de automóvil así como utensilios de cocina, cuentan con una deficiente tenacidad y soldabilidad y con esto resulta fácil su elaboración. Las aleaciones que son ricas en cromo (10-30%) se les conoce como super-ferríticos, estas aleaciones presentan un alto nivel de resistencia a la corrosión o la oxidación (Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006).

La clase más grande en cuanto al número de aleaciones así como la utilización la constituyen los aceros inoxidable austeníticos. Estos materiales cuentan con la estructura cúbica centrada en la cara (FCC, por sus siglas en inglés) a temperatura ambiente así como a temperaturas altas; por lo tanto, no son termotratables. Tienen excelente ductilidad, formabilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión. La resistencia de estos se obtiene mediante un extenso endurecimiento por solución sólida. Los aceros inoxidable austeníticos se pueden trabajar en frío para obtener mayores resistencias que los aceros inoxidable ferríticos. Estos aceros no son magnéticos, lo que les da una gran ventaja para muchas aplicaciones, como ejemplo de esto se encuentran los stent cardiovasculares. Por otro lado desafortunadamente los altos contenidos de cromo y níquel hacen que estos sean costosos. Los aceros inoxidable austeníticos por

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

lo general contienen de 16 a 26% de cromo, de níquel pueden llegar a contener hasta un 35% y de manganeso hasta un 20%. Los principales formadores de austenita son el níquel y el manganeso, aunque el níquel y el nitrógeno también se utilizan porque estos se disuelven fácilmente en la austenita (Shackelford, 1995; Mangonon, 2001).

Los aceros inoxidable martensíticos se obtiene cuando se transforma la estructura cubica centrada en las caras (FCC, por sus siglas en ingles) de la austenita a temperaturas altas, en la estructura de la martensita (tetragonal centrada en el cuerpo) a bajas temperaturas cuando la austenita se enfría rápidamente en un líquido o en aire. En la condición de recocido que es el enfriamiento lento de la austenita en el horno, la microestructura consiste en la fase ferrítica blanda. Por lo general en los aceros de este grupo el contenido de cromo es menor que 17%, ya que de lo contrario el campo de austenita se hace muy pequeño que es necesario un control muy estricto en la temperatura de austenitización como del contenido de carbono. La combinación de dureza, su resistencia mecánica así como la resistencia a la corrosión hacen que estas aleaciones sean muy atractivas para aplicaciones como: cuchillo de alta calidad, válvulas y balines (Shackelford, 1995; Mangonon, 2001).

El grupo de los aceros inoxidable dúplex contiene mejores propiedades que los Al austeníticos o ferríticos y esto se debe a las cantidades iguales aproximadamente de austenita 50% y ferrita 50% dentro de la microestructura. Esta combinación otorga una serie de propiedades mecánicas de resistencia a la corrosión, trabajabilidad y soldabilidad que no se obtiene en ninguno de los otros aceros inoxidable. Estos aceros inoxidable dúplex cuentan con una mejor resistencia al agrietamiento por corrosión con esfuerzo debido a la fase de ferrita, cuentan con mejor tenacidad y mejor ductilidad que el grupo de los ferríticos y esto debido a la fase de austenita. La utilización de los aceros dúplex se da en una gran variedad de industrias, pueden ser las de petróleo, gas, petroquímica, pulpa, papel, así como el control de la contaminación. Es muy común su uso en ambientes acuosos los cuales contienen cloruros y que son sustitutos de los aceros inoxidable austeníticos los cuales pueden haber sufrido agrietamiento por

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

corrosión con esfuerzo (ACE) o algunas picaduras durante su servicio (Shackelford, 1995; Mangonon, 2001).

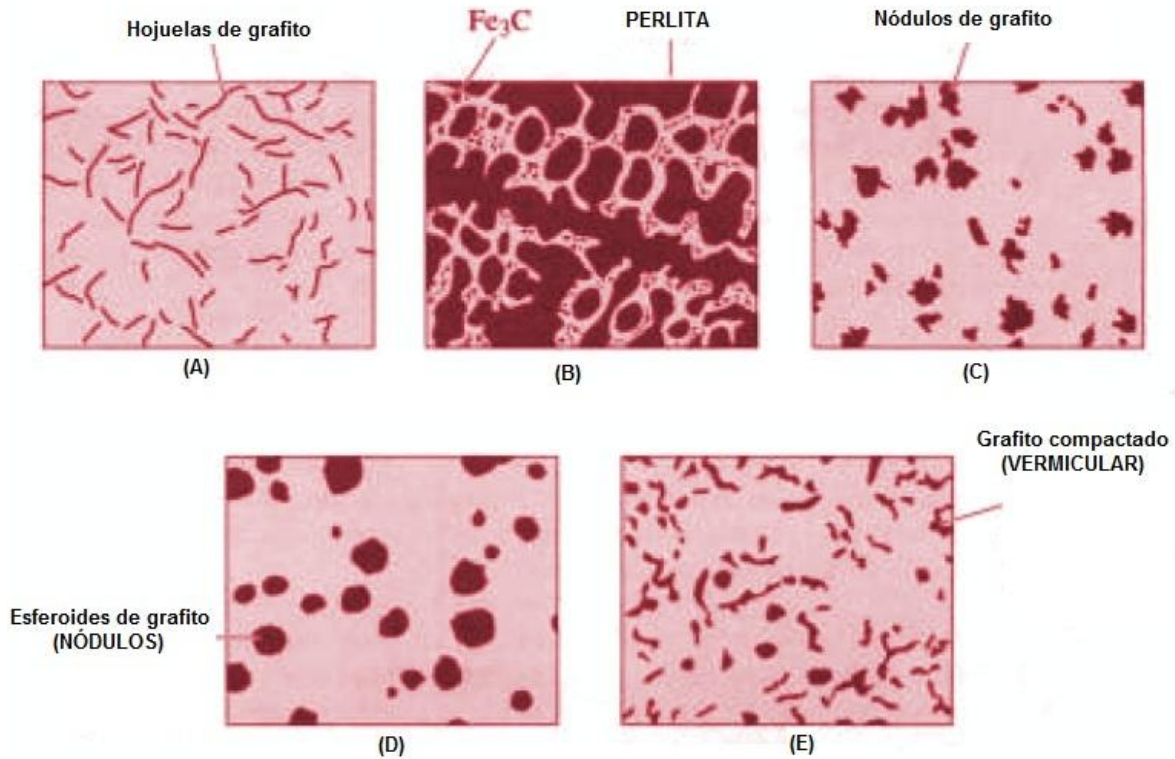
El último grupo es el de los aceros inoxidables endurecidos o endurecibles por precipitación (PH, por sus siglas en inglés), dichos aceros presentan un bajo contenido de carbono, razón por la cual el endurecimiento primario se debe al endurecimiento por precipitación, inclusive en el caso de la calidad martensítica. Dichos aceros también contienen aluminio, titanio, cobre y niobio y deben sus propiedades al endurecimiento por deformación, por solución sólida, endurecimiento por envejecimiento y a la reacción martensítica. Las calidades que se obtienen de los aceros PH son buena ductilidad y tenacidad con resistencia a la corrosión con aleaciones PH que con los AI martensíticos. Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH) cuentan con un alto esfuerzo de fluencia en tensión el cual es de hasta 1700 MPa (250 ksi). Debido a los altos niveles de resistencia mecánica, los aceros PH se utilizan mayormente en aplicaciones de industrias de alta tecnología, tal como la aeroespacial y otras más (Mangonon, 2001).

### **3.1.3 Hierros fundidos**

Los hierros fundidos los definimos como las aleaciones ferrosas que contienen de 2 a 4% de carbono (C) y también de 0.5 a 3% de sílice, que durante la solidificación pasan a través de la reacción eutéctica. Por lo general los hierros fundidos tienen temperaturas de fusión bajas, así como sus viscosidades de su fase líquida, en donde no se forman películas indeseables sobre la superficie cuando son vertidas y sufren una contracción moderada durante su enfriamiento y solidificación (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

Los hierros fundidos obtienen su forma final cuando el metal fundido es vertido sobre un molde, donde la forma del molde será conservada por el material solidificado. Existen cinco tipos generales de hierros fundidos tales como la fundición de hierro blanco, fundición de hierro gris, fundición de hierro maleable, fundición de hierro dúctil y el hierro con grafito compactado. Las microestructuras de estos cinco tipos importantes de hierros fundidos se muestran en la figura 3.1-1.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Figura 3.1-1. Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: (A) fundición gris, (B) fundición blanca, (C) fundición maleable, (D) fundición dúctil o nodular y el (E) hierro con grafito compactado.

Las fundiciones de hierro blanco regularmente contienen poco carbono y silicio, son hipo-eutécticos y solidifican con la mayor parte del carbono como cementita (figura 3.1-1). La cementita o bien el carburo de hierro es una fase dura y a la vez frágil, en consecuencia de esto, el hierro blanco es un material duro, frágil y quebradizo, el cual debe su nombre a su superficie de fractura cristalina la cual es de un color blanco característico la cual se produce cuando se rompe. Las fundiciones de hierro blanco cuentan con una resistencia a la compresión la cual es muy elevada, tienen una excelente resistencia al desgaste y también conservan su dureza durante periodos limitados hasta el calor rojo; de tal manera que este material es excelente para aplicaciones donde se exige resistencia a la abrasión,

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

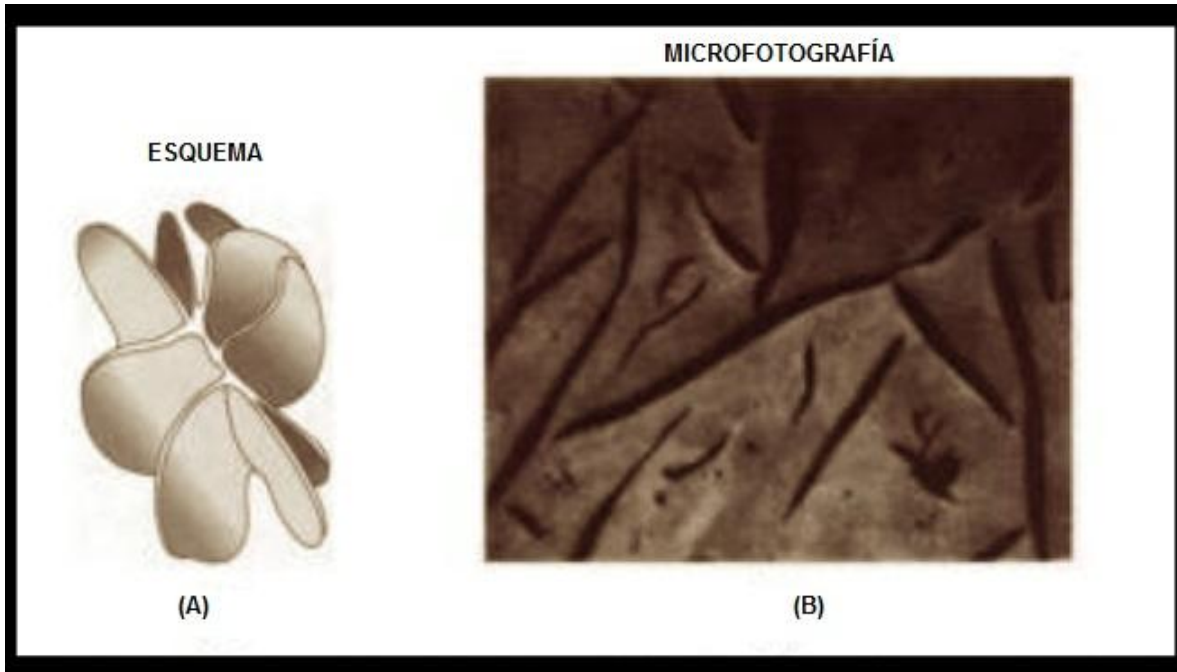
pero dichas fundiciones de hierro blanco no son maquinables (Shackelford, 1995; Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006).

Las fundiciones de hierro maleables se caracteriza porque la mayor parte de su carbono se presentara como nódulos de grafito con una forma irregular dentro de la microestructura (figura 3.1-1) esto se debe a que el hierro maleable primero es fundido como hierro blanco y después se someterá a un tratamiento de templado extenso (800 y 970°C) para producir precipitados nodulares de grafito (Shackelford, 1995; Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006).

Cuando el hierro es enfriado lentamente a partir de la temperatura de revenimiento, la austenita pasa a descomponerse en ferrita y más grafito con lo cual se produce el hierro maleable o ferrítico con el grafito en una matriz ferrítica. De otra forma cuando el hierro es enfriado rápidamente desde su temperatura de revenido o bien cuando se encuentran presentes algunos elementos de aleación los cuales inducen la transformación de la austenita en perlita, bainita o martensita, el producto resultante de esto será el hierro maleable perlítico con el grafito el cual estará en una matriz de perlita, bainita o martensita (Shackelford, 1995; Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006).

La fundición de hierro gris es la fundición de más amplio uso y esta debe su nombre al color gris de su superficie fracturada. Esta fundición se produce cuando su equivalente de carbono se aproxima al eutéctico (4.30%) así como cuando la velocidad de enfriamiento en su solidificación es pequeña. El carbono se forma como hojuelas de grafito las cuales están interconectadas en una celda eutéctica, de esta manera las fundiciones de hierro gris están constituidas de muchos racimos, es decir celdas eutécticas de hojuelas de grafito (figura 3.1-2) (Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Figura 3.1-2. (A) Esquema y (B) microfotografía del grafito en hojuelas en la fundición de hierro gris (100x).

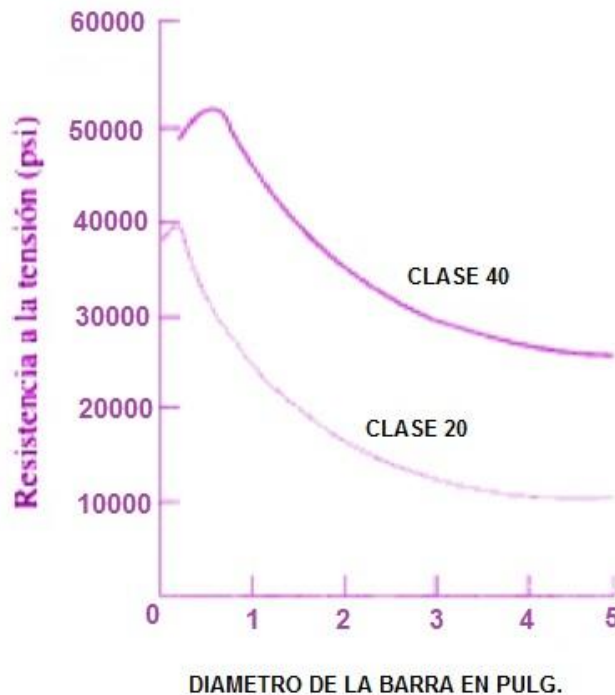
Ahora bien la presencia de las hojuelas de grafito le da varias ventajas a la fundición de hierro gris:

- 1.- capacidad para producir piezas fundidas en formas complejas como los bloques de motor enfriados por agua.
- 2.- una buena maquinabilidad inclusive a grandes niveles de dureza, sin formación de rebabas y resistencia al desgaste.
- 3.- tienen una estabilidad dimensional en condiciones de calentamiento, como discos de frenos y tambores.
- 4.- cuenta con una gran capacidad para amortiguar vibraciones como en las cajas de velocidades.
- 5.- cuentan con una retención de lubricación en el límite, tal como sucede con los cilindros de combustión interna de un motor.

Es bueno saber que los hierros grises mediante un número del 20 al 80, cuando se tiene un hierro gris clase 20 es porque tiene una resistencia a la tensión

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

nominal de 20000 psi, pero sin embargo, en el caso de piezas fundidas gruesas, sus hojuelas de grafito gruesas así como la matriz ferrítica llegan a producir resistencias a la tensión tan bajas como 12000 psi (figura 3.1-3) mientras que en las fundiciones que son delgadas la perlita así como el grafito son finos u con esto se obtienen resistencias a la tensión que son pueden alcanzar los 40000 psi.



Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Figura 3.1-3. Efecto de la velocidad de enfriamiento o del tamaño de la fundición sobre las propiedades a tensión de dos fundiciones de hierro gris.

Las hojuelas de grafito concentran esfuerzos y también causan baja ductilidad y resistencia, pero a pesar de esto las fundiciones de hierro gris cuentan con varias propiedades que son muy atractivas como una gran resistencia a la compresión, buena maquinabilidad, cuentan con una gran resistencia al desgaste por fricción o deslizamiento, resistencia a la fatiga térmica, conductividad térmica buena y una gran capacidad de amortiguamiento ante la vibración (Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

La fundición de hierro dúctil a veces es llamada hierro nodular o en Europa es conocida como hierro al grafito esferulítico (SG, por sus siglas en inglés) ya que el grafito se presenta en forma de nódulos y esferoides o esferulitas. La composición así como el E.C de los hierros grises, dúctiles y compactados de alguna manera son muy similares y el cambio de la forma laminar a la nodular o esferoidal del grafito se consigue por medio de adiciones controladas específicas de magnesio o cerio a la fundición antes de que se dé su solidificación. Los conocidos agentes nodulantes como el magnesio y el cerio reaccionan con el azufre y el oxígeno del hierro fundido y de esta manera alteran el modo de formación del grafito (Mangonon, 2001).

Por otro lado el hierro con grafito compactado es muy reciente y es una adición a las fundiciones de hierro y estos deben su nombre a la forma achatada del grafito. Esta estructura del grafito así como sus propiedades que resultan del hierro son intermedias entre los hierros dúctiles y los hierros grises. La forma del grafito compactada se observó desde hace mucho tiempo antes de su producción comercial y esta ha sido denominada grafito en cuasihojuelas, hojuelas agregadas, semiondular y vermicular. La producción comercial de estos hierros es muy similar a la de los hierros dúctiles, con adiciones de magnesio o cerio aunque es necesario agregar otros elementos como el titanio para así reducir al máximo la formación de grafito esferulítico (Mangonon, 2001).

### **3.1.4 Aleaciones solidificadas rápidamente**

En la categoría de metales amorfos se han producido varias aleaciones ferrosas. El diseño de aleaciones en estos sistemas comprende originalmente buscar composiciones eutécticas, donde se permiten enfriamientos a una temperatura de transición del vidrio a una velocidad de templado de ( $10^5$  a  $10^6$  °C/s). El boro en lugar del carbono ha resultado el elemento aleante principal en las aleaciones ferrosas amorfas y dentro de estas las aleaciones de hierro-silicio son el ejemplo principal de la comercialización que ha obtenido esta nueva tecnología. La ausencia de grano en estas aleaciones, permite que estos materiales sean más



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

fácil magnetizados pero también atractivos como núcleos de transformadores de imán suave (Tabla 3.1-5 aleaciones ferrosas amorfas).

Tabla 3.1-5. Algunas aleaciones ferrosas amorfas.

TABLA 3.1-5. Algunas aleaciones ferrosas amorfas					
Composición (% de peso)					
B	Si	Cr	Ni	Mo	P
20					
10	10				
28		6		6	
6			40		14

Fuente: (Shackelford, 1995)

Los metales amorfos además de contar con propiedades magnéticas tienen potencial excepcional para la fuerza, tenacidad y resistencia a la corrosión. Ahora bien todas estas ventajas se pueden relacionar con la ausencia de áreas no homogéneas de su microestructura, en especial las fronteras de grano. Si bien en todos los casos los métodos de solidificación rápida no producen en producto amorfo o no cristalino. Pero algunos materiales atractivos y únicos han sido resultado así como un subproducto del desarrollo de los metales amorfos. El nombre que reciben estos materiales novedosos así tanto cristalinos como no cristalinos es el de aleaciones solidificadas rápidamente. Aunque si bien la solidificación rápida para muchas composiciones aleantes no puede producir un estado cristalino, sus microestructuras de las aleaciones cristalinas solidificadas rápidamente son de grano fino esto quiere decir que son de  $0.5 \mu m$  comparados con los  $50 \mu m$  de una aleación. Aparte se pueden producir fases meta-estables así como morfologías novedosas de precipitados con la solidificación rápida donde las propiedades de estas aleaciones nuevas se son objeto de investigación activa y desarrollo (Shackelford, 1995).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 3.2 ALEACIONES NO FERROSAS

Dentro de los diseños de ingeniería en la mayoría de las aplicaciones se utilizan las aleaciones ferrosas, sin embargo las aleaciones no ferrosas (aleaciones de elementos distintos al hierro) también tienen un papel indispensable e importante en nuestra tecnología. Las aleaciones no ferrosas incluyen, pero no están limitados a, aleaciones base aluminio, cobalto, zinc, níquel, cobre, así como metales preciosos Pt, Ag, Au, Pd y otros metales. En esta sección se incluyen los metales y aleaciones cuya base no es precisamente el hierro, pero no se pueden clasificar como materiales ligeros porque no tienen baja densidad. Así como en las aleaciones ferrosas, en las aleaciones no ferrosas la lista es extensa y compleja así que solo daremos una breve lista de las principales familias de aleaciones no ferrosas (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

#### 3.2.1 Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio son conocidas por su resistencia a la corrosión así como por su baja densidad. Su fácil fabricación, su apariencia así como su conductividad eléctrica son características atractivas (Shackelford, 1995).

El aluminio sobre la tierra es el tercer elemento más abundante esto porque las reservas de mineral de aluminio son grandes porque representan el 8% de la corteza terrestre. El aluminio posee una densidad de  $2.70 \text{ g/cm}^3$  esto es, la tercera parte de la densidad con la que cuenta el acero, aparte cuenta con un módulo de elasticidad de  $10 \times 10^6 \text{ psi}$ . Aunque las aleaciones de aluminio cuenta con propiedades a la tensión inferiores que las del acero, su resistencia específica o su relación resistencia es excelente (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

El aluminio cuenta con una alta conductividad eléctrica y térmica, además de que se puede conformar con facilidad a bajas temperaturas no presenta una transición de dúctil a frágil. El aluminio no es tóxico y aparte tiene gran éxito en el reciclaje ya que para reciclarlo se utiliza solo el 5% de la energía con la que se fabrica a partir de la alúmina. Otras propiedades benéficas del aluminio son que cuenta con un

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

comportamiento no magnético además de resistencia a la corrosión y la oxidación. Si bien el aluminio no cuenta exhibe un límite de resistencia a la fatiga en algún momento dado puede ocurrir la falla debido a la fatiga, incluso a esfuerzos reducidos. Como consecuencia de que el aluminio tiene un punto de fusión bajo no funciona bien a temperaturas altas. Además las aleaciones de aluminio tienen un pobre resistencia al desgaste esto debido a que su dureza es baja (Askeland y Phulé, 2006).

Las aleaciones de aluminio las podemos dividir en dos, las cuales dependen de su método de fabricación: aleaciones para forja y aleaciones para fundición. Las aleaciones para forja las cuales obtienen su forma mediante la deformación plástica, cuentan con composiciones y microestructuras las cuales son distintas a las aleaciones para fundición, y esto refleja los diferentes requerimientos del proceso de manufactura (Askeland y Phulé, 2006).

En la tabla 3.2-1 se muestra como se designan las aleaciones de aluminio, el primer número indica los principales elementos de la aleación mientras que los números restantes indican la composición específica de la aleación. Ahora el grado de endurecimiento está definido por la designación de temple T o H, y esto depende si la aleación fue endurecida por deformación o tratada térmicamente (tabla 3.2-2). Mientras tanto otras designaciones como (O) indican si la aleación esta recocida, (W) tratada por solución o utilizada tal y (F) como fue fabricada. Los números que se encuentran después de la T o la H nos indican la cantidad de endurecimiento por deformación, así como el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos del procesamiento de la aleación (Askeland y Phulé, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Tabla 3.2-1. Designaciones de las aleaciones de aluminio.

TABLA 3.2-1. Designaciones de las aleaciones de aluminio		
Aleaciones para forja:		
1xxx (a)	Aluminio comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu Y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si está presente el magnesio
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No utilizado actualmente	
Aleaciones para fundición:		
1xx.x. (b)	Aluminio comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunos son endurecibles por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecibles por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecibles por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No utilizado actualmente	
<p>(a) El primer dígito muestra el primer elemento de aleación, el segundo se refiere a la modificación y los últimos dos dígitos indican el porcentaje decimal de la concentración de Al (por ejemplo, 1060 será una aleación con 99.6 de Al).</p> <p>(b) El último dígito indica la forma de producto, 1 o 2 es en lingote (dependiendo de la pureza) y cero es para fundición.</p>		

Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Tabla 3.2-2. Designaciones de temple para aleaciones de aluminio.

Tabla 3.2-2. Designaciones de temple para aleaciones de aluminio
F Tal y como fue fabricada (trabajo en caliente, forjada, fundida, etc.)
O Recocida (en el estado más blando posible)
H Trabajada en frío
H1x-Sólo trabajada en frío (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento).
H12-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temple O y H14
H14-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temple O y H16
H16-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temple H14 y H18
H18-Trabajo en frío que da una reducción de aproximadamente 75%
H19-Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión mayor de 2000 psi respecto a la obtenida con el temple H18
H2x-Trabajado en frío y parcialmente recocido.
H3x-Trabajado en frío y estabilizado a una temperatura baja para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
W Tratada por solución
T Endurecida por envejecimiento
T1-Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.
T2-Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T3-Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
T4-Tratada por solución y envejecida naturalmente
T5-Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente
T6-Tratada por solución y envejecida artificialmente
T7-Tratada por solución y estabilizada por sobre-envejecimiento
T8-Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente
T9-Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío
T10-Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 3.2.2 Aleaciones de magnesio

Estas aleaciones cuentan con una densidad más baja que las aleaciones de aluminio, resultado de esto se encuentran en numerosas aplicaciones estructurales así como en diseños aeroespaciales. El magnesio el tercer metal más abundante de la corteza terrestre normalmente se extrae del cloruro de magnesio concentrado en el agua de mar electrolíticamente y este es más ligero que el aluminio ya que cuenta con una densidad de  $1.74 \text{ g/cm}^3$  y se funde a una temperatura levemente inferior que el aluminio. Si bien en muchos entornos la resistencia del magnesio a la corrosión es casi igual al aluminio, pero expuesto a ambientes salinos tienen un rápido deterioro. Si bien las aleaciones de magnesio no tienen gran resistencia comparadas con las de aluminio, sus resistencias específicas son comparables. Como resultado de esto las aleaciones de magnesio se utilizan en aplicaciones aeroespaciales, maquinaria de alta velocidad, equipo de manejo y transporte de materiales. Si bien el magnesio cuenta con un módulo de elasticidad bajo el cual es de  $(6.5 \times 10^6 \text{ psi})$  así como una inadecuada resistencia a la fatiga, al desgaste y a la termofluencia. Ahora bien el magnesio representa un riesgo durante su maquinado y fundición ya que este se quema al combinarse fácilmente con el oxígeno, de manera final la respuesta del magnesio ante los diferentes mecanismos de endurecimiento es mala (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

Las aleaciones de magnesio estiradas a presión tienen un gran campo de aplicaciones en productos de consumo, tanto como en raquetas de tenis hasta armazones de maletas. Estos componentes estructurales presentan altas razones de resistencia-densidad. Como sabemos el aluminio es un material FCC y contiene números sistemas de deslizamiento (12) lo que le da una buena ductilidad por otro lado el magnesio que es HCP cuenta solo con tres sistemas de deslizamiento lo que le da su característica fragilidad. En las aleaciones de magnesio para moldeo sobresalen las aleaciones de Mg-Al que son las más utilizadas ya que en el moldeo presentan buena fluidez y tendencia a la formación

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

de microrrechupes (pequeños orificios) además del riesgo de agrietamiento en caliente. Durante la solidificación se da segregación de Al y si el contenido es superior al 8% se puede deteriorar la ductilidad y tenacidad, sin embargo si adicionamos zinc por debajo del 3% mejora la resistencia. Estas aleaciones de Mg-Al presentan un buen comportamiento a temperaturas menores a los 100°C. Las aleaciones de magnesio para forja en la actualidad no se utilizan por los problemas de deformabilidad que presentan, las únicas aleaciones que presentan mejores condiciones para la forja son las de Mg-Li en donde los contenidos de Li que son superiores al 11% transforman a la red hexagonal del magnesio en una BCC la cual es mejor para el conformado (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé 2006).

### 3.2.3 Aleaciones de titanio

Estas aleaciones así como las de Al y Mg son de una densidad más baja que la del hierro. Aunque más densas que las de Al o Mg, las aleaciones de titanio tienen la capacidad de mantener la resistencia a temperaturas de trabajo moderadas como ejemplo de esto son las temperaturas superficiales de los aviones de alta velocidad. El titanio al igual que el magnesio comparten la estructura HCP lo que le da una ductilidad característicamente baja. Por otro lado una estructura BCC presente a alta temperatura se puede estabilizar a temperatura ambiente mediante la adición de vanadio (Shackelford, 1995).

El titanio se produce partiendo del  $TiO_2$  (rutilo) y se denomina titanio por el color del óxido esto viene de la palabra títanos que significa tierra blanca. Es el cuarto metal que más abunda sobre la corteza terrestre, sus fuentes de obtención son el rutilo y la ilmenita, pero solo del 5-10% del titanio (Ti) que se extrae se transforma en metal ya que el resto se utiliza como pigmentos de pinturas y en la industria del papel (Shackelford, 1995).

El titanio ofrece una alta resistencia a la corrosión, elevada resistencia específica y excelentes propiedades a temperaturas altas. Las resistencias de 200,000 psi con su densidad de  $4.505 \text{ g/cm}^3$  le aportan unas excelentes propiedades mecánicas. Cuando tiene una capa protectora adherente de  $TiO_2$  le proporciona una gran

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

resistencia a la corrosión y la contaminación a temperaturas por debajo de los 535°C, por otro lado cuando la temperatura es mayor la capa de óxido se desintegra y entonces pequeños átomos como los del carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno terminan por fragilizar el titanio (Shackelford, 1995).

Como el titanio cuenta con una buena resistencia a la corrosión esto le permite utilizarse en equipos de procesamiento químico, implantes biomédicos así como prótesis de cadera y componentes marinos. Aparte el titanio es un material aeroespacial que lo podemos aplicar en fuselajes y componentes del motor a reacción (Shackelford, 1995).

El titanio cuenta con baja densidad así como alta temperatura de fusión y con una baja conductividad térmica (menor que todos los metales) así como bajo calor específico y un bajo coeficiente de dilatación. El titanio es alotrópico tiene una estructura cristalina HCP ( $\alpha$ ) a temperaturas por debajo de 882°C y es estable, además que tiene tendencia a adquirir textura, la cual se caracteriza por su alta resistencia inclusive a temperaturas altas, baja plasticidad así como una baja resistencia a la corrosión, aparte cuenta con mayor rigidez, buena maquinabilidad y soldabilidad y un buen comportamiento de fluencia (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé 2006).

El titanio a temperaturas superiores a los 882°C tiene una estructura BCC ( $\beta$ ) es estable, pero es más deformable, tiene peor resistencia a la corrosión, un peor comportamiento a alta temperatura y en fluencia, tiene un módulo elástico menor así como un mal comportamiento a bajas temperaturas esto por su temperatura de transición dúctil-frágil, además cuenta con una mala soldabilidad y maquinabilidad pero cuenta con buena templabilidad (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

El titanio tiene facilidad para disolver por inserción o sustitución otros elementos además que puede formar compuestos con enlace covalente o iónico. Los elementos que se disuelven estabilizan alguna de las dos fases alotrópicas del titanio y la diferente solubilidad en estas fases está relacionada con el tipo de red del soluto así como el número de electrones de valencia (Shackelford, 1995).

En la fase ( $\alpha$ ) los elementos que tienen menos de 4 electrones de valencia son estabilizadores (Al, Ga, O, N, C, Sc, B, Ge, La, Ce así como otras tierras raras) ya



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

que elevan la temperatura de transformación alotrópica y de esta manera aumentan de manera considerable la resistencia del titanio logrando disminuir la plasticidad y la tenacidad de fractura. Los elementos como Zr, Sn, Si y Hf que tienen 4 electrones de valencia se consideran como neutros ya que la adición de estos elementos en las fases ( $\alpha$ ) y ( $\beta$ ) aumenta la resistencia del titanio, aunque también son considerados elementos neutros el Y y el Th ya que estos pueden formar dispersoides. En la fase ( $\beta$ ) los elementos que tienen más de 4 electrones de valencia son los estabilizadores de esta fase y por lo general suelen ser metales de transición tales como el V, Mo, Ta, Nb, W, Cr, W, Mn, Ni, Co, Fe y Cu y el intersticial H. Las aleaciones de titanio del tipo ( $\alpha$ ) las cuales están formadas por la fase  $\alpha$  presentan poca plasticidad y por esta razón no son forjables, pero cuentan con un buen comportamiento en fluencia así como en resistencia a la oxidación en caliente. Los aleaciones del tipo ( $\alpha+\beta$ ) se forman por medio de una mezcla de ambas fases, tienen propiedades intermedias las cuales son dependientes de la temperatura, clase y cantidad de elemento aleante. Las aleaciones de tipo ( $\beta$ ) que cuentan con un 8% más de estabilizadores de la fase ( $\beta$ ) tienen una buena conformabilidad aparte de que el comportamiento es mejorable mediante tratamiento térmico. Sin embargo el consumo de estas aleaciones es muy bajo, este tipo de aleaciones como ya lo habíamos mencionado son muy forjables como esto como consecuencia de la red BCC de la fase  $\beta$  y más caras (Shackelford, 1995).

El titanio puro es una aleación Ti-O del tipo  $\alpha$ . Los grados de pureza que contiene poseen menor dureza y resistencia a la tracción sin embargo las impurezas como el oxígeno aumentan la resistencia del titanio (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé 2006).

### **3.2.4 Aleaciones de cobre**

Estas aleaciones de cobre tienen diversas propiedades. Su excelente conductividad eléctrica hace que las aleaciones de cobre sean las principales utilizadas en los cables eléctricos. El cobre el cual tiene una densidad de  $8.93\text{ g/cm}^3$  tiene una temperatura de fusión de  $1083^\circ\text{C}$ . Como ya lo habíamos

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

mencionado su conductividad eléctrica es excelente y esta se puede mejorar mediante procesos de afino (eliminación de impurezas) lo que lo hace un material idóneo para la fabricación de cables eléctricos. También su excelente conductividad térmica con la que cuenta le permite su uso en radiadores de auto así como en cambiadores de calor. El cobre cristaliza en la red FCC y por esta razón es muy deformable y aparte cuenta con una gran conformabilidad en frío (en caliente no la tiene tanto debido al exceso aumento en el tamaño del grano). El cobre cuenta también con una resistencia media que va de los 200 a 350 MPa y aparte se pueden obtener alargamientos de rotura de hasta 40X100. Es un metal criogénico con lo cual a 196°C su resistencia mecánica se incrementa en un 50%. Sin embargo no se mecaniza fácilmente debido a ser un material excesivamente blando pero esto se puede solucionar añadiendo algo de P o S. Es muy soldable. El cobre el cual muestra una excelente resistencia a la corrosión por agua de mar y en otros ambientes corrosivos llega a ser atacado por los halógenos en húmedo. El cobre siempre está cubierto por una capa protectora de óxido la cual va crecer con la temperatura y puede llegar a descamarse. Sin embargo al oxidarse, se cubre de una capa verdosa y es esta coloración lo que hace que en algunas ocasiones se utiliza de manera decorativa en arquitectura. Con la adición de aleantes se busca mejorar sus propiedades mecánicas así como su resistencia al desgaste aunque de esta manera se perjudica su conductividad y también su color. En la tabla 3.2-3 se encuentran las familias clave de las aleaciones de cobre (Shackelford, 1995).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Tabla 3.2-3. Clasificación del cobre y las aleaciones de cobre.

TABLA 3.2-3. Clasificación del cobre y las aleaciones de cobre			
familia	Elemento aleante principal	Solubilidad sólida en (%) <sup>a</sup>	Números <i>UNS</i> <sup>b</sup>
Cobres, aleaciones al alto cobre	C		C10000
Latones	Zn	37	C20000, C30000, C40000, C66400-C69800
Bronces de fósforo	Sn	9	C50000
Bronces de aluminio	Al	19	C60600-C64200
Bronces de silicio	Si	8	C64700-C66100
Níqueles de cobre, platas de níquel	Ni	100	C70000

Fuente: (Shackelford, 1995).

### 3.2.5 Latones

Son aleaciones de cobre donde el zinc será el soluto por sustitución predominante. En estas aleaciones su intervalo de solidificación es muy pequeño y por esta razón se obtienen por medio de moldeo y hay por lo menos tres familias de latones. Los latones  $\alpha$  que tienen un contenido inferior al 40% de zinc y de red FCC y son específicos para trabajar en frío. Estos se utilizan en instrumentos musicales, monedas, tuberías, bisutería, etc. Los latones  $\beta$  los cuales tienen entre 47 y 55% de zinc se caracterizan porque a bajas temperaturas forman una fase ordenada, dura y frágil,  $\beta'$ , la cual a una alta temperatura se transforma en la fase  $\beta$  la cual es desordenada y muy deformable. Estos latones  $\beta$  se utilizan como aleación de soldadura porque cuentan con una temperatura de fusión inferior a lo de los latones  $\alpha$ . Los latones  $\gamma$  los cuales tienen un porcentaje de zinc el cual es superior al 60% no se utiliza industrialmente por su fragilidad (Shackelford, 2005).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 3.2.6 Bronces

Estos principalmente son aleaciones de cobre-estaño que además contienen otro elemento de aleación como: Ni, Pb, P y Zn. Los broncees están divididos en dos grupos: los monofásicos que están formados por una fase única  $\alpha$  FCC y los de estructura compleja ( $\alpha+\beta$ ) lo que se emplean para moldeo en la fabricación de cojinetes. Los broncees en comparación a los latones resisten mejor la corrosión y son criogénicos, esto es, que su comportamiento mejora cuando la temperatura disminuye. En los broncees al plomo, los contenidos del menos del 7% de Pb mejoran su maquinabilidad aunque también puede actuar como lubricante. En los broncees al fósforo las pequeñas cantidades de este material en solución sólida aumentan sus propiedades mecánicas. Cuando se agrega zinc a los broncees al zinc se mejora su colabilidad y con esto se abarata el bronce. Los broncees al aluminio (cuproaluminios) son aleaciones de Cu-Al que tienen entre un 5 y 11% de Aluminio, los cuales combinan buenas propiedades mecánicas así como una buena resistencia a la corrosión que es principalmente inter-granular. Cuando el contenido de aluminio es superior al 8% los hace tratables térmicamente. Son criogénicos lo cual permite trabajarlos a temperaturas de hasta 400°C y mantienen sus propiedades. En los cupro-berilios se utiliza la adición más típica de berilio que es de entre un 0.4 y 2% y tratamientos térmicos de solución y maduración posterior le permite obtener a las aleaciones de cobre más resistentes, las cuales tienen resistencias a tracción de hasta 1400 MPa que se pueden comparar con la de los aceros de alta resistencia. También se comportan muy bien a la corrosión y presentan un bajo módulo de elasticidad, estos se emplean en resortes o muelles de precisión así como en electrodos para soldadura, pero su principal inconveniente es su precio alto (Shackelford, 2005).

### 3.2.7 Aleaciones de níquel

Estas aleaciones tienen mucho en común con las aleaciones de cobre. El níquel, que cuenta con una red FCC es lo que hace muy deformable, aparte posee un excelente comportamiento a la corrosión y la oxidación a temperaturas altas. El

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

níquel cuenta con buena resistencia mecánica a temperaturas altas así como una alta conductividad eléctrica y este se utiliza tanto en equipos electrónicos como eléctricos. La posibilidad de solubilidad que existe entre níquel y cobre permite que haya aleaciones donde se aprovecha el mecanismo de endurecimiento por solución. Monel es el nombre que se le asigna a las aleaciones comerciales que cuenta con una relación Ni-Cu de aproximadamente 2:1 en peso, el Monel cuenta con una alta resistencia, resistencia excelente a la corrosión así como buena soldabilidad. El níquel es más duro que el cobre, pero sin embargo el Monel es más duro que el níquel (Shackelford, 2005).

### **3.2.8 Súper-aleaciones**

Las condiciones más críticas a las que se puede someter un material son las altas temperaturas, los ambientes agresivos y las cargas elevadas. La temperatura afecta al material ya que esta cambia su comportamiento en servicio y con ello su vida útil. Aparte de que a grandes temperaturas se presentan fenómenos los cuales no se producen a una temperatura ambiente. En estas condiciones dadas es necesario considerar otros factores como lo son fluencia y esfuerzos térmicos, corrosión, oxidación, influencia de la temperatura en sus características mecánicas así como en sus propiedades físicas como es el coeficiente de dilatación y conductividad térmica y las súper-aleaciones cumplen con estos requisitos (Shackelford, 2005).

#### **3.2.8.1 Súper-aleaciones base níquel**

Las super-aleaciones base níquel tienen una de las mejores relaciones propiedades/estructura de todas las súper-aleaciones en un rango de temperaturas que va de los 650 a 1100°C. Tienen una buena resistencia a tracción a grandes temperaturas, una resistencia a la rotura por fluencia de hasta por 5000 horas, resistencia a la fatiga térmica a bajos y altos ciclos, así como resistencia a la oxidación en caliente, todo esto con el fin de asegurar de 20000 a 50000 horas de vida. Las aleaciones base níquel tienen el objetivo de mejorar las características como son la tracción, fatiga, fluencia y estabilidad superficial del

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

material. Las aleaciones Inconel las cuales están compuesta por níquel, cromo y hierro, así como las Hastelloy que contienen níquel, hierro, cromo y molibdeno, las cuales incorporan titanio son importantes ejemplos de súper-aleaciones base níquel y estas son utilizadas cámaras de combustión, toberas y álabes (paletas curvas) de turbina y son fundamentales para el desarrollo de la industria aeroespacial (Shackelford, 2005).

### **3.2.8.2 Súper-aleaciones base cobalto**

En estas aleaciones a pesar de que el cobalto no tiene una red FCC a temperaturas bajas la cual es importante para tener un buen comportamiento en caliente, con la adición de ciertos aleantes como son el Fe y Ni logran disminuir la temperatura de transformación alotrópica. Estas súper-aleaciones tienen una serie de ventajas frente a las de níquel, como lo son temperatura de fusión mayor, mayor resistencia a la corrosión y a la oxidación en caliente y esto debido al contenido de cromo el cual es de 20 a 30% y de manera general tienen una mayor resistencia a la corrosión-fatiga (Shackelford, 2005).

### **3.2.9 Aleaciones de zinc**

El zinc es un metal, de color blanco azulado que tiene una red HCP y que presenta fluencia a temperatura ambiente. El zinc es muy delicado a la corrosión electroquímica y este es atacado por la humedad. El zinc se emplea en los aceros en procesos de galvanizado, en pinturas (óxidos) y para la obtención de latones. Las aleaciones de zinc que incluyen Cu y Al son muy moldeables y esto debido a que tienen una baja temperatura de fusión y la ausencia de reacción con crisoles y matrices de acero. Las aleaciones de zinc tienen aplicación en piezas de automóvil y la ferretería, aunque el uso en esta industria disminuye constantemente a causa del ahorro de peso que se obtiene con otros materiales (Shackelford, 2005).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 3.2.10 Aleaciones de plomo

El plomo es un material versátil y durable. Fue desarrollado no por sus propiedades mecánicas si no por sus propiedades químicas ya que tiene una estructura FCC, es muy deformable con cargas bajas y a temperatura ambiente tiene fluencia. Este material es muy resistente al agua ya que hace casi 2000 años en los baños públicos de Bath, Inglaterra los romanos instalaron tuberías de plomo y aun se usan. Por otro lado el plomo es un material que resiste muy bien al ácido sulfúrico, además de que absorbe la radiación  $\gamma$  y  $\beta$  y tiene una excelente colabilidad y se obtiene muy fácil por moldeo. Algunas aleaciones de plomo incorporan As, Sb, Sn, Te o Ca que son materiales versátiles y con durabilidad. Las aleaciones de plomo se utilizan en las baterías (rejillas) que son aleadas con antimonio o calcio, también en aportes de soldadura donde es aleado con estaño y en elementos de protección contra la radiactividad o en estructuras de control sonoro, sin embargo la toxicidad del plomo lo restringe en algunas aplicaciones y aleaciones (Shackelford, 2005).

### 3.2.11 Aleaciones de estaño

El estaño es un metal que funde a 231°C y es muy resistente a la corrosión ambiental inclusive en condiciones atmosféricas conserva su brillo metálico, también es resistente a los ácidos orgánicos de tal modo que si entra en contacto con los alimentos no es toxico. En frio este material es muy deformable (por encima de 15°C tiene la fase  $\beta$  es tetragonal y dúctil) al grado que se pueden obtener laminas muy delgadas, de hasta 0.0025 mm de espesor. Este se utiliza en recubrimientos sobre todo en el sector alimenticio. El cobre, plomo y antimonio son los elementos más importantes de aleación ya que elevan las propiedades mecánicas. El estaño es un metal muy interesante para el moldeo con precisión y esto se debe a su baja temperatura de colada (Shackelford, 1995).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 3.2.12 Metales refractarios

Existen aplicaciones donde es necesario superar los 1000°C y se necesitan materiales con altos puntos de fusión y que mantengan sus propiedades a temperaturas elevadas. Los metales refractarios son los que tienen una temperatura de fusión superior a los 2000°C entre ellos destacan el W, Mo, Ta, Re, Nb, inclusive se puede incluir al cromo. Todos estos tienen diversos problemas como su elevada densidad, por encima de 600°C se oxidan fácilmente. Para que su resistencia a la oxidación mejore se utilizan revestimientos de cerámicos o platino los cuales deben soportar unos 1600°C o se alean con algunos elementos como lo son: Cr, Si o Al. Aparte todos ellos, excepto el Re, cuentan con una red BCC lo cual es un inconveniente porque la red FCC presentaría un mejor comportamiento frente a temperaturas altas. Los metales refractarios del grupo V B a altas temperaturas son dúctiles. El niobio cuenta con una temperatura de fusión de 2468°C y este se emplea para la captura de neutrones rápidos, por la baja sección eficaz. El niobio tiene mejor resistencia específica que el tántalo, el cual es un material que resiste muy bien la corrosión y se utiliza frecuentemente en la industria química.

Los metales refractarios del grupo VI B tienen una alta temperatura de transición dúctil-frágil para el Mo es de 33°C y para el W de 343°C, a temperatura ambiente son frágiles. El molibdeno el cual es de los más abundantes, cuenta con buenas propiedades mecánicas y tiene la mejor resistencia específica y el mejor módulo elástico específico. Posee una excelente conductividad térmica. El wolframio tiene una temperatura de fusión de 3410°C y de los materiales refractarios tiene el mayor módulo de elasticidad, este no puede ser endurecido por solución sólida ni precipitación y se refuerza mediante dispersión de óxidos principalmente de torio (Shackelford, 1995).



# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 3.2.13 Metales preciosos

Aquí se encuentran el oro, osmio, iridio, platino, paladio, rutenio, rodio y plata. Tienen una gran resistencia a la corrosión y aparte diversas propiedades derivadas lo que justifica el número de aplicaciones de costo elevado de estos metales y aleaciones. Las aplicaciones más conocidas son las aleaciones dentales, recubrimientos de platino en los convertidores catalíticos y circuitería de oro en la industria electrónica (Shackelford, 2005).

### 3.3 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS

Como sabemos los materiales metálicos cuentan con muchas propiedades físicas, químicas y mecánicas que son características de estos materiales, a continuación describiremos brevemente algunas de las más importantes.

#### 3.3.1 Ductilidad

La ductilidad es la propiedad con la que cuenta un material la cual permite impartirle varias formas sin que este se rompa. Un material que adquiere varias formas sin romperse se dice que es dúctil, mientras que un material que no cambia de forma o este lo hace con dificultad o se rompe a este material se le llamara frágil o quebradizo. Por lo tanto la ductilidad influye directamente en la tenacidad así como la capacidad de fabricar un componente: un material dúctil tiene mayor tenacidad a la fractura que un material frágil (Mangonon, 2001).

#### 3.3.2 Deformación elástica

Cuando una pieza de metal es sometida a una fuerza de tracción uniaxial se produce una deformación en el metal, si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la carga se dice que el metal sufrió un deformación plástica o una deformación no permanente (Shackelford, 1995).

#### 3.3.3 Deformación plástica

Cuando a una pieza de metal le agregamos una carga y si el metal se deforma mucho de tal manera que no pueda recuperar sus dimensiones originales se dice

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

que ha sufrido una deformación plástica. La deformación plástica es una deformación permanente ya que no se recupera al retirar la carga (Shackelford, 1995).

### **3.3.4 Conductividad térmica**

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales la cual es una medida de velocidad con la cual el calor se transfiere a través de un material. La conductividad térmica es similar al coeficiente de difusión y es una propiedad sensible a la microestructura (Askeland y Phulé 2006).

### **3.3.5 Maleabilidad**

Es la propiedad que tienen los materiales blandos de adquirir una deformación por medio de una descompresión sin romperse. A diferencia de la ductilidad, que nos permite obtener hilos (alambres), la maleabilidad favorece para obtener delgadas láminas de material, como por ejemplo el papel aluminio. El elemento más maleable es el oro con el que se pueden malear láminas de una diezmilésima de milímetro de espesor. Los metales se pueden laminar con martillo o rodillos, y se dice que tienen la cualidad de la maleabilidad. Durante el proceso, la forma o el grueso del metal cambia notablemente. Cuando laminamos un metal, sus átomos son forzados a moverse unos sobre otros, esto es de una posición de la estructura cristalina a otra. Sin embargo, como las fuerzas de cohesión son grandes, y los átomos no se separan durante el proceso de reagrupación, el metal se mantiene como unidad, mientras su forma cambia. También la plata, el oro, el platino, el cobre, el aluminio y el hierro, son metales que son altamente maleables y dúctiles (González-Cabrera, 1996).

### **3.3.6 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la que nos refleja el movimiento de un portador de carga en un campo eléctrico. El más destacado portador de carga es el electrón, esto se debe a que es ligero y aparte que existe conductividad eléctrica cuando los electrones pueden deslocalizarse. Estos electrones libres están en movimiento

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

constante dentro del material metálico y ante la ausencia de un campo eléctrico su movimiento aleatorio no produce un flujo neto de electrones. En otras palabras podemos decir que la conductividad eléctrica es la capacidad que tiene un material de dejar pasar la corriente eléctrica, dejar circular libremente las cargas eléctricas. La conductividad eléctrica depende de la estructura molecular y atómica del material, los metales que son buenos conductores es gracias a su estructura que cuenta con muchos electrones con vínculos débiles lo que permite su movimiento (Mangonon, 2001).

### **3.3.7 Tenacidad**

La tenacidad es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la ruptura. Esta propiedad de tenacidad a la fractura es análoga a la propiedad de resistencia a la cedencia. En un ensayo de tensión, el material soportara un esfuerzo y permanecerá elástico hasta que el nivel de esfuerzo aplicado exceda el esfuerzo de fluencia. Si este esfuerzo de fluencia se toma como criterio de falla, dicho material fallara una vez cuando el nivel de esfuerzo sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material. Cuando se presenta una grieta en el material, el esfuerzo global aplicado en dirección opuesta a la grieta se intensifica o se incrementa en el extremo de la grieta (Mangonon, 2001).

### **3.4 APLICACIONES**

Más del 90% de los materiales metálicos que utiliza el hombre son aleaciones ferrosas. Estas aleaciones representan una gran familia de materiales de ingeniería que cuentan con un gran rango de microestructuras así como de sus correspondientes propiedades. Como sabemos la mayoría de los diseños de ingeniería necesitan del soporte estructural de cargas o de transmisión de potencia y estos involucran aleaciones ferrosas. Como es bien sabido los metales y las aleaciones suelen dividirse en dos clases: en aleaciones y metales ferrosos que contienen un alto porcentaje de hierro, como el hierro fundido y el acero y a su vez también en aleaciones y metales no ferrosos los cuales carecen de hierro o tienen cantidades pequeñas. Como ejemplos de metales no ferrosos se encuentra

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

el cobre, zinc, aluminio, níquel y titanio. La diferencia entre aleaciones ferrosas y no ferrosas se hace debido a su empleo y su producción considerablemente mayor de aceros y hierros fundidos en comparación con otras aleaciones. Como sabemos los metales se utilizan en numerosas industrias como lo son la aeronáutica, la biomédica, en los semiconductores, electrónica, energética, en estructuras civiles y de transporte. También muchas aleaciones metálicas como las de titanio, acero inoxidable y basadas en cobalto se utilizan en las aplicaciones biomédicas, como implantes ortopédicos, válvulas cardíacas, tornillos y dispositivos de fijación, y todo esto debido a que estos materiales ofrecen gran dureza, resistencia y biocompatibilidad. Las aleaciones intermetálicas constituyen una clase de materiales metálicos que tienen combinaciones de propiedades únicas que son atractivas para muchas industrias. Estas aleaciones intermetálicas cuentan con un punto de fusión muy alto lo que las hace utilizables en aplicaciones aeronáuticas como los motores de jet. Como ya lo habíamos mencionado antes los metales se usan ampliamente en muchas aplicaciones biomédicas. Algunas aplicaciones son específicas para sustituir tejidos defectuosos o dañados, como un ejemplo de esto es lo que pasa en las aplicaciones ortopédicas en donde una parte o la totalidad de un hueso o articulación se sustituye o se refuerza con aleaciones de metal. En la odontología los metales se usan como material de relleno para obturaciones, se utiliza en tornillos de soporte para implantes dentales así como material de sustitución dental. También se utilizan en instrumentos médicos, dentales y quirúrgicos. Los aceros inoxidables austeníticos son los que más se usan en aplicaciones ortopédicas, se utiliza como tornillos para huesos, placas y clavos intramedulares para huesos. Las aleaciones de magnesio que son muy ligeras se utilizan en la industria aeroespacial y también en el equipo de manejo de materiales. Las aleaciones de titanio las cuales son caras cuentan con una combinación de resistencia y ligereza lo que las hace que se apliquen en partes estructurales de las aeronaves y las aleaciones de níquel que cuentan con alta resistencia a la oxidación y corrosión son aptas para utilizar en industrias

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

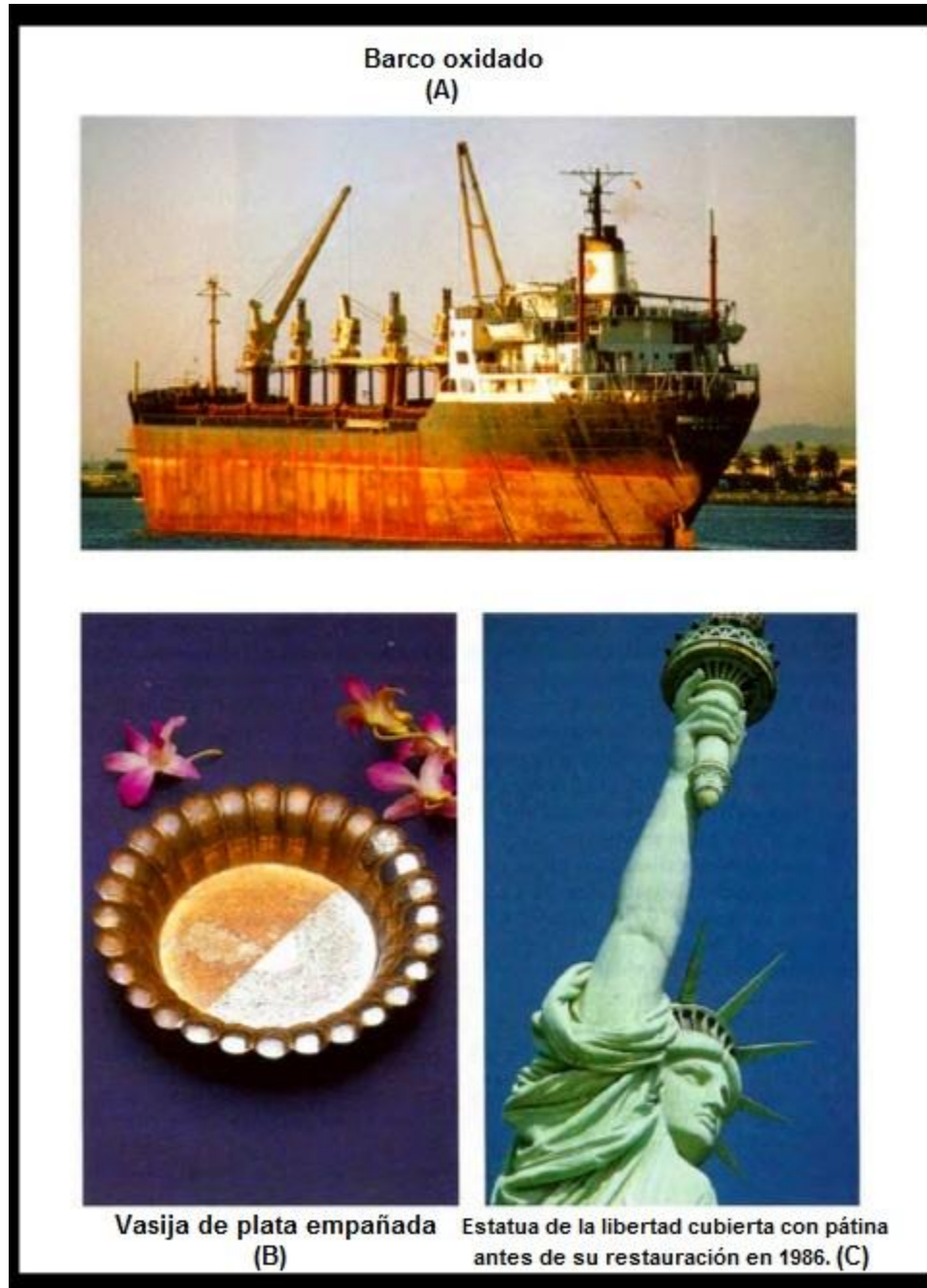
petroleras y de procesamiento químico (Shackelford, 1995; Askeland y Phulé, 2006).

### **3.5 CORROSIÓN**

La corrosión la podemos definir como el deterioro de un material producido por un ataque químico en su ambiente, dado que la corrosión es una reacción química, la velocidad a la que se lleva a cabo depende de la temperatura así como de la concentración de los reactivos y productos. También el esfuerzo mecánico así como la erosión pueden llegar a contribuir a la corrosión (Smith y Hashemi, 2006). La corrosión se refiere al proceso del ataque químico sobre los metales ya que estos son susceptibles a este ataque ya que tienen electrones libres y estos pueden establecer celdas electroquímicas en su estructura, si bien la mayoría de los metales son corroídos por el agua y la atmósfera, también se pueden corroer por ataques químicos de otras soluciones químicas así como metales líquidos (Smith y Hashemi, 2006). En nuestro alrededor se ven muchos ejemplos de lo que es la corrosión, estos pueden ser el hierro oxidado, la capa verde que se forma en el cobre y el latón así como la plata empañada.

La corrosión ocasiona en los edificios daños considerables, también lo hace vehículos, barcos y puentes (figura 3.5-1) (Chang, 2007).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



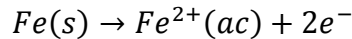
Fuente: (Chang, 2007)

Figura 3.5-1. Ejemplos de corrosión: A) barco oxidado, B) una vasija de plata empañada y C) la estatua de la libertad cubierta con pátina antes de su restauración en 1986.

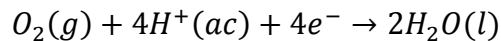
El típico ejemplo de corrosión lo observamos en la formación de óxido en el hierro, esta oxidación se da cuando el metal entra en contacto con el agua y el oxígeno.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

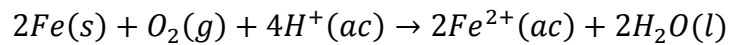
Se dice que las reacciones implicadas en este proceso son muy complejas y aun no se conocen en su totalidad pero podemos decir que las dos principales etapas son las siguientes. En primera una parte de la superficie del metal funcionara como un ánodo y es donde se lleva a cabo la oxidación.



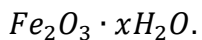
Los electrones que fueron donados por el hierro son los que reducen el oxígeno atmosférico a agua en el cátodo, el cual es a su vez otra región de la misma superficie del metal.



La reacción redox global es la siguiente



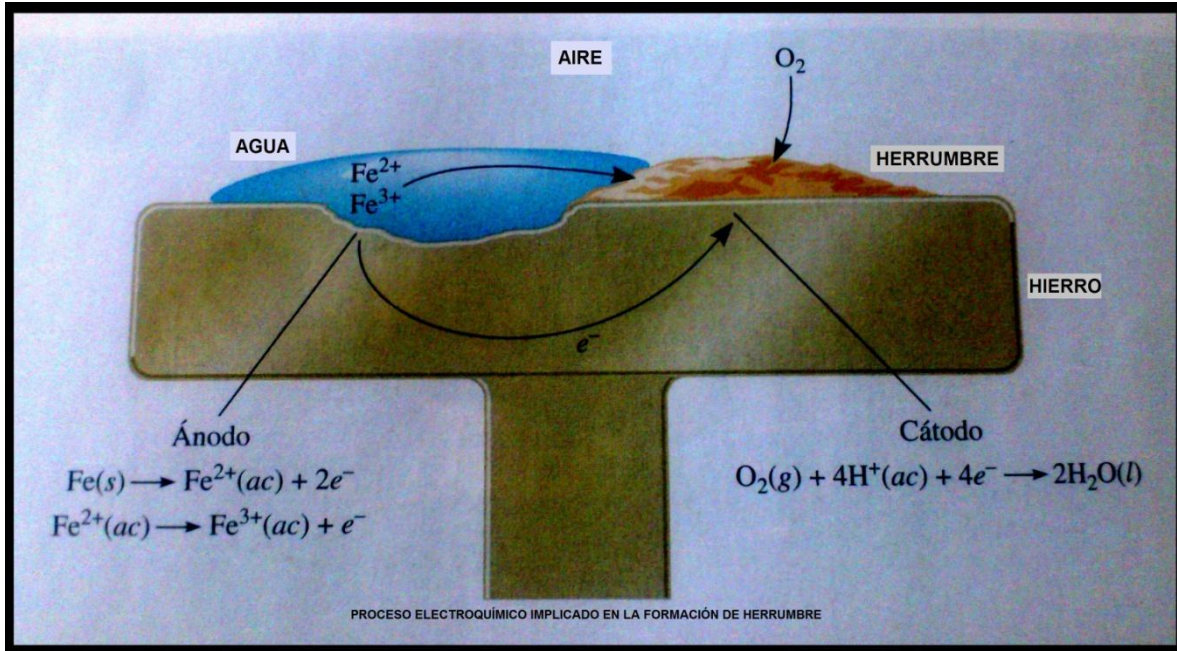
Observamos que la reacción se produce en un medio ácido; donde parte de los iones  $H^{+}$  vienen de la reacción del dióxido de carbono atmosférico con el agua, en donde se forma  $H_2CO_3$ . Donde los iones  $Fe^{2+}$  que se forman en el ánodo posteriormente se oxidan por el oxígeno. Esta forma hidratada de óxido de hierro (III) es lo que se conoce como herrumbre. La cantidad de agua asociada con el óxido de hierro es variable y se representa por medio de la siguiente formula.



Como la figura 3.5-2 nos muestra, vemos la manera en la que se forma el óxido de hierro. Este circuito eléctrico se completa por la migración de electrones y de iones de aquí que la oxidación es tan rápida en el agua salada. En climas fríos las sales  $NaCl$  o  $CaCl_2$  que se esparcen sobre las carreteras congeladas para derretir el hielo y la nieve son las principales causantes de la oxidación de automóviles. En conclusión podemos decir que la corrosión es un proceso destructivo dentro de la ingeniería y representa una enorme pérdida económica (Chang R. 2007).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Chang, 2007).

Figura 3.5.2. El proceso electroquímico implicado en la formación de herrumbre.

Los iones  $H^+$  los proporciona el  $H_2CO_3$ , que se forma cuando el  $CO_2$  se disuelve en agua.

### 3.5.1 Tipos de corrosión

Los tipos de corrosión se clasifican de acuerdo al aspecto del material corroído. Se pueden identificar muchas formas aunque algunas se interrelacionan en diversos grados.

- \* Ataque corrosivo uniforme o general
- \* Corrosión de dos metales o galvánica
- \* Corrosión por picaduras
- \* Corrosión por agrietamiento
- \* Corrosión intergranular
- \* Corrosión bajo tensión
- \* Corrosión por erosión
- \* Daño por cavitación
- \* Corrosión por desgaste
- \* Fuga selectiva



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

### **3.5.1.1 Ataque corrosivo uniforme o general**

Este ataque se caracteriza por una reacción química o electroquímica la cual de manera uniforme procede sobre la superficie del metal expuesta al ambiente corrosivo. Con base a su peso este ataque uniforme representa la mayor destrucción de los metales particularmente de los aceros. Este ataque corrosivo es fácil de controlar mediante recubrimientos protectores, inhibidores y protección catódica (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.5.1.2 Corrosión de dos metales o galvánica**

En la corrosión galvánica se debe tener cuidado al juntar metales distintos esto debido a que existe una diferencia en su potencial electroquímico y este puede originar la corrosión. Como sabemos el acero galvanizado el cual es un acero que está recubierto con zinc es un claro ejemplo en donde un metal en este caso el zinc se sacrifica para proteger al acero. El zinc el cual se sumerge en caliente o electrorrecubre en el acero es anódico con respecto a este y por ello se corroe y así protege al acero, el cual es cátodo en esta celda galvánica. Otro caso que se da en el uso de dos metales diferentes es la placa de estaño la cual se utiliza para lata de estaño, estas placas de estaño son producidas mediante electrodeposición de una placa de estaño sobre una hoja de acero. Por su naturaleza no toxica de las sales del estaño estas hacen que estas placas sean útiles para materiales que contengan alimentos. En condiciones de exposición atmosférica por lo regular el estaño es catódico respecto al acero, de esta forma si el exterior de una pieza de placa de estaño es perforada y se expone a la atmosfera el estaño no se corroerá pero el acero sí, pero en la ausencia de oxígeno atmosférico el estaño es anódico respecto al acero lo que hace que el primero sea un material útil para empaque de comidas y bebidas, así como vemos en este ejemplo el oxígeno es un factor importante dentro de la corrosión galvánica. Otro factor importante en la corrosión galvánica de dos metales es su coeficiente entre las áreas catódicas y anódicas a este efecto se le conoce como efecto del área. Cuando se presenta una relación de área catódica-anódica desfavorable esta consiste en una gran área catódica y una pequeña área anódica. Cuando hay cierta cantidad de flujo de corriente hacia

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

el par metálico como sucede en los electrodos de cobre y hierro de diversos tamaños la densidad de corriente será mucho mayor para el electrodo más pequeño que para el electrodo de mayor tamaño, en consecuencia el electrodo anódico más chico se corroerá más rápido. En resumen, podemos decir que se debe evitar un cociente entre una gran área del cátodo y una pequeña área del ánodo (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.5.1.3 Corrosión por picaduras**

Este ataque corrosivo es caracterizado por hoyos o picaduras que se presentan en un metal, este ataque es muy destructivo en las estructuras de ingeniería ya que puede llegar a perforar el metal, de otra forma si no se presenta perforación en las estructuras se pueden aceptar con un mínimo de picaduras. Estas picaduras suelen ser muy difíciles de localizar ya que se pueden encontrar recubiertas por los productos de corrosión. Además debido a que las picaduras varían en número y profundidad de las mismas es difícil evaluar el daño que producen. Como consecuencia de esto las picaduras pueden producir de manera repentina fallas inesperadas. Estas picaduras necesitan un periodo de iniciación pero cuando ya han iniciado crecen a una velocidad la cual siempre va en aumento, estas picaduras por lo general se desarrollan en dirección de la gravedad y sobre las superficies inferiores de los equipos de ingeniería. Se dice que las picaduras comienzan en lugares donde hay aumentos locales en cuanto a la velocidad de corrosión. También las inclusiones, otras heterogeneidades estructurales y heterogeneidades composicionales en la superficie metálica son muy frecuentes donde comienzan las picaduras. Además las diferencias que existen entre las concentraciones de iones y oxígeno crean celdas de concentración las cuales también pueden comenzar las picaduras. Pero estas picaduras en el diseño de equipos de ingeniería se pueden evitar usando materiales que no tiendan a corroerse por medio de la corrosión por picaduras. Sin embargo hay veces que esto no es posible debido al diseño y es ahí cuando se recurre a utilizar materiales con mejor resistencia a la corrosión. Como ejemplo podemos decir que si vamos a utilizar aceros inoxidables en la presencia de algunos iones de cloruro, se debe

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

utilizar la aleación del tipo 316 la cual contiene 2% de molibdeno, 18% de Cr y 8% de Ni la cual tiene una mejor resistencia a las picaduras que la aleación 305 la cual contiene solo 18% de Cr y 8% de Ni como sus principales elementos. Aun sabiendo esto, se recomienda realizar pruebas de corrosión a varias aleaciones antes de elegir la aleación final resistente a la corrosión (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.5.1.4 Corrosión por agrietamiento**

Esta forma de corrosión electroquímica localizada puede ocurrir en grietas y bajo superficies recubiertas donde es posible que existan soluciones estancadas. Esta corrosión por grietas es importante dentro de la ingeniería ya que esta ocurre bajo las juntas, pernos y remaches, asientos de válvulas y entre discos, además en depósitos porosos así como en otras situaciones similares. Este tipo de corrosión se presenta en aleaciones como las de aceros inoxidable y titanio, así como en aleaciones de cobre y aluminio. Para que ocurra la corrosión por grietas, las grietas deben ser lo bastante grandes para que entre un líquido pero a su vez lo suficiente estrecha para que el líquido permanezca estancado. Esta corrosión suele ocurrir en grietas de unos cuantos micrómetros (mcm). Las juntas fibrosas las cuales llegan a actuar como mechas que absorben una solución electrolítica y la mantienen en contacto con la superficie metálica forman lugares ideales para que se forme la corrosión por grietas. Para evitar la corrosión por agrietamiento o bien minimizarla dentro de los diseños de ingeniería, se puede recurrir a los siguientes métodos.

- 1.-usar juntas de contacto que estén firmemente soldadas en vez de remacharlas o atornillarlas en la estructura.
- 2.-diseñar recipientes de drenaje en donde las soluciones estancadas se puedan acumular.
- 3.- utilizar juntas que no sean absorbentes, tales como el teflón en caso de ser posible.

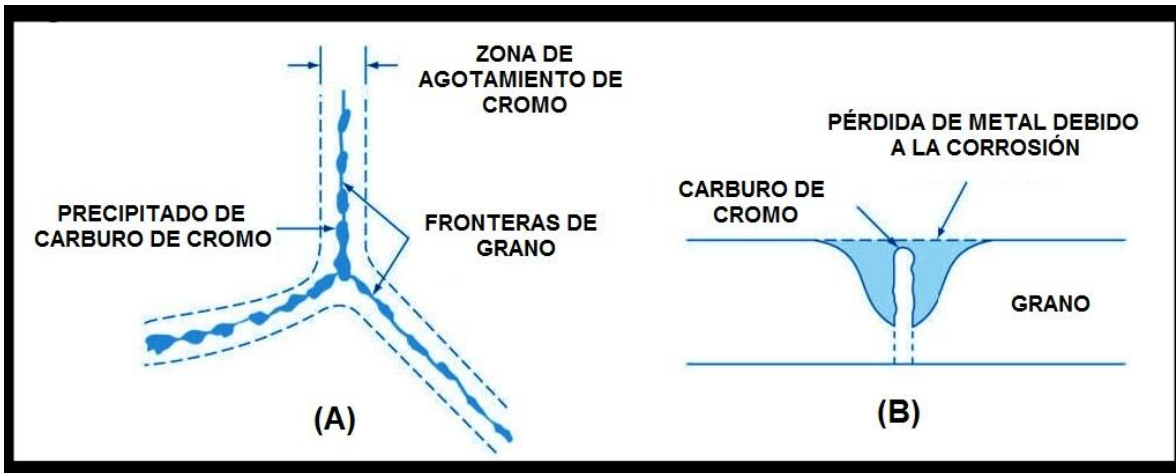
(Smith y Hashemi, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 3.5.1.5 Corrosión intergranular

Este tipo de corrosión es un ataque corrosivo localizado y/o adyacente a las fronteras de grano de una aleación. Si un metal se corroe de manera uniforme en condiciones comunes, las fronteras de grano llegarán a ser un poco más reactivas que la matriz. Pero en otras condiciones, las regiones de la frontera de grano pueden llegar a ser muy reactivas y así causar corrosión intergranular provocando la pérdida de resistencia de la aleación así como la desintegración en las fronteras de grano. Como ejemplo muchas aleaciones de alta resistencia de aluminio como algunas de cobre tienen fases precipitadas para endurecerlas y estas son susceptibles a la corrosión intergranular en ciertas condiciones. Un ejemplo de corrosión intergranular se da en los aceros inoxidable austeníticos (18% Cr y 8% Ni) los cuales se calientan o se enfrían lentamente en un intervalo de temperatura de 500°C a 800°C. Es en este denominado intervalo de temperatura de sensibilización cuando los carburos de cromo ( $Cr_{23}C_6$ ) se pueden precipitar en las interfaces de las fronteras de grano como vemos en la figura 3.5-3(A). Cuando dichos carburos de cromo se han precipitado a lo largo de las fronteras de grano en los aceros inoxidable austeníticos es cuando se dice que estas aleaciones se encuentran en la condición sensibilizada. Si un acero inoxidable austenítico contiene más de 0.02% en peso de carbono, los carburos de cromo se pueden precipitar en las fronteras de grano de la aleación cuando se calientan en un intervalo de 500°C a 800°C durante un largo tiempo.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Smith y Hashemi, 2006).

Figura 3.5-3. (A) Representación esquemática de la precipitación de carburo de cromo en fronteras de grano en un acero inoxidable tipo 304 sensibilizado. (B) Sección transversal en fronteras de grano que muestra ataque por corrosión intergranular adyacente a las fronteras de grano.

El tipo 304 es un acero inoxidable austenítico con alrededor de 0.06% y 0.08% en peso de carbono, es una aleación que si se calienta por mucho tiempo en un intervalo de 500°C a 800°C se sitúa en la condición de sensibilización y este será susceptible a la corrosión intergranular. Cuando los carburos de cromo se forman en las fronteras de grano, estos agotan las regiones adyacentes a las fronteras del Cr de tal modo que el nivel de este último en esas áreas se encuentra por debajo del 12% de Cr necesario para un comportamiento inoxidable. Por eso cuando el acero inoxidable del tipo 304 se encuentra en condición sensibilizada y se expone a un ambiente corrosivo, las regiones que estén cerca de las fronteras de grano se verán atacadas de una forma severa.

Sin embargo esta corrosión intergranular en los aceros inoxidables austeníticos se puede controlar mediante las siguientes formas:

- 1.-utilizar tratamientos térmicos mediante una solución de alta temperatura después de la soldadura. Con el calentamiento de la unión soldada dentro del

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

intervalo de 500°C a 800°C y después templearlo con agua, los carburos de cromo se pueden redisolverse y así volver a una solución sólida.

2.-agregar un elemento el cual combine con el carbón en el acero de tal manera que no se puedan formar los carburos de cromo. En ciertas aleaciones como la del tipo 347 y 321 se utilizan pequeñas cantidades de colombio y titanio respectivamente y esto se hace ya que estos elementos cuentan con mayor afinidad para el carbón que para el cromo y se dice que las aleaciones con trazas de Ti o Cb están en la condición estabilizada.

3.-disminuir el contenido de carbón a casi 0.03% en peso o en menor cantidad de manera que no puedan precipitarse importantes cantidades de carburos de cromo. El acero inoxidable del tipo 340L cuenta con un nivel de carbón tan bajo como el arriba señalado (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.5.1.6 Corrosión bajo tensión**

Las grietas que se forman a causa de la corrosión por esfuerzo (GCE) en los metales se refieren a las grietas que son provocadas por los efectos combinados de los esfuerzos por tensión y un ambiente corrosivo específico que actúa sobre el metal. Durante las grietas de corrosión por esfuerzo la superficie del metal es atacada de manera muy leve mientras que las grietas se propagan a través del metal (figura 3.5-4). Estos esfuerzos que ocasionan las CGE pueden ser residuales o aplicados. Los esfuerzos residuales altos que son lo que causan las CGE son el resultado por ejemplo de los esfuerzos térmicos generados por las velocidades de enfriamiento desiguales, un mal diseño mecánico para los esfuerzos, las transformaciones de fase durante el tratamiento térmico o del trabajo en frío y la soldadura. Aunque si bien solo ciertas combinaciones entre aleaciones y ambientes provocan las CGE. Los aceros inoxidables se agrietan en ambientes de cloruros pero no en los que contienen amoníaco, por otra parte las aleaciones de Cu-Zn se agrietan en ambientes que contienen amoníaco pero no en las que contienen cloruros (Smith y Hashemi, 2006).



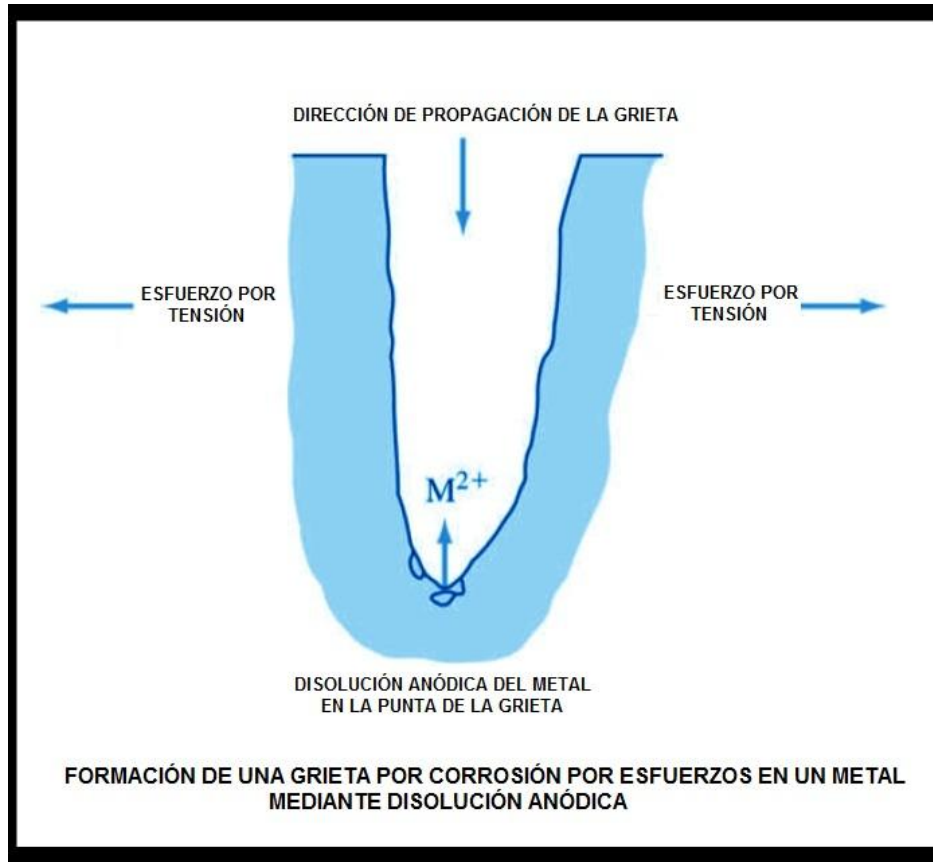
Fuente: (Smith y Hashemi, 2006).

Figura 3.5-4. Grietas por corrosión por esfuerzo en un tubo.

#### **3.5.1.6.1 Mecanismo del agrietamiento debido a la corrosión por esfuerzos.**

Estos mecanismos que intervienen en las CGE no se entienden del todo ya que existen muchos sistemas de aleación-ambiente los cuales incluyen un gran número de mecanismos diferentes. La mayoría de estos mecanismos incluyen las etapas de iniciación como de propagación de grietas, donde en muchos casos la grieta comienza en una picadura o alguna discontinuidad en la superficie del metal. Después de iniciada la grieta su extremo comienza a avanzar como en la figura 3.5-5. Se genera un alto esfuerzo el extremo de la grieta esto debido a los esfuerzos por tensión que actúan sobre el metal. La disolución anódica del metal se ocasiona debido a la corrosión electroquímica que está localizada en el extremo de la grieta y conforme esta va avanzando, esta grieta crece en un plano perpendicular al esfuerzo por la tensión hasta que el metal cede o se fracciona. Si se llega a interrumpir la corrosión o el esfuerzo la grieta dejara de crecer.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Smith y Hashemi, 2006).

Figura 3.5-5. Formación de una grieta por corrosión por esfuerzos en un metal mediante disolución anódica.

El esfuerzo por tensión es necesario tanto para la iniciación como la propagación de grietas y también es importante en la ruptura de capas superficiales. Reducir el nivel de esfuerzo aumenta el tiempo para que se provoque el agrietamiento. Otros factores importantes para la formación de grietas por corrosión debido a esfuerzos son la temperatura y el ambiente.

Protección con el agrietamiento ocasionado por la corrosión por esfuerzos.

A continuación se presentan los métodos para evitar las CGE en los metales.

1.-reducir los esfuerzos en la aleación por debajo del nivel que ocasiona grietas.

Esto se puede hacer disminuyendo la tensión sobre la aleación o bien proporcionando al material un recocido para relajar los esfuerzos. Estos son



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

posibles en aceros al carbón calentándolos de 600-650°C y los aceros inoxidable austeníticos calentándolos de 815-925°C.

2.-suprimir el ambiente que está causando el deterioro.

3.-si no es posible cambiar el nivel de esfuerzos o el ambiente se procede a cambiar la aleación. Por ejemplo se utiliza el titanio en lugar del acero inoxidable (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.5.1.7 Corrosión por erosión**

Esta se define como la aceleración en la velocidad del ataque corrosivo sobre un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo y de la superficie metálica. Cuando es rápido el movimiento relativo del fluido los efectos de desgaste así como de la abrasión pueden ser severos. Las características de la corrosión por erosión es que aparecen huecos en la superficie del metal, picaduras, hoyos, valles y otros daños en la superficie metálica que ocurren en la dirección del flujo del fluido corrosivo (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.5.1.8 Daño por cavitación**

Este tipo de corrosión por erosión es el resultado de formación y colapso de burbujas de aire o cavidades que están llenas de vapor en un líquido cerca de la superficie del metal. Este daño ocurre en superficies metálicas donde hay un flujo de líquido de alta velocidad así como cambios de presión como lo que ocurre en los impulsores de bombas y hélices de barcos. Se dice que el rápido colapso de las burbujas de vapor llega a producir presiones tan altas como los 60000 psi. Cuando hay repetidos colapsos de burbujas de vapor se producen daños considerables en la superficie metálica. Cuando se remueven las capas superficiales y cuando se quitan las partículas metálicas de la superficie del metal es probable que el daño por cavitación aumente las velocidades de corrosión y se produzca el desgaste de la superficie (Smith y Hashemi, 2006).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 3.5.1.9 Corrosión por desgaste

Esta corrosión ocurre en interfaces entre materiales bajo carga los cuales están expuestos a deslizamiento y vibración. Esta corrosión se caracteriza porque aparecen picaduras o huecos que están rodeados por productos de corrosión. En el caso de corrosión por desgaste de metales, los fragmentos metálicos de las superficies en frotamiento se oxidan y algunas capas de óxido se llegan a desprender por la acción de desgaste, como consecuencia de esto se presenta una acumulación de óxido el cual actúa como abrasivo entre las superficies en frotamiento. Comúnmente la corrosión por desgaste ocurre en superficies que están en contacto rígido como las que se encuentran en los ejes, cojinetes o camisas (Smith y Hashemi, 2006).

### 3.5.1.10 Fugas selectivas

Estas corresponden a eliminar de manera preferencial un elemento de una aleación sólida por medio de un proceso de corrosión. Un ejemplo de este tipo de corrosión (fugas selectivas) es la deszinificación, en esta ocurre la fuga selectiva de zinc y esto es a partir de cobre en latones. Por otro lado también se producen procesos similares en otros sistemas de aleaciones como las pérdidas de níquel, estaño y cromo a partir de las aleaciones de cobre. En una deszinificación de un latón que está formado de 70% Cu y 30% Zn, el zinc de manera preferencial se removerá del latón dejando así una matriz de cobre débil y esponjoso. La deszinificación implica los siguientes pasos.

- 1.-el cobre así como el zinc se disolverán en una disolución acuosa
- 2.-iones de cobre se co-depositan sobre el latón
- 3.-los iones de zinc permanecen en la solución.

Ya que el cobre que queda no cuenta con la misma resistencia del latón la resistencia de la aleación se reduce considerablemente.

Para minimizar la deszinificación o evitarse se utiliza un latón con un menor contenido de zinc (latón de 85% Cu y 15% Zn) o bien un cobre-níquel (70-90% Cu,

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

10-30% Ni). Otras maneras pueden ser la de cambiar el ambiente corrosivo o utilizar protección catódica (Smith y Hashemi, 2006).

### **3.6 INHIBIDORES DE CORROSIÓN**

El efecto de un inhibidor es reducir la velocidad de corrosión. Cuando se agregan inhibidores a un sistema se puede disminuir la corrosión. La mayoría de los inhibidores se ha formulado de manera empírica y muchos cuentan con características propias, aunque sus acciones también varían de modo considerable. Como ejemplo de esto son los inhibidores del tipo absorción los cuales al ser absorbidos en una superficie forman una película protectora. Los inhibidores de tipo remoción reaccionan para eliminar los agentes que causan la corrosión como el oxígeno (Smith y Hashemi, 2006).

Los inhibidores de la corrosión se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios, los más usuales los listamos a continuación:

De acuerdo a su mecanismo de actuación

- Inhibidores anódicos

- Inhibidores catódicos

- Inhibidores mixtos

- Inhibidores de adsorción

De acuerdo a su composición química

- Inhibidores orgánicos

- Inhibidores inorgánicos

De acuerdo a su aplicación

- Inhibidores en fase vapor

- Inhibidores de decapado

- Inhibidores para soluciones alcalinas

- Inhibidores para soluciones de cloruros

- Inhibidores para agua potable

- Inhibidores para agua de calderas

- Inhibidores para productos petrolíferos

- Inhibidores para pinturas

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Inhibidores para hormigón armado

Inhibidores para grasas y aceites

Inhibidores para anticongelantes

(Gómez de león hijes y Alcaraz Lorente, 2004)

A continuación describiremos algunos de los inhibidores listados

### 3.6.1 Inhibidores anódicos

Estos inhibidores aumentan la polarización del ánodo formando una capa pasiva de producto de corrosión (aunque en un inicio tiene un efecto despolarizador), por esta razón también reciben el nombre de pasivantes o pasivadores. La capa pasiva que se forma depende de la naturaleza del inhibidor así como de las condiciones térmicas (Gómez de león hijes y Alcaraz Lorente, 2004).

### 3.6.2 Inhibidores catódicos

Estos actúan aumentando la polarización del cátodo siguiendo alguno de los siguientes pasos:

*“Dificultando la descarga de los iones  $H^+$  en medio ácido, o del hidróxido en medio básico”.*

*“Reaccionando con el oxígeno disuelto, impidiendo la formación del hidróxido necesario para formar productos de corrosión con el metal”.*

*“Reduciendo las reacciones catódicas por depósito de productos insolubles”.* (Gomez de león hijes y Alcaraz Lorente, 2004)

### 3.6.3 Revestimientos orgánicos

Los revestimientos orgánicos son las pinturas y se dispone de una gran variedad de estas. Las pinturas pueden llegar a contener metales de relleno de sacrificio en suspensión los que le brindaran una protección adicional al metal. Como un ejemplo de estas pinturas se encuentra la pintura zincrometal, dicha pintura se utiliza con éxito en aceros y hierros. Cuando se utilizan materiales distintos se

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

deberán pintar los materiales anódicos y catódicos. Si se pinta el material anódico puede resultar un desastre, esto se debe, a que si se llega a romper la pintura en algún punto, esta pequeña área expuesta del material anódico originara una densidad de corriente muy grave y un daño por corrosión muy rápido (Mangonon, 2001).

### **3.6.4 Revestimientos inorgánicos**

Los revestimientos inorgánicos son aquellos como el vidrio, los esmaltes y cemento. Los esmaltes se utilizan en láminas de acero para bañeras y piletas. Otro esmalte es el esmalte vidriado que en realidad viene siendo una capa de material cerámico sobre la superficie de un acero. Por ejemplo los calentadores de agua residenciales tienen su interior revestido de vidrio (cerámica). Por otro lado los revestimientos de cemento también son cerámicos y estos por lo general se aplican al acero para aumentar su resistencia a la corrosión (Mangonon, 2001).

### **3.6.5 Revestimientos metálicos**

En los revestimientos metálicos tenemos algunos ejemplos como es el caso del zinc sobre el acero esto para obtener acero galvanizado, así como el del estaño sobre las latas, revestimiento de acero inoxidable sobre aceros al carbono simples o de aleación baja y el de aluminio puro sobre aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación (Mangonon, 2001).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### UNIDAD 4. CERÁMICOS Y VIDRIOS

#### 4.1 CERÁMICOS

Los cerámicos son compuestos inorgánicos y no metálicos de carbono, oxígeno, nitrógeno, boro y silicio que están unidos entre sí por enlaces iónicos y/o enlaces covalentes. Debido a estas uniones iónicas y covalentes, los cerámicos cuentan con altos puntos de fusión, así como grandes módulos elásticos, gran resistencia mecánica y dureza, aparte tienen escasa conductividad eléctrica y térmica y son muy frágiles. De manera general podemos decir que los materiales cerámicos son duros y a la vez frágiles, tenacidad y ductilidad bajas. Estos materiales son buenos aislantes eléctricos y térmicos esto debido a la ausencia de electrones de conducción. Los materiales cerámicos tienen temperaturas de fusión muy altas y poseen una gran estabilidad química en muchos ambientes hostiles y esto se debe a sus fuertes enlaces, es por estas propiedades que los materiales cerámicos son indispensables en muchos diseños de ingeniería. Los materiales cerámicos que son utilizados en la ingeniería los podemos dividir en dos grupos: materiales cerámicos tradicionales y materiales cerámicos de ingeniería. Un cerámico tradicional se compone de tres componentes básicos: arcilla, sílice y feldespato. Los cerámicos tradicionales se elaboran de arcilla o minerales no arcillosos, principalmente óxidos. Algunos ejemplos de materiales cerámicos tradicionales son: los refractarios, cerámicas blancas, cemento, productos estructurales de arcilla, esmalte en porcelana, vidrios, ladrillos y azulejos. Los cerámicos avanzadas o cerámicos de ingeniería consisten por compuestos puros o casi puros como los carburos de silicio ( $SiC$ ), óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ). Los cerámicos de ingeniería cuentan con mejores propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión/oxidación, propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas que las cerámicos tradicionales. Algunas de estas cerámicos son carburos ( $SiC$  y  $BC$ ), nitruros ( $AlN$ ,  $SiN$ ,  $SiAlON$  y  $BN$ ), así como boruros, óxidos puros (alúmina, zirconia, toria, berilia, magnesia, espinela y forsterita), también cerámicos magnéticas, ferroeléctricas, piezoeléctricas y las más recientes superconductoras. Los cerámicos de ingeniería que se utilizan en alta tecnología

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

son el carburo de silicio el que se utiliza en las áreas de temperaturas altas del motor de turbina de gas automotriz y el óxido de aluminio es utilizado como base de apoyo para chips de circuito integrado en un modulo de conducción térmica (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

### 4.1.1 Tipos, composición y usos

La mayor aplicación de los cerámicos dentro de la ingeniería es su uso para soportar altas temperaturas, refractarios en la industria de los metales y tratamientos térmicos, así como revestimientos y materiales en los motores de turbina de gas para uso aéreo y terrestre. Se utilizan en aplicaciones que requieren resistencia al desgaste en virtud de dureza y ahí se utilizan como abrasivos. También se utilizan para contener productos químicos como los ácidos y bases y esto debido a sus propiedades de resistencia a la corrosión.

Alúmina ( $Al_2O_3$ ) este material se utiliza para contener materiales fundidos o en algunas aplicaciones donde el material se tiene que operar a temperaturas altas, donde también requieren de una elevada resistencia mecánica. La alúmina también se utiliza como un sustrato que tiene una constante dieléctrica reducida para receptáculos o empaques electrónicos donde se alojan chips de silicio. La principal aplicación de la alúmina es en los aisladores de las bujías, aunque también se han encontrado algunas aplicaciones para uso médico y dental. También la alúmina que se encuentra contaminada con cromo se utiliza para fabricar láser (Askeland y Phulé, 2006).

El nitruro de aluminio ( $AlN$ ) se utiliza como un buen aislante eléctrico, a pesar de que cuenta con una gran conductividad térmica. Debido a que cuenta con un coeficiente de expansión térmica similar al del silicio, este material ( $AlN$ ) se utiliza como un reemplazo para el ( $Al_2O_3$ ) como material para sustrato de los circuitos integrados. Se logran reducir grietas y se obtiene aislamiento térmico y el calor generado por el circuito eléctrico se puede eliminar con rapidez. También suele usarse en circuitos eléctricos que operan a alta frecuencia (Askeland y Phulé, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

El titanio de bario ( $BaTiO_3$ ) es un material cerámico electrónico es uno de los más utilizados y varios miles de capacitores son fabricados con este material. El  $BaTiO_3$  cuenta con una constante dieléctrica elevada con la que es posible que se fabriquen capacitores más pequeños los cuales pueden contener cantidades considerables de carga (Askeland y Phulé, 2006).

El Carburo de boro ( $B_4C$ ) es un material muy duro pero a su vez es muy ligero, es el tercer material con mayor dureza después del diamante y del nitruro de boro cúbico ( $CBN$ ). El carburo de boro se utiliza como blindaje nuclear y además se utiliza en aplicaciones donde se requiere una gran resistencia a la abrasión así también en una porción de placa de blindaje a prueba de balas, a pesar de que el carburo de boro a temperaturas altas tiene propiedades un poco pobres (Askeland y Phulé, 2006).

La cordierita ( $2MgO - 2Al_2O_3 - 5SiO_2$ ) este material es útil como material cerámico electrónico, se utiliza para elaborar una estructura en panal que se utiliza en los catalizadores de los convertidores catalíticos (Askeland y Phulé, 2006).

El diamante (C) es el material más duro que existe en la Naturaleza. En la industria los diamantes se utilizan como abrasivos para pulir y pulverizar. Por medio de procesos de deposición químicos al vapor son preparados los recubrimientos de diamante y materiales tipo diamante que son resistentes a la abrasión para ser utilizados en muchas aplicaciones como herramientas de corte. Los diamantes también se utilizan en la joyería (Askeland y Phulé, 2006).

Sílice o sílica ( $SiO_2$ ) es un material cerámico de uso muy amplio, ingrediente esencial de los vidrios así como de muchos otros materiales vitrocerámicos. Los materiales que están basados en la sílice principalmente se utilizan como refractarios, aislamientos térmicos, abrasivos, cristalería para laboratorio, compuestos reforzados con fibras y la sílice también se utiliza en la fabricación de fibras ópticas para comunicaciones (Askeland y Phulé, 2006).

El dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) es utilizado para fabricar materiales cerámicos electrónicos como el ( $BaTiO_3$ ), pero se utiliza por lo general en forma de pigmento blanco para la fabricación de pinturas (Askeland y Phulé, 2006).



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

El óxido de zinc ( $ZnO$ ) este es utilizado como un acelerador en la vulcanización del hule que se utiliza en los neumáticos. El óxido de zinc también es utilizado en pinturas, polvos medicinales cutáneos, dispositivos de protección contra oscilaciones y ungüentos para la piel (Askeland y Phulé, 2006).

La zirconia ( $ZrO_2$ ) se utiliza para fabricar materiales cerámicos como el zirconio. Se usa para fabricar sensores del gas oxígeno que se utilizan en los automóviles, así como para medir el oxígeno disuelto en los aceros líquidos. La zirconia también es utilizada como aditivo en varios materiales cerámicos electrónicos y material refractario. La zirconia también se utiliza para hacer artículos de joyería esto debido a su forma cristalina cúbica (Askeland y Phulé, 2006).

### **4.2 VIDRIOS**

Los vidrios no presentan un orden periódico en estructura y por lo tanto son materiales amorfos. El vidrio es un material cerámico fabricado con materiales inorgánicos a temperaturas altas, pero estos se distinguen de otras cerámicos ya que sus componentes son calentados hasta que se fusionan y después se enfrían hasta un estado rígido sin cristalización. El vidrio tiene una estructura amorfa o no cristalina. Las moléculas del vidrio no están distribuidas en orden repetitivo de largo alcance como el que se da en los sólidos cristalinos (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

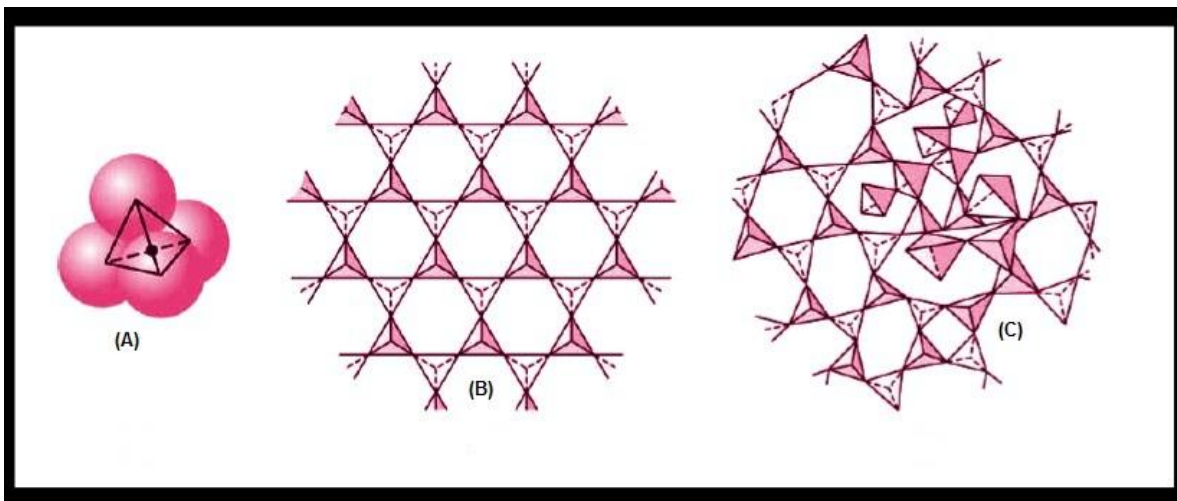
Los vidrios cuentan con propiedades especiales las cuales no se encuentran en otros materiales de ingeniería. La transparencia y dureza a temperatura ambiente, así como su solidez y excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes normales, hace que los vidrios sean importantes en aplicaciones de ingeniería como en la construcción y cristales para vehículos. En la industria eléctrica el vidrio es importante para distintos tipos de lámparas por las propiedades elásticas con las que cuenta y aparte porque se pueden hacer recipientes herméticos al vacío requeridos dentro de la industria electrónica para tubos electrónicos. Los cuales se obtienen con vidrio y además ofrece sus propiedades aislantes para fijar conectores. También la alta resistencia química del vidrio lo hace muy útil para aparatos de laboratorio así como de revestimientos

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

de tubos resistentes a la corrosión y también en la industria química para recipientes de reacciones (Smith y Hashemi, 2006).

### 4.2.1 Estructura de los vidrios

La estructura de los vidrios también determina las propiedades de estos materiales. La mayoría de los vidrios se basan en el óxido de silicio. La sub-unidad fundamental de los vidrios basados en sílice es el tetraedro  $(SiO_4)^{4-}$  con un ion de silicio en el centro de cuatro iones oxígeno que están dispuestos de forma simétrica. Obsérvese la figura 4.2-1 (Smith y Hashemi, 2006).



Fuente: (Smith y Hashemi, 2006).

Figura 4.2-1. Representación esquemática de A) un tetraedro de silicio-oxígeno, B) una sílice cristalina ideal (cristobalita) en la que el tetraedro tiene un orden de largo alcance y C) un vidrio de sílice sencillo en el que el tetraedro no tiene un orden de largo alcance.

Por ejemplo en la sílice cristalina cristobalita, el tetraedro de Si-O se encuentra unido esquina a esquina dentro de una distribución regular, produciendo así un orden de largo alcance como se ve en la figura 4.2-1B. También en un vidrio sencillo de sílice, vemos que el tetraedro está unido también esquina con esquina

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

para formar una red suelta sin orden alguno de largo alcance (figura 4.2.1C) (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

Otro óxido que también forma vidrio es el óxido de boro  $B_2O_3$  y por sí solo, también forma subunidades las cuales son triángulos planos con un átomo de boro el cual se encuentra ligeramente fuera del plano de los átomos de oxígeno. El óxido de boro también es un gran aditivo para muchos tipos de vidrio como los comerciales, los borosilicatos y los de aluminio-borosilicato (Smith y Hashemi, 2006).

### **4.2.2 Tipos, composición y usos**

En la tabla 4.2-1 se enlistan algunos tipos importantes de vidrios así como sus composiciones y algunas observaciones sobre sus aplicaciones y propiedades especiales. El vidrio de sílice fundido es el más importante de un solo componente. Cuenta con una alta transmisión espectral y no es susceptible al daño por radiación, que es lo que causa el oscurecimiento de otros vidrios. El vidrio es ideal para ventanas de vehículos especiales, ventanas de túneles de viento y también sistemas ópticos en dispositivos espectrofotométricos. Pero el vidrio de sílice es caro y difícil de procesar (Smith y Hashemi, 2006).

#### **4.2.2.1 Vidrio de soda-cal**

Es el tipo de vidrio más comúnmente producido. Este representa cerca del 90% de todo el vidrio. Su composición es de 71-73% de  $SiO_2$ , 12-14% de  $Na_2O$  y de 10-12% de  $CaO$ . Se utiliza en vidrios planos, utensilios soplados, recipientes, utensilios prensados y también se emplea en productos de iluminación cuando no se requiere alta durabilidad química y gran resistencia al calor (Smith y Hashemi, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Tabla 4.2-1. Composición de algunos vidrios.

Tabla 4.2-1. Composición de algunos vidrios								
vidrio	$SiO_2$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	$B_2O_3$	$Al_2O_3$	otros	Observaciones
1 Sílice (fundido)	99.5+							Difícil de fundir y fabricar, pero se puede usar a 1000°C. baja expansión y alta resistencia al choque térmico.
2 Sílice 96%	96.3	<0.2	<0.2		2.9	0.4		Fabricado de vidrio de borosilicato relativamente blando; con calor se separan las fases de $SiO_2$ y $B_2O_3$ ; con calor se consolidan los poros.
3 Soda-cal: lámina de vidrio	71-73	12-14		10-12		0.5-1.5	$MgO$ , 1-4	Se fabrica con facilidad. Se usa mucho en calidades que varían ligeramente, ya sea para ventanas, recipientes o bombillas eléctricas.
4 Silicato de plomo: uso eléctrico	63	7.6	6	0.3	0.2	0.6	$PbO$ , 21 $MgO$ , 0.2	Fácil de fundir y fabricar con buenas propiedades eléctricas.
5 Alto en plomo	35		7.2				$PbO$ , 58	Alto en plomo, absorbe rayos X; por su alta refracción se usa en lentes acromáticos. Vidrio cristal decorativo
6 Borosilicato: baja expansión	80.5	3.8	0.4		12.9	2.2		Baja expansión, buena resistencia al choque térmico, y buena estabilidad química. Se usa mucho en la industria química
7 Baja pérdida eléctrica	70.0		0.5		28.0	1.1	$PbO$ , 1.2	Baja pérdida dieléctrica
8 Aluminoborosilicato: aparato estándar	74.7	6.4	0.5	0.9	9.6	5.6	$B_2O_3$ , 2.2	Con más alúmina y menos óxido bórico mejora la durabilidad química
9 Bajo en álcali (vidrio E)	54.5	0.5		22	8.5	14.5		Se usa mucho en fibras para compuestos resinosos vítreos
10 Aluminosilicato	57	1.0		5.5	4	20.5	$MgO$ , 12	Alta resistencia a la temperatura, baja expansión.
11 Vidrio-cerámica	40-70					10-35	$MgO$ , 10-30 $TiO_2$ , 7-15	Cerámica cristalina hecha por desvitrificación del vidrio. Fácil de fabricar (como vidrio), buenas propiedades. Diversos vidrios y catalizadores.

Fuente: (Smith y Hashemi, 2006).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 4.2.2.2 Vidrios de borosilicato

Cuando se sustituyen los óxidos alcalinos por óxido bórico en la red vítrea de sílice se produce un vidrio de menor expansión. Cuando el  $B_2O_3$  entra en la red de sílice este debilita la estructura con lo cual disminuye considerablemente su punto de reblandecimiento. Este efecto de debilidad se le atribuye a la presencia de boros planares de 3 coordenadas. Este vidrio conocido como vidrio Pyrex<sup>®</sup> se utiliza en equipos de laboratorio, utensilios para hornos, tuberías y también unidades herméticas de faros delanteros (Smith y Hashemi, 2006).

### 4.2.2.3 Vidrios de plomo

El óxido de plomo es un modificador de la red de sílice. También actúa como formador de redes. Los vidrios de plomo cuentan con un gran contenido de óxido de plomo, poseen un punto de fusión bajo y se utilizan en vidrios protectores para rellenar o soldar. Estos vidrios se utilizan como protectores de radiación de alta energía y se colocan en ventanas de radiación, tubos de televisor y fundas de lámparas fluorescentes. También por los altos índices de refracción los vidrios de plomo algunas veces se utilizan en algunas lentes ópticas y en vidrios decorativos (Smith y Hashemi, 2006).

## 4.3 PROPIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS, TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS

### 4.3.1 Cerámicos

Porosidad: El contenido de huecos se puede expresar como porosidad aparente o como porosidad total. La porosidad aparente se denomina al volumen total de espacio de poros abiertos, es una medida del área superficial disponible para reaccionar con gases y líquidos fundidos. De manera general la porosidad perjudica las propiedades químicas y mecánicas de los cerámicos y por esa razón es necesario minimizarla. Pero si los cerámicos se van a utilizar como aislantes, la porosidad en los cerámicos aumenta su capacidad de aislamiento y esto los hace mucho más ligeros (Mangonon, 2001).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

**4.3.1.1 Tenacidad:** Debido a la combinación de enlaces iónicos-covalentes los materiales cerámicos tienen baja tenacidad, característica inherente a su condición. En los últimos años se ha llevado a cabo una gran investigación para mejorar la tenacidad de cerámicos. Con procesos como la compresión en caliente de cerámicos con aditivos y reacciones de aglutinación se han logrado conseguir materiales con mayor tenacidad (Smith, 1998).

**4.3.1.2 Dureza:** La gran dureza que tienen algunas cerámicos las hace ideales para ser utilizados como abrasivos para cortar, pulir y afilar otros materiales de menor dureza. La alúmina fundida (óxido de aluminio) y el carburo de silicio son dos de los productos abrasivos cerámicos que más se utilizan de manera industrial (Smith, 1998).

**4.3.1.3 Conductividad térmica:** Los materiales cerámicos por lo general presentan baja conductividad térmica y esto es debido a su enlace iónico covalente son buenos aislantes térmicos por lo que son empleados como refractarios (Smith y Hashemi, 2006).

**4.3.1.4 Propiedades eléctricas:** Los materiales cerámicos también son utilizados en aplicaciones eléctricas y electrónicas. Muchas cerámicos se utilizan como aislantes eléctricos de corrientes de bajo y alto voltaje. También encuentran aplicación en condensadores de manera en especial cuando se requiere miniaturización. La rigidez dieléctrica es otra propiedad importante. Esta cantidad es una medida de la capacidad que tiene el material para guardar energía a altos voltajes. La rigidez eléctrica se define como el campo eléctrico máximo que el dieléctrico puede mantener sin interrupción eléctrica (Smith, 1998).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 4.3.2 Vidrios

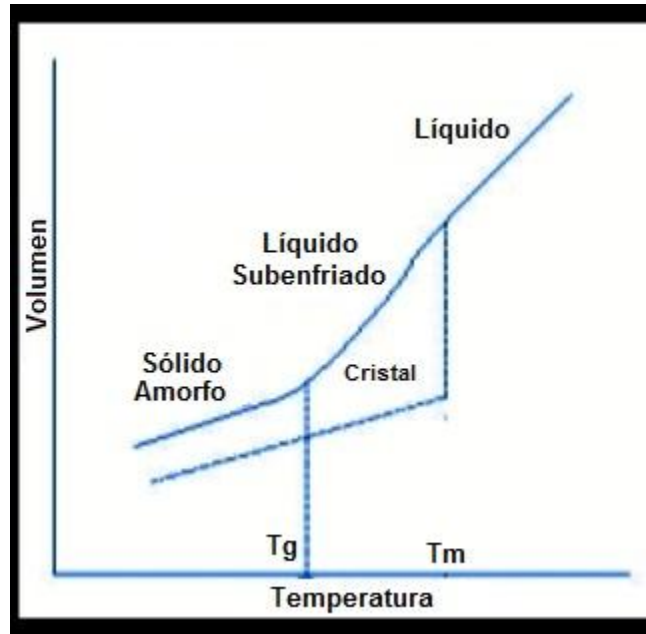
#### 4.3.2.1 Punto de fusión

Temperatura en donde el vidrio tiene una viscosidad de  $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  ( $100P$ ), y se utiliza como punto de referencia para comparar las diferencias de fusión entre dos vidrios (Mangonon, 2001).

**4.3.2.2 Densidad:** La densidad de los vidrios depende de los huecos de la red amorfa y también de la masa de los iones presentes. Con la adición de especies que llenan los huecos o intersticios de la red amorfa se aumenta la densidad al reducir el espacio vacío. Cuando se da la adición de iones a la estructura se altera la densidad en proporción a la masa de estos iones en relación con la de los iones que se encuentran presentes en el vidrio (Mangonon, 2001).

**4.3.2.3 Expansión térmica:** el comportamiento de los vidrios en cuanto a expansión térmica está clasificada con base en regiones de temperatura. Cuando se encuentran a temperaturas por debajo de la región de transición vítrea, el material es un vidrio sólido amorfo, frágil y se comporta de modo elástico lineal. Cuando se encuentra por encima de la región de transición vítrea, se describe como una masa fundida y se comporta como un fluido viscoso. Dentro de la región de transición vítrea aun se describe como un vidrio pero presenta un comportamiento visco-elástico, véase figura 4.3-1 (Mangonon, 2001).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Reyes-Melo e Hinojosa-Rivera, 2000)

Figura 4.3-1. Variación del volumen con la temperatura en un material que puede ser amorfo o cristalino.

Por tratarse de materiales frágiles, la resistencia de los vidrios depende del tamaño de las imperfecciones macroscópicas, del volumen del material, así como de las condiciones ambientales y la tenacidad de la fractura (Mangonon, 2001).

### 4.4 PROCESO DE FRAGUADO DE CERÁMICOS TRADICIONALES

Los cerámicos tradicionales constan de tres componentes básicos como lo son la arcilla, sílice y feldespato. La arcilla se constituye principalmente de silicatos de aluminio hidratados ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ ) así como de pequeñas cantidades de otros óxidos como el  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$  y  $Na_2O$ . La arcilla de los cerámicos tradicionales permite llevar a cabo una fácil manipulación del material antes de su endurecimiento firme y esta constituye el principal componente del material. La sílice ( $SiO_2$ ) que también se conoce como cuarzo o sílex, cuenta con una alta temperatura de fusión y de los cerámicos tradicionales es un componente refractario. El feldespato de potasio se compone de  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ , cuenta con una baja temperatura de fusión y cuando se mezcla con un cerámico fundido

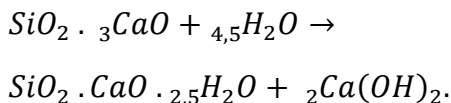


## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

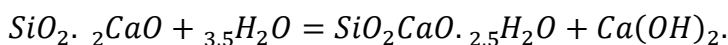
forma un vidrio. Esto hace que los componentes refractarios se unan entre sí (Smith y Hashemi, 2006).

### 4.4.1 Fraguado y endurecimiento

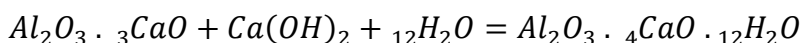
Cuando se prepara una mezcla de cemento-agua, sus componentes reaccionan entre sí formando una masa plástica que dura un cierto tiempo antes de consolidarse. Primero va perdiendo su plasticidad (el principio del fraguado), y se vuelve más o menos quebradiza, de tal forma que ya no puede ser moldeada o amasada con agua otra vez. Finalmente se consolida (final del fraguado), y su dureza aumenta hasta alcanzar un aspecto pétreo. Al primer proceso se le conoce como fraguado y el segundo proceso endurecimiento. Esto se debe a la hidratación de los anhidros del cemento. La reacción del silicato tricálcico se puede expresar en la siguiente forma:



Por hidratación se forman cristales de hidróxido cálcico y silicato hidratado gelatinoso el cual rodea a los granos de silicato tricálcico, impidiendo de esta manera que sea atacado nuevamente por el agua por ser impermeable. Los silicatos bicálcicos  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$ , son atacados de una manera lenta por el agua, después de unas semanas se ven cristales cubiertos por una capa superficial de silicato hidratado amorfo:

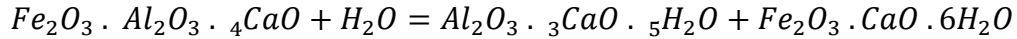


El aluminato tricálcico reacciona con el agua de una manera muy rápida en presencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  el cual es producido en la hidratación de los silicatos (primera y segunda etapa), formando así cristales hexagonales en forma de placas. La mezcla sufre una deshidratación debido a las reacciones exotérmicas ocurridas que favorecen la pérdida de agua.

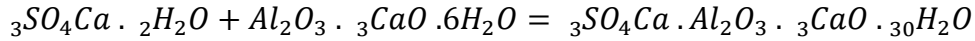


El ferroaluminato tetracálcico reacciona como el aluminato tricálcico, y forma placas hexagonales de aluminato tricálcico cristalizado y ferrito monocálcico hidratado, amorfo:

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



El sulfoaluminato cálcico es producido cuando el sulfato cálcico reacciona sobre el aluminato cálcico; cristaliza en el sistema hexagonal:



También se encuentra otro sulfoaluminato cálcico el cual cristaliza con 12 moléculas de agua (Orus, 1964).

### 4.4.2 Falso fraguado

Cuando se prepara la mezcla de cemento-agua va adquiriendo consistencia y parece fraguar. Si, el amasado continua sin adicionar más agua, la consistencia se deshace y fragua de una manera normal. Esto se cree que es debido a la deshidratación del yeso al moler el clínker, en donde se alcanzan temperaturas de 150°C. No se presenta desprendimiento de calor que es la diferencia de los cementos mal retardados o fraguado relámpago. Se observa más en los clínters poco cocidos o muy cocidos y esto probablemente se atribuye a que la cal contribuye a la deshidratación del yeso (Orus, 1964).

### 4.5 CONCRETO: COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES, FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA (PRECAUCIONES).

El cemento es un material que tiene propiedades adhesivas y cohesivas. Dichas propiedades le aportan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Para efectos de construcción el significado de cemento es restringido a materiales aglutinantes utilizados con arena, piedras, tabiques, bloques de construcción, etc. Los componentes principales de este cemento son compuestos de cal, de esta manera en la construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos. Los cementos que son utilizados en la fabricación de concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, de esta manera experimentan una reacción química con el agua y se denominan cementos hidráulicos. Los cementos hidráulicos se componen por silicatos y aluminatos de cal, y se clasifican de manera general como cementos naturales, portland y aluminosos (Neville, 1999).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 4.5.1 Composición

Las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento portland consisten principalmente en cal, alúmina, sílice y óxido de hierro. Estos materiales interactúan dentro del horno hasta formar una serie de productos más complejos, que alcanzan un equilibrio químico. El equilibrio no se mantiene durante el enfriamiento y la rapidez de enfriamiento afecta el grado de cristalización, así como la cantidad de material amorfo dentro del clínker enfriado. Se puede decir que el cemento se encuentra en un estado de equilibrio congelado, lo que significa que los productos congelados reproducen el equilibrio existente durante la temperatura en la que se forma el clínker. Esta suposición se hace para calcular la composición de los compuestos de los cementos comerciales, esta composición “potencial” se calcula partiendo de las cantidades de óxidos presentes en el clínker. Se consideran cuatro compuestos principales del cemento, los cuales se muestran en la tabla 4.5-1 con sus símbolos de abreviación.

Tabla 4.5-1. Compuestos principales del cemento portland.

Tabla 4.5-1. Compuestos principales del cemento portland		
Nombre del compuesto	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$
Aluminoferrita tetracálcica	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	$C_4AF$

Fuente: (Neville, 1999).

Los químicos del cemento utilizan esta notación donde describe cada óxido con una letra:  $CaO = C$ ;  $SiO_2 = S$ ;  $Al_2O_3 = A$ , y  $Fe_2O_3 = F$ . Análogamente, el  $H_2O$  del cemento hidratado es indicado por una H, y  $SO_3$  por S. Los silicatos presentes en el cemento no son compuestos puros ya que contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen importantes efectos en los arreglos atómicos, formas cristalinas y propiedades hidráulicas de los silicatos. Los cálculos de composición del cemento portland están basados en el trabajo de R.H. Bogue y colaboradores, pero a menudo son llamados “composición de Bogue”.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Las ecuaciones de Bogue que determinan el porcentaje de compuestos principales en el cemento se muestran a continuación.

Los términos en el paréntesis representan el porcentaje de óxido dado en la masa total del cemento.

$$C_3S = 4.07(CaO) - 7.60(SiO_2) - 6.72(Al_2O_3) - 1.43(Fe_2O_3) - 2.85(SO_3)$$

$$C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.754(3CaO.SiO_2)$$

$$C_3A = 2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.04(Fe_2O_3)$$

Aparte de los compuestos principales que se observaron en la tabla 4.5-1 hay otros compuestos presentes en menor proporción como  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $K_2O$ , y  $Na_2O$ . Dos de estos compuestos menores son de interés: los óxidos de sodio y potasio,  $Na_2O$  y  $K_2O$ , estos son conocidos como álcalis, aunque el cemento tiene otros álcalis. Se ha encontrado que estos reaccionan con algunos agregados y los productos de esa reacción ocasionan una desintegración del concreto, además de que afectan la rapidez con la que el cemento adquiere resistencia. Es posible obtener una idea de la composición del cemento, la tabla 4.5-2 muestra los límites de la mezcla de los diferentes óxidos de los cementos portland (Neville, 1999).

Tabla 4.5-2. Límites de composición aproximados para cemento portland.

Tabla 4.5-2. Límites de composición aproximados para cemento portland	
Óxido	Contenido, porcentaje
$CaO$	60-67
$SiO_2$	17-25
$Al_2O_3$	3-8
$Fe_2O_3$	0.5-6.0
$MgO$	0.5-4.0
Álcalis (como $Na_2O$ )	0.3-1.2
$SO_3$	2.0-3.5

Fuente: (Neville, 1999).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 4.5.2 Propiedades

Las características o cualidades básicas del concreto son trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad. En alguno de los 3 estados del concreto:

Estado fresco: en un principio cuando el concreto tiene consistencia plástica, es blando y se puede trabajar o moldear con facilidad en diferentes formas, de esta manera se conserva durante la colocación y compactación.

Cuando el concreto está fresco tiene propiedades muy importantes como son su trabajabilidad y cohesividad.

Estado fraguado: cuando el concreto comienza a adquirir cierta rigidez se conoce como fraguado del concreto (figura 4.5-1).



Fuente: (IMCYC, 2004).

Figura 4.5-1. Fraguado del concreto.

Estado endurecido: cuando el concreto ha comenzado a fraguar, adquiere resistencia y durabilidad.

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 4.5.2.1 Trabajabilidad

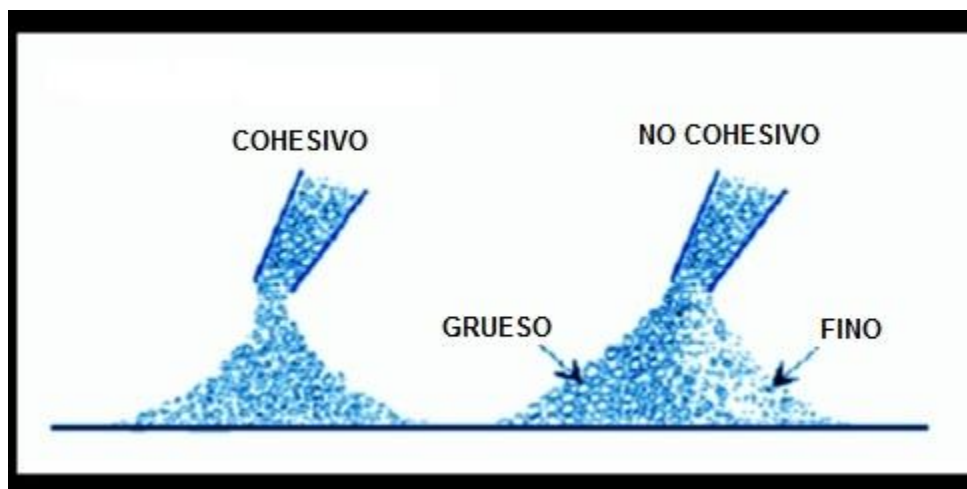
La trabajabilidad significa que tan fácil es colocar, compactar y darle un acabado al concreto. El concreto rígido puede ser difícil de manejar, colocar y después compactar, y si este no es construido apropiadamente no será resistente o durable cuando se encuentre endurecido.

La trabajabilidad es afectada por:

La cantidad de pasta de cemento, que es la parte blanda o líquida de la mezcla del concreto. Entre más pasta se combina con los agregados gruesos y finos, la mezcla será más trabajable (IMCYC, 2004).

### 4.5.2.2 Resistencia y durabilidad

El concreto que se preparó correctamente es un material resistente y durable. También es denso, impermeable al agua, es capaz de resistir altas temperaturas y resistente al desgaste por intemperismo. El concreto entre más denso será más impermeable al agua. La durabilidad del concreto incrementa con la resistencia. La compactación apropiada la cual consta de remover el aire del concreto da como resultado un concreto con una densidad mayor la cual es más resistente y durable. Por último, la cohesividad del concreto a la unión de los componentes en el estado fresco (figura 4.5-2).



Fuente: (Ledesma García, 2013; Material de Asignatura).

Figura 4.5-2. Diferencia entre cohesivo y no cohesivo.

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

Sin embargo, la cohesividad es afectada por la granulometría del agregado. Un agregado graduado se refiere a que existe un intervalo de tamaños de los agregados y estos van desde piedras grandes hasta arena fina. Cuando se adicionan agregados bien graduados se obtiene una mezcla más cohesiva, sin embargo con agregados demasiado gruesos la mezcla resulta pedregosa (IMCYC, 2004).

### **4.5.3 Fabricación**

El cemento portland está compuesto principalmente por materiales calcáreos como la caliza, alúmina y sílice, que se encuentran como pizarra o arcilla. La materia prima para fabricar el cemento la encontramos en casi todos los países y las fabricas de cemento las hay en todo el mundo. La fabricación del cemento consiste en moler de una manera muy fina la materia prima, mezclarla de una manera minuciosa en cierta cantidad y calcinarla a una temperatura de 1300°C a 1400°C dentro de un horno giratorio de gran dimensión. A dicha temperatura el material se funde parcialmente y se sintetiza, de esta manera se forman bolas que son conocidas como clínker. Cuando el clínker se enfría, se tritura hasta obtener un polvo más fino. Después se le agrega un poco de yeso y el material resultante se denomina cemento portland. La trituración y la mezcla de las materias primas se pueden efectuar tanto en condiciones húmedas como secas, de ahí se dan los nombres de proceso “húmedo” y proceso “seco”. Inicialmente se considerará el proceso húmedo. Cuando se utiliza marga, se tritura finamente y se dispersa en agua dentro de un molino de lavado el cual cuenta con brazos revolventes que rompen los aglomerados de materias solidas. También las arcillas son trituradas y mezcladas con agua en un molino similar al descrito anteriormente. Después las dos mezclas se bombean, de forma que se mezclen en determinadas proporciones y pasan a través de una serie de cribas. La lechada resultante de este proceso fluye hacia unos tanques de almacenamiento. Cuando se emplea caliza, se debe barrenar y triturar por medio de trituradoras, después se depositan en un molino de bolas con la arcilla dispersa en agua. Ahí se continúa el molido de la caliza hasta obtener una harina, la lechada resultante se bombea a tanques de

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

almacenamiento. La lechada es un líquido de consistencia cremosa, tiene entre 35-50% de agua y solo una pequeña cantidad de material, alrededor del 2%. La lechada se deposita en varios tanques de almacenamiento y la sedimentación de los sólidos suspendidos se evita de manera mecánica por agitación o burbujas de aire comprimido. El contenido de cal de la lechada está determinado por la proporción de materiales calcáreos y arcillosos. La composición química se obtiene mediante un ajuste final mezclando las diferentes lechadas. Cuando se tiene la lechada con el contenido deseable de cal, esta pasa a un horno rotatorio que es un cilindro de acero el cual está recubierto por material refractario, el cual gira de manera lenta alrededor de su eje. Dentro del horno se deposita la lechada, se añade carbón pulverizado mediante inyección de aire en el extremo inferior donde la temperatura va de los 1450 a 1500°C. El carbón, el cual no debe tener mucha ceniza, llama la atención porque se ocupan 220kg por cada tonelada de cemento. Dentro del horno la lechada desciende encontrando temperaturas mayores. Se elimina el agua y se libera el  $CO_2$ , después el material seco sufre algunas reacciones químicas hasta que en la parte más caliente del horno, cerca del 20-30% del material se vuelve líquido y la cal, alúmina y sílice se vuelven a combinar. Después la masa se funde en bolas de diámetros de 2.5-3 mm que son conocidas como clínker. El horno tiene que funcionar de una manera constante para asegurar el abasto y uniformidad del clínker y para reducir el deterioro del forro refractario. Dentro de los procesos secos y semi-secos, las materias primas son trituradas y adicionadas con las proporciones correctas dentro de un molino de mezclado donde se mezclan y su tamaño se reduce a polvo fino. El polvo seco o grano molido crudo es bombeado al silo de mezcla donde se hace un ajuste final de las proporciones de los materiales que son requeridos para la manufactura del cemento. En el proceso semi-seco, el grano molido crudo y mezclado se deposita en el granulador. Después se le agrega agua en una cantidad del 12% del peso del grano molido adicionado y así se obtienen pastillas de alrededor de 15 mm de diámetro interior. Las pastillas son horneadas en una rejilla mediante gases calientes del horno, hasta endurecer. Las pastillas se meten al horno y se siguen las mismas operaciones que en el proceso húmedo. Como el contenido de



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

humedad es del 12% y no del 40% de la lechada utilizada en el proceso húmedo, el horno es más pequeño. La cantidad de calor es baja ya que solo se tiene que eliminar cerca del 12% de humedad. El proceso resulta muy económico, pero solo si las materias primas están algo secas. El consumo total de carbón puede llegar a ser de 100kg por tonelada de cemento. Dentro del proceso de vía seca, el grano crudo que tiene una humedad de 0.2%, se pasa a través de un pre-calentador. Aquí se calienta alrededor de los 800°C antes de introducirlo al horno. El tamaño del horno es pequeño en comparación al utilizado en el proceso húmedo y esto se debe a que la humedad del grano no tiene que eliminarse. La mayor parte del grano crudo pasa a través de un calcinador fluidizado introducido entre el pre-calentador y el horno. La temperatura en el calcinador está cerca de los 820°C, la temperatura es estable porque la calcinación es uniforme y la eficiencia del intercambio de calor es alta. Una parte del grano se introduce en el horno de manera usual, pero el efecto del calcinador fluidizado es aumentar la des-carbonatación (disociación de  $CaCO_3$ ) del grano crudo antes de que entre en el horno y de esta manera aumentar la rapidez de producción del horno. Es importante saber que todos los procesos necesitan una mezcla íntima de las materias primas ya que las reacciones dentro del horno se presentan por difusión en materiales sólidos y es importante una distribución uniforme de materiales para asegurar un producto uniforme. Saliendo del horno, no importa el tipo de proceso, el clínker se enfría. El clínker frío que es de color negro, centellante y duro es mezclado con yeso, esto con el objetivo de impedir el fraguado relámpago del cemento. Cuando el cemento ya ha sido molido y este tiene  $1.1 \times 10^{12}$  partículas por kg, está listo para ser transportado de manera a granel. Aunque se bien algunos tipos de cemento son empacados en sacos o tambores. El proceso seco se utiliza hoy en día para reducir al mínimo la energía que es requerida por la combustión, excepto cuando los materiales crudos necesitan el proceso húmedo (Neville, 1999).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

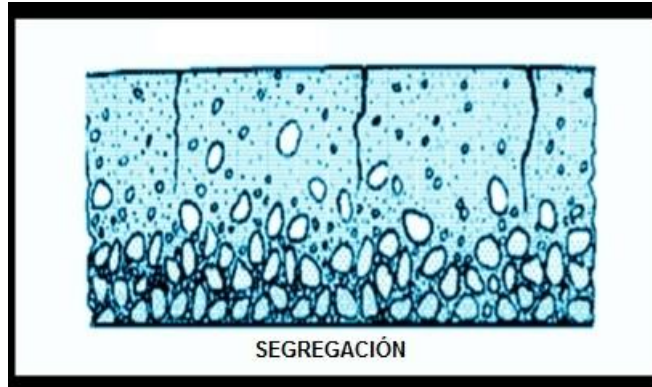
### **4.5.4 Transporte**

Existen varios métodos para transportar el concreto y estos dependen del costo, así como el más fácil para el tamaño de la obra. El concreto se puede transportar utilizando un camión revolvedor, bomba de concreto, grúa, canaletas, banda transportadora, montacargas y botes. En trabajos pequeños se utiliza una carretilla que es una manera fácil de transportarlo. Cuando se utiliza la carretilla o vagones con ruedas, se debe tener cuidado con el movimiento para que el concreto no presente segregación y si se da esto es preferible usar mezclas de bajo revenimiento (IMCYC, 2004).

### **4.5.5 Puesta en obra y precauciones**

Al momento de colocar el concreto se debe tener cuidado de no dañar o mover las cimbras así como el acero de refuerzo. La colocación del concreto se hace partiendo desde las esquinas de la cimbra o en el caso de ser un sitio con pendiente se realiza desde el nivel más bajo. Al utilizar y manejar concreto fresco se debe evitar el contacto con la piel, además de llevar ropa y equipo protector adecuados. Los retrasos causan que el concreto pierda revenimiento, que se seque o pierda humedad y a causa de esto se ponga duro o rígido. Los retrasos son un problema grave en días calurosos o con viento ya que el concreto se seca y endurece en menos tiempo. Para evitar los retrasos se debe planear con anticipación. Verificar que todos los trabajadores, herramientas y contenedores estén preparados y que todas las preparaciones para recibir el concreto se hayan realizado con anticipación. Nunca se debe agregar agua simplemente al concreto para hacerlo más trabajable, se debe utilizar un súper-fluidificante para recuperar la trabajabilidad o bien utilizar una mezcla de cemento-agua pero sin alterar la relación agua/cemento. La segregación se da cuando los agregados grueso y fino, así como la pasta de cemento llegan a separarse (figura 4.5-3).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Ledesma García, 2013; material de asignatura).

Figura 4.5-3. Segregación del concreto.

La segregación se puede dar durante el mezclado, transportado, colocado, compactado del cemento. La segregación hará que el concreto sea más débil, también menos durable y tendrá un acabado pobre. Para evitar la segregación al concreto se deben realizar pruebas de revenimiento para verificar que no esté “demasiado seco” o “demasiado húmedo”. Se debe asegurar que el concreto se mezcle de manera correcta (IMCYC, 2004).

### 4.5.6 Efecto de la temperatura

#### 4.5.6.1 Desprendimiento de calor

La reacción que se lleva a cabo entre el cemento y el agua es exotérmica (libera calor). Si colocamos la mezcla dentro de un termo y le colocamos un termómetro se apreciará el aumento de temperatura. Este fenómeno es importante porque en las grandes masas de este aglomerante, como en las presas o en los diques se han alcanzado a medir temperaturas de hasta 50°C por encima de las del ambiente; y las cuales llegan a durar mucho tiempo. A causa de estas elevadas temperaturas se presentan grietas en las grandes masas de hormigón cuando se enfrían, originando así la contracción. La máxima temperatura es de 83 cal g<sup>-1</sup> de cemento y la mínima es de 28 cal g<sup>-1</sup> de cemento. Para limitar este desprendimiento de calor que se origina, se necesita reducir a un mínimo el aluminato tricálcico, esto se hace aumentando el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de esta

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

manera convertirlo en aluminio-ferrito tetracálcico el cual desarrolla una cantidad de calor menor, pero para disminuirlo aun más se necesita rebajar el contenido de silicato tricálcico y así de esta manera, se disminuyen las resistencias iniciales, pero no así las finales (Orus, 1964).

### **4.5.6.2 Acción de hielo**

El cemento Portland se ve afectado por el hielo ya que este retrasa el fraguado y lo detiene cuando la temperatura se encuentra por debajo de algunos grados bajo cero, pero cuando la temperatura aumenta el fraguado comienza otra vez. El agua al congelarse sufre un aumento de volumen de un 10% aproximadamente, esto ocasiona que los cristales de hielo disgreguen el mortero. Cuando el cemento Portland ya ha fraguado, este resiste muy bien las heladas (Orus, 1964).

### **4.5.6.3 Acción del calor**

El fraguado aumenta con el calor. Cuando el cemento Portland ya se encuentra fraguado resiste temperaturas superiores a los 100°C, empezando su resistencia a disminuir, esto debido a que primero se produce una dilatación térmica y después al evaporarse el agua sufre una contracción. A temperaturas por encima de los 300°C la contracción es mayor que la dilatación provocando con esto, grandes grietas en la pasta pura. Dependiendo de su aplicación como mortero u hormigón así como la naturaleza de sus agregados sean ígneos o sedimentarios, cuyas dilataciones añaden a la del cemento y estas cuartejan el producto que es sometido a temperaturas elevadas (Orus, 1964).

### **4.5.6.4 Aireación del cemento**

El cemento no se altera con el aire seco. Pero cuando está húmedo absorbe  $\text{CO}_2$  y se acelera el fraguado, por otro lado la humedad los retrasa y hace que disminuyan sus resistencias (Orus, 1964).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

### **4.5.7 Agentes químicos**

#### **4.5.7.1 Sustancias perjudiciales al cemento Portland**

Algunas sustancias actúan sobre el cemento Portland fraguado, atacándolo y poniéndolo en riesgo para la obra ejecutada. Los sulfatos atacan al cemento Portland fraguado porque estos reaccionan con la cal y forman el sulfato cálcico y con los aluminatos hidratados forma el sulfoaluminato o sal de CANDLOT que es insoluble. El sulfato magnésico es el sulfato que actúa con más energía, porque ataca a los silicatos hidratados de cal, aluminatos y el hidróxido de calcio, para así formar el sulfato cálcico hidratado o yeso y el sulfoaluminato, que estos al cristalizar provocan una expansión disgregando de esta manera los morteros. Para evitar estas acciones de los sulfatos, al cemento Portland se le añaden puzolonas y/o se fabrican cementos puzolánicos y de escorias. Los superfosfatos atacan debido al sulfato amónico. También los cementos Portland son atacados por las sustancias grasas las cuales saponifican la cal libre. El agua de mar ataca al cemento Portland como los sulfatos. También lo atacan las lejías, aguas jabonosas, cloruros, nitratos, soluciones azucaradas, algunos jabonosos, etc. (Orus, 1964).

#### **4.5.8 Aditivos**

Los aditivos son capaces de impartir beneficios físicos y económicos considerables con respecto al concreto. Los aditivos aunque no siempre son baratos, no representan un gasto adicional ya que su empleo puede dar ahorros. Es decir, el costo de mano de obra que se requiere para compactar y mejorar la durabilidad sin el uso de medidas adicionales. Un aditivo se define como un producto químico, que en casos especiales, se agrega a la mezcla de concreto en proporciones no mayores del 5% por masa de cemento durante el mezclado o una operación adicional de mezclado antes de que se coloque el concreto. Esto se hace con el propósito de realizar una modificación a las propiedades del concreto. Los aditivos pueden ser orgánicos o inorgánicos en cuanto a su composición. Su carácter químico es el que difiere del mineral, es su característica esencial. Los

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

aditivos comúnmente se clasifican por la función que tienen en el concreto, pero también cuentan con una acción adicional (Neville, 1999).

La clasificación de la norma C 494-92 es la siguiente:

- 1.- tipo A reductores de agua
- 2.- tipo B retardantes
- 3.- tipo C acelerantes
- 4.- tipo D reductores de agua y retardantes
- 5.- tipo E reductores de agua y acelerantes
- 6.- tipo F reductores de agua de alto rango o superfluidificantes
- 7.- tipo G reductores de agua de alto rango y retardantes, o superfluidificantes y retardantes

### **4.5.8.1 Aditivos acelerantes**

Su función primordial es acelerar el desarrollo temprano de resistencia del concreto. Esto quiere decir su endurecimiento, pero también se puede acelerar el fraguado del concreto. Una de las ventajas de usar un acelerante es que el acabado se da más temprano en la superficie del concreto así como la aplicación de aislamiento y la estructura se puede poner más rápido en servicio (Neville, 1999).

El acelerante que es más utilizado es el cloruro de calcio. Este es efectivo para acelerar la hidratación de los silicatos de calcio, como el  $C_3S$ , por el cambio ligero en la alcalinidad del agua de poros o como un catalizador en las reacciones de hidratación. El cloruro de calcio es un acelerante efectivo y de bajo costo, pero presenta un defecto serio, los iones de cloruro en la vecindad del refuerzo de acero u otro acero empapado, favorecen a la corrosión. Por esta razón varias normas y reglamentos prohíben el uso de cloruro de calcio en concreto que tenga acero o aluminio empapado. El uso de cloruro de calcio no se aconseja usar en el concreto sin refuerzo ya que la durabilidad de este se puede ver afectada por agentes externos (Neville, 1999).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

### **4.5.8.2 Aditivos retardantes**

Los aditivos retardantes ocasionan un retraso en el fraguado del cemento. Los retardantes también hacen que el endurecimiento de la pasta sea lento, aunque si bien algunas sales aceleran el fraguado pero inhiben el desarrollo de la resistencia. Cabe mencionar que los retardantes no cambian la composición o identidad de los productos de hidratación. Los retardantes son útiles cuando se elabora concreto en climas cálidos, cuando el tiempo de fraguado es corto por la alta temperatura y para la prevención de juntas frías. De manera general los retardantes prolongan el tiempo del concreto donde este se puede transportar, colocar y compactar.

La acción retardante es exhibida por el azúcar, derivados de carbohidratos, boratos solubles, sales solubles de zinc y otras sales, el metanol también puede ser utilizado como retardante. El mecanismo de acción de los retardantes aun no se ha identificado con certeza. Es probable que cambien el crecimiento o morfología de los cristales, que llegan a ser absorbidos en la membrana de cemento hidratado que se forma muy rápido y haciendo lento el crecimiento de núcleos de hidróxido de calcio. Se debe tener gran cuidado al usar retardantes, porque si se utilizan en cantidades erróneas, estos pueden llegar a inhibir de una manera completa el endurecimiento y fraguado del concreto (Neville, 1999).

La anhidrita soluble, se utiliza en una proporción pequeña, porque en cantidades mayores se produce un fraguado rápido. El efecto que tiene es detener el fraguado del aluminato tricálcico al producir sulfoaluminato de cálcico hidratado, de esta manera se forma una membrana alrededor de los granos de cemento, y esto da lugar a que los silicatos se hidraten después de unas dos horas, que es principio del fraguado y posteriormente lo hacen los aluminatos; contribuir a la extensión de la cal libre por su agua de hidratación y así aumentar las resistencias al principio del endurecimiento (Orus, 1964).

### **4.5.8.3 Aditivos reductores de agua**

La función de estos aditivos es la de reducir el contenido de agua de la mezcla, por lo general de 5 a 10%, aunque algunas veces cuando la trabajabilidad es muy

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

alta hasta en un 15%. El objetivo de utilizar un aditivo reductor de agua en las mezclas de concreto es de permitir una reducción en la relación agua-cemento y que se mantenga su trabajabilidad o en forma alterna mejorarla a una relación dada de agua-cemento. Los aditivos reductores de agua afectan la rapidez de hidratación del cemento, pero la naturaleza de los productos de hidratación no cambia y así es la estructura de la pasta de cemento hidratada. El uso de reductores de agua no afecta la resistencia del concreto a la congelación y deshielo. La efectividad de los reductores de agua respecto a la resistencia varía de acuerdo al tipo de cemento, la mayor se obtiene utilizando cementos de bajo álcali o un contenido bajo de  $C_3A$  (Neville, 1999).

### **4.6 CERÁMICOS CON ALTA RESISTENCIA TÉRMICA: MATERIALES REFRACTARIOS**

#### **4.6.1 Materiales refractarios**

Por la gran resistencia térmica que tienen los materiales cerámicos estos se utilizan como refractarios. Estos son materiales que resisten la acción de ambientes calientes, ya sean líquidos o gaseosos. Los materiales refractarios son capaces de soportar temperaturas altas y además conservar sus propiedades físicas y mecánicas a esa temperatura. Los refractarios se utilizan ampliamente en las industrias metálicas, cerámicos, productos químicos y vidrio. Estos materiales son muy importantes dentro de las industrias metalúrgicas, especialmente en la industria del hierro y el acero ya que estas consumen cerca del 63% de los materiales refractarios. Existen muchos cerámicos puros que tienen altos puntos de fusión, como lo son el óxido de aluminio y el óxido de magnesio, los cuales se podrían usar como refractarios pero resultan costosos y difíciles de dar forma. Por esta razón la mayoría de los refractarios industriales se hacen con mezclas de compuestos cerámicos. Las propiedades importantes de los materiales refractarios son su resistencia a baja y alta temperatura, su densidad volumétrica así como su porosidad. En su mayoría los materiales refractarios cuentan con densidades aparentes dentro de un intervalo que va de 2.1 a 3.3  $g/cm^3$  (132 a 206  $lb/pie^3$ ). Los refractarios densos que tienen baja porosidad son más resistentes a la



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

corrosión, erosión y penetración por líquidos y gases. Sin embargo, se necesita que los refractarios aislantes cuenten con una alta cantidad de porosidad. Estos refractarios aislantes se utilizan como respaldo para los ladrillos o materiales refractarios de más alta densidad y refractabilidad (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

### 4.6.2 Tipos de refractarios

Los materiales refractarios industriales se dividen en dos tipos: refractarios ácidos y refractarios básicos. Los ácidos se basan sobre todo en  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  y los básicos en  $MgO$ ,  $CaO$  y  $Cr_2O_3$ . (Smith y Hashemi, 2006).

La clasificación de ácido o básico se realiza acorde a la reactividad de los refractarios ante materiales ácidos o básicos. Los ácidos refractarios reaccionan con materiales básicos y también son degradados por ellos. Por otro lado, los básicos reaccionan con materiales ácidos y también son degradados por ellos (Mangonon, 2001).

Los refractarios básicos se componen principalmente de  $MgO$ , cal ( $CaO$ ), mineral de cromo o mezclas de dos o más de estos materiales. Los refractarios básicos tienen una alta densidad aparente, gran resistencia al ataque químico de escorias básicas y óxidos y cuentan con una alta temperatura de fusión, pero estos son muy caros. Los refractarios básicos contienen alto porcentaje de magnesio (92-95%) y se utilizan en recubrimientos para el proceso básico de oxígeno en la fabricación del acero (Smith y Hashemi, 2006).

#### 4.6.2.1 Refractarios ácidos

Los refractarios de sílice presentan alta refractabilidad, gran resistencia mecánica y rigidez a temperaturas cercanas a sus puntos de fusión. Los barros refractarios están hechos a base de una mezcla de barro plástico, arcilla de sílex pulverizada y grog de arcilla (partícula gruesa). Cuando están en condiciones de no cocción (verdes), estos refractarios son una mezcla de partículas que van desde gruesas hasta muy finas. Después de la cocción, las finas partículas forman un enlace cerámico entre las partículas más grandes. Los refractarios altos en alúmina

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

tienen del 50 al 99% de alúmina y cuentan con temperaturas de fusión más altas que los ladrillos fabricados de barro refractario. Estos se pueden utilizar en condiciones de horno más severas y a temperaturas mayores que los ladrillos de barro refractario, pero son muy costosos (Smith y Hashemi, 2006).

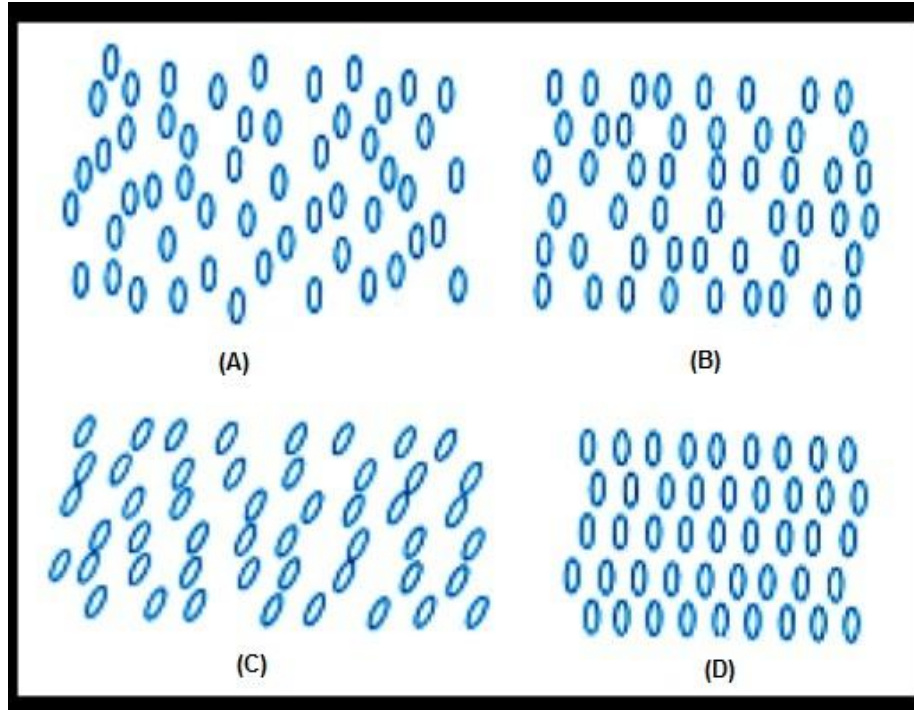
### **4.6.3 Usos de los materiales refractarios**

Los materiales refractarios son importantes componentes en el equipo que se utiliza en la producción, refinación y manejo de vidrios y metales, así como para la construcción de hornos de tratamiento térmico y otros equipos de procesos de altas temperaturas. Los refractarios deben resistir altas temperaturas sin que sufran corrosión o debilitamiento por el entorno circundante. Los refractarios comunes se componen de partículas gruesas de óxido que están unidas por un material refractario más fino. Este último se funde durante el horneado y así se da la unión. Los refractarios se clasifican en tres grupos: ácido, básico y neutro en función de su comportamiento químico (Askeland y Phulé, 2006).

### **4.7 CRISTALES LÍQUIDOS Y CUASICRISTALES**

Estos materiales no tienen periodicidad tridimensional, pero no son completamente amorfos. Los cristales líquidos son compuestos de bajo peso molecular. Tienen ordenamientos, pero solo en una dirección del espacio porque en otra dirección la estructura es amorfa. Si dicho orden es función de la temperatura se llaman termotrópicos y si es función de la concentración cuando se encuentran en solución se llaman lyotrópicos. En la figura 4.7-1 se muestra un esquema del ordenamiento de estos materiales. Los cuasicristales tienen simetría rotacional de orden 5. Un cristal cuenta con simetría de rotación de orden “n” cuando esta invariante después de girar  $\left(\frac{360}{n}\right)^\circ$  alrededor de un eje determinado.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Reyes-Melo e Hinojosa-Rivera, 2000).

Figura 4.7-1. Esquema que muestra el orden que se presenta en los cristales líquidos. (A) moléculas sin ningún tipo de orden. (B) moléculas en capas y alineadas perpendicularmente a las capas. (C) moléculas en capas, con alineamiento paralelo a las capas. (D) alineamiento cristalino bidimensional con capas desfasadas.

En la figura 4.7-2 se muestra un esquema de este tipo de estructura, se observa que no hay periodicidad sin embargo si colocamos un eje de rotación perpendicular a la hoja e imaginamos que la imagen es de dimensiones infinitas y giramos en un ángulo de  $72^\circ$  en contra o en el sentido de las manecillas del reloj se obtiene la misma imagen. La simetría es una característica inherente de los cristales. Este tipo de simetría no es posible en los cristales de las 14 redes de Bravais. Se ha encontrado de manera experimental que una fase de una aleación aluminio-magnesio es un cuasicristal (Reyes-Melo e Hinojosa-Rivera, 2000).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



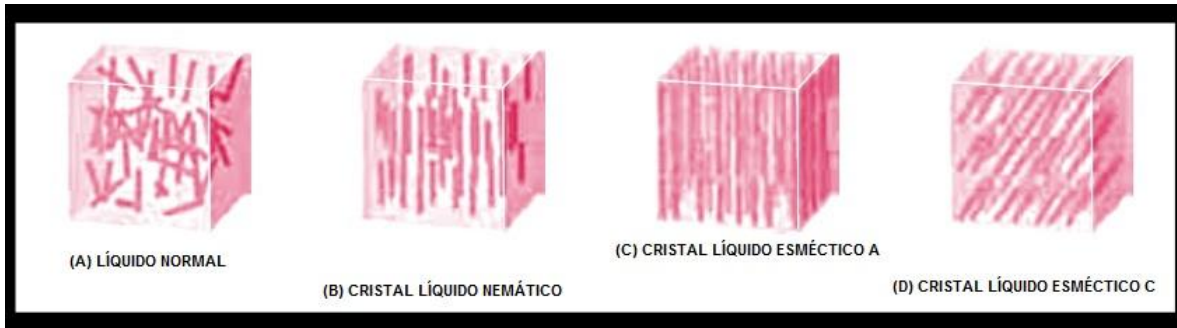
Fuente: (Reyes-Melo e Hinojosa-Rivera, 2000).

Figura 4.7-2. Esquema del ordenamiento de un cuasicristal.

Las sustancias que forman cristales líquidos se constituyen por moléculas largas y aproximadamente cilíndricas. En la fase líquida, estas moléculas se encuentran orientadas en direcciones diferentes (figura 4.7-3A). En cambio las fases liquido-cristalinas, exhiben cierto ordenamiento de las moléculas. Dependiendo de la naturaleza del ordenamiento, los cristales líquidos se divide en tres categorías: nemáticos, esmécticos y colestéricos (Brown, 2004).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Brown, 2004).

Figura 4.7-3. El ordenamiento en las fases líquido-cristalinas comparado con un líquido normal (no cristalino).

### 4.7.1 Fase líquido-cristalina nemática

En esta fase las moléculas se encuentran alineadas a lo largo de sus ejes longitudinales, sin embargo no presentan ningún ordenamiento respecto a los extremos de las moléculas. El acomodo de sus moléculas (figura 4.7-3B) es muy similar al de un grupo de lápices donde sus extremos no están alineados (Brown, 2004).

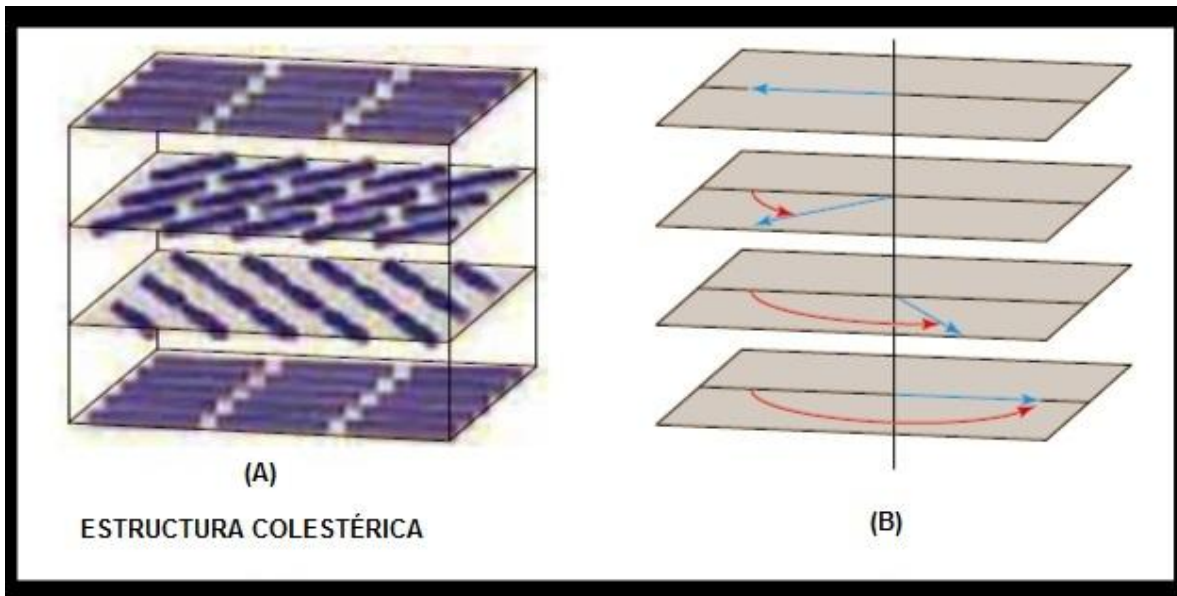
### 4.7.2 Fases líquido-cristalinas esmécticas

Aquí las moléculas presentan un ordenamiento adicional más allá de la fase nemática. Las fases esmécticas parecen un puño de lápices donde sus extremos están casi alineados. Existen diferentes tipos de fases esmécticas, que son designadas por las letras A, B, C, etc. Dentro de la fase esméctica A, las moléculas están dispuestas en capas y sus ejes longitudinales perpendiculares a las capas (figura 4.7-3C). Aunque otras fases esmécticas tienen diferentes tipos de alineación. Como ejemplo se ve en la fase esméctica C (figura 4.7-3D) las moléculas se encuentran alineadas con sus ejes longitudinales inclinados en relación con las capas en que están apiladas las moléculas (Brown, 2004).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 4.7.3 Fase líquido-cristalina colestérica

La fase líquido-cristalina colestérica se muestra en la figura 4.7-4. Aquí las moléculas se encuentran alineadas a lo largo de los ejes longitudinales como en el caso de los cristales líquidos nemáticos, pero están dispuestas en capas, con las moléculas de cada plano torcidas un poco en relación con las moléculas de los planos de arriba y abajo. El nombre de estos cristales líquidos proviene del hecho que muchos derivados del colesterol adquieren esta estructura. Los cristales líquidos colestéricos se han utilizado para vigilar los cambios de temperatura en donde los métodos convencionales no son prácticos. Estos cristales pueden detectar puntos calientes en circuitos microelectrónicos, que puede ser indicativo de una falla. Además se pueden incorporar en termómetros para medir la temperatura cutánea de los bebés (Brown, 2004).



Fuente: (Brown, 2004).

Figura 4.7-4. (A) ordenamiento en un cristal líquido colestérico. Las moléculas de capas sucesivas están orientadas con un ángulo característico respecto a las de las capas adyacentes a fin de evitar interacciones desfavorables. El resultado es un eje tipo tornillo, como se aprecia en (B).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 4.7.4 Aplicaciones

Hoy en día se utilizan como sensores de presión así como de temperatura, caratulas de dispositivos eléctricos como las calculadoras, relojes digitales y computadoras portátiles, entre otros. Las aplicaciones de estos cristales líquidos se hacen posibles gracias al hecho que las fuerzas débiles intermoleculares las cuales mantienen juntas a las moléculas dentro de un cristal líquido se pueden alterar muy fácil por los cambios de temperatura, campos electromagnéticos y presión (Brown, 2004).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### UNIDAD 5. MATERIALES POLIMÉRICOS

#### 5.1 MATERIALES POLIMÉRICOS

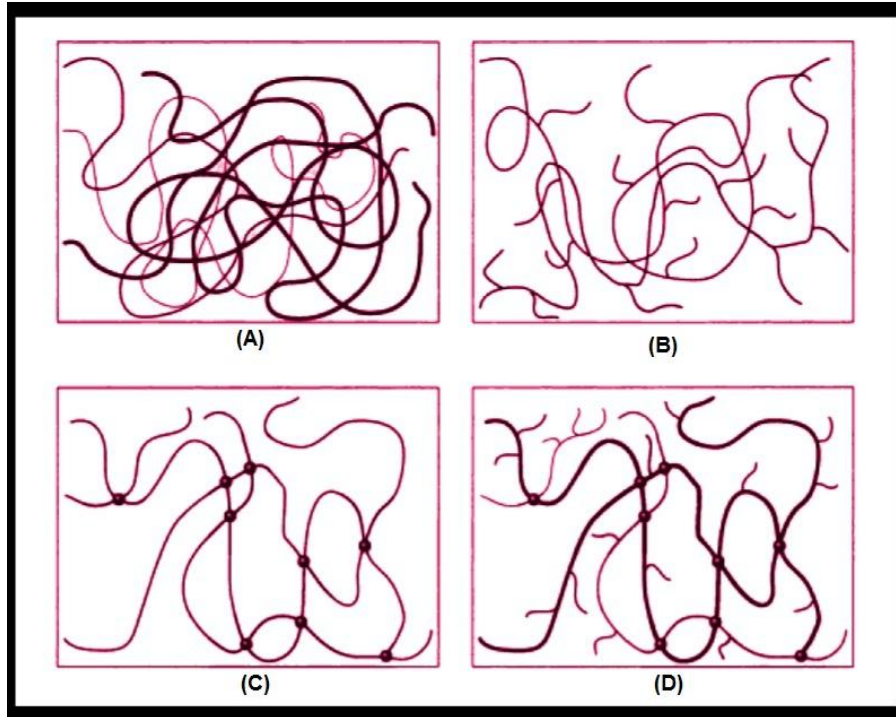
En 1827, Jons Jakob Berzelius designó el término de polímero (que viene del griego polys, “muchos”, y meros, “partes”) para indicar las sustancias moleculares que tienen alta masa molecular y están formadas por la polimerización (unión) de los monómeros, que son moléculas con baja masa molecular (Brown, 2004). Se puede considerar como un material polimérico sólido aquel que tiene varias partes o unidades las cuales están enlazadas químicamente y que están unidas entre sí para formar un sólido (Smith y Hashemi, 2006). Los polímeros son moléculas lineales o ramificadas que se forman por la repetición indefinida de grupos funcionales simples que son los monómeros los cuales se componen principalmente por C, H, O, N (Shackelford, 1995). El polímero es un material puro que no se encuentra adulterado y que normalmente se considera como el producto macromolecular (o de moléculas gigantes) de cadena larga del proceso de polimerización. Las cadenas llegan a contener diversas combinaciones de C, H, O, N, F y S. Durante su fabricación son líquidos y son fácilmente moldeables. Pero los polímeros puros tal como los metales puros no se pueden utilizar como tales. Cuando a los polímeros se les agregan aditivos las “mezclas” o “aleaciones” se denominan plásticos o resinas. Los plásticos constituyen una clase grande y diversa de materiales, cuyo número es más de 15000 y este continúa en aumento y cuentan con una gran diversidad de propiedades y características de elaboración. El tipo de unión es el covalente y este predomina en estos materiales (Mangonon, 2001).

#### 5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

La clasificación de los polímeros puede ser descrito de acuerdo a la síntesis de sus moléculas, su estructura molecular o dependiendo la familia química a la cual pertenecen. Los polímeros se pueden clasificar dependiendo si es un polímero lineal o un polímero ramificado (véase figura 5.2-1).



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

Figura 5.2-1. Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. Nótese que la ramificación puede ocurrir en cualquier tipo de polímero (por ejemplo, termoplásticos, termoestables y elastómeros). (A) polímero lineal no ramificado: obsérvese que las cadenas no forman líneas rectas y no están conectadas. Se muestran diferentes cadenas poliméricas mediante diferentes tonos y diseños para mostrar claramente que cada una de las cadenas no está conectada con otra. (B) polímero lineal ramificado: las cadenas no están conectadas; sin embargo, tienen ramificaciones. (C) polímero termoestable sin ramificación: las cadenas están conectadas entre sí mediante enlaces covalentes, pero no tienen ramificación. Los puntos de unión resaltan mediante círculos rellenos. (D) polímero termoestable que tiene ramificación y cadenas interconectadas mediante enlaces covalentes. Las distintas cadenas y ramificaciones aparecen en diferentes tonos para distinguirlas con mayor claridad. Los sitios donde las cadenas están realmente enlazadas aparecen con círculos rellenos.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

El polímero lineal se forma de cadenas moleculares en forma de espagueti. Dentro de un polímero ramificado hay cadenas primarias de polímero y cadenas más pequeñas secundarias que se conocen como “ramales” las cuales nacen de las cadenas principales. Se puede observar que aunque se dicen “lineales”, las cadenas cuentan con forma de línea rectas. Otra mejor manera de describir los polímeros se hace en función de su comportamiento térmico y mecánico. En la tabla 5.2-1 se comparan los principales tres categorías de polímeros (Askeland y Phulé, 2006).

Tabla 5.2-1. Comparación de las tres categorías principales de polímeros.

Tabla 5.2-1. Comparación de las tres categorías principales de polímeros		
Comportamiento	Estructura general	Ejemplo
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles (con o sin ramificación)	Polietileno
Termoestables	Red tridimensional rígida (las cadenas pueden ser lineales o ramificadas)	Poliuretanos
Elastómeros	Termoplásticos o termoestables ligeramente entrelazados, en forma de moléculas en espiral	Hule natural

Fuente: (Askeland y Phulé, 2006).

### 5.2.1 Termoplásticos

Estos se forman por largas cadenas que se producen al unir monómeros; y se comportan de una manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no ser ramificadas. Las cadenas individuales están entrelazadas. Existen enlaces de van der Waals relativamente débiles entre átomos de cadenas distintas. En los termoplásticos las cadenas se pueden desenlazar aplicando un esfuerzo a la tensión, los termoplásticos pueden ser cristalinos o amorfos. Cuando se calientan se ablandan y se funden. Son procesadas en ciertas formas cuando se calientan a temperaturas elevadas. Los termoplásticos se reciclan fácilmente (Askeland y Phulé, 2006).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

Los termoplásticos necesitan calentarse para darles forma y después ser enfriados, de esta manera adquieren y mantienen la forma que se les dio. Los termoplásticos pueden calentarse de nuevo cierto número de veces para poder darles nuevas formas sin que se presente un cambio significativo en sus propiedades. La mayoría de estos materiales se constituyen por cadenas principales que son muy largas de átomos de carbono, que se encuentran enlazados entre sí en forma covalente. En algunas ocasiones, también se enlazan átomos de hidrogeno, azufre o oxigeno de manera covalente con la cadena molecular principal. Los átomos o grupos de átomos adheridos se encuentran enlazados de manera covalente a los átomos de la principal cadena. Las largas cadenas se encuentran ligadas entre sí por medio de enlaces secundarios (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.2.2 Termoestables**

Están constituidos por cadenas largas ya sean lineales o ramificadas de moléculas que están fuertemente unidas por enlaces cruzados o entrelazados que forman estructuras de redes tridimensionales. Los termoestables o polímeros de red tienen cierto parecido a un puñado de hilos los cuales están tejidos entre sí en varios sitios y no solo enredados. Por lo general los termoestables son más resistentes, pero son más frágiles que los termoplásticos. Los termoplásticos al momento de calentarse no se funden sino que estos se desintegran. Los termoestables son difíciles de reciclar esto después de que las reacciones de enlaces cruzados han tenido lugar (Askeland y Phulé, 2006).

Los plásticos termofijos los cuales adquieren una forma permanente y que son fijados o “curados” mediante una reacción química, no es posible fundirlos y darles una forma de nuevo, porque estos se degradan y/o se descomponen cuando se someten a temperaturas altas, estos plásticos termofijos no son reciclables. La palabra termofijo significa que se requiere calor (del griego therme que significa calor) para endurecer de manera permanente al plástico. También existen muchos plásticos que se llaman termofijos y que solo se pueden fijar o curar a temperatura ambiente mediante una reacción química. En su mayoría los plásticos termofijos

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

se componen por una red de átomos de carbono que están enlazados en forma covalente para formar un sólido rígido. En algunas ocasiones también se enlazan de manera covalente átomos de nitrógeno, azufre, oxígeno u otros para formar una estructura reticular termofija. Estos materiales tienen buenas ventajas para el diseño de ingeniería como son alta rigidez y alta estabilidad térmica, peso ligero, alta estabilidad dimensional, resistencia a la fluencia y deformación bajo carga y propiedades aislantes térmicas y eléctricas altas (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.2.3 Elastómeros**

Los elastómeros son considerados otro tipo de polímero, pero estos en realidad no son. Estos materiales por lo general son flexibles de módulo pequeño que pueden estirarse hasta al menos dos veces su longitud y al momento de desaparecer el esfuerzo recuperan su longitud original. Los elastómeros son mejor conocidos como hules. Presentan una deformación elástica >200%. Es posible que se trate de termoestables o termoplásticos ligeramente entrelazados. Las cadenas poliméricas cuentan con una forma de moléculas en espiral las cuales se pueden estirar de manera reversible cuando se les aplica una fuerza. También están los elastómeros plásticos los cuales son un grupo especial de polímeros, cuentan con la facilidad de procesamiento de los termoplásticos así como el comportamiento elástico de los elastómeros (Mangonon, 2001; Askeland y Phulé, 2006)

## **5.3 TERMOPLÁSTICOS DE USO GENERAL Y SUS APLICACIONES**

### **5.3.1 Polietileno**

Es un material termoplástico translúcido, que tiene un color entre transparente y blanquecino, este es fabricado en películas delgadas transparentes. Las secciones que son gruesas son translúcidas y cuentan con una apariencia cerosa. Si se utilizan colorantes se pueden obtener una gran variedad de productos de diferentes colores (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. El polietileno se utiliza en recipientes, enseres domésticos, aislantes eléctricos así como botellas moldeadas por soplado. Las películas de polietileno

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

se utilizan para empacar y también como materiales de revestimiento dentro de estanques de agua (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.2 Policloruro de vinilo y copolímeros**

Este material mejor conocido como PVC es un plástico que se utiliza mucho y tiene el segundo tonelaje en ventas más grande del mundo. El gran uso del PVC se da por la gran resistencia química y la capacidad única para mezclarse fácilmente con aditivos y formar un gran número de compuestos que tienen una gran variedad de propiedades físicas y químicas (Smith y Hashemi, 2006).

El policloruro de vinilo rígido se puede utilizar en algunas aplicaciones pero es difícil de procesar y tiene baja resistencia al impacto. Este se utiliza en la industria de la construcción en tuberías, canaletas, marcos de ventana, molduras y adornos interiores. También se utiliza para hacer conductos de cables de electricidad (Smith y Hashemi, 2006).

El policloruro de vinilo plastificado con la adición de plastificantes al PVC se obtiene, suavidad, flexibilidad y extensibilidad. El PVC plastificado se utiliza en tapicería de muebles y automóviles, cortinas de baño, zapatos, equipaje, recubrimiento de paredes interiores y como impermeable para la lluvia (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.3 Polipropileno**

Es el tercer material plástico más importante y es uno de los de más bajo costo ya que este puede ser sintetizado a partir de materias primas petroquímicas que son de menor costo y un catalizador tipo Ziegler (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Se utiliza en enseres domésticos, empaques, componentes de aparatos electrodomésticos, frascos de diversos tipos y material de laboratorio. Dentro de la industria del transporte, los copolímeros de polipropileno de alto impacto reemplazan a los cauchos como cubiertas de acumuladores. El polipropileno que está mezclado con material de carga se utiliza en cubiertas de ventiladores de automóviles así como ductos de calefacción. El homopolímero del propileno se utiliza como material tejido que se usa en la fabricación de sacos para

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

embarcar muchos productos industriales. Cuando se fabrica como película el polipropileno se utiliza para fabricar bolsas y envoltorios para artículos blandos, por el lustre, brillo y su buena resistencia. También el polipropileno se utiliza en tapas roscadas, cajas y recipientes (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.4 Poliestireno**

Material termoplástico, el cuarto de mayor tonelaje. El homo-polímero de poliestireno es un material plástico incoloro, inodoro y también muy frágil. Existen además del poliestireno del tipo cristalino, otros tipos importantes que son los poliestirenos que son modificados con caucho, son resistentes al impacto y expandibles. El estireno se utiliza para producir un gran número de copolímeros importantes (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Dentro de sus aplicaciones de estos materiales están las partes interiores de automóviles, enseres domésticos, perillas y carcasas de aparatos electrodomésticos (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.5 Poliacrilonitrilo**

Material polimérico de tipo acrílico que se utiliza en forma de fibras, debido a la resistencia y estabilidad química con la que cuenta, también es utilizado como comonomero en algunos termoplásticos de ingeniería (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. El acrilonitrilo que se utiliza en forma de fibra lo emplean como lana en suéteres y cobertores. También es usado como comonomero para producir los copolímeros de estireno-acrilonitrilo (resinas SAN) y los terpolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (resinas ABS) (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.6 Estireno-acrilonitrilo (SAN)**

Son miembros de la familia del estireno que cuentan con alto rendimiento. Las resinas SAN son copolímeros aleatorios amorfos de acrilonitrilo y estireno (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Las resinas SAN tienen sus principales aplicaciones en lentes de instrumentos automotrices, paneles de apoyo con carga de vidrio y componentes

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

del tablero de instrumentos, recipientes de licuadoras y batidoras, perillas de aparatos electrodomésticos, también como jeringas medicas y aspiradores sanguíneos, vasos, tazas y acabados vítreos (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.7 ABS**

Son una familia de termoplásticos. Su nombre se da por los tres monómeros que se utilizan para producirlo, acrilonitrilo, butadieno y estireno. Estos materiales son importantes en ingeniería por su gran resistencia mecánica y al impacto, además de ser combinadas con su facilidad de procesamiento (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. El principal uso del material ABS es en tuberías y accesorios, como lo son de desagüe y ventilación para edificios. También se utilizan como partes automotrices, cajas y cubiertas de computadoras, piezas de aparatos electrodomésticos como son revestimientos para puertas e interiores de los refrigeradores, maquinas de oficina, carcasas de teléfono, portacables eléctricos y blindajes contra interferencias electromagnéticas de radiofrecuencias (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.8 Polimetil metacrilato (PMMA)**

Es un material termoplástico duro, rígido y transparente que cuenta con una buena resistencia a la intemperie y más resistente al impacto que el vidrio. Es mejor conocido con el nombre de Plexiglás o Lucite y dentro del grupo de los termoplásticos que son conocidos como acrílicos es el más importante (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Este material es utilizado en ventanillas de barcos y aviones, alumbrado exterior, tragaluces y también anuncios publicitarios. También se llega a utilizar como cristales de luces traseras, gafas de seguridad, manijas, perillas y escudos de seguridad (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.9 Fluoroplásticos**

Materiales que son plásticos o polímeros, son fabricados a partir de monómeros que tienen uno o varios átomos de flúor. Los fluoroplásticos tienen una gran

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

combinación de propiedades especiales que los hacen útiles en ingeniería. Tienen alta resistencia a condiciones ambientales químicas que son muy hostiles y cuentan con propiedades muy notables como aislantes eléctricos. Los fluoroplasticos que cuentan con un gran porcentaje de flúor presentan bajos coeficientes de fricción y esto les da propiedades de antiadherencia y autolubricación. Se han fabricado muchos pero los dos que más utilizan son el politetrafluoroetileno (PTFE) y el policlorotrifluoroetileno (PCTFE) (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Los PTFE son utilizados en tuberías resistentes a sustancias químicas y partes de bombas, componentes eléctricos moldeados, cintas y recubrimientos antiadherentes, aislamiento de cables. Además los compuestos de PTFE con carga son utilizados para la fabricación de boquillas, empaques, sellos, juntas y rondanas. Los productos extruidos, maquinados y moldeados de materiales poliméricos de PCTFE son utilizados en equipos de procesamiento químico así como en aplicaciones eléctricas. También se utilizan para fabricar componentes eléctricos, rondanas, juntas y sellos (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.10 Poliamidas (nylon)**

Estos son termoplásticos los cuales se pueden procesar fundidos y su estructura de la cadena principal tiene un grupo amida de manera repetida. Los nylons pertenecen a la familia de plásticos de ingeniería y tienen una capacidad de carga que es superior a altas temperaturas, tienen buena dureza, baja resistencia a la fricción y tienen buena resistencia a las sustancias químicas (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Se utilizan casi en todo tipo de industria. Su uso más común es la fabricación de piezas antifricción y engranes que no necesitan lubricación, piezas mecánicas las que deben funcionar a temperaturas altas y resistentes a hidrocarburos y disolventes, también partes eléctricas y partes de alto impacto que necesitan rigidez y resistencia. En la industria automotriz se utilizan como velocímetros y engranes para limpia parabrisas. El nylon que es reforzado con vidrio se utiliza en recipientes para líquido de frenos y de dirección, paletas de ventilador, tapas de válvulas y cubiertas de la columna de la dirección. Se utilizan



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

en aplicaciones eléctricas o electrónicas como conectores, aislantes de alambre para conexiones, enchufes, terminales y monturas de antena (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.11 Policarbonato**

Son otra clase de termoplásticos de ingeniería, tienen características especiales de alto desempeño como son su dureza y estabilidad dimensional y su alta resistencia (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Las aplicaciones de los policarbonatos incluyen engranes y levas, escudos protectores, cascos, componentes de aviones, cubiertas de relevadores eléctricos, cajas y lentes de semáforos, hélices de barcos, colectores solares y vidrieras para ventanas, aparatos domésticos pequeños, terminales de computadora y carcasas de herramientas eléctricas manuales (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.12 Resinas de fenileno a base de oxido**

Estas resinas a base de oxido también constituyen un tipo de materiales termoplásticos de ingeniería. Con el acoplamiento oxidativo de monómeros fenólicos se producen as resinas termoplásticas de fenileno a base de óxido (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Las aplicaciones características de estas resinas son sintonizadores de tv y componentes de balancín para determinar la formación de calor, conectores eléctricos, pequeños aparatos electrodomésticos y carcasas de maquinas de oficina, también tableros de automóviles y partes exteriores de la carrocería (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.13 Acetales**

Materiales termoplásticos que se utilizan en ingeniería y tienen un gran rendimiento. Están dentro de los termoplásticos más resistentes y tienen excelente estabilidad dimensional. Entre otras de sus características importantes son sus

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

bajos coeficientes de fricción, buen procesamiento, resistencia a disolventes y alta resistencia térmica de 90°C (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Estos materiales han reemplazado a varias piezas de fundidas de cobre, zinc y aluminio, gracias a su bajo costo. Dentro de la industria automotriz se usan en componentes de sistemas de combustibles, manijas de ventanillas y cinturones de seguridad. En la maquinaria se usan como acoplamientos metálicos, engranes, levas y carcasas, propulsores de bombas. También se utilizan en productos de consumo, como son cierres de cremalleras, plumas para escribir y carretes de pesca (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.14 Poliésteres termoplásticos**

Son dos materiales termoplásticos de ingeniería, el tereftalato de polibutileno (PBT) y tereftalato de polietileno (PET). Este es usado como envoltura de alimentos y fibra para ropa, cuerdas y alfombras. El PBT fue introducido en 1969 como material de reemplazo en algunas aplicaciones que usaban metales y plásticos termoestables (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. El PBT se usa en aplicaciones eléctricas y electrónicas como reles, conectores, interruptores, componentes sintonizadores de TV, tableros terminales y tableros de circuito integrado. El PBT también tiene usos industriales como propulsores de bombas, ménsulas de apoyo y carcasas, válvulas y soportes de riego, cámaras y componentes de medidores de agua. El PBT se utiliza también como carcasas y mangos de aparatos electrodomésticos. Sus aplicaciones automotrices incluyen carretes y tapas de bobinas, marcos, engranes de velocímetro y controles de inyección de combustible (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.15 Polisulfona**

Los anillos de fenileno de la polisulfona que se repite son los que restringen la rotación de las cadenas del polímero y de esta manera crean una fuerte atracción molecular, que le imparte gran resistencia y rigidez a este material (Smith y Hashemi, 2006).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

Aplicaciones. Este material tiene aplicaciones electrónicas y eléctricas como lo son núcleos de bobina, carretes, conectores, película de capacitores, tableros de circuitos estructurales y componentes de televisión. Las polisulfonas son resistentes a la esterilización y de ahí su gran uso en bandejas y herramientas medicas. Dentro de equipos de control de contaminación y procesos químicos son utilizadas como tuberías, empaques de torre, bombas, módulos y placas de apoyo de filtro que son resistentes a la corrosión (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.16 Sulfuro de polifenileno (PPS)**

Es un termoplástico de ingeniería el cual esta caracterizado por su destacable resistencia química, aparte posee buenas propiedades mecánicas y de rigidez a elevadas temperaturas. Su estructura simétrica compacta de anillos de fenileno que están separados por átomos de producen un material polimérico rígido y fuerte (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Tiene aplicaciones mecánico-industriales como bombas sumergibles centrifugas, bombas de tipo engranaje y equipo para procesamiento químico. Los compuestos de PPS también son muy recomendados para usar en diversas aplicaciones automotrices “bajo el cofre” como suelen ser los sistemas de control de emisiones, ya que son impermeables a la corrosión producto de los gases de escape del motor, otros fluidos automotrices y la gasolina. También son utilizados en aplicaciones electrónicas y eléctricas como conectores, componentes de computadora, carretes y formas para bobina. El PPS al ser resistente a la corrosión y químicamente es estable se utilizan como recubrimientos para ductos de crudo, accesorios acopladores, válvulas y otros equipos que son utilizados en las industrias del procesamiento del petróleo y procesamiento químico (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.3.17 Polieterimida**

Este material es de los más recientes de los termoplásticos amorfos de ingeniería. Este material presenta una estabilidad de los enlaces “*imida*” lo que le dan a este material una gran resistencia térmica así como una resistencia a la alta rigidez y la

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

fluencia. También este material posee buenas propiedades de aislamiento eléctrico que son estables en cierto rango de temperaturas y frecuencias (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Este material se utiliza en aplicaciones automotrices, eléctricas, electrónicas, de especialidad y aeroespaciales. Dentro de las aplicaciones electrónicas y eléctricas se encuentran las conexiones a espigas de contacto, bobinas para temperaturas altas, bloques de fusibles, carretes y cajas de interruptores de circuitos de alto voltaje (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.4 TERMOESTABLES O TERMOFIJOS Y SUS APLICACIONES**

#### **5.4.1 Fenólicos**

Los fenólicos son materiales termofijos que fueron los primeros materiales plásticos de gran importancia utilizados en la industria. Estos plásticos fenólicos se siguen usando en la actualidad por su precio bajo y además de sus buenas propiedades eléctricas y también porque son aislantes térmicos. Son muy fáciles de moldear pero se limitan en el color ya que solo son castaños o negros. Estas resinas fenólicas son producidas mediante la reacción del fenol y formaldehído mediante polimerización por condensación y agua como subproducto (Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Las principales aplicaciones de los compuestos fenólicos son los dispositivos de cableado, conectores, sistemas de relés telefónicos y conmutadores eléctricos. Dentro la ingeniería automotriz, se utilizan compuestos moldeados fenólicos para la fabricación de frenos de potencia así como de partes de transmisión. Los fenólicos se utilizan como perillas, manijas y placas terminales dentro de los aparatos electrodomésticos pequeños. Las resinas fenólicas por ser buenos adhesivos a temperaturas altas y son resistentes a la humedad, se utilizan para laminar algunos tipos de contrachapado y tableros de partículas. Las resinas también se utilizan en grandes cantidades como material aglutinante de arena en moldeo en cascara y fundiciones (Smith y Hashemi, 2006).

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

### **5.4.2 Resinas epóxicas**

Es una familia de materiales poliméricos termofijos los cuales no generan productos de reacción cuando son endurecidos (enlace cruzado) y por esta razón presentan baja contracción al curar. Cuentan con una buena adhesión a otros materiales, cuentan con buena resistencia química y al medio ambiente, además de tener buenas propiedades como aislantes eléctricos y buenas propiedades mecánicas. Su propiedad de adhesividad hace que los epóxicos sean excelentes materiales para encapsular componentes electrónicos y de diversos tipos, así como para revestir cualquier tipo de material como plástico, acero y otros, y también para unir materiales iguales o diferentes como aluminio, madera, vidrio, acero o plástico (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Las resinas epóxicas son utilizadas en una gran variedad de recubrimientos protectores y decorativos en base a su buena adhesión, su buena resistencia química y mecánica. El uso principal de estas resinas está en los revestimientos de tambores y latas, recubrimiento de cables, pintura de automóviles y artefactos. Las resinas epóxicas se utilizan también dentro de la industria electrónica y eléctrica por su baja contracción durante el curado, su resistencia dieléctrica, buena adhesión y su capacidad que tienen de conservar sus propiedades en distintas condiciones ambientales como sitios con alta humedad y mojados. Dentro de las típicas aplicaciones de las resinas se incluyen los conmutadores, los aislantes de alto voltaje y encapsulado de transistores. También llegan a utilizarse para fabricar materiales de matriz de fibra y fabricar laminados (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

### **5.4.3 Poliésteres insaturados**

Estos materiales tienen dobles enlaces covalentes carbono-carbono reactivos que se pueden entrecruzar para formar materiales termofijos. Cuando se combinan con fibras de vidrio, los poliésteres insaturados se pueden entrecruzar, formando así de esta manera materiales compuestos reforzados de gran resistencia (Smith y Hashemi, 2006).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Aplicaciones. Los poliésteres insaturados que son reforzados con vidrio se utilizan para la fabricación de autopartes y paneles de automóviles. También se utiliza para construir pequeñas plataformas de barcos y dentro de la industria de la construcción es utilizado para fabricar componentes de baños y paneles. Los poliésteres insaturados reforzados con vidrio se utilizan donde se requiere una gran resistencia a la corrosión como tanques, tuberías y ductos (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.4.4 Resinas amínicas (ureas y melaminas)**

Son materiales poliméricos termofijos que están formados por la reacción controlada de formaldehído con diversos compuestos los cuales contienen el grupo amina  $-NH_2$ . Los dos tipos más importantes de resinas amínicas son la urea-formaldehído y la melamina-formaldehído. Las resinas de urea se encuentran disponibles en una gran variedad de colores, translúcidas, blancas, incoloras inclusive hasta de color negro lustroso. Las melaminas son resinas termofijas amínicas, estas se conocen por su gran dureza, su colorabilidad permanente, así como su resistencia a la flama con autoextinción (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

Aplicaciones. Para elaborar perillas, manijas, para placas y receptáculos eléctricos de pared se utilizan los compuestos moldeables de urea-formaldehído con carga de celulosa. Los compuestos de melamina cargados con celulosa se utilizan en botones, vajillas, perillas y botones de control moldeados. Las resinas de urea como las de melamina que son solubles en agua se usan como adhesivos y resinas de enlace para los tableros de partículas de madera, cascos de barcos, contrachapados, pisos y ensamblado de mobiliario. Se usan las resinas amínicas como aglutinantes para núcleos y cajas de fundición. Las melaminas debido a que no imparten olor ni sabor a los alimentos, se utilizan como para varios artículos domésticos (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 5.5 ELASTÓMEROS

#### 5.5.1 Caucho natural

El caucho se produce a partir del látex del árbol *Hevea brasiliensis*. El látex es un líquido lechoso, el cual tiene partículas pequeñas de caucho. Una propiedad no muy común del hule pero muy útil es su elasticidad. El hule se llega a estirar 10 veces más de su longitud y puede regresar a su tamaño original. Esta propiedad de flexibilidad del hule se debe a que sus moléculas de cadena larga son flexibles. El hule en estado natural es un desorden de cadenas poliméricas pero si la fuerza externa que se aplica es mucha, las cadenas individuales se deslizaran entre ellas y se pierde la elasticidad. Charles Goodyear en el año de 1839, descubrió que el hule natural o caucho se podía entrelazar usando azufre para evitar así el deslazamiento de las cadenas. Este proceso es mejor conocido como vulcanización y este abrió el camino para darle al caucho varios usos comerciales y prácticos como las dentaduras postizas y el principal los neumáticos de los automóviles (Smith y Hashemi, 2006; Chang, 2007).

#### 5.5.2 Caucho estireno-butadieno (SBR)

Este es el caucho sintético más importante y es el de mayor uso y es un copolímero del butadieno-estireno. El caucho SBR es de menor costo que el caucho natural y es usado en muchas aplicaciones de caucho. Se utiliza para cuerdas de neumáticos pero el SBR genera más calor pero tiene mejor resistencia. El caucho natural y el SBR es que absorben diferentes disolventes como la gasolina y el aceite y se hinchan (Smith y Hashemi, 2006).

#### 5.5.3 Cauchos de nitrilo

Estos son copolímeros de butadieno y acrilonitrilo y tienen proporciones que van del 55 al 82% de butadieno y de 45 a 18% de acrilonitrilo. Los grupos nitrilo le proporcionan buena resistencia a disolventes y aceites, y mejoran la resistencia al calor y la abrasión. Estos cauchos de nitrilo son más caros que los cauchos ordinarios, por esta razón el uso de estos cauchos se reduce a aplicaciones

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

especiales, como son juntas en las que se requiere alta resistencia a los aceites, mangueras de combustible y disolventes (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.5.4 Policloropreno (neopreno)**

Estos cauchos son similares al isopreno, pero a diferencia de que el grupo metilo unido al doble enlace ha sido remplazado por un átomo de cloro: este átomo aumenta la resistencia de los dobles enlaces cuando son atacados por el oxígeno, calor, ozono, luz y distintas condiciones ambientales. Este material presenta buena resistencia a combustibles y aceites, pero también mejora su resistencia más que otros cauchos ordinarios. Pero cuentan con una flexibilidad más débil a bajas temperaturas y tienen un costo más caro. Los neoprenos se suelen utilizar en cinturones industriales, sellos, diafragmas de automóvil, mangueras y recubrimientos de alambres y cables (Smith y Hashemi, 2006).

### **5.6 PROPIEDADES QUÍMICAS, TÉRMICAS Y MECÁNICAS.**

Una de las principales ventajas de los plásticos de ingeniería es que cuentan con baja densidad y esta característica es debido a la pequeña masa de los átomos que lo componen. Los plásticos reforzados ofrecen resistencias específicas además de módulos específicos bastante grandes que son aprovechados en la industria aeroespacial (Mangonon, 2001). En la tabla 5.6-1 se encuentra una lista de las densidades, resistencias a la tensión, resistencias dieléctricas, resistencias al impacto y para algunos termoplásticos las temperaturas máximas de uso. La gran ventaja que tienen muchos materiales plásticos es que sus densidades son muy bajas, la mayoría de los plásticos tienen densidades de 1 comparada con 7.8 del hierro.



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Tabla 5.6-1. Algunas propiedades de termoplásticos selectos de uso general.

Tabla 5.6-1. Algunas propiedades de termoplásticos selectos de uso general						
Material	Densidad $g/cm^3$	Resistencia a la tensión (x 1000 psi) <sup>1</sup>	Resistencia al impacto, Izod ( $pie \cdot lb/pulg$ ) <sup>2</sup>	Resistencia dieléctrica ( $V/mil$ ) <sup>3</sup>	Temp. Máx. de uso (sin carga)	
					°F	°C
Poliétileno: Baja densidad	0.92-0.93	0.9-2.5	0.4-14	480	180-212	82-100
Alta densidad	0.95-0.96	2.9-5.4		480	175-250	80-120
PVC clorado, rígido	1.49-1.58	7.5-9	1.0-5.6		230	110
Polipropileno, uso general	0.90-0.91	4.8-5.5	0.4-2.2	650	225-300	107-150
Estireno-acrilonitrilo (SAN)	1.08	10-12	0.4-0.5	1775	140-220	60-104
ABS, uso general	1.05-1.07	5.9	6	385	160-200	71-93
Acrílico, uso general	1.11-1.19	11.0	2.3	450-500	130-230	54-110
Acetatos celulósicos	1.2-1.3	3-8	1.1-6.8	250-600	140-220	60-104
politetrafluoroetileno	2.1-2.3	1-4	2.5-4.0	400-500	550	288

1) 1000 psi = 6.9 MPa  
 2) Prueba Izod con muesca:  $1 pie \cdot lb/plg = 53.83 J/m$   
 3) 1 V/Mil = 39.4 V/mm

Fuente: (Smith y Hashemi, 2006)

Los materiales plásticos tienen resistencias a la tensión que son muy bajas, sin embargo esta propiedad puede convertirse en una desventaja dentro de algunos diseños de ingeniería. La resistencia a la tensión de los materiales plásticos es de menos de 10000 psi (69 MPa). De manera general, los materiales plásticos son buenos aislantes eléctricos. La resistencia como aislante eléctrico que tienen los materiales plásticos es medida por su resistencia dieléctrica, donde esta se define como el gradiente de voltaje que produce la caída de la corriente eléctrica a través del material. De manera general la resistencia dieléctrica se mide en voltios por milímetro o voltios por milésimas de pulgada (mil). La resistencia dieléctrica de los plásticos se encuentra entre 385-1775 V/mil. Los materiales plásticos tienen una temperatura máxima de uso la cual es baja y varía de 54-149°C (130 a 300°F). Aunque algunos termoplásticos tienen temperaturas de uso que son mal altas, como el politetrafluoroetileno el cual resiste temperaturas de hasta 288°C (550°F). Los plásticos termofijos son frágiles y esto debido a la estructura de enlaces

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

transversales y no se deforman con la temperatura (Mangonon, 2001; Smith y Hashemi, 2006).

# INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

## UNIDAD 6. MATERIALES SEMICONDUCTORES

### 6.1 FUNDAMENTOS DE LOS SEMICONDUCTORES

Los semiconductores son materiales que se comportan como un conductor o aislante, dependiendo de diversos factores tales como el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que lo incide así como la temperatura ambiente a la que se encuentre. Los semiconductores que son aquellos materiales donde sus conductividades eléctricas están entre las de metales altamente conductores y la de los aislantes con una conducción pobre. Los semiconductores intrínsecos son aquellos semiconductores puros donde su conductividad eléctrica se determina en base a sus propiedades conductivas inherentes. Los elementos químicos como el silicio y el germanio puros son materiales semiconductores intrínsecos. Dichos elementos cuentan con la estructura cubica de diamante con enlaces covalentes altamente direccionales. Los orbitales de enlace híbridos  $sp^3$  tetraédricos los cuales consisten en pares de electrones mantendrán unidos a los átomos dentro de una red cristalina. Aquí en esta estructura cada átomo de silicio o germanio aportan cuatro electrones de valencia (Smith y Hashemi, 2006).

Como se vio anteriormente los polímeros son materiales técnicos muy sobresalientes los cuales han tenido un gran impacto en la sociedad contemporáneo. Por otra parte los semiconductores son relativamente invisibles, pero su impacto social no se ve afectado ya que es del mismo orden. Un grupo parcialmente pequeño de elementos y compuestos cuentan con una propiedad eléctrica importante, dicha propiedad es la semiconducción, una propiedad donde no son ni buenos conductores eléctricos, aunque de igual forma no son buenos aisladores eléctricos. En pocas palabras se puede decir que, la capacidad que tienen para conducir electricidad es intermedia. Los semiconductores, estos no se ajustan en cualquiera de los cuatro tipos de materiales estructurales basados en el enlazamiento atómico. Los metales, inherentemente, son buenos conductores de electricidad. Los malos conductores son los no metales, así como los cerámicos y los polímeros, pero, por otro lado son buenos aislantes (Shackelford, 1995).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 6.2 SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

Los materiales semiconductores como lo son el silicio y el germanio, son elementos que se utilizan para la construcción de muchos dispositivos electrónicos de uso común. Estos materiales cuentan con una conductividad eléctrica que es muy fácil de controlar y cuando estos son combinados apropiadamente, llegan a actuar como interruptores, dispositivos de almacenamiento o amplificadores. El germanio y el silicio puros se comportan como semiconductores intrínsecos. La brecha de energía  $E_g$  que existe entre las bandas de valencia y conducción en los semiconductores es pequeña (Tabla 6.2-1), por esta razón algunos electrones tienen suficiente energía térmica para salvar la brecha, entrando así en la banda de conducción.

Tabla 6.2-1. Estructura electrónica y conductividad eléctrica de los elementos del grupo IVA a 25°C.

metal	Estructura electrónica	Conductividad eléctrica ( $\text{ohms}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	Brecha de energía (eV)	Movilidad de los electrones ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	Movilidad de los huecos ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )
C (diamante)	$1s^2 2s^2 2p^2$	$< 10^{-18}$	5.4	1800	1400
Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	$5 \times 10^{-6}$	1.107	1900	500
Ge	... .. $4s^2 4p^2$	0.02	0.67	3800	1820
Sn	... .. $5s^2 5p^2$	$0.9 \times 10^5$	0.08	2500	2400

Fuente: (Askeland, 1998).

Los electrones excitados dejarán niveles de energía libres, es decir huecos, dentro de la banda de valencia. Cuando un electrón se mueve para llenar un hueco, en la fuente original de este electrón se crea otro; por esto parece ser que los huecos actuarán como electrones de carga positiva y portadores de carga eléctrica. Cuando al material se le aplica un voltaje eléctrico, los electrones de la banda de valencia se aceleran rumbo a la terminal positiva, mientras que los huecos de la banda de valencia se dirigen hacia la terminal negativa. Por esta razón la corriente se conduce por medio del movimiento de electrones y huecos (Askeland, 1998).

Por lo tanto la conductividad se determina por el número de pares de electrón hueco.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

$$\sigma' = n_e q \mu_e + n_h q \mu_h$$

Donde:

$n_e$  = número de electrones en la banda de conducción

$n_h$  = número de huecos en la banda de valencia

$\mu_e$  Y  $\mu_h$  = son las movilidades de electrones y de huecos (véase tabla 6.2-1)

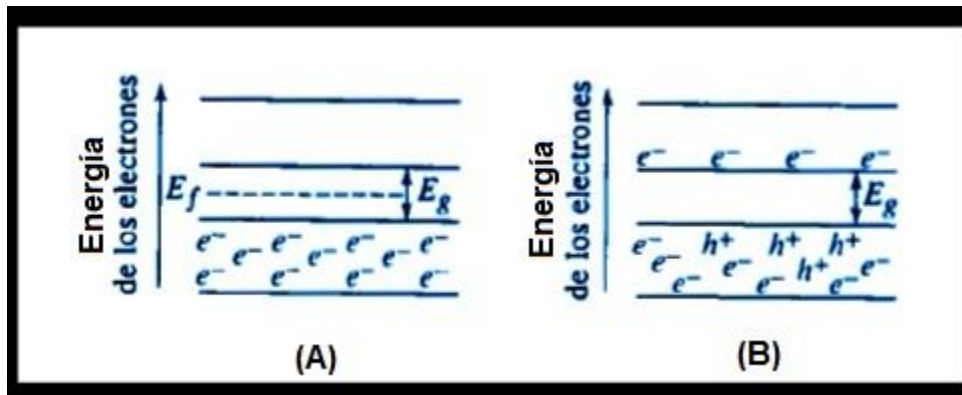
Para el caso de los semiconductores intrínsecos:

$$n = n_e = n_h$$

La conductividad queda como:

$$\sigma = nq(\mu_e + \mu_h)$$

En los semiconductores intrínsecos, se controla la temperatura y con esto se controla el número de portadores de carga y también la conductividad eléctrica. En el cero absoluto todos los electrones se encuentran en la banda de valencia y por otro lado los niveles de la banda de conducción están libres (figura 6.2-1).



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.2-1. Distribución de electrones y huecos en las bandas de valencia y de conducción (A) en el cero absoluto y (B) una temperatura elevada.

Cuando la temperatura se incrementa, existen mayores posibilidades que se ocupe un nivel de energía en la banda de conducción (hay las mismas posibilidades de quedar libre un nivel en la banda de valencia, es decir que se presente un hueco) (véase figura 6.2-1) (Askeland, 1998).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

El número de electrones que están en la banda de conducción, es igual al número de huecos en la banda de valencia, y esta dado por:

$$n = n_e = n_h = n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

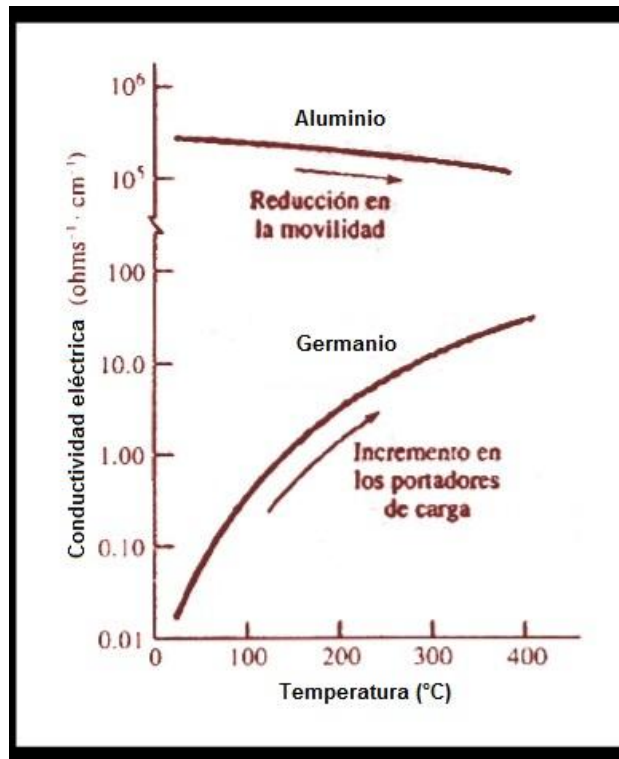
Donde  $n_0$  se considera como constante, aunque esta también depende de la temperatura. Con temperaturas más altas mas electrones cruzan la zona prohibida y por ello, la conductividad se incrementa:

$$\sigma = n_0 q (\mu_e + \mu_h) \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

Aquí  $n$  y  $\sigma$  se relación con la temperatura por medio de una ecuación de Arrhenius,  $tasa = A \exp(-Q/RT)$ . El comportamiento de un semiconductor es opuesto al que tienen los metales (figura 6.2-2).

Cuando incrementa la temperatura también aumenta la conductividad en un semiconductor ya que están presentes mas portadores de carga, mientras que en los metales se reduce la conductividad, y esto se debe a la menor movilidad de los portadores de carga (Askeland, 1998).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.2-2. Conductividad eléctrica en función de la temperatura, para semiconductores en comparación con metales.

Cuando se retira el voltaje de excitación o la fuente de energía los huecos y electrones se vuelven a combinar después de un periodo. El número de electrones en la banda de conducción se reduce rápidamente y está dada por:

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$$

Donde:

$t$  = el tiempo después de haber eliminado el campo

$n_0$  = es una constante

$\tau$  = constante conocida como tiempo de recombinación (esta característica es importante durante la operación de muchos dispositivos semiconductores) (Askeland, 1998).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

### 6.3 SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

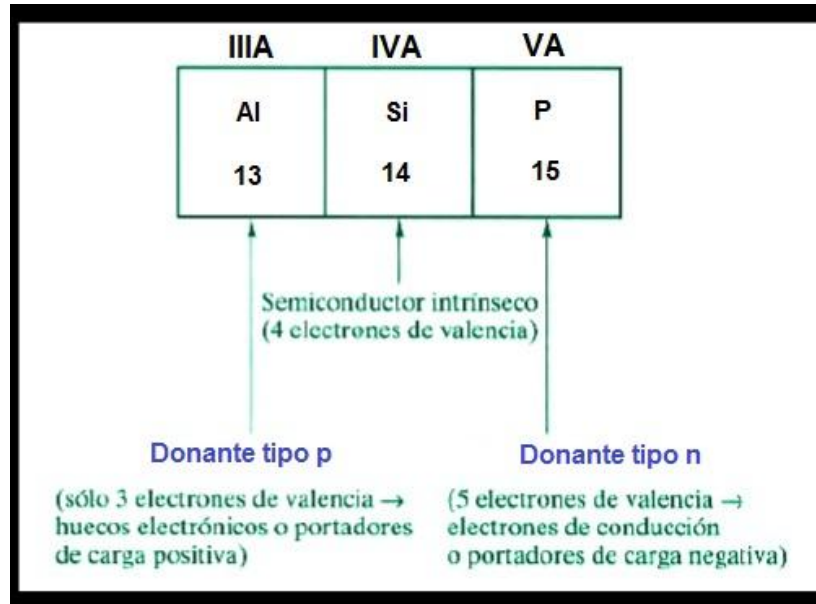
El comportamiento de un semiconductor extrínseco no se puede controlar con precisión, esto porque ligeras variaciones en la temperatura cambian la conductividad. Los materiales puros tienen la propiedad de semiconducción extrínseca. La semiconducción extrínseca es el resultado de la adición de impurezas que son conocidas como dopantes, y este proceso de adición de dichos componentes es conocido como dopado. La conductividad del semiconductor extrínseco depende del número de átomos de impurezas o dopantes y en un rango específico de temperatura, incluso puede resultar independiente de la temperatura (Shackelford, 1995; Askeland, 1998).

Existen dos tipos de semiconducción extrínseca: El tipo  $n$  que es donde predominan los portadores de carga negativa y el tipo  $p$  aquí donde predominan los portadores de carga positiva. La filosofía entre la producción de cada tipo se encuentra en la figura 6.3-1 donde se ve una pequeña porción de la tabla periódica alrededor del silicio.

Aquí el silicio tiene 4 electrones de valencia en su capa exterior. El fósforo es dopante tipo  $n$  porque tiene 5 electrones de valencia. El electrón extra fácilmente se puede convertir en un electrón de conducción o portador de carga negativa. El aluminio es dopante tipo  $p$  porque tiene 3 electrones de valencia. Esta falta de un electrón contra los 4 electrones de valencia del silicio fácilmente llega a producir un hueco electrónico, un portador positivo de carga (Askeland, 1998; Shackelford, 2005).



## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



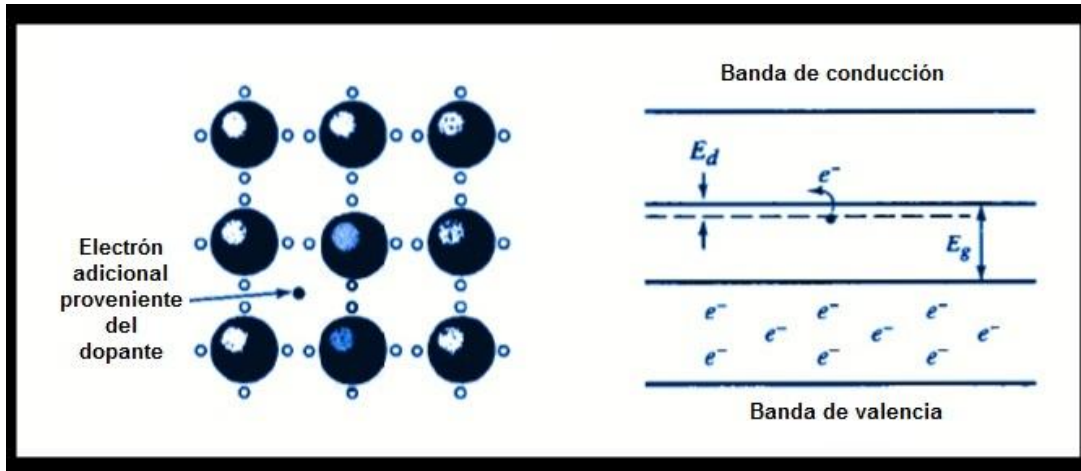
Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.3-1. Sección reducida de la tabla periódica de los elementos. El silicio, en el grupo IV A, es un semiconductor intrínseco. Añadiendo una pequeña cantidad de fósforo, del grupo V A, se obtienen electrones extras (no necesarios para los enlaces con los átomos de silicio). Como resultado, el fósforo es un dopante tipo n (su adición produce portadores de carga negativa). De forma similar, el aluminio, del grupo III A, es un dopante de tipo p con una deficiencia de electrones de valencia, lo que conlleva la formación de portadores de carga positiva (huecos electrónicos).

### 6.3.1 Semiconductores tipo n

Cuando al silicio o al germanio se le agrega un átomo de impureza como antimonio el cual tiene una valencia de cinco. Cuatro de los electrones del átomo de antimonio participan en el proceso de enlaces covalentes, mientras que el electrón adicional entra en un nivel de energía en estado de donación, por debajo de la banda de conducción (figura 6.3-2).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.3-2. Cuando un átomo dopante con una valencia superior a cuatro se le agrega al silicio, se introduce un electrón adicional y se crea un estado de energía donador. Ahora los electrones se excitan con mayor facilidad para pasar a la banda de conducción.

Como este electrón adicional no está unido de manera muy fuerte con los átomos, solo se requiere un pequeño incremento en energía  $E_d$  para que el electron pase a la banda de conducción ( $E_d$  es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la de donadores. El incremento de energía que se requiere se define como  $E_g - E_d$ ). Ahora  $E_d$  es la brecha de energía que controla la conductividad en vez de  $E_g$  (tabla 6.3-1). Ahora cuando los electrones de donación entran en la banda de conducción no se presentan huecos correspondientes (Askeland, 1998).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Tabla 6.3-1. Espacios de energía de donadores y aceptantes en electrón volts cuando se dopan semiconductores de silicio y de germanio.

Tabla 6.3-1. Espacios de energía de donadores y aceptantes en electrón volts cuando se dopan semiconductores de silicio y de germanio				
dopante	Silicio		Germanio	
	$E_d$	$E_a$	$E_d$	$E_a$
P	0.045		0.0120	
As	0.049		0.0127	
Sb	0.039		0.0096	
B		0.045		0.0104
Al		0.057		0.0102
Ga		0.065		0.0108
In		0.160		0.0112

Fuente: (Askeland, 1998).

Una cantidad pequeña de semiconducción intrínseca se sigue dando, con algunos electrones que adquirieron suficiente energía para saltar el espacio  $E_g$ . La cantidad de dopadores de carga es:

$$n_{total} = n_e(\text{dopante}) + n_e(\text{intrínseca}) + n_h(\text{intrínseca})$$

Esto es:

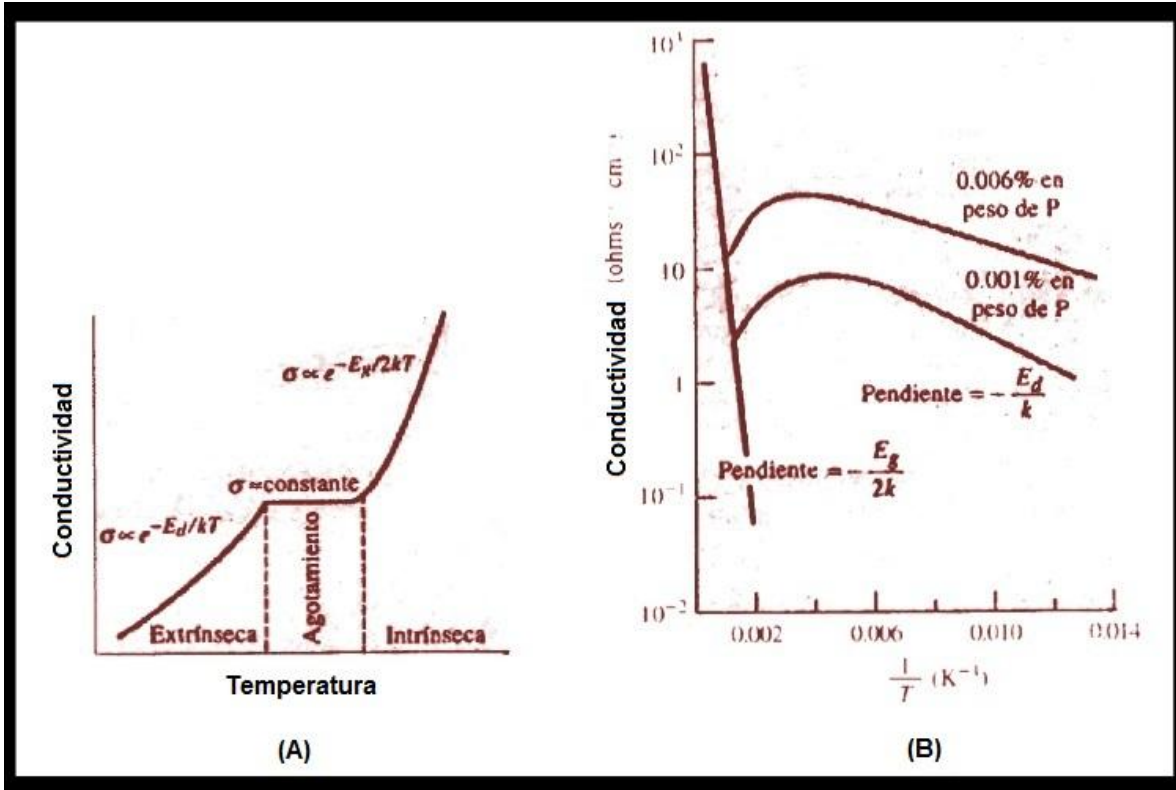
$$n_0 = n_{0d} \exp\left(\frac{-E_d}{kT}\right) + 2n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

Donde  $n_{0d}$ ,  $n_0$  son constantes. A temperaturas bajas se producen pocos electrones así como huecos intrínsecos y aproximadamente el número de electrones es:

$$n_{total} = n_{0d} \exp\left(\frac{-E_d}{kT}\right)$$

A medida que se incrementa la temperatura, al espacio  $E_d$  saltan más electrones de donación hasta que todos están en la banda de conducción. En este punto se alcanza el agotamiento de donadores (figura 6.3-3).

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.3-3. Efecto de la temperatura en la conductividad del silicio dopado con fósforo. A bajas temperaturas, la conductividad aumenta, ya que más electrones donadores entran en la banda de conducción. A temperaturas moderadas, ocurre el agotamiento de donadores. A temperaturas más elevadas, se hace importante la semiconducción intrínseca. (A) Diagrama esquemático y (B) trazo de Arrhenius.

La conductividad es casi constante; no hay más electrones de donación y la temperatura es demasiado baja para producir electrones y huecos intrínsecamente en especial si  $E_g$  es grande. La conductividad es:

$$\sigma = n_d q \mu_e$$

Donde  $n_d$  es el número máximo de electrones de donación, que es determinado por el número de átomos de impurezas que han sido agregados.

El término  $\exp(-E_g/2kT)$  se vuelve importante a temperaturas elevadas y se incrementa de nuevo la conductividad conforme la siguiente ecuación.

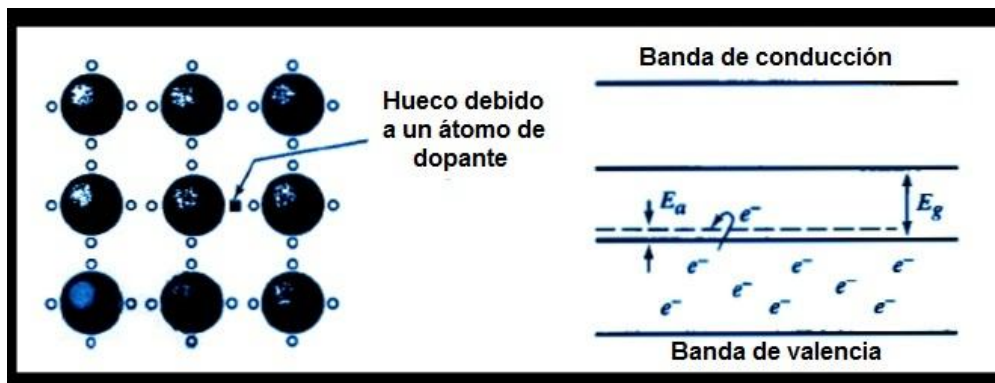
## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

$$\sigma = qn_d\mu_e + q(\mu_e + \mu_h)n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

Si se grafica  $\sigma$  en función de  $1/T$ , se obtiene la relación de Arrhenius, y de ahí se puede calcular  $E_g$  y  $E_d$  (Askeland, 1998).

### 6.3.2 Semiconductores tipo P

Cuando se agrega a un semiconductor una impureza como el galio, el cual tiene una valencia de tres, no hay suficientes electrones para completar el proceso de enlace covalente. Se crea un hueco de electrón en la banda de valencia, el cual se puede llenar con electrones de otras posiciones de la banda (**figura 6.3-4**).



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.3-4. Cuando un átomo dopante con una valencia menor a 4 es sustituido en una red de silicio, se crea un hueco de electrón en la estructura y aparece un nivel de energía de aceptante justo por encima de la banda de valencia. Se requiere de poca energía para excitar los huecos de electrones y ponerlos en movimiento.

Los huecos actúan como aceptantes de electrones. Este lugar que tiene huecos tiene una energía un poco mayor que la normal y crea un buen nivel de energía de electrones, por encima de la banda de de valencia (Tabla 6.3-1). Un electrón tiene que ganar un nivel de energía de  $E_a$  con el fin de crear un hueco en la banda de

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

valencia. Este hueco ahora se mueve portando la carga, y se ha obtenido un semiconductor tipo P (Askeland, 1998).

Como ocurre con los semiconductores tipo n, la temperatura subirá hasta causar la saturación de aceptantes.

$$\sigma = n_a q \mu_h$$

Donde  $n_a$  es el número máximo de aceptantes, esto es los huecos introducidos por el dopante.

### 6.3.3 Compuestos semiconductores

Los únicos elementos que tienen aplicaciones prácticas como semiconductores son el silicio y el germanio. Aunque un gran número de compuestos intermetálicos y cerámicos cuentan con este mismo efecto como se ve en la tabla 6.3-2 (Askeland, 1998).

Tabla 6.3-2. Brechas de energía y movilidades de compuestos semiconductores.

Tabla 6.3-2. Brechas de energía y movilidades de compuestos semiconductores			
Compuesto	Brecha de energía (eV)	Movilidad de electrones ( $cm^2/V \cdot s$ )	Movilidad de huecos ( $cm^2/V \cdot s$ )
ZnS	3.54	180	5
GaP	2.24	300	100
GaAs	1.35	8800	400
GaSb	0.67	4000	1400
InSb	0.165	78000	750
InAs	0.36	33000	460
ZnO	3.2	180	
CdS	2.42	400	
PbS	0.37	600	600

Fuente: (Askeland, 1998).

### 6.3.4 Semiconductores estequiométricos

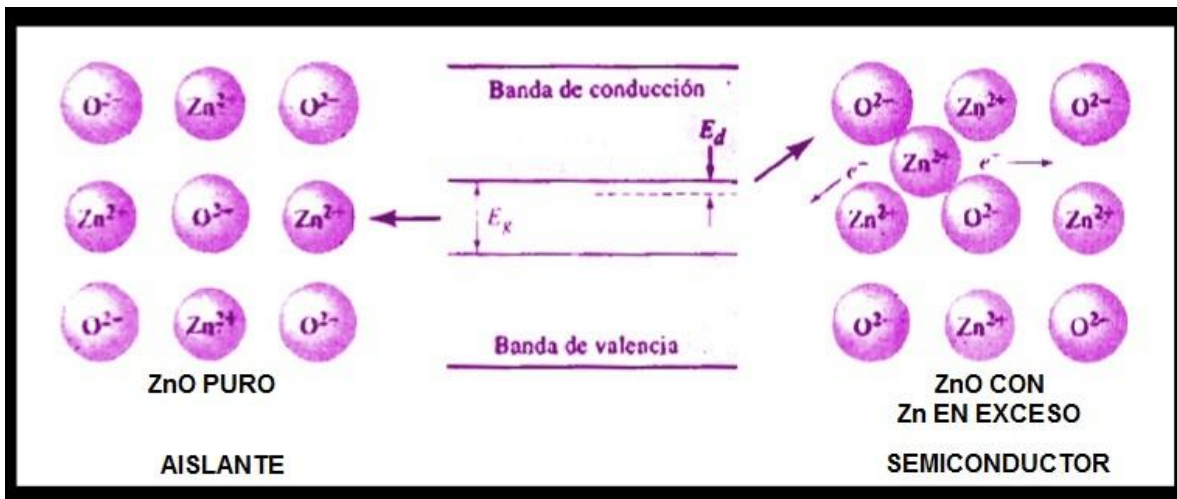
Son por lo general compuestos intermetálicos. Cuentan con estructuras de banda que son similares al silicio y el germanio y estructuras cristalinas. Como ejemplo tenemos los elementos del grupo III y IV de la tabla periódica. El galio y el arsénico

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

se combinan para formar un compuesto (GaAs) el cual tiene un promedio de cuatro electrones de valencia por átomo. Este compuesto GaAs se puede dopar para así producir semiconductores del tipo *n* o tipo *p* (Askeland, 1998).

### 6.3.5 Semiconductores imperfectos o no estequiométricos

Son compuestos iónicos que tienen en exceso, aniones (produciendo un semiconductor tipo *p*) o cationes (produciendo un semiconductor tipo *n*). Hay cierto número de sulfuros y óxidos que cuentan con este comportamiento, uno de ellos es el ZnO el cual tiene una estructura cristalina de blenda. Si al ZnO agregamos un átomo adicional de zinc este entrara en la estructura en forma de ion  $zn^{2+}$ , cediendo dos electrones los cuales contribuyen al número de portadores de carga. Estos electrones con un pequeño aumento de energía se llegan a excitar, con el fin de transportar corriente (figura 6.3-5).

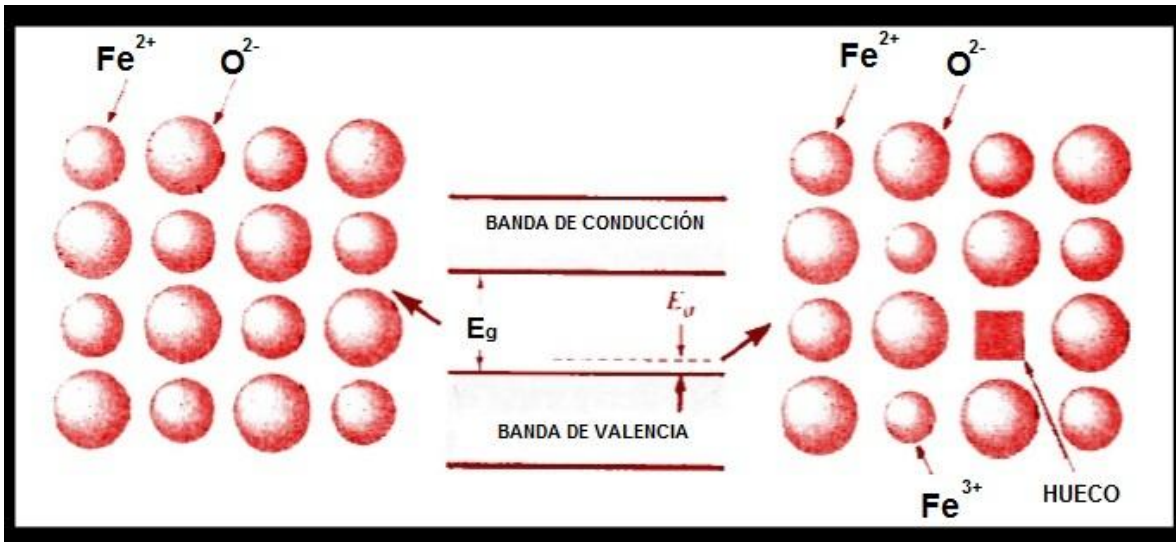


Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.3-5. Los átomos de zinc intersticiales pueden ionizarse y producir electrones adicionales, creando un semiconductor imperfecto de tipo *n* en el ZnO.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Ahora el ZnO se comporta como un semiconductor del tipo n. Se crea otro semiconductor imperfecto al reemplazar tres iones de  $Fe^{2+}$  por dos iones de  $Fe^{3+}$  en el FeO, creando así un hueco (figura 6.3-6). Ahora los iones de  $Fe^{3+}$  actúan como aceptantes de electrones, y así se produce un semiconductor tipo p (Askeland, 1998).



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.3-6. Dos iones  $Fe^{3+}$  y un hueco reemplazan tres iones de  $Fe^{2+}$  manteniendo un equilibrio de cargas general pero creando un nivel de aceptante. El resultado es un semiconductor imperfecto tipo p.

### 6.4 PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS

Los semiconductores que son aquellos materiales donde sus conductividades eléctricas están entre las de metales altamente conductores y la de los aisladores con una conducción pobre. Un grupo parcialmente pequeño de elementos y compuestos cuentan con una propiedad eléctrica importante, dicha propiedad es la semiconducción, una propiedad donde no son ni buenos conductores eléctricos, aunque de igual forma no son buenos aisladores eléctricos (Shackelford, 1995; Smith y Hashemi, 2006).

Los semiconductores cuentan con conductividades entre las que corresponden a los aislantes y los conductores. La resistividad, la constante dieléctrica, la



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

movilidad de los huecos y de los electrones corresponden a los semiconductores. Los semiconductores se pueden clasificar como elementales como Si o Ge o como compuestos SiC o GaAs. El nivel de conductividad se controla por el tipo que sea de semiconductor o por los dopantes. Los semiconductores extrínsecos son muy utilizados por su estabilidad térmica y por su capacidad de sintonizar el nivel de conductividad. Los cristales de los semiconductores se usan como chips de computadoras empleando productos químicos ultralimpios así como lugares limpios. Estos materiales que tienen brecha de energía directa se utilizan para la fabricación de LED, láser y similares. El silicio es utilizado para fabricar diodos, transistores y circuitos integrados (Askeland y Phulé, 2006).

Los tres elementos semiconductores como Si, Ge y Sn son una especie de frontera entre los elementos metálicos y los no metálicos. El Si y el Ge se utilizan como elementos semiconductores. El control preciso de su pureza química permite controlar sus propiedades electrónicas. Los elementos que forman compuestos semiconductores como el arseniuro de galio (GaAs) se utilizan como rectificador para alta temperatura así como en la fabricación de cristales de láser, el sulfuro de cadmio (CdS) es utilizado como una célula solar de bajo costo para transformar energía solar en eléctrica (Shackelford, 2005).

### **6.5 APLICACIONES**

Muchos dispositivos electrónicos se han desarrollado usando las características de semiconducción. Aquí se describirán algunos.

#### **6.5.1 Termistores**

Como se sabe, la conductividad eléctrica depende de la temperatura. Esta relación es utilizada por los termistores para medir la temperatura. En las alarmas contra incendio se utilizan termistores. Cuando el termistor se calienta, este deja pasar a través de un circuito una corriente más grande, la cual activa la alarma (Askeland, 1998).

# INGENIERÍA DE MATERIALES

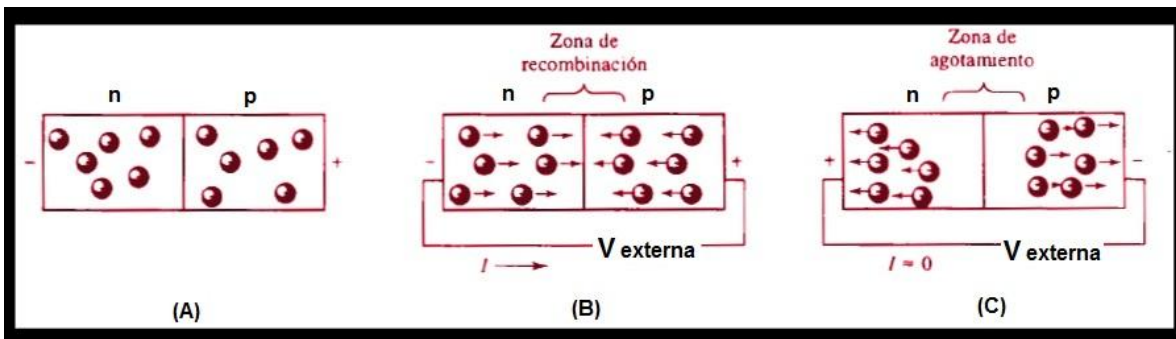
## GUÍA DEL MAESTRO

### 6.5.2 Transductores de presión

La brecha de energía y la estructura de bandas son función del espaciamiento entre átomos de un material. Cuando a un semiconductor se le aplica presión, los átomos son forzados a juntarse, así la banda de energía reduce y aumenta la conductividad. Si la conductividad se mide, se puede calcular la presión que actúa sobre el material (Askeland, 1998).

### 6.5.3 Rectificadores (dispositivos de unión tipo p-n)

Los rectificadores son producidos uniendo un semiconductor tipo *n* con un tipo *p*, formando de esta manera una unión p-n (figura 6.5-1).



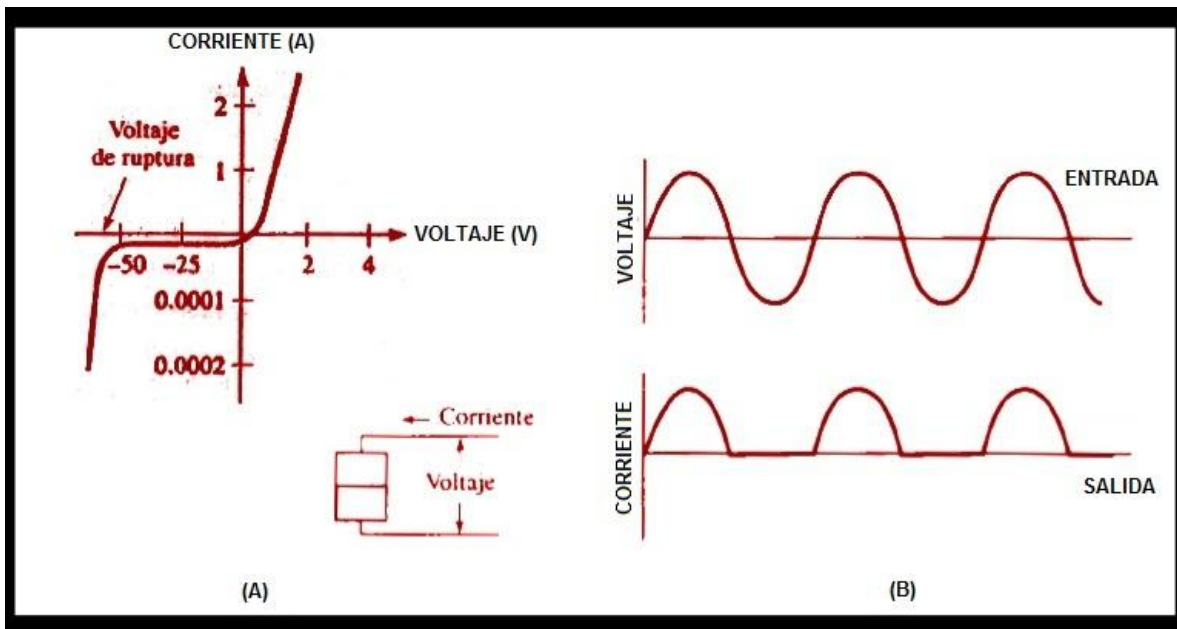
Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.5-1. Comportamiento de un dispositivo de unión p-n. (A) Se provoca el equilibrio al concentrarse electrones del lado n y huecos del lado p, (B) una polarización positiva hará que fluya una corriente y (C) una polarización negativa no permitirá que fluya corriente.

En la unión tipo *n* se concentran los electrones y en la unión tipo los huecos. El desequilibrio eléctrico que resulta crea un voltaje o potencial de contacto por medio del flujo. Si se aplica un voltaje externo en la unión *p-n*, haciendo que la terminal negativa este del lado del tipo n, los huecos y electrones se moverán hacia la unión y se recombinarán. Este movimiento de huecos y electrones crea una corriente neta, esto es conocido como polarización indirecta (figura 6.5-1B). Si

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

la polarización indirecta se incrementa, la corriente que pasa a través de la unión aumentará como se observa en la figura 6.5-2A (Askeland, 1998).



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.5-2. (A) Característica de corriente voltaje en una unión p-n. Note la diferencia de escalas en el primer y tercer cuadrante. (B) Si se aplica una señal alterna, ocurre una rectificación y solo la mitad de la señal de entrada pasara a través del rectificador.

Ahora, si el voltaje aplicado se invierte creando así una polarización inversa, los electrones y los huecos se separan de la unión (figura 6.5-1C). No habiendo portadores de carga en la zona de agotamiento, la unión tiene comportamiento como un aislante y casi no fluye corriente (figura 6.5-2A). Como la unión tipo p-n solo permite el flujo de corriente en una sola dirección, solamente pasara la mitad de una corriente alterna, esta última se convertirá en corriente directa (figura 6.5-2B). Estas uniones son conocidas como diodos rectificadores. De manera típica en la polarización inversa se presenta una pequeña fuga de corriente, esto debido al movimiento de huecos y electrones térmicamente activados. Por otro lado, cuando la polarización inversa es demasiado grande, el portador que llegue a fugarse a

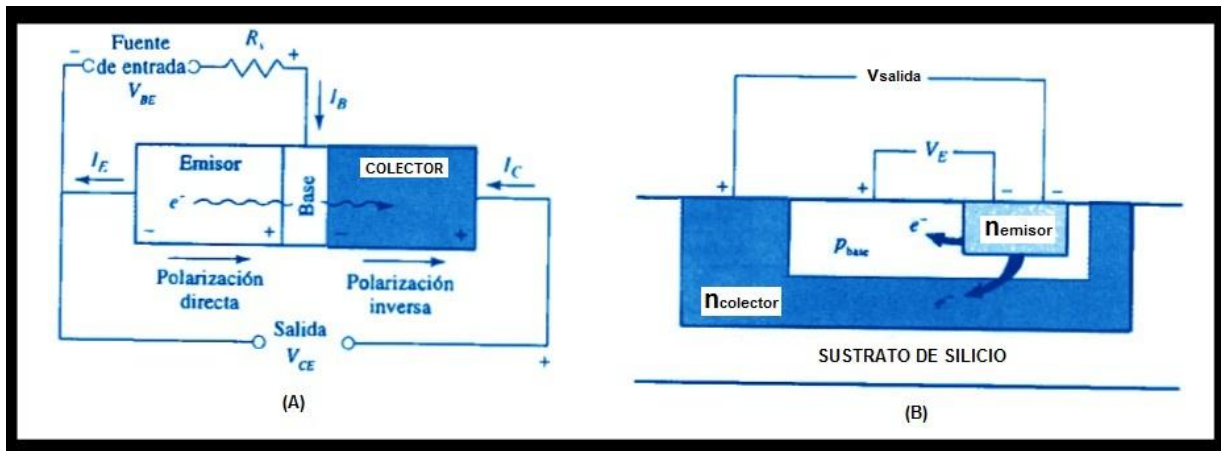
## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

través de la barrera aislante de la unión se acelerará, excitando así a otros portadores de carga, causando una corriente elevada en una dirección inversa (figura 6.5-2A). Este fenómeno se puede utilizar para construir dispositivos limitadores de voltaje. Al construir y dopar apropiadamente la unión p-n, puede seleccionarse el voltaje de avalancha o de ruptura. Cuando en el circuito el voltaje excede el voltaje de ruptura, una corriente elevada fluirá a través de la unión y será derivada del resto del circuito. Estos dispositivos reciben el nombre de diodos Zener y son utilizados para proteger los circuitos con altos voltajes accidentales (Askeland, 1998).

### 6.5.4 Transistores de unión bipolar

Los transistores se pueden utilizar como interruptores o amplificadores. Un ejemplo de esto es el transistor de unión bipolar (BJT), este es utilizado en unidades de procesamiento central de computadoras por la rápida respuesta que tiene hacia la conmutación. Un transistor de unión bipolar es un grupo de materiales semiconductores ya sea  $p-n-p$  o  $n-p-n$ . Hay tres zonas en el transistor: el emisor, la base y el colector. De igual forma con la unión p-n, de manera inicial los electrones se encuentran concentrados en el material tipo n y en el tipo los huecos. En la figura 6.5-3 se observa un transistor  $n-p-n$  junto con su circuito eléctrico, también se encuentra de manera esquemática la forma en que podría aparecer al estar instalado en un chip de silicio.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.5-3. (A) Circuito para un transistor de unión bipolar n-p-n. La entrada crea una polarización directa y otra inversa que hace que los electrones se muevan alejándose del emisor, a través de la base y hacia el colector, creando una salida amplificada. (B) Esquema de la sección transversal del transistor.

La señal eléctrica que se va a amplificar se encuentra conectada entre el emisor y la base, con un pequeño voltaje entre estas dos zonas. La salida del transistor o señal amplificada se encuentra conectada entre el colector y el emisor, y trabaja con un voltaje superior. El circuito está conectado de manera que se produce una polarización entre la base y el emisor (en la base tipo p esta el voltaje positivo), mientras se produce una polarización inversa entre el colector y la base (en el colector tipo n esta el voltaje positivo). La polarización directa hace que del emisor salgan los electrones y entren a la base (Askeland, 1998).

En la base, los huecos y electrones intentan recombinarse, pero, si la base es delgada y con un ligero dopado, o bien si el tiempo de recombinación  $\tau$  es largo, casi todos los electrones pasaran a través de la base y entraran dentro del colector. La polarización inversa entre colector y base acelera a los electrones a

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

través del colector, completando de esta manera el circuito y produciendo una señal de salida. La corriente a través del colector se da por:

$$I_c = I_0 \exp\left(\frac{V_E}{B}\right)$$

Donde:

$I_0$  y  $B$  son constantes

$V_E$  es el voltaje entre la base y el emisor.

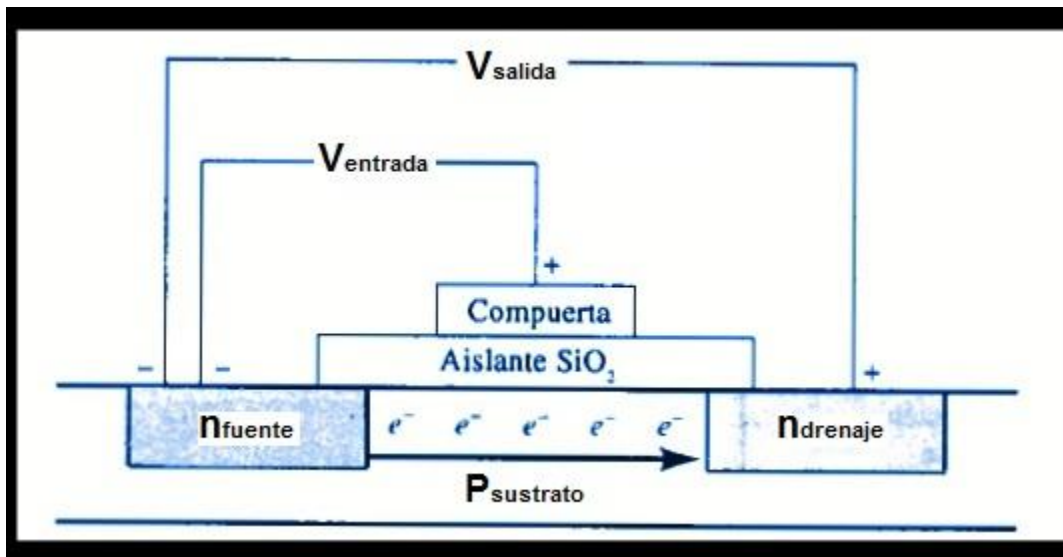
Si el voltaje de entrada  $V_E$  se incrementa, se produce una corriente  $I_c$  muy grande (Askeland, 1998).

### 6.5.5 Transistores de efecto de campo

Otro tipo de transistor, que se utiliza con de manera frecuente para almacenar información en la memoria de las computadoras, es el transistor de efecto de campo (FET), el cual se comporta ligeramente distinto a los transistores de unión bipolar. En la figura 6.5-4 se muestra un transistor de efecto de campo, de óxido metálico semiconductor (MOS), en el que se forman dos regiones tipo n, dentro de un sustrato tipo p. una de las regiones del tipo n es conocida como fuente, la segunda recibe el nombre de drenaje. Hay un tercer componente del transistor que es un conductor, el cual recibe el nombre de compuerta el cual se encuentra separado del semiconductor por medio de una delgada capa de aislante  $SiO_2$ . Entre la compuerta y la fuente se aplica un potencial, quedando la región de la compuerta con carga positiva. El potencial atrae electrones hacia la compuerta, pero no pueden entrar a ella debido al sílice. La concentración de electrones por debajo de la compuerta hace que la región sea más conductora, por lo que un potencial grande entre la fuente y el drenaje permite que los electrones fluyan de la primera al segundo, produciendo de esta manera una señal amplificada. Cuando se modifica el voltaje de entrada entre fuente y compuerta, el número de electrones cambia en la trayectoria de conducción, también cambiando la señal. Los transistores de efecto de campo son de menor precio en su producción que los transistores de unión bipolar. Como los FET utilizan menos espacio, son los

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

preferidos en los circuitos integrados microelectronicos, donde tal vez existan 100,000 transistores dentro de un chip de silicio (Askeland, 1998).



Fuente: (Askeland, 1998).

Figura 6.5-4. Transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico n-p-n.

# INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

## UNIDAD 7. MATERIALES NUEVOS

### 7.1 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES

Los nuevos materiales son materiales avanzados con funciones avanzadas o convencionales que tienen propiedades mejoradas de manera significativa. Cada material puede volverse “nuevo” si se adoptan técnicas y/o procesos de fabricación nuevos o avanzados. En la actualidad, se utilizan nuevos materiales que han permitido grandes avances en diferentes sectores industriales. Entre las principales industrias y principales aplicaciones se pueden mencionar las siguientes: industria automotriz (autopartes), industria aeroespacial y aeronáutica, industria petrolera, industria de la construcción, industria química, medicina y biomedicina, productos de consumo, implementos deportivos, artículos de oficina, entre otros (figura 7.1-1) (Guerrero, Dávila, Galeas, Pontón, Rosas, Sotomayor y Valdivieso, 2011).



Fuente: (Guerrero, Dávila, Galeas, Pontón, Rosas, Sotomayor y Valdivieso, 2011).

Figura 7.1-1. Campo de aplicación de los nuevos materiales.



## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

La característica importante de los nuevos materiales es que estos están ligados a la tecnología usada para su fabricación y producción. Un material no solo se caracteriza por su composición química definida, sino también sus propiedades dependen de la tecnología de procesamiento y se pueden controlar durante el proceso de fabricación. En general los nuevos materiales o cualquier tipo de material, puede ser utilizado en dos tipos de aplicaciones: estructurales y funcionales. Los materiales estructurales son utilizados en aplicaciones donde se requieren ciertas propiedades mecánicas específicas. Esto quiere decir que, un nuevo material estructural es aquel que una vez que es incorporado a algún componente tiene la función principal de soportar cargas. Los materiales estructurales por lo general forman parte de sistemas complejos, dentro de los cuales cada uno tiene que cumplir una función específica, la misma que define su diseño. Un material funcional tiene el objetivo de cumplir con una función o propiedad en particular, puede ser magnética, electrónica, óptica, nuclear, etc. El papel de los materiales estructurales debido a su naturaleza es restringido a mejorar y optimizar las propiedades y funciones de productos ya existentes, mientras tanto los materiales funcionales siempre están presentes en el desarrollo de nuevas aplicaciones. La ciencia e ingeniería de los materiales se basa principalmente en el análisis microestructural de un material, aunque también ha influido de manera significativa la innovación en las tecnologías de procesamiento. En las últimas tres décadas, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, menores costos de fabricación y un mejor desempeño. Estas tecnologías se sostienen en el avance de otras ramas de la ciencia porque muchos de sus procesos incluyen procesos de fabricación los cuales son controlados por sistemas computarizados, sensores, modelamiento matemático, entre otros (Guerrero, Dávila, Galeas, Pontón, Rosas, Sotomayor y Valdivieso, 2011).

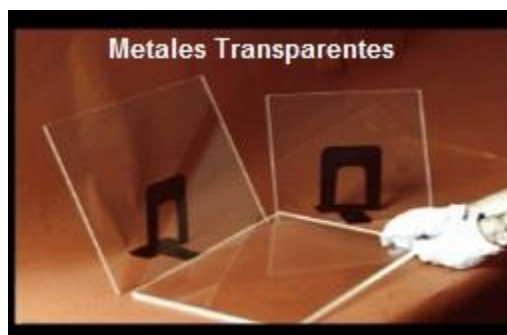
Los ingenieros diseñan de la mayoría de los materiales y los procesos que son necesarios para su fabricación. Los ingenieros deben conocer las propiedades y estructura interna de los materiales, de tal manera que sean capaces de

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

seleccionar el más adecuado para las aplicaciones así como también ser capaces de desarrollar los mejores procesos de fabricación. Los ingenieros especializados en la investigación trabajan en modificar las propiedades de los materiales o en la creación de nuevos materiales. También los ingenieros de diseño utilizan los materiales ya existentes para partir de ellos y crear o diseñar nuevos productos y sistemas. La búsqueda de materiales nuevos continúa progresivamente. Los ingenieros mecánicos buscan materiales que soporten altas temperaturas, los ingenieros eléctricos tratan de encontrar nuevos materiales para que los dispositivos electrónicos puedan operar a mayores temperaturas y mayores velocidades. La obtención de materiales nuevos, asombrosos y singulares, se ido obteniendo con la nanotecnología y están modificando nuestra comprensión del mundo y nuestro futuro inmediato. La ingeniería utilizara tarde o temprano estos materiales. La nanotecnología también es un campo que ofrece espectaculares cambios en la fabricación de materiales nuevos. La nanotecnología es la ciencia de controlar y fabricar máquinas y estructuras a nivel y tamaño molecular, capaz de construir átomo a átomo materiales nuevos (Pérez Marín, nd).

### 7.1.1 Metales transparentes

Proceso donde se incorporan nanoporos dentro de su estructura, de esta manera los metales que son tratados llegan a ser transparentes y porosos, a través de ellos dejan pasar la luz y son muy ligeros (figura 7.1-2) (Pérez Marín, nd).



Fuente: (Pérez Marín, nd).

Figura 7.1-2. Metales transparentes.

# INGENIERÍA DE MATERIALES

## GUÍA DEL MAESTRO

### 7.1.2 Aluminio transparente

También es conocido como aluminio transparente. Es un aluminio que está modificado de tal manera que tiene cualidades de transparencia; actualmente se utiliza dentro de la industria automotriz como blindaje, así como en la construcción de naves espaciales y también se estudia para ser utilizado como vidrio en las viviendas (figura 7.1-3) (Pérez Marín, nd).

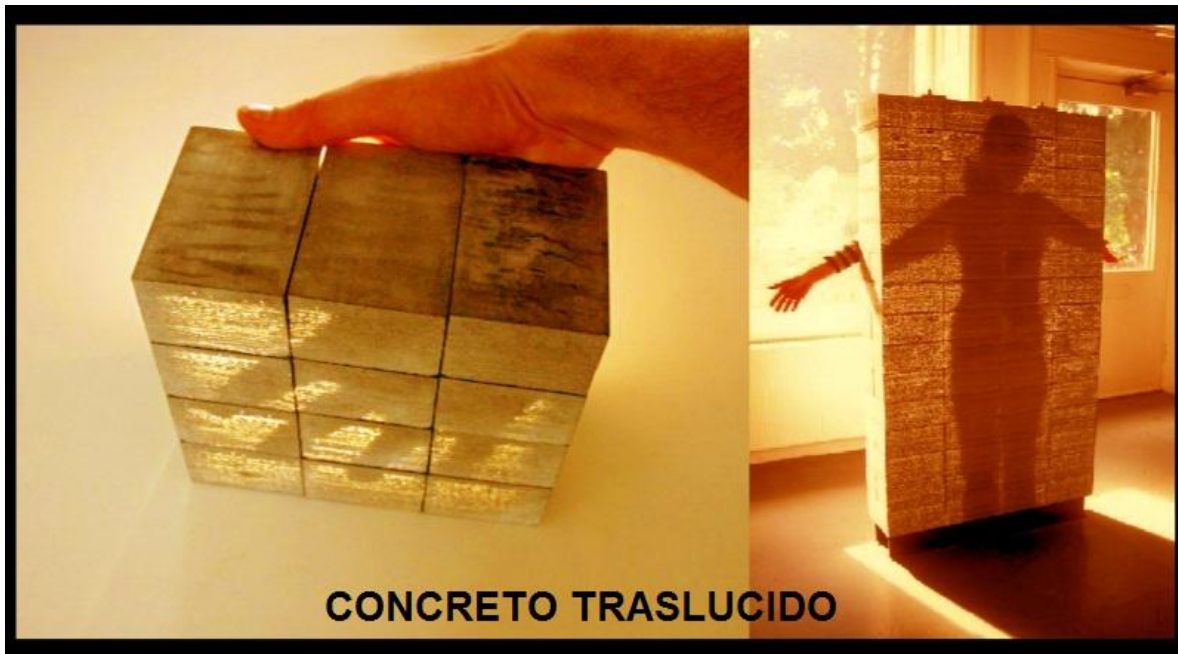


Fuente: (Pérez Marín, nd).

Figura 7.1-3. Aluminio transparente.

### 7.1.3 Concreto traslúcido

Es un material de construcción muy novedoso, este material otorga iluminación a los espacios cerrados. El cemento ha sido mezclado con fibra óptica, con lo cual se crea un hormigón el cual permite el paso de la luz. Una pared elaborada con este material denominado "Litra con" cuenta la resistencia y solidez del hormigón tradicional y gracias a las fibras de cristal que se le han incorporado, permite visualizar las siluetas del espacio exterior (figura 7.1-4) (Pérez Marín, nd).



Fuente: (Pérez Marín, nd).

Figura 7.1-4. Concreto translucido.

## **7.2 MATERIALES AMBIENTALMENTE AMIGABLES**

Hasta hace poco se creía que el planeta Tierra contaba con una gran cantidad de recursos naturales y energía inagotables. Además en la espaciosa atmosfera y superficie el ser humano era capaz de emitir, prácticamente sin límite, todo tipo de contaminantes sin que se vieran impactos significativos en la naturaleza y esta tuviera cambios apreciables. Hoy se sabe que esto no es así y el deterioro ambiental se ha hecho más notable y los científicos han encontrado un mayor número relaciones entre las acciones antropogénicas y el cambio climático. El sector que más contribuye al deterioro ambiental es el sector de construcción, esto con base en sus fases de extracción y manufactura de materiales, mantenimiento, edificación y demolición, consume una gran cantidad de recursos no renovables y además es una fuente importante de residuos y contaminación del aire, suelo y el agua. Por estas razones es urgente un cambio de mentalidad en todos los

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

sectores que están ligados al proceso de construcción, lo que permita la adopción de decisiones que estén encaminadas hacia la sostenibilidad (Porrás Salazar y Tenorio Monge, 2010).

Para reducir sustancialmente los impactos ambientales, se debe minimizar el uso de recursos naturales vírgenes en la producción y el uso de materiales de construcción. La reutilización de materiales o el uso de residuos como materia prima para productos nuevos reducen también los impactos de los recursos vírgenes. Los efectos asociados con el uso de recursos vírgenes se reducen con la reutilización o el reciclaje de recursos. La destrucción del hábitat, consumo de energía, generación de residuos y la contaminación del aire y del agua se reducirán al mínimo con un uso reducido de recursos vírgenes: en la transformación y fabricación de nuevos materiales se ahorra energía por que se han eliminado las primeras etapas del procesamiento primario con el uso de materiales reciclados y si estos materiales se utilizan en la obra o en el mismo lugar, los impactos de transporte se pueden eliminar (Martínez Navarro y Turégano García, nd). Para minimizar el uso de los recursos es posible adoptar diferentes criterios de uso de materiales como pueden ser:

- 1.- reutilizar materiales, reducir el uso de materiales nuevos, no reconstruir.
- 2.- reducir el uso del material
- 3.- reutilizar las estructuras existentes en el lugar
- 4.- recuperación y reutilización de materiales en su totalidad
- 5.- utilizar materiales durables
- 6.- utilizar materiales y productos con mayor contenido de reciclaje
- 7.- utilizar productos y materiales producidos a partir de recursos renovables.

(Martínez Navarro y Turégano García, nd).

Como una respuesta a esta problemática, en el mercado hoy en día se encuentra un grupo de materiales los cuales se han denominado ecológicos, “verdes” o amigables con el medio ambiente. Aunque la utilización y selección de estos materiales es una área muy confusa y controversial del diseño con múltiples variables y una gran cantidad de respuestas correctas e incorrectas.

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

A estos materiales se les puede dar el nombre de materiales ecológicos, verdes o amigables con el medio ambiente, porque en su proceso de fabricación se minimizan los impactos negativos sobre el medio ambiente, también están diseñados de tal forma que potencien esta reducción en sus restantes etapas del ciclo de vida del edificio: transporte de materiales, construcción, funcionamiento y demolición, en la tabla 7.2-1 se dan algunas características de los materiales ecológicos.

Tabla 7.2-1. Características de los materiales ecológicos.

Tabla 7.2-1. Características de los materiales ecológicos
Proceden de fuentes renovables y abundantes
No contaminan
Consumen poca energía en su ciclo de vida
Son duraderos
Pueden estandarizarse
Son fácilmente valorizables
Proceden de producción justa
Tienen valor cultural en su entorno
Tienen bajo costo económico

Fuente: (Porras Salazar y Tenorio Monge, 2010).

Los materiales que son amigables con el medio ambiente también tienen sus inconvenientes, porque la mayoría de ellos son naturales, lo cual dificulta su uso en la construcción. Esto debido a las razones como la disponibilidad a mediana y gran escala, las dificultades que presentan en la instalación y mantenimiento o la falta de mano de obra especializada, además de procesos de certificación los cuales garantizan estándares de calidad, resistencia o durabilidad. Incluso se han llegado a dar casos en donde estos inconvenientes son causa de un diferencial de costos tan alto, hasta el punto que el proyecto deja de ser rentable y su uso se desecha. Por otro lado se debe tener en cuenta que no siempre la respuesta correcta está en la utilización de materiales ecológicos, tal vez la solución en algunos casos sea la utilización de productos convencionales de manera distinta. En esta forma se podría pensar en el uso de agregados reciclados para sustituir y

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

compactar el suelo o el diseño de un sistema estructural el cual permita el reemplazo de piezas o un fácil desensamblaje (Porrás Salazar y Tenorio Monge, 2010).

### **7.3 CONCIENCIA ECOLÓGICA, SOCIAL Y CULTURAL**

La conciencia ambiental en el sector de la construcción tiene un crecimiento a nivel global, esto es probablemente por la necesidad de tener objetivos de ahorro de energía y una reducción de los impactos al medio ambiente. Se debe tener conciencia que la mayor parte de los recursos que se utilizan en la actualidad no son renovables, solo cerca del 5% del material es procedente de fuentes renovables. Con excepción de la madera, productos de fibras y plantas, la mayoría de los materiales de construcción no son renovables. Así como los minerales de hierro también se consideran ilimitados y el cromo se está agotando. La explotación de materiales geológicos altera hábitats, produce erosión de los suelos y aumento de la escorrentía, y altera los procesos ecológicos de la tierra donde se produce la minería. El reciclaje de materiales, reprocesamiento o reutilización reduce sensiblemente la extracción de recursos y los correspondientes recursos para la generación de energía (Borsani, 2011).

En el desarrollo de nuevos materiales para construcción debemos tener en cuenta que se necesitan materiales sostenibles, los cuales ayuden a reducir el consumo de recursos, reduciendo de esta manera el impacto ambiental, esto se lograra utilizando materiales regionales y usando componentes renovables, así como el reciclaje de residuos (Guerrero, Dávila, Galeas, Pontón, Rosas, Sotomayor y Valdivieso, 2011).

Los nuevos materiales para construcción deben ser de preferencia reciclables, reusables, refabricables, biodegradables y muy durables. A lo largo de toda la historia de la humanidad se han descubierto nuevos materiales que se aplican a la edificación y la construcción de ciudades los cuales resuelven nuestros problemas, principalmente en estructuras y aislamientos. Hoy en día parece ser que no existen muchos materiales nuevos y que el acero y el concreto se han afianzado

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

en el sector construcción, sin embargo existen diversos materiales los cuales resuelven nuestros nuevos requerimientos como cuestiones térmicas, de humedad, lumínicas, acústicas, los cuales son muy útiles; estos nuevos materiales interactúan con los tradicionales materiales y así satisfacen nuestros problemas de habitabilidad, como lo es en confort, estructura y seguridad de los edificios. En México muchas tecnologías llegan del exterior las cuales aplicamos la mayoría de las veces, pero esto no es sustentable, por eso los ingenieros, arquitectos y constructores mexicanos deben desarrollar más estos sistemas y así dar innovaciones técnicas al respecto (Hernández Moreno y Garduño Hernández, 2010).



# INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

## BIBLIOGRAFÍA

Askeland D.R. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales (tercera edición). Ed. International Thomson Editores

Askeland D.R. y Phulé P.P. (2006). Ciencia e ingeniería de los materiales (cuarta edición). Ed. Thomson. USA

Borsani M.S. (2011). Materiales ecológicos: estrategias, alcances y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles. UPC. Consultado (Agosto 2013) en:  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13759/1/Borsani,%20Mar%C3%ADa%20Silvia.pdf>

Brown L.B. (2004). Química la ciencia central (novena edición). Ed. Pearson Prentice Hall

Chang R. (2007). Química (novena edición). Ed. Mc Graw Hill

Fitzgerald R.W. (1996). Mecánica de materiales (edición revisada). Ed. Alfaomega

Giles R.V, Evett J.B y Cheng L. (1994). Mecánica de los fluidos e hidráulica (tercera edición). Ed. Mcgraw-Hill

Gomez de león hijes F.C y Alcaraz Lorente D.J. (2004). Manual básico de corrosión para ingenieros. Universidad de Murcia.

González Cabrera V.M. (1996). Física Fundamental. Ed. Progreso

## **INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO**

Guerrero V.H, Dávila J, Galeas S, Pontón P, Rosas N, Sotomayor V, Valdivieso C. (2011). Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales (primera edición). Guerrero V.H. (ed). Consultado (agosto 2013) en: <http://ebookbrowse.net/nuevos-materiales-aplicaciones-estructurales-e-industriales-pdf-d319352872>

Hernández Moreno S. y Garduño Hernández A. (2010). Tecnologías actuales aplicadas al desarrollo urbano sustentable. Acta universitaria 20 (1): 25-34. Consultado (agosto 2013) en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41613084003>

IMCYC. (2004). Conceptos básicos del concreto (capítulo 02). Instituto mexicano del cemento y del concreto (ed). México

Lambe T.W y Whitman R.V (1991). Mecánica de suelos. Ed. Limusa

Ledesma García J. (2013). Material de asignatura

Levine I.N. (2004). Físicoquímica Vol. 1 (quinta edición). Ed. McGraw Hill

Mangonon P.L. (2001) Ciencia de materiales selección y diseño. Ed. Pearson Educación México

Martínez Navarro F. y Turégano García J.C. (nd). Ciencias para el mundo contemporáneo. Guía de recursos didácticos. Gobierno de canarias (ed). Consultado (agosto 2013) en: [http://www.cienciasmc.es/web/pdf/u8\\_nuevos\\_materiales.pdf](http://www.cienciasmc.es/web/pdf/u8_nuevos_materiales.pdf)

Neville A.M. (1999). Tecnología del concreto. Ed. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

Orus F. (1964) Materiales de construcción (séptima edición). Ed. Dossat

## INGENIERÍA DE MATERIALES GUÍA DEL MAESTRO

Pérez Marín A.F. (nd). Los nuevos materiales en la arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Consultado (agosto 2013) en:  
[http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.revista.unal.edu.co%2Findex.php%2Femail%2Farticle%2Fdownload%2F1186%2F1732&ei=ZzcmUp7zC\\_HeyQGr74CADA&usg=AFQjCNEP6CRHPhusC\\_varpZvOpWNeZ3Aiw&sig2=H\\_C5LDz400V3BHlvYJBAiQ&bvm=bv.51495398,d.aWc](http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.revista.unal.edu.co%2Findex.php%2Femail%2Farticle%2Fdownload%2F1186%2F1732&ei=ZzcmUp7zC_HeyQGr74CADA&usg=AFQjCNEP6CRHPhusC_varpZvOpWNeZ3Aiw&sig2=H_C5LDz400V3BHlvYJBAiQ&bvm=bv.51495398,d.aWc)

Porras Salazar J.A y Tenorio Monge R. (2010). Materiales ecológicos: ni tan fáciles de identificar, ni tan fáciles de utilizar. *Ingeniería* 20 (1 y 2): 197-200. Consultado (agosto 2013) en: <http://www.latindex.ucr.ac.cr/ingenieria-20/ingenieria-20-1-2-14.pdf>

Reyes-Melo M.E. e Hinojosa-Rivera M. (2000). Estructura de sólidos amorfos. *Ingenierías* 3 (9): 7-14

Shackelford J.F. (1995). *Ciencia de materiales para ingenieros* (tercera edición). Ed. Pearson Prentice Hall

Shackelford J.F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros* (sexta edición). Ed. Pearson Prentice Hall

Smith W.F. (1998). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (tercera edición). Ed. Mc Graw Hill

Smith W.F. y Hashemi J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (cuarta edición). Ed. Mc Graw Hill

Vable M. (2006). *Mecánica de materiales*. Ed. Oxford

West J.M. (1986). *Corrosión y oxidación fundamentos*. Ed. Limusa