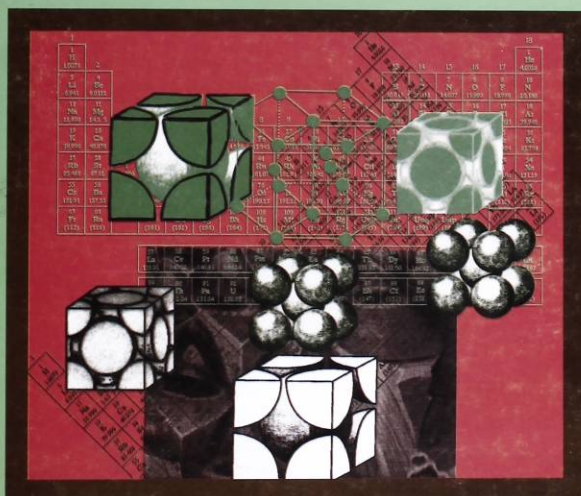


1061

# INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES



Antonio de Ita de la Torre  
Francisca Franco Velázquez

Materiales

UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA  
Casa abierta al tiempo  Lerapetzako



INTRODUCCIÓN  
A LOS  
**MATERIALES**

#### INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES

Este material fue dictaminado y aprobado para su publicación por el Consejo Editorial de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Unidad Azcapotzalco de la UAM, en su sesión del día 17 de mayo 2003.

# INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES

Antonio de Ita de la Torre  
Francisca Franco Velázquez



División de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Departamento de Materiales

2894011

## UAM-AZCAPOTZALCO

RECTOR

Dr. Adrián Gerardo de Garay Sánchez

SECRETARIA

Dra. Sylvie Jeanne Turpin Marion

COORDINADORA GENERAL DE DESARROLLO ACADÉMICO

Dra. Norma Rondero López

COORDINADOR DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

Dr. Jorge Armando Morales Aceves

JEFE DE LA SECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN EDITORIALES

Lic. Francisco Javier Ramírez Treviño

ISBN-970-31-0485-1

©UAM-Azcapotzalco

Antonio de Ita de la Torre  
Francisca Franco Velázquez

Corrección

Rosendo García Leyva

Ilustración de portada

Consuelo Quiroz Reyes

Diseño de portada

Modesto Serrano Ramírez

Sección de producción  
y distribución editoriales

Tel. 5318-9222-9223

Fax. 5318-9222

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

Av. San Pablo 180

Col. Reynosa Tamaulipas

Delegación Azcapotzalco

C.P. 02200

México, D.F.

Introducción a los materiales

1.ª edición 2006

1.ª reimpresión 2008

Impreso en México

Desde hace ya varios años, estamos preparando este material y son muchos los obstáculos que hemos tenido que vencer para llegar a este resultado. El principal problema es la multitud de textos que ya existen, aunque siempre son traducciones de material original en inglés.

La ventaja fundamental de este trabajo es que cubre con un enfoque general, por el momento, las necesidades del curso de "Introducción a los Materiales". Este curso es el primer curso del Tronco Profesional de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica. Se encuentra ubicado en el 4º trimestre. Pero este curso también lo pueden tomar alumnos de otras 5 carreras: industriales, físicos y mecánicos, como un curso obligatorio y para los civiles y químicos es una materia optativa.

Debido a que son muchos los profesores que imparten esta materia es muy difícil tener todos los posibles enfoques. Definitivamente, le hemos dado nuestro enfoque, pero tratando de tocar los puntos con cuidado y cubriendo todo el material posible y algo más de lo que normalmente se toca en el curso.

Creemos que este material será muy útil, sobre todo para los alumnos. Esperamos la comprensión de nuestros amables lectores y sus sugerencias para mejorar el presente material.

Antonio de Ita y Francisca Franco  
Junio de 2005





## Contenido

Cap. 1. Materiales Cristalinos y Amorfos	9
Tabla periódica de los elementos	9
Números cuánticos	10
Enlaces atómicos	15
Materiales amorfos	16
Cap. 2. Sistemas Cristalinos	23
Redes de bravais	23
Parámetro de red, número de átomos por celda, número de coordinación, factor de empaquetamiento	25
Índices de Miller para: puntos, direcciones y planos	32
Empaquetamiento compacto, distancia interplanar, ángulo entre direcciones o planos	36
Difracción de rayos X , cámara de Laue	38
Cap. 3. Metales Puros	41
Propiedades generales: químicas, físicas, mecánicas	42
Transformaciones alotrópicas	44
Tamaño de grano	47
Cap. 4. Cerámicos	51
Enlaces	53
Estructuras	54
Productos tradicionales	59
Refractarios	71
Cemento	74
Cap. 5. Polímeros	79
Peso molecular	79
Distribución de peso molecular, clasificación	80
Tacticidad	85
Transición vítrea, cristalinidad	86
Características	87
Elastómero	89

Cap. 6. Aleaciones	91
Regla de Gibbs	91
Reglas de Hume Rothery	92
Diagramas de equilibrio	93
Regla de la palanca	95
Identificación metalográfica de las soluciones sólidas	97
Eliminación de la segregación por tratamiento térmico	99
La dureza en función de los elementos aleantes	100
Aleaciones totalmente solubles al líquido	102
Reacciones invariantes	105
Cap. 7. Diagrama de fases de hierro - carburo de hierro	109
Clasificación de los aceros según su utilización	116
Influencia de los elementos de aleación en los aceros	117
Tratamientos térmicos: normalizado, recocido, temple	118
Diagrama TTT	124
Cap. 8. Propiedades Mecánicas	127
Dureza: mohs, vickers, rockwell, brinell, knoop	127
Tensión	131
Compresión, torsión, impacto	135
Cap. 9. Propiedades Eléctricas y Magnéticas	137
Ley de Ohm	137
Conductividad	138
Semiconductores	139
Superconductores	139
Materiales transductores	140
Propiedades magnéticas	140
Bibliografía	143

## Capítulo 1

### MATERIALES AMORFOS Y CRISTALINOS

Se define la cristalinidad como un orden estructural a corto y a largo alcance, mientras que los materiales amorfos sólo tienen orden a corto alcance. Es claro que, las distancias que se mencionan para corto alcance son los primeros vecinos y largo alcance, significa muchas distancias interatómicas.

En la naturaleza se pueden encontrar muchos materiales que muestran una estructura exterior que presenta planos y direcciones bien definidos, por ejemplo, en el cuarzo se puede observar una estructura tipo hexagonal, mientras que en el sulfuro de hierro o pirita se puede encontrar una estructura tipo cúbico. Esto muestra que, en muchos materiales la estructura cristalina es evidente macroscópicamente pero en otros materiales sólo se puede encontrar la cristalinidad por métodos más complicados como son el análisis por rayos x. En muchos casos, los materiales puede tener una parte cristalina y una parte amorfa, como ocurre frecuentemente con los polímeros.

En la naturaleza, se pueden encontrar tres grandes clases de materiales: Metales, Cerámicos y Polímeros. Esta división se basa en sus propiedades generales. Una definición muy simple de cada grupo indica que: los metales en general son elementos químicos y son buenos conductores eléctricos y térmicos. Los cerámicos están formados por metales y no metales, con estructuras complicadas cuyo elemento principal es el silicio, casi todos son malos conductores eléctricos y térmicos. Finalmente, los polímeros son compuestos de cadenas largas de carbono y en general no son buenos conductores eléctricos, ni térmicos, aunque se pueden modificar, para cumplir muchos propósitos. En los capítulos posteriores se tratarán cada uno de ellos, con más detalle. Ahora se pondrán las bases en forma muy general para entender los diferentes tipos de materiales.

#### Tabla periódica de los elementos

Es claro que todo los materiales están formados por átomos y que estos son los que tienen la información que los caracteriza como elementos químicos. En la tabla periódica de los elementos se encuentran las características básicas de los átomos de los elementos conocidos hasta ahora. A los 92 elementos naturales, esto es hasta el uranio, se añaden más de 20 elementos artificiales creados por el hombre. Uno de los últimos, el 112, apenas descubierto en 1996, en Alemania, se obtuvo, bombardeando una placa de plomo con millones de átomos de zinc.

En la tabla, los elementos se encuentran ordenados por el número atómico, esto es por el número de protones, en columnas, que agrupan los elementos con ciertas características comunes. Por ejemplo, la columna más conocida es la última columna, la 18, la de los gases nobles, es bien sabido, que todos los miembros de esa columna son gases y no se combinan químicamente con nada, esto es así, por tener sus capas y subcapas de electrones completamente llenas.

TABLA 1.1. Tabla periódica de los elementos

1																		18																																																			
H 1.00794																		He 4.0026																																																			
3		4																5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																									
Li 6.941		Be 9.0122																B 10.811		C 12.011		N 14.007		O 15.999		F 18.998		Ne 20.180		Al 26.982		Si 28.086		P 30.974		S 32.065		Cl 35.453		Ar 39.948																													
11		12																13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36					
K 39.098		Ca 40.078		Sc 44.956		Ti 47.867		V 50.942		Cr 51.996		Mn 54.938		Fe 55.845		Co 58.933		Ni 58.693		Cu 63.546		Zn 65.409		Ga 69.723		Ge 71.64		As 74.921		Se 78.96		Br 79.904		Kr 83.798																																			
37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54		55		56		57		58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71	
Rb 85.468		Sr 87.62		Y 88.906		Zr 91.224		Nb 92.906		Mo 95.94		Tc (99)		Ru 101.07		Rh 101.91		Pd 106.42		Ag 107.87		Cd 112.41		In 114.82		Sn 118.71		Sb 121.76		Te 127.6		I 126.90		Xe 131.29																																			
55		56		57-71		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86		87		88		89		90		91		92		93		94		95		96		97		98		99		100		101		102		103	
Cs 132.91		Ba 137.23		# 89-103		La 178.49		Ce 140.12		Pr 140.91		Nd 144.24		Pm (140)		Sm 150.36		Eu 151.96		Gd 157.25		Tb 158.93		Dy 162.50		Ho 164.93		Er 167.26		Tm 168.93		Yb 173.04		Lu 174.97																																			
87		88		89-103		104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114		115		116		117		118		119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129		130											
Fr (223)		Ra (226)		#		Rf (161)		Db (164)		Sg (166)		Bh (164)		Hs (177)		Mt (168)		Ds (181)		Rg (172)		Uub (185)		Uut (184)		Uuq (189)		Uup (188)																																									

\* Lantánidos

# Actínidos

Otra columna muy conocida es la primera de la izquierda, la número 1, la de los metales alcalinos. La segunda desde la izquierda, la número 2, contiene las tierras alcalinas, en las siguientes columnas, de la 3 a la 12, están contenidos los metales de transición. Los metales y los no metales, están en las columnas 13 a la 16, estos dos grupos están divididos por una diagonal, arriba los no metales y abajo los metales. Finalmente la penúltima columna, la 17, es la de los halógenos. En principio, conociendo un miembro de la columna se conocen las características químicas generales de todos los demás elementos de esa columna. Es claro, que esta tabla periódica es una de las varias posibilidades para presentar y agrupar a los elementos y tratar de mostrar características comunes. Actualmente existen al menos unas 10 nuevas formas de presentar a los elementos en tablas de formas diferentes. Algunas de ellas son tridimensionales. En la dirección electrónica [www.chem.qmul.ac.uk](http://www.chem.qmul.ac.uk) se encuentra la última la tabla aprobada por la Unión Internacional de Química, así como información de los últimos elementos descubiertos. En la dirección [www.chemlab.pc.maricopa.edu/periodic/periodic.html](http://www.chemlab.pc.maricopa.edu/periodic/periodic.html), se encuentran algunas formas interesantes de tablas.

### Números cuánticos

El átomo está formado por neutrones y protones en el núcleo y electrones alrededor del núcleo. Para caracterizar los átomos se pueden utilizar a los electrones y en especial de la energía que poseen al girar alrededor del núcleo. Por otro lado, la energía asociada se puede caracterizar por los números cuánticos correspondientes.

**Número Cuántico Principal.** Se designa con una "n" y puede asumir cualquier valor entero de uno en adelante. Dependiendo del número, se le asocia el nombre de una capa y se anota en la tabla siguiente, también, el máximo número de electrones que se pueden acomodar en esa capa, así:

n	CAPA	Máximo
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
5	O	50

Para calcular el número máximo de electrones por capa se utiliza la ecuación:  $2n^2$

**Número Cuántico Secundario o acimutal.** Se designa con la letra " $\ell$ ", determina el tipo de subnivel en el que se localiza un electrón y se relaciona con la forma de la nube electrónica. Los valores de " $\ell$ " están determinados por "n" y " $\ell$ " puede asumir cualquier valor entero desde 0 hasta "n - 1". Los valores de los subniveles de " $\ell$ " se asocian con ciertas letras que se han tomado de las series en espectroscopía óptica en inglés.

Para calcular el número máximo de electrones por subcapa, la fórmula es:  $2(2\ell + 1)$

**Número Cuántico Magnético.** Representa la orientación espacial de los orbitales contenidos en los subniveles energéticos cuando están sometidos a un campo magnético. Se representa con " $m_\ell$ " y toma valores de  $-\ell$  hasta  $+\ell$ , pasando por cero.

**Número Cuántico Espín.** Este número cuántico expresa el campo eléctrico generado por el electrón al girar sobre su propio eje. Sólo puede tener dos valores  $+\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$ , se representa con una "s".

Se tiene la siguiente tabla para los números cuánticos de  $\ell$ :

$\ell$	Subnivel	Origen	Máximo
0	s	sharp - brillante	2
1	p	principal	6
2	d	difuso	10
3	f	fundamental	14
4	g	-	18
5	h	-	22

Finalmente, sólo falta decir que los electrones en un átomo, deben tener todos sus números cuánticos diferentes, según lo establece el principio de exclusión de Pauli. Esta restricción permite ordenar, de acuerdo a las reglas, los electrones del átomo en forma de niveles y subniveles.

*Ejemplo: Encontrar los números cuánticos de los electrones del átomo del helio.*

*El helio tiene como número atómico el 2 por lo tanto tiene dos protones. Como su masa atómica es 4.00 debe tener dos neutrones y los dos protones en el núcleo. Por lo tanto para ser un átomo neutro, debe tener dos electrones alrededor del núcleo.*

*Se inicia con el número cuántico principal  $n=1$ . El número cuántico secundario o acimutal debe ser  $\ell=0$ , el magnético  $m_\ell=0$  y el de espín tiene los posibles valores de  $+\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$ . Por lo tanto los números cuánticos para los dos electrones son :  $(1, 0, 0, +\frac{1}{2})$  y  $(1, 0, 0, -\frac{1}{2})$ , que como se ve, los dos grupos de números cuánticos difieren en el valor del espín.*

*Se puede escribir que la configuración de los electrones del helio es :  $1s^2$*

*donde 1 indica el número cuántico  $n$ , que correspondiente a la capa  $s$  muestra que se trata de la subcapa  $\ell=0$   
el 2 como un superíndice indica el número de electrones en la subcapa.*

*Un ejemplo más complicado sería el cobre. El cobre tiene el número atómico 29. Así que debe tener 29 protones y como su masa atómica es 63, deben estar 34 neutrones. Para conservar la neutralidad eléctrica, se deben tener por lo tanto 29 electrones. Consultando la tabla de los números cuánticos principales, se ve que, se necesitan cuatro capas para acomodar los 29 electrones: la capa K acepta 2 electrones, en la L se pueden colocar 8, en la M se acomodan 18 y se necesita la capa N para el electrón que sobra.*

Del ejemplo anterior ya se sabe que la capa K queda descrita con:  $1s^2$  y con los números cuánticos en orden:  $(n, \ell, m_\ell, s)$ :  $(1, 0, 0, +\frac{1}{2})$  y  $(1, 0, 0, -\frac{1}{2})$  para los 2 primeros electrones.

Ahora, se toma el siguiente número cuántico, el 2, ó sea la capa L. Por lo tanto, se tienen como valores posibles para  $\ell$ : el 0 y 1. Ahora, si  $\ell=0$  entonces  $m_\ell$  vale 0, y para  $\ell=1$ ,  $m_\ell$  vale  $-1, 0$  y  $1$ . El espín siempre se tienen los valores de  $+\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$ . Así se tienen los números cuántico en orden:  $(n, \ell, m_\ell, s)$

$$\begin{array}{cccc} (2, 0, 0, +\frac{1}{2}) & (2, 1, -1, +\frac{1}{2}) & (2, 1, 0, +\frac{1}{2}) & (2, 1, 1, +\frac{1}{2}) \\ (2, 0, 0, -\frac{1}{2}) & (2, 1, -1, -\frac{1}{2}) & (2, 1, 0, -\frac{1}{2}) & (2, 1, 1, -\frac{1}{2}) \end{array}$$

La primera columna se puede resumir como:  $2s^2$

y las tres siguientes columnas en:  $2p^6$

estas dos subcapas dan la capa L, es decir, las dos con el con número principal 2 y se tiene un total de 8 electrones.

Ahora, para la tercera capa M, esto es, con número cuántico 3. Se tiene que  $\ell$  vale 0, 1 y 2. Para  $\ell=0$ ,  $m_\ell$  para vale 0, y cuando  $\ell=1$ ,  $m_\ell$  vale  $-1, 0$  y  $1$  y finalmente para  $\ell=2$ ,  $m_\ell$  tiene como valores  $-2, 1, 0, 1$  y  $2$ . El espín siempre tienen los valores de  $+\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$ . Así se tienen que los números cuántico en orden:  $(n, \ell, m_\ell, s)$  son:

$$\begin{array}{cccc} (3, 0, 0, +\frac{1}{2}) & (3, 1, -1, +\frac{1}{2}) & (3, 1, 0, +\frac{1}{2}) & (3, 1, 1, +\frac{1}{2}) \\ (3, 0, 0, -\frac{1}{2}) & (3, 1, -1, -\frac{1}{2}) & (3, 1, 0, -\frac{1}{2}) & (3, 1, 1, -\frac{1}{2}) \end{array}$$

La primera columna se puede resumir en:  $3s^2$ .

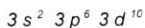
y las tres siguientes columnas en:  $3p^6$ .

ahora los siguientes números cuánticos son:

$$\begin{array}{cccccc} (3, 2, -2, +\frac{1}{2}) & (3, 2, -1, +\frac{1}{2}) & (3, 2, 0, +\frac{1}{2}) & (3, 2, 1, +\frac{1}{2}) & (3, 2, 2, +\frac{1}{2}) \\ (3, 2, -2, -\frac{1}{2}) & (3, 2, -1, -\frac{1}{2}) & (3, 2, 0, -\frac{1}{2}) & (3, 2, 1, -\frac{1}{2}) & (3, 2, 2, -\frac{1}{2}) \end{array}$$

estas 5 columnas se pueden resumir en:  $3d^{10}$ .

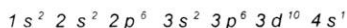
Sumado estos dos últimos resultados se tiene que la estructura de la capa M es:



con un total de 18 electrones.

Como sólo queda un electrón y la capa M ya está llena entonces se inicia la capa N. Esto es simple, ya que este electrón tendrá los números cuánticos: (4, 0, 0, +½) este último paso se pueden resumir en la estructura como:  $4s^1$ .

Finalmente se tiene que la estructura del cobre se puede escribir como:



Con los correspondientes números cuánticos anotados arriba.

Se debe notar que en realidad los niveles se llenan de acuerdo con la regla o principio de construcción de los átomos que dice que: "cada nuevo electrón añadido a un átomo entrará en el orbital disponible, pero que tenga la energía mínima". Cuando se analiza la energía asociada a cada nivel, en particular, resulta que el orden de llenado de las subcapas es de acuerdo a la siguiente secuencia:

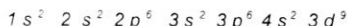


como regla nemotécnica esta secuencia es el resultado de recorrer la tabla 1.2 con las líneas indicadas y ésta se puede reproducir en cada ocasión:

Tabla 1.2

▼	7s	▼	7p	7d	
▼	6s	6p	6d	6f	
▼	5s	5p	5d	5f	
▼	4s	4p	4d	4f	
▼	3s	3p	3d		
▼	2s	2p			
▼	1s				

Por lo tanto la secuencia correcta para el cobre debe escribirse como:





## Enlaces atómicos

Existen dos grupos de enlaces para que los átomos se unan entre sí y son los primarios y los secundarios, según la fuerza con la cual se unen los átomos. En el grupo de los enlaces primarios o de gran fuerza están: el metálico, el covalente y el iónico. En el grupo de las uniones secundarias o débiles están la de "Van der Waals" y la del "puente de hidrógeno".

*Enlace metálico.* Los metales tienen una valencia baja, es decir tienen uno o dos electrones en su última capa o subcapa. Al unirse con los otros átomos por fuerzas eléctricas, los metales, ceden estos electrones para formar una nube que rodea a todos los átomos, sin estar ligados a ninguno en especial y se mueven libremente en esa nube. Por eso, los metales tienen muy buenas propiedades eléctricas y térmicas.

*Enlace covalente.* Los materiales unidos en esta forma comparten electrones entre dos o más átomos. Las uniones covalentes son muy fuertes, los materiales unidos de este modo tienen poca ductilidad y mala conductividad eléctrica. Para que un electrón se mueva y forme una corriente eléctrica, debe romperse el enlace covalente y así liberar al electrón, necesitando altas temperaturas o voltajes muy elevados. En general estos materiales, unidos por enlace covalente, se comportan como aislantes eléctricos y no como conductores. Muchos materiales cerámicos y polímeros están completamente o parcialmente unidos por este tipo de enlace.

*Enlace iónico.* En general los átomos se encuentran eléctricamente neutros. Pero, si pierden un electrón, entonces quedan cargados positivamente o si reciben un electrón quedan cargados negativamente, en cualquiera de estos casos, se dice que se forma un **ión**. Cuando se encuentran presentes dos tipos de materiales que puedan transformarse fácilmente en iónicos al intercambiar sus electrones: uno como donador y el otro como aceptor, entonces pueden unirse formando un enlace iónico. El átomo que aporta los electrones queda con carga positiva y se dice que es un catión, mientras que el otro átomo, el que acepta los electrones adquiere carga negativa y se llama anión. En general estos materiales son frágiles, su conductividad eléctrica es baja, ya que la carga eléctrica puede ser transferida por el movimiento de iones enteros, que por cierto, no se desplazan fácilmente.

*Enlace de Van der Waals.* En este enlace se ligan las moléculas o grupos de átomos mediante atracciones electrostáticas débiles, en forma de dipolos. Los plásticos, cerámicos, el agua y otras moléculas están permanentemente o instantáneamente polarizadas; esto es, algunas porciones de la molécula tienden a estar con carga positiva, mientras otras porciones están cargadas negativamente. La atracción electrostática entre las regiones positivas de una molécula y las regiones negativas de una segunda molécula se unen débilmente. Los cristales formados por los gases nobles tienen este tipo de enlace.

Finalmente la unión puente de hidrógeno es una unión del tipo de dipolos, pero la

diferencia es que estos dipolos son permanentes y no inducidos como en el caso de los gases nobles. El agua es el ejemplo clásico de este tipo de unión. En principio la energía de unión es un poco más fuerte que la de los dipolos inducidos.

## MATERIALES AMORFOS

La característica fundamental de los amorfos es no tener una estructura cristalina a largo alcance, aunque se ha encontrado que tienen una estructura repetitiva pero sólo a primeros vecinos. Dentro de los materiales amorfos se tienen a todos los líquidos, los vidrios, la mayoría de los plásticos y algunos metales. Pero sólo si éstos últimos se enfrían muy rápidamente, como  $10^6$  °C / s, un millón de grados centígrados en un segundo, desde el estado líquido.

**VIDRIO.** Los vidrios en general son sólidos inorgánicos que como todos los amorfos no presentan periodicidad de largo alcance, sólo de corto alcance, en su estructura atómica. Esto es debido a que no cristalizan cuando se enfrían desde el estado líquido. Algunos, consideran a los vidrios como líquidos sobre enfriados y en efecto es posible observar que los vidrios en catedrales muy antiguas han fluido en el transcurso de los siglos, engrosando en su parte inferior.

En la mayoría de los vidrios comerciales el componente principal es el dióxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ , que por su estructura se le considera como un silicato. El  $\text{SiO}_4$ , que se muestra en la figura 1.1 se puede hacer corresponder a un tetraedro donde el silicio, círculo negro, está en el centro y en los vértices los oxígenos, círculos vacíos. Estos pueden formar cadenas uniéndose en un vértice, una arista o una cara.

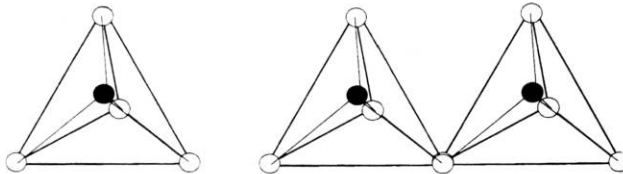


Figura 1.1 Estructuras de tetraedros del  $\text{SiO}_4$ , uno solo y dos unidos por un vértice común

Existen otros óxidos formadores de red, tales como el óxido de boro,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ; óxido de germanio,  $\text{GeO}_2$ ; pentóxido de fósforo,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; pentóxido de arsénico,  $\text{As}_2\text{O}_5$  y óxido de cromo,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; entre otros.

Si al vidrio de sílice se le añaden óxidos tales como óxido de sodio,  $\text{Na}_2\text{O}$ ; óxido de calcio,  $\text{CaO}$ ; óxido de magnesio,  $\text{MgO}$ ; óxido de litio,  $\text{Li}_2\text{O}$ ; óxido de potasio,  $\text{K}_2\text{O}$ ; u óxido de zinc,  $\text{ZnO}$ ; se reordena la red, por lo cual éstos óxidos se llaman modificadores de red.

*Ejemplo:* Si al vidrio de sílice se le añade óxido de sodio,  $\text{Na}_2\text{O}$ , se romperá un enlace en la red estructural, dicha modificación se debe a la reacción:



por lo tanto, aumentando la cantidad de modificadores el promedio de enlaces por oxígeno - silicio que se forman entre dos átomos de silicio decrecerá en la siguiente proporción, donde N es el número de enlaces O - Si de puente por átomo de silicio:

O / Si	N
2.0	4
2.5	3
3.0	2

El objetivo del modificador es disminuir la viscosidad y como una consecuencia, se tiene un decremento de la temperatura de fusión y de trabajo.

La viscosidad es una de las propiedades del vidrio y para definirla se debe imaginar que la masa del vidrio líquido está formado por capas y para mover una capa pasando sobre la otra, se requiere de una fuerza de corte por unidad de volumen "f", el valor de esta fuerza depende de la relación:

$$f = \frac{N A v}{\theta}$$

Donde: N = coeficiente de viscosidad  
 A = área entre las capas  
 v = velocidad de movimiento  
 $\theta$  = separación entre capas

La unidad del coeficiente de viscosidad es el "Poise" que es la fuerza por unidad de área, por un cierto tiempo, que se necesita para mover una capa de fluido a la velocidad de 1 cm / s, pasando una capa paralela cuya distancia sea 1 cm.

La viscosidad de los materiales amorfos varía inversamente proporcional a la temperatura. Existen distintos puntos en la variación de la viscosidad con la temperatura, tales como:

$$+ \text{ Punto de deformación, viscosidad} = 10^{14.5} \text{ poises} = 10^{13.5} \text{ N s / m}^2$$

Por debajo de esta temperatura el comportamiento del vidrio es esencialmente elástico.

$$+ \text{ Punto de recocido, viscosidad} = 10^{13} \text{ poises} = 10^{12} \text{ N s / m}^2$$

Por arriba de esta temperatura el vidrio presenta fluencia lenta y se puede disminuir el esfuerzo mediante la conversión de deformación elástica en deformación plástica.

$$+ \text{ Punto de ablandamiento, viscosidad} = 10^8 \text{ poises} = 10^7 \text{ N s / m}^2$$

A esta temperatura el vidrio todavía se deforma bajo su propio peso.

$$+ \text{ Punto de trabajo, viscosidad} = 10^4 \text{ poises} = 10^3 \text{ N s / m}^2$$

En este intervalo de temperatura el vidrio se prensa o se estira fácilmente.

### **Clasificación de los vidrios**

Los vidrios se pueden clasificar de acuerdo al contenido de sus elementos básicos, así se tiene los tipo silicato - sódico y cálcico, los de borrosilcatos, los de plomo - silicatos y los aluminio - silicatos entre otros.

Las aplicaciones más comunes para cada uno de los tipo de vidrio, según la clasificación de la tabla 1.3, serían:

1. Láminas de vidrio para ventanas comunes chicas
2. Botellas, jarros y frascos
3. Focos y bulbos
4. PYREX, vidrios de laboratorio (probetas, pipetas, matraces, etc.)
5. Vajillas, vasos y utensilios para cocina
6. Usos eléctricos (bulbos, válvulas electrónicas, etc.)
7. Protectores de radiación vidrio cortado (cristal cortado, adornos, etc)

8. Fibras de vidrio y usos eléctricos (aislantes)
9. Tuberías en reactores químicos

TABLA 1.3 TIPOS DE VIDRIOS

COMPOSICIÓN	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO
1 Si-sódico-cálcico I	72.5	13	0.3	9.3	3		1.5	0.10	
2 Si-sódico-cálcico II	73	15		10			1	0.05	
3 Si-sódico-cálcico III	73	16	0.6	5.2	3.6		1		
4 Borosilicato	80.6	4.2		0.1	0.05	12.6	2.2	0.05	
5 Plomo-silicato	55.5		11						33
6 Plomo-silicato I I	63		7.6	6	0.3		0.2	0.60	21
7 Plomo-silicato I I I	30		3			0.2			65
8 Aluminio-silicato	54.6	0.6		17.4	4.5	8	14.8		
9 Aluminio-silicato	55.3	0.6	0.4	4.7	8.5	7.5	7.5		

Otras propiedades de los vidrios son ser:

1. Transparentes
2. Duros y resistentes al rayado
3. Lisos
4. No son materiales porosos
5. Resisten a los agentes químicos
6. Excelentes en sus propiedades de aislamiento eléctrico y dieléctrico
7. Propiedades ópticas esenciales en lentes y prismas combinación apropiada de índices de refracción y poder dispersivo
8. Colores bellos y permanentes
9. Centellean
10. Su naturaleza de forma y color casi no cambia, con el tiempo
11. No son inflamables
12. Facilidad para moldearlos en caliente
13. Facilidad para soldarlos
14. Coeficiente de dilatación calorífica muy baja y algunos son muy resistentes al calor, al choque térmico y otros son buenos transmisores del calor

### Propiedades ópticas

Los lentes fotocromáticos son aquellos que varían su color con la cantidad de la luz existente. Contienen iones de  $\text{Ag}^+$  en forma de haluros de plata, esto es, compuesto con un halógeno. Cuando se expone el vidrio a la luz, los fotones del ultravioleta incidentes, producen electrones que reducen la plata de  $\text{Ag}^+$  a  $\text{Ag}^0$ , la consecuencia es que hay una reducción en la transmisión de luz y entonces se oscurecen los lentes. Cuando la luz disminuye se invierte el proceso electrónico en los iones de la plata y con ello el vidrio se hace más transparente.

La absorción de luz es menor al 0.6 % por centímetro de espesor. Los vidrios ópticos deben tener combinaciones concretas de índice de refractividad y de poder de dispersión. En los vidrios fotosensibles se tienen elementos como plata, oro, mercurio, cobre o plomo que funcionan como sensibilizadores ópticos, dando ciertos colores.

El índice de refracción se calcula como:

$$n = \frac{\text{seno del ángulo incidente}}{\text{seno del ángulo refractado}} = \frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } \phi}$$

Los ángulos se miden con respecto a la normal al plano del vidrio.

La fracción de luz reflejada "R" por una superficie se expresa como sigue:

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

Transmitividad total de la luz en el vidrio se puede definir como:

$$T = \frac{\text{Intensidad de luz que sale}}{\text{Intensidad de luz que incide}}$$

Y se puede calcular como:

$$T = K e^{-\beta t}$$

donde:  $K$  = reducción de la intensidad debida a la reflexión y es =  $(1 - R)^2$

$\beta$  = coeficiente de absorción ( $\text{cm}^{-1}$ )

$t$  = espesor del vidrio

$e$  = 2.7182 número de neper o base de los logaritmos naturales

### Propiedades técnicas

- Propiedades mecánicas: No son dúctiles  
La rotura es producida por esfuerzo de tracción  
Alta resistencia a la rotura  
Módulo de Poisson entre 0.18 y 0.30  
Dureza: En la escala de Mohs se encuentran entre la apatita, 5 y el cuarzo, 7, entre 500 y 1300 en dureza vickers
- Propiedades térmicas: Conductividad calorífica a la temperatura ambiente varía entre 0.0018 y 0.033 calorías / (s  $\text{cm}^2$ )  
Calor específico a la temperatura ambiente 0.20 cal / g  
Resistencias a las variaciones bruscas de temperatura  
Resistencias a la tensiones térmicas
- Propiedades eléctricas: Resistividad eléctrica en un semiconductor  
Resistencia dieléctrica en un aislante
- Resistencia a la corrosión: Son atacados por: Ácido fluorhídrico, HF  
Ácido fosfórico,  $\text{H}_3\text{P O}_4$ , concentrado y caliente  
Soluciones alcalinas concentradas





## Capítulo 2

### SISTEMAS CRISTALINOS

Cuando los átomos se unen entre sí y forman una estructura que llena todo el espacio, es decir, presentan un orden a corto y largo alcance, se dice que forman un cristal. Se pueden encontrar 7 tipos de arreglos de átomos que cumplen esta condición, si se añaden unos subtipos, se forman las famosas 14 redes de Bravais. En las tablas siguientes: en la 2.1 se caracterizan estas estructuras y los subtipos que existen, en la primera columna de la tabla se da el nombre, en la siguiente los posibles subtipos y en la final, las abreviaturas correspondientes:

TABLA 2.1. TIPOS DE ESTRUCTURAS

ESTRUCTURA	SUBTIPO	ABREVIATURA
Cúbica	Simple	cs
	Centrada en el cuerpo	cccu
	Centrada en las caras	ccca
Tetragonal	Simple	ts
	Centrada en el cuerpo	tccu
Hexagonal	-----	h
Trigonal	-----	tri
Ortorrómica	Simple	os
	Centrada en el cuerpo	occu
	Centrada en las bases	occb
	Centrada en las caras	occa
Monoclínica	Simple	ms
	Centrada en las bases	mcb
Triclínica	-----	trikli

En la figura 2.1 se muestran los dibujos de las 7 celdas básicas mencionadas.

En la siguiente tabla, la 2.2, se caracteriza cada estructura cristalina de acuerdo al tamaño o longitud de sus aristas y al valor de los ángulos entre ellas.

TABLA 2.2 ARISTAS Y ÁNGULOS DE LAS ESTRUCTURAS

Estructura	Aristas	Ángulos entre las aristas
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos son de $90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos son de $90^\circ$
Ortorrónica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son de $90^\circ$
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de $90^\circ$ y un ángulo de $120^\circ$
Trigonal	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y diferentes de $90^\circ$
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de $90^\circ$ y un ángulo diferente de $90^\circ$
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos distintos y diferentes de $90^\circ$

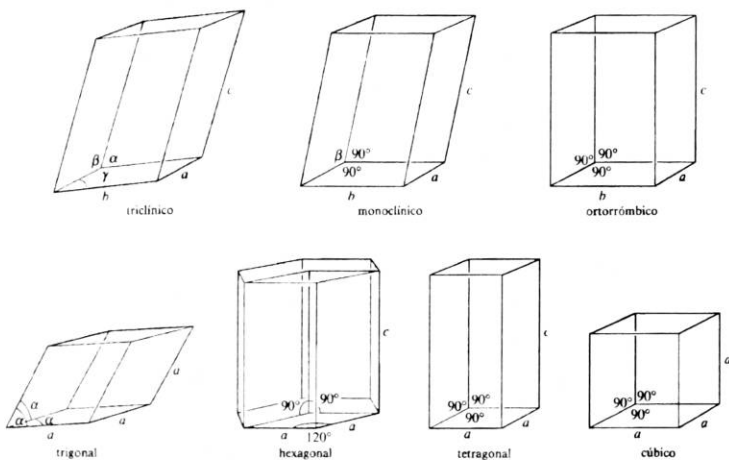


Figura 2.1 Los 7 tipos de celdas unitarias

**Parámetro de red:** Los cristales de la tabla anterior tienen ciertas dimensiones en sus aristas y en los ángulos de las estructuras mencionadas. Una forma de caracterizar las estructuras es de acuerdo al tamaño y forma de la celda más simple o unitaria de la estructura. Para medir la longitud de las aristas se acostumbra utilizar como unidad el angström, donde:

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

Es claro que, en sistema cúbico sólo hay un dato, que define la estructura, este es el tamaño de la arista, que determina el tamaño de la celda y se le llama también **parámetro de red**, normalmente se conoce como  $a_0$ . En el caso de otras estructuras puede haber dos o tres valores del parámetro de red, que se utilizan para definir el tamaño de la celda en cada caso.

Otra cantidad que se utiliza para caracterizar las celdas es el **Número de átomos por celda unitaria**: Este es el número de átomos que se encuentran dentro del volumen de la celda. En el caso de un sistema cúbico simple, cs, la celda se forma por 8 átomos, pero cada átomo de cada esquina se comparte con 8 celdas, por lo tanto se tiene:

$$8 (1/8) = 1$$

Para el sistema cúbico centrado en el cuerpo, cccu, se tienen 8 átomos en las esquinas compartidos cada uno con 8 celda y un átomo central que sólo pertenece a esa celda, así se tiene:

$$8 (1/8) + 1 = 2$$

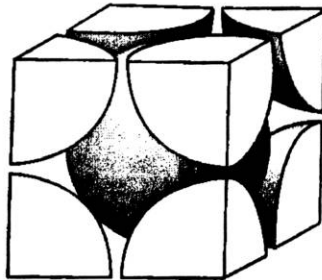


Figura 2.2. Celda cúbica centrada en el cuerpo mostrando los dos átomos por celda, uno en el centro y 8 piezas de 1/8 en los vértices

En el caso del cúbico centrado en las caras, ccca, se tienen 8 átomos en las esquinas que se comparten con 8 celdas y 6 átomos en las 6 caras que se comparten con sólo dos celdas cada uno, entonces se tiene que:

$$8 \left( \frac{1}{8} \right) + 6 \left( \frac{1}{2} \right) = 1 + 3 = 4$$

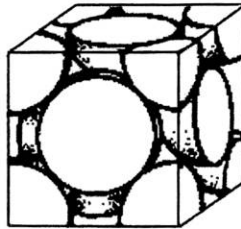


Figura 2.3. El sistema cúbico centrado en las caras, mostrando el medio átomo por cara y un  $1/8$  en cada vértice

En el caso de la estructura hexagonal, h, llamada también hexagonal compacta, hc: la celda más simple o unitaria se puede considerar como un prisma rectangular, con base romboédrica rectangular, es decir uno de los ángulos de la base es diferente de  $90^\circ$  y es un prisma centrado en el cuerpo. En la celda normal se pueden encontrar tres de estos prismas. Como se muestra en la figura 2.4. Así se puede obtener que cada celda prismática tiene dos átomos por celda. Un átomo en cada esquina que se comparte con 8 celdas, así son 8 vértices y un átomo central, por lo tanto se tiene que:  $8 \left( \frac{1}{8} \right) + 1 = 2$  átomos por celda y como se tienen tres de estas celdas prismáticas en una celda normal, así se tiene que son 6 átomos por celda.

Desde otro punto de vista se puede calcular el número de átomos por celda así: en una celda normal se tienen 6 átomos en la base, cada átomo se comparte con 6 celdas y son doce átomos de este tipo; hay un átomo en el centro de la base y este se comparte con dos celdas y se tienen dos de esos átomos; finalmente hay tres átomos en el interior que sólo se utilizan en la celda; entonces sumando todo se tiene:

$$12 \left( \frac{1}{6} \right) + 2 \left( \frac{1}{2} \right) + 3(1) = 6$$

que es lo que se había obtenido antes.

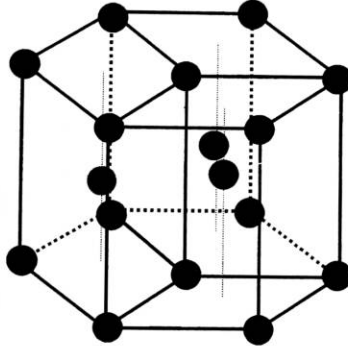


Figura 2.4. Celda hexagonal mostrando las tres celdas prismáticas romboédricas

Otra característica que define la celda hexagonal es la relación entre el tamaño de su eje vertical,  $c$ , y su eje horizontal,  $a$ , como  $c/a$ . El valor normal es 1.633 pero se pueden encontrar metales que presentan un valor menor o mayor a este. Los ejemplos típicos: para el valor menor al ideal son el titanio y el zirconio, el valor ideal lo tienen el magnesio y el cobalto, mientras que un valor mayor al ideal lo presentan el zinc y el cadmio.

**Radio atómico:** Es la mitad del tamaño del átomo y se puede utilizar para calcular el valor del parámetro de la red o tamaño de la estructura elemental o unitaria. En estructuras simples, en especial las que sólo tienen un átomo por punto de la red o nodo, es posible calcular la relación entre el tamaño del átomo y el de la celda unitaria. En cada caso se observa cómo es la celda y qué átomos están en contacto para construir el cristal. En casi cualquier libro especializado, se encuentran los valores, al menos para los elementos, de los radios atómicos correspondientes.

**Número de primeros vecinos o número de coordinación:** Es el número de átomos que se encuentran en contacto en el espacio con un átomo en particular.

*Ejemplo: En el sistema cúbico se tiene el tipo cúbico simple,  $cs$ , cada átomo tiene 4 vecinos en un plano y uno más en el plano de adelante y otro más en el plano de atrás, un total de 6 vecinos. El cúbico centrado en el cuerpo,  $cccu$ , tiene 8 vecinos: el átomo*

central tiene 4 vecinos en el plano de adelante y 4 en el plano de atrás. El cúbico centrado en las caras, *ccca*, y el hexagonal, *h*, tienen 12 vecinos, 6 átomos al rededor de él, en un plano, 3 en el plano de adelante y 3 átomos más en el plano de atrás. En la figuras 2.5 se muestran los casos del: hexagonal compacto, *hc*, y del cúbico centrado en el cuerpo, *ccc*.

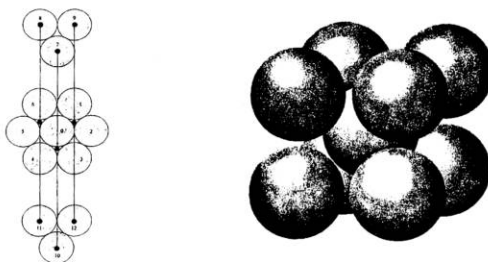


Figura 2.5. Los primeros vecinos en la estructura hexagonal y la cúbica centrada en el cuerpo

Otro dato muy importante es el **factor de empaquetamiento**: Se calcula como el cociente del volumen del número de átomos de la celda dividido entre el volumen total de la celda. De esta forma se puede determinar que tan llena o compacta es una estructura cristalina, ya que se mide el volumen ocupado por los átomos e indirectamente se mide el volumen libre. Así que, mientras más llena está la celda, más compacta se dice que es la estructura.

Aquí el problema es, determinar cómo se encuentran los átomos y cómo se unen a los demás de la estructura. Así, por ejemplo, en el sistema cúbico simple, *cs*, los átomos de cada esquina se tocan con los átomos que están a la derecha, a la izquierda, arriba, bajo, atrás y adelante. Así, el lado de una celda está formado por dos esferas en contacto y el parámetro de red o longitud de la arista de la celda,  $a_0$ , vale  $2r$ , dos radios atómicos, como se muestra en la figura 2.6.

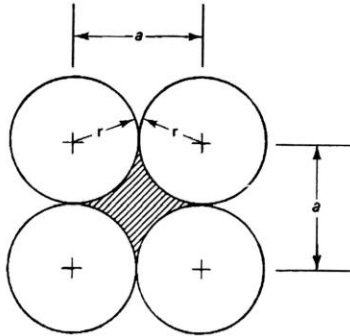


Figura 2.6. Plano del cúbico simple

$$(4r)^2 = 2a_0^2 + a_0^2$$

Entonces, calculando según la definición, el número de átomos por celda, se sabe que es 1, así que el volumen de esa esfera es  $\frac{4}{3} \pi r^3$ . Como el volumen total de la celda es  $a_0^3$ , entonces se tiene que el factor de empaquetamiento es:

$$\frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{a_0^3} = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{(2r)^3} = \frac{\pi}{6} = 0.524$$

Así, se encuentra que en el cs, sólo está ocupado un 52.4 % del total del volumen de la celda.

Para el sistema cúbico centrado en el cuerpo se sabe que tiene dos átomos por celda y que los átomos que están en contacto son los átomos que forman la diagonal del volumen y que ésta mide  $4r$ , como se puede apreciar en la figura 2.7.

Como se trata de la diagonal de volumen se puede ver que su longitud se puede escribir en función de la diagonal de la cara inferior,  $d$ , y del otro cateto que es la longitud de una arista y vale  $a_0$ , según la ley de pitágoras se tiene que:

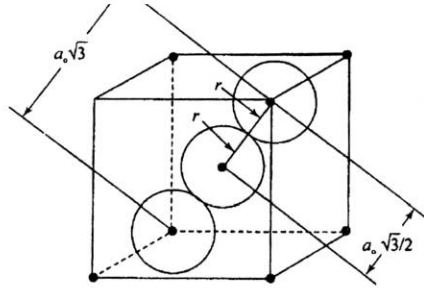


Figura 2.7. Los tres átomos en la diagonal del arreglo cubico centrado en el cuerpo

$$(4 r)^2 = d^2 + a^2$$

El valor de la diagonal de la base,  $d$ , se puede escribir como:

$$d^2 = a_0^2 + a_0^2 = 2 a_0^2$$

Así que entonces se obtiene que:

$$(4 r)^2 = 2 a_0^2 + a_0^2$$

de donde se tiene finalmente que el parámetro de red vale:

$$a_0 = \frac{4 r}{\sqrt{3}}$$

Ahora, para calcular el empaquetamiento, se calcula la razón del volumen ocupado entre el volumen total de la celda, así se tiene:



$$\frac{2 (4/3 \pi r^3)}{a_0^3} = \frac{2 (4/3 \pi r^3)}{\left(\frac{4r}{\sqrt{3}}\right)^3} = 0.68$$

Así se obtiene que el 68 % del espacio del cccu se encuentra ocupado por átomos.

La última estructura en que se determinará el factor de empaquetamiento, será en el sistema cúbico centrado en las caras. Como se vio antes, tiene 4 átomos por celda. Los átomos en contacto son los átomos de la diagonal de la cara del cubo. Así que por medio de la relación de pitágoras se calcula su relación con la dimensión de la red utilizando que:

$$(4r)^2 = a_0^2 + a_0^2$$

$$16 r^2 = 2 a_0^2$$

De ahí se tiene que:

$$a_0 = \sqrt{8} r$$

Esta expresión se puede modificar para tener la forma tradicional

$$a_0 = 2 \sqrt{2} r \quad \text{o también de la forma} \quad a_0 = \frac{4}{\sqrt{2}} r$$

Entonces, ya se puede calcular el factor de empaquetamiento que vale:

$$\frac{4 (4/3 \pi r^3)}{a_0^3} = \frac{4 (4/3 \pi r^3)}{(\sqrt{8} r)^3} = 0.74$$

es decir que en la celda cúbica centrada en la cara, ccca, se encuentra ocupando un 74 % del volumen total. Por lo tanto, esta es la estructura más compacta entre las anteriores y hay que decir, entre todas las comunes posibles.

## ÍNDICES DE MILLER: PUNTOS, DIRECCIONES Y PLANOS

### Coordenadas

Para definir la posición de los puntos en un espacio tridimensional y que puedan representar los átomos que forman los cristales, se utilizan sistemas de coordenadas, por ejemplo el ortogonal. Como se sabe, en un sistema ortogonal o rectangular, el ángulo entre los tres ejes en el espacio es de  $90^\circ$ . La distancia entre los puntos sobre los ejes se puede dividir como múltiplos del parámetro de red. Así, las coordenadas de un punto se pueden anotar como las distancias en los ejes para llegar a ese punto. Se denota la localización de un punto, como los valores en los tres ejes separados por comas, como  $[x, y, z]$ .

*Ejemplos: Localizar el punto  $[0, 0, 0]$ . Es claro, que este punto es el origen de coordenadas. Otro ejemplo: localizar el punto  $[1, 2, 1]$ . En la figura 2.8 se observa donde se localiza este punto con la letra G. Otro punto localizado en la figura es el punto H que tiene de coordenadas  $[2, 1, 1]$ . En estas notas los valores negativos se pondrán como subrayado así:  $\underline{1}$  y se utiliza para indicar la dirección -1.*

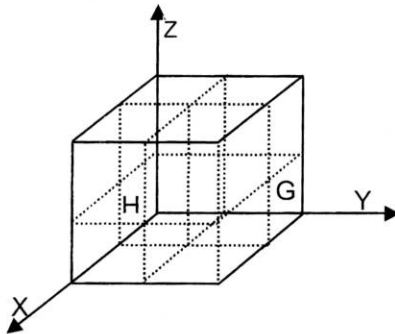


Figura 2.8. Localización de puntos en el espacio

### Direcciones de la celda unitaria

Ciertas direcciones en la celda unitaria son de particular importancia. Por ejemplo, en un caso interesa saber cuál es la dirección en la que se deforman los cristales. Claro que, en este caso, el material se deforma así porque en esta dirección los átomos están en contacto entre sí, es decir, están en la dirección más compacta del arreglo, sea por ejemplo en el sistema cúbico centrado en las caras.

Para encontrar los **Índices de Miller** de una dirección: se colocan los tres números, que representan los componentes del vector que representa la dirección, trazado desde el origen. Los valores se escriben entre corchetes. *Ejemplo: la dirección  $[1, 1, 1]$ . Se colocan los componentes del vector en cada eje y el punto final se une con el origen, como se muestra en la figura 2.9.*

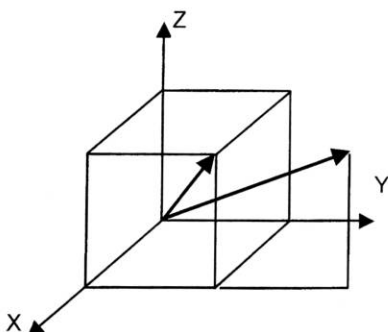


Figura 2.9. Algunas direcciones

*Otro ejemplo: Dibujar la dirección  $[1\ 2\ 1]$ . Se coloca uno en "x", al final de este vector se dibujan 2 unidades en la dirección de "y", al final de él, se coloca 1 unidad en la dirección de "z". Se une el origen con el final del vector y se tiene la dirección buscada. Como se muestra en la figura 2.9.*

Se puede tener una familia de direcciones, cuando ésta representa direcciones semejantes aunque iguales, por ejemplo: la de los ejes coordenados, la familia se llamará  $(1, 0, 0)$  y representa a los ejes positivos:  $[1, 0, 0]$ ,  $[0, 1, 0]$ ,  $[0, 0, 1]$  y a los ejes negativos  $[\bar{1}, 0, 0]$ ,  $[0, \bar{1}, 0]$ ,  $[0, 0, \bar{1}]$ . Como se puede observar esta familia está formada por todas las combinaciones de un uno y dos ceros. Como se muestra en al figura 2.10.

## Planos

Ciertos planos de átomos en un cristal son importantes, por ejemplo, los metales se deforman a lo largo de los planos de átomos que están más estrechamente unidos. Para determinar los índices de Miller de un plano: se identifican los puntos de intersección del plano con los ejes coordenados. Si el plano pasa por el origen, el origen se desplaza una unidad para atrás, abajo o a la izquierda, según sea necesario. Se obtienen los recíprocos de estas intersecciones. Se eliminan fracciones, multiplicando por factor adecuado, pero

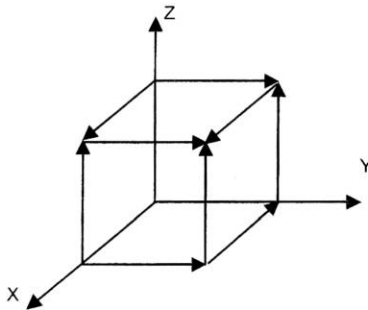


Figura 2.10. Las direcciones de las aristas del cubo

no se reduce a enteros mínimos. Los valores obtenidos se escriben dentro de paréntesis redondos. *Ejemplo: El plano (1, 1, 2). Corta a los ejes "x" y "y" en el inverso de uno, y al eje "z" en un medio, así resulta el plano figura 2.11.*

Si se tienen ceros en los índices de Miller de los planos, entonces el inverso resulta infinito, es decir el plano no corta al eje correspondiente y esto quiere decir, que es paralelo a ese eje.

*Ejemplo: El plano (1, 0, 0) corta al eje "x" en 1 / 1. Al eje "y" y al "z" los corta en los inversos de uno esto es 1 / 0 ó infinito, esto es, el plano es paralelo a estos dos ejes, el "y" y el "z". En la figura 2.12 se muestra este plano.*

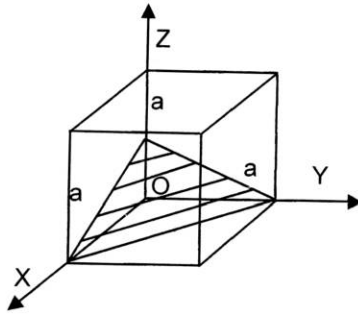


Figura 2.11. Plano ( 1 1 2 )

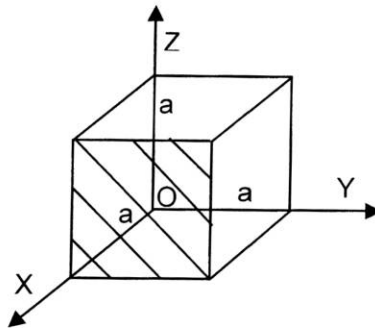


Figura 2.12. Plano ( 1, 0, 0 )

Los planos con ciertos valores, en los índices y sus valores negativos son planos idénticos y paralelos separados por la misma distancia del origen de coordenadas. Los planos que se obtienen con valores múltiplos de un cierto plano, no representan planos iguales, aunque si paralelos.

En los sistemas cúbico, ortorrómbico y tetragonal una dirección perpendicular a un plano tiene los mismo índices que el plano.

## Familia de Planos

En cada celda unitaria, los planos de una familia representan un grupo de planos equivalentes donde sus índices presentan una cierta particularidad. Estos grupos de planos similares se representan mediante llaves, esto es con  $\{h, k, l\}$ . Ejemplo: la familia  $\{1, 0, 0\}$  representa a todos los planos que son caras del cubo: estos son:  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$ ,  $(0, 0, 1)$  y los negativos  $(\bar{1}, 0, 0)$ ,  $(0, \bar{1}, 0)$ ,  $(0, 0, \bar{1})$ , la particularidad de los índices es que todos tienen un uno y dos ceros.

## ***Empaquetamiento compacto***

Al colocar muchos átomos, uno junto al otro y alineados en varias filas se obtiene un plano que se llama plano compacto, como el que se muestra en la figura 2.13. Se puede observar que los huecos que se forman, tienen la forma de triángulo: unos hacia arriba y otros hacia abajo. Si se pone una segunda capa compacta de átomos, esta se puede colocar en cualquiera de los dos tipos de huecos pero si escoge uno, sean, los triángulos hacia arriba, todos los átomos de la segunda capa quedan en esa posición. Se puede colocar una tercera capa en los triángulos hacia arriba de la segunda capa. Es claro, que las tres capas tienen posiciones diferentes y se puede decir que la secuencia de los planos es ABC, si se coloca otra capa, en los agujeros hacia arriba de la tercera capa, entonces, ésta estará en la misma posición de la capa A y así sucesivamente. Así, se establece la secuencia de los planos como es ABCABC. En este caso lo que se está reproduciendo es el plano  $(1, 1, 1)$  del arreglo cúbico centrado en las caras.

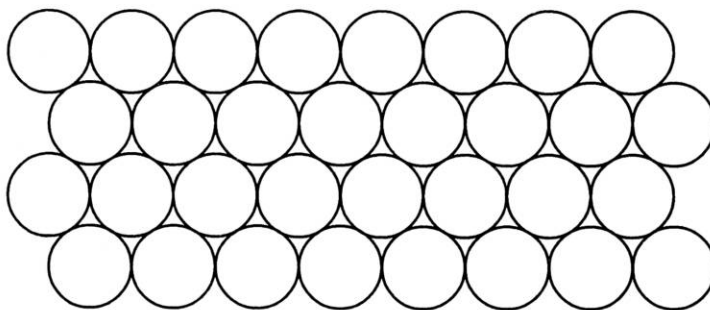


Figura 2.13. Arreglo atómico con el ordenamiento más compacto posible en dos dimensiones

Pero, si al poner la tercera capa, ésta se coloca, no en los triángulos hacia arriba sino en

los triángulos hacia abajo, se observa que esta capa cae exactamente como la capa A, de tal forma que en este caso, la secuencia de planos que se establece es ABABAB. Esta secuencia reproduce la estructura hexagonal.

### **Distancia Interplanar**

La distancia entre dos planos de átomos paralelos adyacentes con los mismos índices de Miller, está dada por la ecuación:

$$d = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Donde " $a_0$ " es el parámetro de red y  $(h, k, l)$  son los índices de Miller.

### **Ángulo entre dos direcciones o dos planos**

El ángulo entre dos direcciones o dos planos y entre un plano y una dirección se puede obtener por medio de la ecuación:

$$\cos(A \cdot B) = \frac{A \cdot B}{|A| |B|}$$

donde  $A(h_1, k_1, l_1)$  y  $B(h_2, k_2, l_2)$  representan dos direcciones o dos planos o un plano y una dirección. En el producto punto, o sea, el numerador, resulta:  $h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2$ . El denominador es el producto de los módulos y estos son:  $(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)^{1/2}$  para A y  $(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)^{1/2}$  para B.

*Ejemplo 1. Calcular el ángulo entre los planos A (1, 2, 3) y B (1, 1, 1)*

$$\cos \alpha = \frac{1 + 2 + 3}{\sqrt{1^2 + 2^2 + 3^2} \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}}$$

$$\cos \alpha = \frac{6}{\sqrt{14} \sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{42}} = 0.926$$

finalmente se tiene que el ángulo vale 22.21°.

Ejemplo 2: Demostrar que los planos (1, 0, 0) y (0, 1, 0) son perpendiculares.

$$\cos \alpha = \frac{0 + 0 + 0}{\sqrt{1^2+0^2+0^2} \sqrt{0^2+1^2+0^2}}$$

$$\cos \alpha = 0$$

Así que el ángulo es de 90° y los planos son perpendiculares entre si.

## Temas avanzados

### Difracción de rayos X y su utilización

Cuando se produce la difracción de los rayos X en los materiales, se muestra que existe una estructura cristalina ordenada. Significa que al penetrar las ondas de los rayos X encuentran condiciones en la estructura cristalina ordenada, a un cierto ángulo, que hace que se produzca una interferencia constructiva entre las ondas de rayos X, al interactuar con los átomos de la red y los rayos X, salen del material, mientras que a un ángulo diferente, se puede producir interferencia destructiva y por lo tanto no salen ondas de rayos X. A partir de este hecho se puede determinar las distancias interplanares y con ello se podrán identificar los materiales cristalinos desconocidos.

Se utilizan rayos x con una longitud de onda,  $\lambda$ , conocida, que incide en una muestra en forma de polvo. El haz de rayos x se difracta en un ángulo específico, llamado ángulo de difracción o de Bragg, si se cumple la ley de Bragg que establece que:

$$n \lambda = 2 d \operatorname{sen} \theta$$



Donde  $n$  es el orden de la difracción y generalmente se toma con un valor de uno. La distancia entre los que difractan a ese ángulo es  $d$  y  $\theta$  es el ángulo donde se produce la difracción.

El equipo donde se realiza este ensayo se llama: difractómetro de rayos x. El resultado que normalmente se obtiene de este experimento es una gráfica donde el eje "y" es la intensidad de los rayos x difractados y en el eje "x" está el ángulo de difracción, normalmente se utiliza  $2\theta$ .

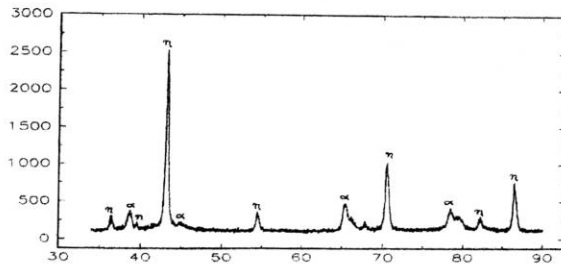


Figura 2.14. Diffractograma, gráfica de la intensidad del haz difractado contra el ángulo dos theta

Este diffractograma es como una huella digital para cada material. En esta gráfica, como la que se muestra en la figura 2.14, se pueden determinar, de acuerdo a la ley de Bragg, para cada ángulo donde aparece un pico, la distancia entre los planos que producen la difracción de los rayos x. Existen muchos libros donde se encuentran la información de los materiales y su diffractograma, en forma de tarjetas, con datos del material, la intensidad de los picos, la estructura cristalina y además información del autor de esa información o en forma de tablas con las intensidades mas importantes o los nombres posibles o la fórmula química. Actualmente esa información se tiene codificada en programas de cómputo que se puede desplegar en la pantalla de una computadora y compararla con los resultados obtenidos de un diffractograma.

#### Cámara de Laue

En esta técnica se utilizan rayos x policromáticos y muestras monocristalinas. Se utiliza principalmente para conocer la orientación de los monocristales. Se hace incidir los rayos sobre la muestra y se analizan los rayos x difractados que la atraviesan y los que son reflejados. Las imágenes de los rayos x difractados se formaban sobre una película

fotográfica en placas planas "F" antes y después de la muestra. Aunque actualmente ya se utilizan detectores planos en lugar del papel fotográfico, logrando patrones de difracción en tiempos muy cortos y con mucha exactitud. En la figura 2.15 se muestra un arreglo de esta técnica.

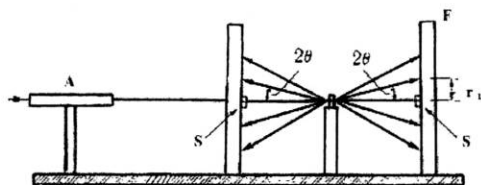


Figura 2.15. Cámara de Laue

### Capítulo 3

#### METALES PUROS

Son aquellos elementos generalmente sólidos, con brillo característico, buenos conductores del calor y la electricidad, densos, tenaces, maleables y dúctiles.

Los átomos de los metales se unen entre sí por medio del enlace que se conoce como unión metálica y las características de esta unión son:

1. Los átomos están unidos entre sí en forma muy compacta por fuerzas electrostáticas.
2. Los electrones de la última capa pueden moverse libremente de un átomo a otro.
3. Presenta la capacidad para formar la unión entre átomos metálicos iguales y átomos muy diferentes.
4. La fuerza de atracción entre los átomos depende de la distancia interatómica y de la cantidad de electrones en las últimas capas de electrones.
5. Las fuerzas repulsivas que dan origen al equilibrio, son de naturaleza electrónica.
6. La unión no tiene una dirección especial.

En la naturaleza los metales se encuentran como: óxidos, carbonatos, sulfatos, etc. del metal correspondiente. Existen algunos metales que se encuentran casi puros como: el oro, la plata, el cobre, etc., en el caso del hierro y el níquel se encuentran puros sólo en meteoritos.

Si se quiere extraer el metal a partir de su mineral, se debe realizar un proceso que incluye los siguientes pasos:

mineral → extracción del mineral → concentración → metal

En general, se llama *mena* a la combinación del elemento puro con otros elementos químicos, esto es, como se encuentra en la naturaleza, que son conocidos también como minerales. Se llama *ganga* al material que se encuentra junto con la mena y que no contiene ningún compuesto del metal. Para separar a los metales de los otros elementos, se utilizan muchos procesos físicos y químicos que varían según el metal que se trata. Estos procesos se estudian en lo que se llama *Metalurgia Extractiva*.

## Propiedades químicas

De acuerdo a la tabla periódica de los elementos, se encuentran tres grupos de metales, todos tienen características comunes, pero presentan algunas propiedades diferentes desde el punto de vista químico. En la primera columna se encuentran los *metales alcalinos* como: litio, sodio, potasio, etc. Su característica principal es que con el hidrógeno forman hidruros y con el agua hidróxidos. De la tercera a la onceava columna se encuentran los *metales de transición* tales como: el cobre, la plata, el oro, el cromo, el platino, etc., todos estos elementos son metales y tienen todas las características distintivas de los metales. Desde el punto de vista de la estructura electrónica, su última subcapa es una subcapa d. Finalmente, en parte de las columnas doceava a la dieciseisava se encuentran otros elementos también conocidos como *metales* entre ellos están: el aluminio, el zinc, el plomo, el titanio, etc, estos tienen todas las características típicas de los metales pero su última subcapa está formada por una subcapa s ó p.

**Propiedades físicas.** Los metales presentan en general una gran densidad, una alta dureza y una conductividad eléctrica y térmica elevadas.

**Propiedades mecánicas.** La ductilidad y la maleabilidad de los metales son muy buenas, esto es se pueden hacer alambres o placas con ellos. Resisten, además, bien en los ensayos de tensión o de compresión.

En el estado sólido los metales se pueden presentar en tres formas: metales puros, soluciones sólidas o compuestos intermetálicos. Esto es, un sólo componente en el primer caso y dos o más en los otros dos casos. Si existen dos o más metales, es posible que se combinen en cualquier porcentaje, formando entonces una solución sólida. Normalmente las soluciones se forman para ciertos intervalos de composición, pero si se presentan soluciones para composiciones bien definidas, se llaman intermetálicos.

Para los **compuestos intermetálicos** se pueden encontrar los siguientes casos:

a) Compuestos de valencia:  $\text{CaSe}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Pb}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_2\text{Se}$ , su combinación obedece las reglas de las valencias. Sus propiedades se parecen a las de los compuestos no metálicos. Poseen conductividad eléctrica pequeña y presentan poca ductilidad.

b) Compuestos intersticiales:  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$ ,  $\text{CrN}$ ,  $\text{TiH}$ . Este grupo está formado por metales de transición. Estos compuestos tienen carácter metálico, composición química variable, puntos de fusión elevados y alta dureza. Cuando se presentan dentro de los aceros de temple y ciertas herramientas de carburo

cementadas, mejoran las propiedades de estos materiales.

c) Compuestos electrónicos:  $\text{Ag}_5\text{Cd}_8$ ,  $\text{Ag}_3\text{Cd}_3$ ,  $\text{Ag}_3\text{Zn}$ ,  $\text{AuZn}_3$ . La mayoría de estos compuestos tienen propiedades semejantes a las soluciones sólidas de composición química variable, tiene ductilidad elevada y poca dureza.

Las **soluciones sólidas**. Se consideran formadas por dos partes: un solvente y un soluto, en general, se dice que el solvente está en mayor proporción que el soluto. Un ejemplo simple es agua con cloruro de sodio, donde el agua es el solvente y el cloruro de sodio es el soluto. En el caso de los metales las soluciones son mayormente sólidas y pueden ser de dos tipos: sustitucional o intersticial.

*Soluciones sólidas por sustitución.* Es la sustitución en la red espacial de átomos del soluto. *Ejemplo: El oro tiene una estructura cúbica centrada en las caras y algunos de sus átomos pueden ser remplazados por otro tipo de átomos, por ejemplo, de plata, sin que el oro pierda sus características o que se destruya o modifique la red cristalina del oro, a menos de que el contenido de plata se aumente hasta sustituir todo el oro.* En este caso en particular, además, se dice que la plata es completamente soluble en el oro y al revés, se dice, también, que el oro es completamente soluble en la plata.

Las reglas de Hume Rothery dan las condiciones necesarias para que dos elementos puedan formar una solución sustitucional.

Estas son:

1. La diferencia en el radio atómico debe ser menor al 15 %.
2. Los dos elementos deben tener el mismo tipo de estructura cristalina.
3. Deben tener una electronegatividad similar.
4. La valencia debe ser igual.

*Soluciones sólidas intersticiales.* Es claro que, para poder meter un átomo en un lugar intersticial se tiene que considerar el tamaño de los huecos que existen en la red. Así que los elementos que forman aleaciones intersticiales, deben tener en general su radio atómico menor a un angström, ya que de ese tamaño son la mayoría de los espacios interatómicos, en el caso de la mayoría de los metales. Algunos ejemplos de elementos intersticiales son: boro = 0.97 Å, carbono = 0.77 Å, nitrógeno = 0.71 Å, oxígeno = 0.60 Å, hidrógeno = 0.46 Å, etc.

### Huecos Intersticiales

El espacio entre los átomos que forman un cristal se conoce como hueco intersticial, en muchas ocasiones en lugar de considerar el espacio real se unen los centros de los átomos cercanos y así se definen los huecos tetragonales y los octogonales para los arreglos más compactos. En la figura 3.1 se presentan los dos tipos de huecos intersticiales más comunes. En el primer caso se muestra el hueco octaédrico donde se localiza el átomo de Mg. El octaedro se obtiene uniendo los centro de los átomos de oxígeno. En el segundo caso, uniendo los centros de los átomos de oxígeno se forma el tetraedro y el átomo de silicio se encuentra en el hueco tetragonal.

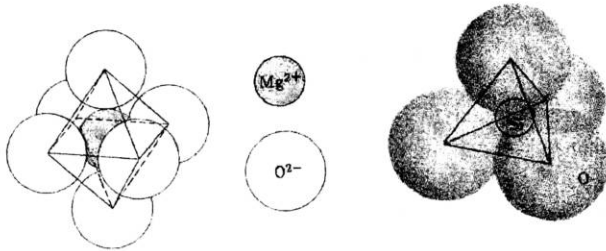


Figura 3.1. Huecos octaédricos y tetraédricos

### Transformaciones Alotrópicas

Se definen como cambios de estructura cristalina sin cambio en las propiedades químicas. El caso más interesante, por sus aplicaciones tecnológicas, es el hierro. El diagrama de enfriamiento se muestra en la figura 3.2. A muy alta temperatura se encuentra en forma líquida y a 1539 °C se forma un sólido con estructura cúbica centrada en el cuerpo, llamada fase ferrita delta. Esta fase es magnética. A partir de 1400 °C cambia la estructura cristalina y deja de ser magnética, la estructura cristalina es cúbica centrada en las caras. La nueva estructura se llama austenita o fase gama. Si se enfría el hierro y se alcanzan los 910 °C se produce una nueva fase con estructura cúbica centrada en el cuerpo, la estructura se conoce como ferrita alfa. Esta estructura se mantiene hasta la temperatura ambiente. Entre los 910 y los 780 °C la ferrita no es magnética, pero desde esa temperatura, 780 °C, la ferrita si

es magnética.

Es de suponer, que al formar una aleación de hierro con el carbono estas diferentes estructuras alotrópicas causen más posibilidades de nuevas estructuras, en general conocidas como fases. Estas se estudian con mucho detalle en el capítulo 7. Aquí sólo se mencionarán algunos nombres tales como perlita, ledeburita y cementita, producidas por la aleación del hierro con el carbono. La martensita es otra fase, pero ésta se produce, sólo si existe además, un enfriamiento muy rápido de la aleación.

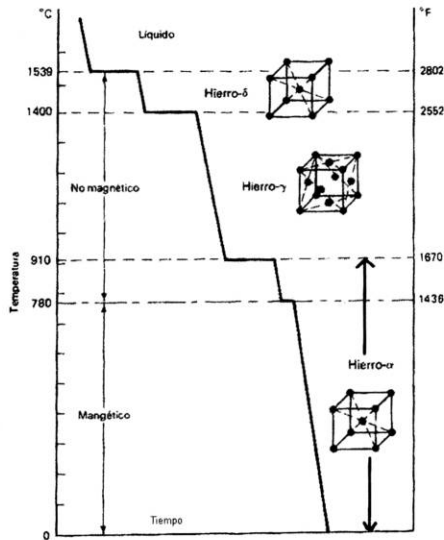


Figura 3.2. Diagrama de enfriamiento del hierro, mostrando las diferentes formas alotrópicas

Otro material que posee transformaciones alotrópicas es el carbono. Su forma normal es el grafito con estructura hexagonal pero existe el diamante con una forma estructural muy especial llamada diamante, una estructura cúbica centrada en las

caras, pero con otros átomos en posiciones intersticiales y por lo tanto más compacta. Esta estructura le otorga al diamante una extraordinaria dureza, así es el elemento más duro en la naturaleza. En la figura 3.3 se muestra esta estructura, para la mejor claridad los átomos fuera de las posiciones cúbicas centradas en las caras son de otro color.

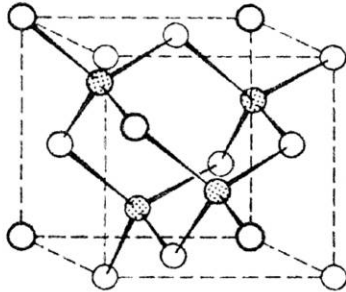


Figura 3.3. Estructura del diamante

En general los metales y la mayoría de los materiales se encuentran en forma de policristales es decir pequeños dominios que se caracterizan porque cada uno puede tener su propia orientación cristalográfica. Si estos dominios crecen mucho de tal forma que ocupen todo el material, entonces se puede tener un monocristal. Esto es, en un monocristal sólo se tiene un cristal y por lo tanto todo el material tiene la misma orientación cristalográfica. Por la misma razón, en un monocristal no se encuentra ningún **límite de grano**. En un policristal, cada grano está separado del grano contiguo por un límite de grano.

Algunos autores mencionan que la alotropía en compuestos se llama polimorfismo. Un material que presenta polimorfismo es la sílice, Si O<sub>2</sub> en la figura 3.4 se muestran las diferentes estructuras que se presentan para diferentes temperaturas. Empezando con el líquido para muy alta temperatura y enfriando se tienen las estructuras polimórficas: cristobalita, tridimita, cuarzo alto o beta y cuarzo bajo o alfa.



## Tamaño de Grano

En general, en los metales se mide el tamaño de grano, midiendo un corte transversal de una muestra, que previamente se ha preparado metalográficamente. La observación se hace normalmente a 100 aumentos y se cuenta el número de granos en una área determinada. En el caso de utilizar la norma americana ASTM (American Society for Testing and Materials) o la NOM (Norma Oficial Mexicana) el área correspondiente es una pulgada cuadrada. La fórmula para determinar el número del tamaño de grano  $n$  se obtiene de:

$$N = 2^{n-1}$$

Donde  $N$  es el número de granos medidos por pulgada cuadrada y  $n$  es el número ASTM del tamaño de grano, si la medida se hace a 100 aumentos.

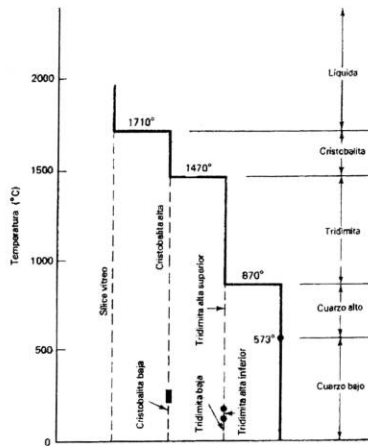


Figura 3.4. Diagrama de enfriamiento de la sílice,  $SiO_2$ , mostrando los diferentes compuestos polimórficos, que se tienen con la temperatura

Si se utiliza un aumento diferente a 100 veces, entontes la fórmula se cambia por:

$$(\text{Aumento} / 100)^2 N = 2^{n-1}$$

En la tabla 3.1 se indican algunos números de tamaños de grano ASTM y la cantidad de granos observados en un milímetro cuadrado a un aumento, éstos están listados en la segunda columna. En la tercera columna, se midió el número de granos en una pulgada cuadrada, pero con 100 aumentos. Finalmente, en la cuarta columna, se presenta el diámetro promedio de los granos en milímetros, suponiendo que se tienen esferas.

En general, se considera un grano grande cuando  $n$  está entre 1 y 5, para valores entre 5 y 8 se considera que el grano es normal y si  $n$  tiene un valor mayor a 8, se dicen que el grano es fino.

TABLA 3.1. NÚMERO DEL TAMAÑO DE GRANO ASTM

n grano ASTM	N * número de granos / mm <sup>2</sup>	N ** número de granos / pulg <sup>2</sup>	Diámetro promedio mm
-3	1	0.06	1
-2	2	0.12	0.75
-1	4	0.25	0.5
0	8	0.5	0.35
1	16	1	0.25
2	32	2	0.18
3	64	4	0.125
4	128	8	0.091
5	256	16	0.062
6	512	32	0.044
7	1 024	62	0.032
8	2 048	128	0.022
9	4 096	256	0.016
10	8 200	512	0.011
11	16 400	1 024	0.008
12	32 800	2 048	0.006
13	65 600	4 096	0.004

\* a un aumento      \*\* a 100 aumentos

Ahora, cuando se utiliza el sistema internacional de medida, entonces la relación para determinar el tamaño de grano,  $n$ , con un aumento de una vez y midiendo el número de granos que se encuentran en un milímetro cuadrado,  $N$ , se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$N = - 2.9542 + 1.4427 \ln n$$

Estos valores son los valores que se anotaron en la segunda columna de la tabla 3.1.

Un procedimiento simple para obtener la última columna de la tabla 3.1, es calcular la raíz cuadrada del valor inverso de la segunda columna, en algunos casos, el valor se aproxima por el siguiente decimal.

*Ejemplo: Para el tamaño de grano  $n$  igual a 8, se tienen 2 048 granos por  $\text{mm}^2$ , de acuerdo a la segunda columna, entonces:*

$$\frac{1}{\sqrt{2048}} = 0.022$$

*Que corresponde al valor de la última columna.*

Es muy importante hacer notar, que los valores en todos los caso son promedios ya que al medir una cierta área pequeña, se están haciendo inferencias del volumen total del material. Así también, al medir un área transversal, se está midiendo a los granos en diferentes cortes o posiciones relativas y finalmente, porque muchas veces los granos no están contenidos totalmente dentro del área de medición. Este problema se puede eliminar haciendo muchas mediciones, en muchas áreas y calcular promedios. Actualmente, ya existen equipos que pueden hacer este trabajo, llamados Analizadores de Imágenes, que por medio de programas, hasta pueden mostrar una distribución estadística de los tamaños de grano.





## CERÁMICOS

La palabra cerámica proviene de la palabra griega "keramos" que significa arcillas. Los materiales cerámicos son compuestos formados por elementos metálicos y no metálicos; como propiedades generales que los caracterizan, se puede señalar que son duros, frágiles, resistentes a la compresión; algunos son transparentes, otros translúcidos; en relación a la conductividad del calor y de electricidad algunos son aislantes, otros presentan conductividad baja, aunque ésta va supeditada a varios factores; en su mayoría son resistentes a la corrosión a temperatura ambiente y otros también a temperaturas elevadas.

Los *cerámicos de acuerdo a la antigüedad* de su aplicación se pueden clasificar en:

- a) Productos cerámicos tradicionales
- b) Productos cerámicos modernos

En los productos cerámicos tradicionales se pueden considerar:

- a) Productos de arcilla
- b) Refractarios
- c) Vidrios

En lo que a la primera aplicación, *productos de arcilla*, se refiere se debe recordar que entre los primeros productos procesados por el hombre están los de alfarería, por cierto, algunos autores manejan indistintamente los términos alfarería y cerámica. El origen de la alfarería es muy antiguo, ya que el hombre primitivo en su lucha por la sobrevivencia perseguía a los animales que le servían de alimento y huía de los que podían atacarlo. Debó observar constantemente las huellas que estos dejaban a su paso, sobre todo en los suelos arcillosos, porque las huellas se endurecían con el calor del sol. Más tarde, cuando quizá por accidente, él conoció el fuego y pudo observar que con el calor se endurecían los artefactos que él diseñaba para guardar sus alimentos.

La importancia de estos materiales, está en sus aplicaciones, que comprende su uso tradicional, en la fabricación de ladrillos, la construcción de baldosas, tubos de albañal, aisladores para transformadores, etc, etc. Otra aplicación muy importante de los materiales cerámicos es su uso como refractarios. Un ejemplo, es el óxido de magnesio que puede soportar temperaturas entre 1500 y 2300 °C sin disociación, ni fusión. La alúmina,  $Al_2O_3$ , es un material que presenta un punto de fusión más alto, una gran resistencia a la mayoría de los reactivos químicos, presenta baja resistividad, alta conductividad eléctrica y también puede utilizarse como abrasivo.

Entre los materiales cerámicos refractarios se encuentran los siguientes: alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , zirconia,  $\text{ZrO}_2$ , óxido de cromo,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , toria,  $\text{ThO}_2$ , carburo de silicio,  $\text{SiC}$ , carburo de hafnio,  $\text{HfC}$ , carburo de zirconio,  $\text{ZrC}$ , carburo de niobio,  $\text{NbC}$ , carburo de tungsteno,  $\text{WC}$ , boruro de hafnio,  $\text{HfB}_2$ , boruro de zirconio,  $\text{ZrB}_2$ , boruro de tantalio,  $\text{TaB}_2$ , boruro de titanio,  $\text{TiB}_2$  y nitruro de boro,  $\text{BN}$ .

**Productos cerámicos modernos.** Algunos productos cerámicos modernos son:

a) Titanato de Bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) que es utilizado en la fabricación de pastillas para fonógrafo, siendo su función convertir energía mecánica en energía eléctrica, por lo tanto es un transductor.

b) Ferritas magnéticas. Las ferritas magnéticas tienen una estructura cristalina llamada espinela, como se muestra en la figura 4.1. Un ejemplo de las ferritas es la magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , se considera como un óxido doble, formado por el óxido ferroso y el óxido férrico,  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , cuya principal aplicación es la fabricación de imanes metálicos, ya que debido a su estructura, tiene propiedades ferromagnéticas, esto es, un imán permanente.

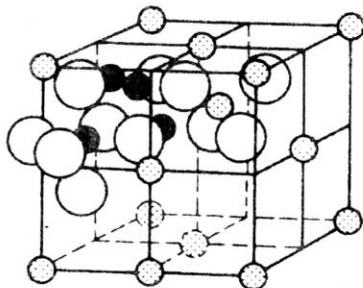


Figura 4.1 La estructura cristalina de la espinela

c) Compuestos semiconductores; un ejemplo, es el sulfuro de zinc y el sulfuro de plomo. Una de sus aplicaciones es la fabricación de dispositivos para medir la temperatura, llamados termistores. Esto se debe a que como la conductividad de estos semiconductores se incrementa con la temperatura se pueden utilizar para medir la temperatura, si se conoce la relación que existe entre la conductividad y temperatura.

## **Tipos de enlaces presentes en los materiales cerámicos**

### *Enlace iónico*

La estructura que se tiene queda determinada por el tamaño y carga del átomo ionizado, tiene la tendencia a formar el empaquetamiento tan compacto como lo permitan los átomos; el enlace es del tipo no direccional y hay una conductividad eléctrica baja. La fuerza del enlace iónico aumenta a medida que se incrementa su carga y por esta razón muchos compuestos con carga múltiple son duros y tienen un punto de fusión alto. Como ejemplo se tienen los siguientes óxidos: alumina,  $Al_2O_3$ , zirconia,  $ZrO_2$  y trióxido de ltrio,  $Y_2O_3$ .

### *Enlace Covalente*

Los átomos que forman un enlace covalente tienen una electronegatividad similar, por lo cual es un tipo de enlace direccional y no presenta estructuras de empaquetamiento compacto, dando como resultado productos cerámicos con valores de dureza y temperaturas de fusión altos. Como ejemplos se tienen el sulfuro de zinc,  $ZnS$ , que se utiliza para fabricar pintura blanca para la industria del papel y del caucho y también como material luminiscente.

### *Enlaces Mixtos*

Muchos materiales cerámicos tienen una combinación de enlace covalente y enlace iónico, por ejemplo el yeso,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ . El azufre tiende a formar un enlace covalente con el oxígeno, produciendo el radical  $SO_4$  y el calcio le cede dos electrones para que se forme un enlace iónico. Los compuestos iónicos son solubles en agua a temperatura ambiente y se puede aumentar la solubilidad si se calienta la solución; en el caso del yeso aumenta muy poco la solubilidad. Otro ejemplo, serían los diferentes silicatos que son importantes en la tecnología de la cerámica. Las estructuras de silicatos están basadas en el radical silicato, un tetraedro de sílice,  $SiO_4$ , cuyo enlace es de tipo covalente y se comporta como un grupo iónico como el caso de la fosferita,  $Mg_2SiO_4$ .



### *Fuerzas de Van der Waals*

Los enlaces iónicos y covalentes están referidos como los enlaces primarios y son los que explican los enlaces atómicos de la mayoría de los materiales cerámicos. Sin embargo, otros enlaces secundarios más débiles también están presentes y tienen mayores efectos en las propiedades de algunos materiales cerámicos. Estos enlaces secundarios están agrupados bajo el nombre de fuerzas de Van der Waals.

Las fuerzas de Van der Waals son muy importantes en las estructuras de capas, tales

como sucede en las arcillas, micas, grafito y el nitruro de boro, estos tres últimos hexagonales. Todos estos materiales cerámicos tienen enlaces primarios fuertes en las capas, pero dependen de las fuerzas de Van der Waals para mantener las capas unidas. De esta propiedad, resultan las características de anisotropía. Todas estas estructuras de capa, tiene deslizamiento entre las capas. En los minerales arcillosos, esta propiedad hace posible la plasticidad con la adición de agua y de esta forma es posible usar la arcilla en la alfarería, porcelana, loza, ladrillos y muchos otros objetos.

Aunque las fuerzas de Van der Waals son débiles, pueden causar la adsorción de moléculas en la superficie de las partículas. Para partículas de dimensiones coloidales, entre 100 y 30 Å, los iones adsorbidos suministran suficiente carga a la superficie de la partícula para atraer partículas de carga opuesta y repeler partículas de la misma carga. Esto tiene un efecto mayor en la reología, esto es, en la fluencia de las partículas suspendidas en un fluido, por ejemplo de suspensiones de partículas usadas para la inyección para moldes y otras técnicas de formación de plásticos.

## ESTRUCTURAS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

Las principales estructuras corresponden a los siguientes tipos según la clasificación cristalográfica:



en donde A y B son átomos de los elementos metálicos y X representa átomos de los elementos no metálicos.

**Compuestos AX, tipo cloruro de sodio, NaCl.** Presentan enlaces iónicos que dan a los materiales cerámicos una estabilidad alta, ejemplo de estos tipos de compuestos son el óxido de magnesio, MgO; óxido de calcio, CaO; óxido ferroso, FeO; todos ellos tienen una estructura similar a la de cloruro de sodio, es decir, cúbica centrada en las caras, ccca.

En esta celda se encuentran los cationes colocados en los vértices y los aniones ocupan las posiciones octaédricas. Por lo que hay 4 aniones y 4 cationes, por lo tanto, la carga queda balanceada y con un número de coordinación,  $NC = 6$ , esto es, cada átomo tiene 6 primeros vecinos. Los iones X, por ejemplo los  $Cl^-$ , no se tocan. Como se puede observar en la figura 4.2.

**Compuestos AX con enlaces covalentes tipo sulfuro de zinc, ZnS.** Tienen una celda cúbica centrada en las caras con cuatro aniones se localizan en posiciones ccca y cuatro cationes en la mitad de los ocho sitios tetraédricos. Aunque hay ocho sitios de coordinación, cuatro por celda unitaria, sólo cuatro están ocupados para que queden balanceadas las cargas, como se ve en la figura 4.3.



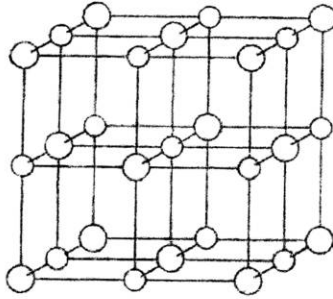


Figura 4.2. Estructura cristalina del Na Cl, son dos estructuras cúbicas centradas en las caras intercaladas, las esferas chicas son Na<sup>+</sup> y las grandes Cl<sup>-</sup>

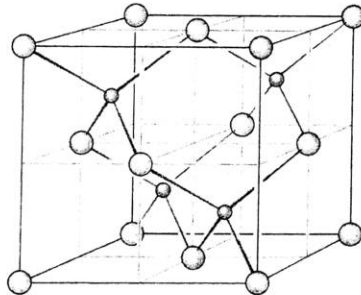


Figura 4.3. Estructura del sulfuro o blenda de zinc, un sistema cúbico centrado en las caras de Zn con 4 átomos de S en posiciones intersticiales tetraédricas o al revés

**Compuestos A X, tipo cloruro de cesio, Cs Cl.** Constituyen una celda cúbica simple con un sitio intersticial cúbico ocupado por un anión, el sitio intersticial tiene un número de coordinación de ocho por lo que a cada átomo A le corresponden ocho vecinos X y a cada átomo X le corresponden ocho vecinos A, como se muestra en la figura 4.4.

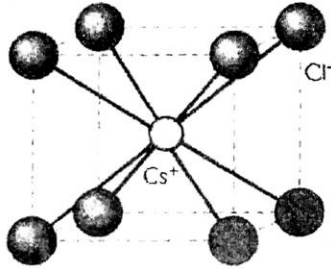


Figura 4.4. Estructura cristalina del Cs Cl, es un cúbico centrado en el cuerpo

**Compuestos  $A X_2$ , tipo fluorita  $Ca F_2$ .** Los iones  $Ca^{2+}$ , átomos tipo A, tienen una estructura cúbica centrada en las caras, esferas blancas, los iones tipo  $F^-$ , son los átomos tipo X, esferas negras, forman un arreglo cúbico simple, como se muestra en la figura 4.5. Cada átomo de flúor esta rodeado por 4 átomos de calcio. Mientras que cada calcio está rodeado por 8 átomos de flúor.

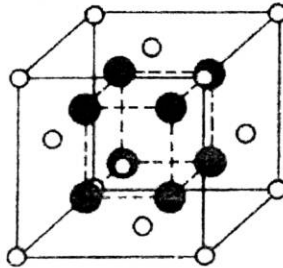


Figura 4.5. Estructura cristalina de la fluorita de calcio,  $Ca F_2$ , dos estructuras cúbicas

**Composición  $A B X_3$ , tipo titanio de bario,  $Ba Ti O_3$ .** Por arriba de  $1200^\circ C$  el titanato de bario,  $BaTiO_3$ , presenta una estructura cúbica con los iones  $Ba^{2+}$  en los vértices y los iones oxígeno O en el centro de cada cara y el ion titanio, Ti, en el centro del cubo, como se observa en la figura 4.6.

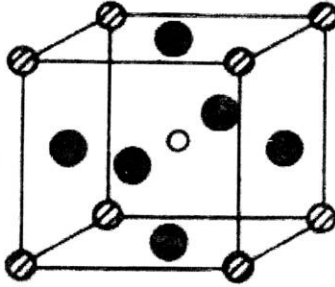


Figura 4.6. Estructura del tipo  $BaTiO_3$

A temperaturas por debajo de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  los cationes, Ba y Ti, se mueven hacia arriba con respecto a los aniones, O. Como los iones Ti y O se desplazan en direcciones opuestas, los centros de las cargas negativas y positivas no son idénticos, por lo tanto la estructura deja de ser cúbica para transformarse en tetragonal.

**Compuestos  $A_2X_3$ , tipo Alúmina, óxido de aluminio,  $Al_2O_3$ .** Una de las maneras más sencillas de comprender la configuración de esta estructura es considerándola un empaquetamiento hexagonal compacto, H C, con iones  $O^{2-}$

En esta red el número de sitios octaédricos es igual al número de átomos de O, pero como el ión de aluminio es trivalente sólo se pueden tener dos Al. El resultado es que únicamente se llenan  $2/3$  de los sitios, como se muestra en la figura 4.7.

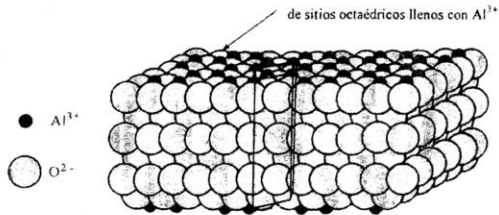


Figura 4.7. Croquis de una estructura de la Alúmina, como corindón

**Estructuras  $A B_2 X_4$ , tipo Aluminato de magnesio, Espinela,  $Mg Al_2 O_4$ .** Esta estructura se puede visualizar como una combinación de las estructuras cúbicas centradas en las caras de cloruro de sodio, NaCl, y del sulfuro de zinc, ZnS, como se muestra en la figura 4.8.

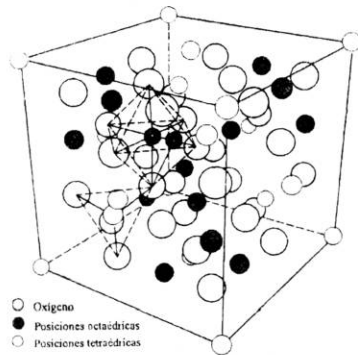


Figura 4.8. Estructura del compuesto  $Mg Al_2 O_4$

La Tabla 2 resume los datos estructurales de las composiciones recién descritas.

TABLA 1. RESUMEN DE LAS ESTRUCTURAS CERÁMICAS

NOMBRE	ESTRUCTURA	C A	C C	EJEMPLOS
Cloruro de Sodio	ccca	6	6	MgO, CaO, LiF, CoO, NiO
Blenda de Zinc	ccca	4	4	ZnS, BeO, SiC
Perovskita	ccca	6	6, 12	BaTiO <sub>3</sub> , CoTiO <sub>3</sub> , SrZrO <sub>3</sub>
Espinel	ccca	4	4, 6	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Espinel Inversa	ccca	4	4, 6+	FeMgFeO <sub>4</sub> , MgTiNgO <sub>4</sub>
Cloruro de cesio	cs	8	8	CsCl, CsBr, CsI
Fluorita, Ca F <sub>2</sub>	cs	4	8	ThO <sub>2</sub> , CeO <sub>2</sub>
Rutilo, Ti O <sub>2</sub>	ccca*	3	6	GeO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , PbO <sub>2</sub> , VO <sub>2</sub>
Wurzita, Zn S	hc	4	4	ZnO, SiC
Corindón, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hc	4	6	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ilmenita, Fe TiO <sub>3</sub>	hc	4	6	CoTiO <sub>3</sub> , NiTiO <sub>3</sub>
Olivina, Mg <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>	hc	4	4, 6	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Arseniuro de níquel	hc	6	6	NiAs, FeS, CoSe

- + C A Coordinación de aniones (aniones de primeros vecinos)
- + C C Coordinación de cationes (cationes como primeros vecinos)
- + El primer o el segundo Fe pueden estar en la coordinación tetraédrica
- \* Esta celda está distorsionada

## PRODUCTOS CERÁMICOS TRADICIONALES

### Productos de arcilla

En este grupo de productos se encuentra lo que se considera como alfarería, ladrillo para construcción, loseta para pavimento resistente al ácido, tubos para conductores eléctricos, tejas, tubos de desagüe, etc.

Si se refiere a productos de arcilla, la pregunta inmediata es: ¿Qué es una arcilla?. Arcilla es un material terrígeno de grano fino, cuyo tamaño de partícula es de 2 micras o menos y que desarrolla plasticidad cuando se mezcla con cantidades limitadas de agua.

Una pregunta similar surge respecto al concepto plasticidad: ¿Qué se entiende por

plasticidad?. Es la capacidad que tiene la arcilla para formar con el agua una pasta moldeable.

La plasticidad tiene su origen en:

a) La enorme superficie de contacto que presenta la arcilla, debido a su finura. Para comprender este hecho se puede suponer que un cubo que mida un centímetro por lado puede tener contacto sobre una superficie equivalente a 6 caras de  $1 \text{ cm}^2 = 6 \text{ cm}^2$ . Otro forma de ver el problema es suponer que la arcilla está formada por cubos pequeños, así si se divide el volumen de  $1 \text{ cm}^3$  en cubos de  $10^{-6} \text{ cm}^3$  de los que se tendrían obviamente  $10^6$  cubos, por lo tanto se tiene una área total de 6 veces ese valor, entonces el área total que se tiene sería de  $6 \times 10^6 \text{ cm}^2$ .

b) Por su composición química, la plasticidad es el resultado del deslizamiento fácil de las diferentes capas de las arcillas. Existen atracciones fuertes dentro de cada capa, pero atracciones débiles entre las capas; entonces una capa se podrá deslizar sobre la otra sin mucho problema. Como se ve en la Figura 4.9.

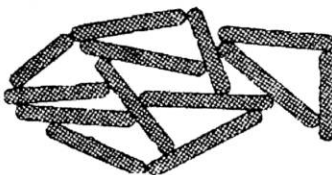


Fig. 4.9. Capas de arcilla

Debido a las fuerzas de Van der Waals que se presentan entre las partículas y el agua, se provoca un deslizamiento fácil entre partículas, lo que da lugar a la plasticidad de las arcillas. Ver figura 4.10.

**Adsorción de agua por la arcilla.** Esta adsorción de Van der Waals favorece el deslizamiento haciendo que la arcilla húmeda sea extremadamente plástica.

Factores que influyen en la plasticidad

Los factores fundamentales son: la composición química, composición mineralógica,

tamaño de partícula y los electrolitos presentes

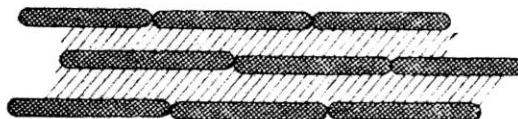


Figura 4.10. Arcilla con agua

*Índice de plasticidad.* Indica el límite de plasticidad de una arcilla y es el resultado de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. El límite líquido es la cantidad de agua necesaria para formar una pasta moldeable y el límite plástico es la cantidad de agua que se necesita obtener una pasta pegajosa.

### **Geología de Arcillas**

Los granitos, feldspatos, pegmatitas, dieron lugar a las arcillas por envejecimiento, el cual se llevó a cabo por la acción mecánica del agua, vientos glaciales y movimientos terrestres en colaboración con la acción química del agua, dióxido de carbono y ácidos húmicos.

#### **Arcillas Residuales y Arcillas Transportadas**

Arcillas residuales son rocas que han permanecido en su posición original, es decir cerca de la roca madre. Pero en la mayoría de los casos los agentes de envejecimiento han transportado las partículas de las rocas madres y las han depositado en otro lugar, formando bancos de arcillas "transportadas", en el transcurso de éste transporte, se produce la separación de las diferentes partes de la roca madre, su separación por diferencia de tamaño de partículas y una mezcla con otros productos de envejecimiento de otras procedencias.

Los depósitos que se forman a partir del movimiento del agua siempre se colocan en forma estratificada a diferencia de los depósitos transportados por el viento que tienen una estructura más precisa y desmenuzada.

Es indudable que hacer una clasificación de arcillas es una tarea difícil ya que se tendría que tener como base varios puntos de vista como son: geológico mineralógico, relacionado a las propiedades o en función al uso, por lo tanto a continuación se verá la clasificación de Ries, R28, F. Singr.

## Mineralogía de las Arcillas

Las rocas básicas a partir de las cuales se han formado las arcillas, son los aluminosilicatos complejos. Durante el envejecimiento éstos se hidrolizan, los iones alcalinos y alcalino térreos forman sales solubles y son lixiviados, permaneciendo un residuo constituido por aluminosilicatos y silicatos hidratados de composición y estructura variable y además sílice libre, así como partículas de roca inalterada, por ejemplo feldespato, mica y cuarzo.

### Propiedades de las Arcillas

La naturaleza básica de los constituyentes de las arcillas se pueden asociar en tres grandes grupos:

Grupo 1: Por Composición:

- a) Composición mineralógica: tipos y proporciones relativas de los minerales
- b) Composición física: de tamaño y forma de partícula de cada mineral
- c) Composición química

Grupo 2: Por las Propiedades derivadas del grupo

- a) Fenómeno de adsorción
- b) Características de empaquetamiento y estructura

Grupo 3: Por las Propiedades físicas controladas por la composición mineralógica por el fenómeno de adsorción y las características de empaquetamiento y estructura

- a) Resistencia en seco
- b) Contracción en el secado
- c) Plasticidad
- d) Características de flujo
- e) Estabilidad de las suspensiones
- f) Permeabilidad

La mayor parte de las propiedades cerámicas de las arcillas son debidas a las cargas eléctricas que poseen las partículas de arcilla, estas propiedades aparecen fundamentalmente por dos causas:

- 1) Una subdivisión de un cristal gigante da lugar a enlaces rotos, por tal motivo las partículas tienen cargas eléctricas
- 2) La presencia de cargas residuales en la red debidas a estructuras desordenadas que contienen iones de valencia incorrecta



Otra propiedad de las arcillas es el intercambio iónico, ya sea catiónico ó aniónico. Intercambio iónico es el nombre que recibe el conjunto de procesos reversibles durante los cuales las partículas sólidas de arcilla, adsorben iones de la fase acuosa, y al mismo tiempo, desadsorben cantidades equivalentes de otros iones y establecen un equilibrio entre ambas fases.

Sílice,  $\text{SiO}_2$

La sílice,  $\text{SiO}_2$ , desde el punto de vista químico es un óxido pero por su estructura puede considerarse como un silicato.

La sílice puede presentarse en varias formas polimórficas o alotrópicas dependiendo de la temperatura. Hasta  $573\text{ }^\circ\text{C}$  existe como cuarzo alfa, entre  $573$  y  $870\text{ }^\circ\text{C}$  como cuarzo beta, en el intervalo de  $870$  a  $1470\text{ }^\circ\text{C}$  existe como tridimita y entre  $1470$  y  $1713\text{ }^\circ\text{C}$  se presenta como cristobalita.

Nombre	$^\circ\text{C}$	Cristalización	Densidad $\text{g} / \text{cm}^3$
Cuarzo	573 - 870	Hexagonal compacta	2.655
Tridimita	870 - 1470	Ortorrómica	2.270
Cristobalita	1470 - 1713	Tetragonal	2.300

#### CLASES DE SILICATOS Y ALGUNOS GRUPOS DE MINERALES

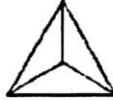
El componente básico de los silicatos se considera el tetraedro donde el ión silicio está en el centro del tetraedro y en los vértices se encuentran iones oxígenos formando el compuesto  $(\text{Si O}_4)^{4-}$ , que es la unidad para formar cadenas lineales o cíclicas.

De acuerdo con la forma en que se presenta esta unidad básica se pueden agrupar muchos grupos de minerales:

CLASE

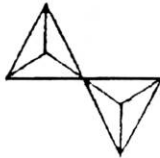
GRUPO

Nesosilicatos



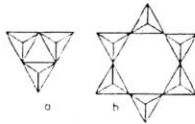
Olivino  
Granate  
Zirconio  
Silimanita - Andalucita - Cianita  
Topacio  
Cloritoides

Sorosilicatos



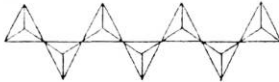
Epidota

Ciclosilicatos



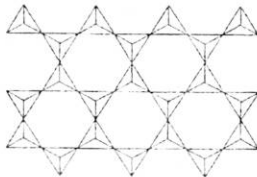
Berilio  
Turmalina

Inosilicatos



Anfibola  
Piroxeno  
Wolastonita

Filosilicatos



Pirofilita-Talco  
Montmorilonita - Saponita  
Vermiculita  
Ilita  
Mica-Mica quebradiza  
Clorita  
Caolinita - Serpentina  
Hormita

La secuencia para la *fabricación de productos de arcilla* que se seguiría de una manera general sería:

Trituración ⇒ Molienda ⇒ Tamizado ⇒ Mezclado ⇒ Envejecimiento ⇒ Moldeado ⇒ Secado ⇒ Cocido ⇒ Decorado.

*Trituración.* Es la reducción de trozos grandes a un tamaño adecuado para una reducción secundaria. Los procesos mecánicos de reducción se fundamentan en las siguientes acciones: a) Por golpe de martillo, b) Trituración por compresión, c) Acción de desgarramiento o de cizallamiento.

El golpe se produce por el impacto de un martillo móvil sobre el material. La trituración por compresión se lleva a cabo en trituradores de mandíbulas o con tambores giratorios que fuerzan el material a través de un espacio limitado. La acción cizallante se produce cuando un diente o barra se hace pasar a través del material estacionario.

*Molienda.* Comúnmente se utiliza el término molienda en sentido muy general, pero en particular lo que se involucra es la producción de un polvo fino. La molienda se efectúa por impacto y frotamiento debido a que se realiza en molinos que consisten de cilindros horizontales rotatorios que contienen esferas o barras.

*Tamizado.* El tamizado es uno de los métodos para clasificar los materiales cerámicos por tamaño de partícula, para lo cual son utilizados tamices o cribas. Los tamices o cribas están formados por la malla y un bastidor que la sostiene.

La malla está construida por hilos de bronce fosforado, latón, acero inoxidable, aluminio, cobre, nylon, seda y otras aleaciones. La malla se monta sobre bastidores circulares o rectangulares.

El diámetro y la tolerancia de los tamices están especificados en normas: la norma inglesa es la British Standard Specification 410 - 1943 y la norma americana es la ASTM la American Society for Testing Materials, la E 1139.

En ambas normas se designa un tamiz por el número de mallas, como una cierta distancia, esto significa, por ejemplo, el número de aberturas por pulgada lineal.

*Mezclado.* El mezclado es la unión de dos o más ingredientes en cantidades que proporcionen una pasta cerámica con la composición y plasticidad adecuadas.

Los ingredientes básicos son: arcilla, materiales no plásticos, tales como cuarzo molido o polvo de un producto cerámico ya cocido y fundentes. La función de los materiales no plásticos que también son conocidos por los ceramistas como desgrasantes, es disminuir la proporción de agua en la pasta, evitando así, una excesiva contracción durante el secado.

Los fundentes son sustancias tales como: el óxido de sodio,  $\text{Na}_2\text{O}$  y el óxido de calcio,  $\text{CaO}$ , que bajan el punto de fusión de la mezcla, con lo que se obtiene una vitrificación más completa a temperaturas menores.

En productos cerámicos, se emplea el término mezclado desde tres puntos de vista: húmedo, plástico y seco. *Mezclado húmedo* es la mezcla de un material cerámico con agua para formar una suspensión que pueda fluir. Ésta es una operación importante en la preparación de las pastas y se lleva a cabo en grandes recipientes provistos de agitadores o hélices. *Mezclado plástico* consiste en mezclas de una sustancia cerámica con agua, pero que su consistencia es demasiado seca para fluir como lo hacen las mezclas húmedas y al mismo tiempo demasiado húmedas para moverse libremente como lo hacen los polvos granulares, estas mezclas son pegajosas. Este mezclado puede efectuarse en un recipiente cilíndrico cerrado, provisto de un tornillo sin fin que puede ser rotatorio con cuchillas o paletas.

El *mezclado seco* es la combinación de materiales cerámicos que se pueden mover libremente aunque tengan cierta cantidad de humedad. Esta operación puede realizarse en cilindros y tubos giratorios.

*Envejecimiento.* Se produce sobre la pasta cerámica que ya está lista para emplearse, básicamente se realiza durante su almacenamiento en una bodega húmeda, si se trata de grandes cantidades, en cantidades pequeñas, se guarda en lugares húmedos, la pasta es envuelta en plástico y se cubre con sacos húmedos. El envejecimiento mejora la plasticidad porque disgrega las partículas de arcillas en otras más pequeñas que absorben más agua.

*Moldeo.* El moldeo de las pastas cerámicas tradicionales está en función de las propiedades plásticas y del flujo de las mismas, por lo que, los métodos de moldeo se dividen de acuerdo a la condición de la pasta como sigue:

a) Líquida, b) viscosa, c) plástica, d) semiseca y e) seca

En los casos de a) y b), la pasta fluye por gravedad o a baja presión. En las condiciones plástica y semiseca se obtiene el flujo mediante presiones considerables, pero se conserva la nueva forma cuando se retira la presión. En la condición seca, generalmente no se puede inducir el flujo.

Los métodos de moldeo más antiguos son modelado a mano y torneados en una rueda, en los que se utilizan pastas de arcilla en condición plástica. En los métodos posteriores se emplea la colada de arcillas en condiciones en que fluyan por gravedad y en consecuencia sean capaces de retener una forma impuesta. El moldeo de pastas demasiado secas para fluir bajo presión, esto es por un prensado en seco, es una técnica relativamente reciente.

*Secado de las piezas moldeadas.* En los procesos de moldeo cerámico el agua es una

parte esencial. Pero cuando se han moldeado las piezas, su función ha terminado, por lo que debe eliminarse, lo más que se pueda antes de la cocción. La cocción consiste en cocer los productos cerámicos. El proceso de secado se efectúa en dos etapas:

1. Al principio el secado tiene lugar en la superficie y se produce una contracción de volumen igual al de la pérdida de agua. El agua de contracción es la que se encuentra entre las partículas de arcilla y que explica la plasticidad de la misma. Si el secado es demasiado rápido, habrá una disminución de volumen brusco y se producirá agrietamiento.
2. Si se continúa con el secado, el agua se evapora desde el interior de la pasta y la contracción es casi nula. El contenido de agua total en la pasta es la suma del agua de contracción y el agua en los poros, así la primera, produce disminución de volumen mientras la segunda no.

**Secadores.** Los secadores pueden ser: a) sin calentamiento y b) con calentamiento.

a) En climas cálidos, las piezas pueden secarse cuando son expuestas a la atmósfera aunque es necesario impedir un secado demasiado rápido, por lo cual se cubren las piezas con paños húmedos. En otro tipo de clima, será necesario que por lo menos exista un tejado para evitar también el secado muy rápido.

b) En los secadores con calor, este puede transmitirse a las piezas por convección o conducción.

La convección precisa del movimiento del aire para eliminar el vapor de agua. Esto se logra colocando tubos de vapor en el suelo y paredes de los secaderos o inyectando aire caliente.

Cuando los materiales son colocados sobre una base caliente se dice que se calientan por conducción.

**Cocción.** La cocción o cocido tiene por objeto transformar un artículo de arcilla moldeado y secado en un producto duro resistente al agua y a los productos químicos.

Los artículos no vidriados solamente se llevan a una cocción mientras que los vidriados se cocen al menos dos veces, esto es, son sujetos a diferentes procedimientos.

Al inicio del cocido hay eliminación de agua debido a que la cantidad de agua presente depende de los minerales que contenga la pasta y de la eficiencia del método de secado aplicado a las piezas.

Al inicio de la cocción la eliminación del agua es en el siguiente orden:

a) Agua de contracción. Es el agua que hay entre las partículas, por lo general existe

mayor cantidad en artículos que han sido secados por un proceso natural o sin calentamiento.

b) Agua higroscópica. Es el agua retenida por los minerales no es eliminada en el proceso de secado natural.

c) Agua químicamente enlazada. Al último queda el agua que está combinada químicamente y que al comenzar la descomposición de los minerales de arcilla es eliminada. En la cocción, el tiempo y la velocidad de calentamiento están en función de la composición química y mineralógica de la pasta, del tamaño y forma de la pieza así como del tipo de horno que se utilice.

A continuación se describe la secuencia de la cocción. El proceso durante el calentamiento es el siguiente:

Temperatura  
en °C

- 110 - 260 Se elimina humedad de contracción e higroscópica.
- 260 - 425 Casi no hay cambios importantes. Algo de dilatación térmica.
- 425 - 650 Los minerales de arcilla se descomponen en sílice y alúmina y se libera agua que está combinada químicamente:



- 800 - 900 En este intervalo, si las condiciones del horno son oxidantes se elimina toda la materia orgánica y se oxidan las pirritas que puedan estar presentes.
- 900 - 1000 Se inicia la fusión o vitrificación que es el resultado de una formación lenta de líquido que va a ocupar los espacios. Porosos y cuando se enfría formará una matriz ya que se aglutinan las partículas inertes.
- 1000 - 1400 Se alcanza la vitrificación total.

Factores que influyen en el grado de vitrificación:

- 1) Temperatura de cocción.
- 2) Tipo de Atmósfera ya sea oxidante o reductora.
- 3) Composición química y mineralógica.
- 4) Las Impurezas.
- 5) Electrolitos presentes.
- 6) Fundentes en la mezcla.
- 7) Finura de partículas y distribución de éstas en el cuerpo de la pieza.
- 8) Colocación de las piezas.

- 9) El área de la pieza expuesta al calentamiento.
- 10) Forma y espesor de la sección transversal.

Propiedades que dependen del grado de vitrificación:

- 1) Resistencia a la compresión en frío o sea su dureza.
- 2) Porosidad.
- 3) Densidad.
- 4) Resistencia al desgaste.
- 5) Durabilidad.

Clasificación de productos de alfarería en función de su temperatura de cocción:

Terracota (barros)	Temperatura de cocción	1000 °C
Loza fina	Temperatura de cocción	1200 °C
Loza alta temperatura	Temperatura de cocción	1350 °C
Porcelana (libre de hierro)	Temperatura de cocción	1500 °C

Otras propiedades de los productos de alfarería:

**Dureza.** Se mide por el método Vickers común o por un equipo que se llama esclerómetro. Antes del desarrollo del ensayo de microdureza se utilizaba el método de rayado de Mohs.

Los valores de dureza Mohs de una cerámica, se reportan tomando el número menor del mineral que raye la muestra. Por ejemplo al corindón le corresponde el número 9, ya que raya al topacio, 8 y a todos los demás de menor número, pero no al diamante, 10.

En la figura 4.11 se ve el diagrama de equilibrio del sistema binario sílice-alúmina. Los puntos de fusión de la sílice y la alúmina son 1710 y 2050 °C respectivamente. La composición eutéctica es 94.5 % de sílice y 5.5 % de alúmina con un punto de fusión de 1545 °C.

Se tiene la línea del "liquidus" arriba de la cual se encuentra la mezcla en fase líquida, en la figura A, B, C y D. Además existen otras áreas limitadas por las líneas curvas y horizontales conocidas como zonas sólido - líquido y finalmente las zonas sólido - sólido. Se indican los nombres de las fases presentes en cada región.

Para determinar la cantidad relativa de cualquier fase, ya sea líquida ó sólida, basta con aplicar la regla de la palanca.

De este diagrama se puede concluir lo siguiente:

- a) En materiales refractarios no es aconsejable utilizar composiciones de 3 a 8 % de alúmina por su cercanía a la temperatura eutéctica y su baja temperatura de fusión.

- b) La capacidad como material refractario aumenta en función del contenido de alúmina. Este se aplica particularmente a la capacidad del refractario bajo carga.
- c) Los materiales de sílice y alúmina presentan intervalos amplios de temperaturas en donde empieza a formarse el líquido, hasta la completa fusión de la pieza.
- d) Los cristales de mullita y alúmina son los únicos compuestos que permanecen estables por arriba de la temperatura de los 1710 °C.

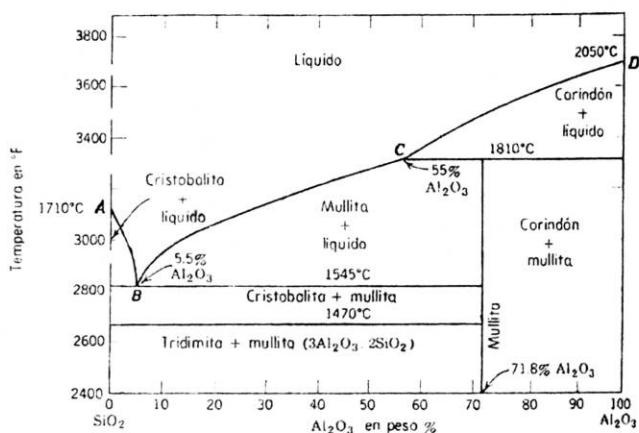


Figura 4.11. Diagrama de fase de equilibrio para el sistema  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

Los datos para este diagrama de fase de equilibrio solamente se pueden considerar en condiciones de equilibrio entre los constituyentes y con materiales muy puros, en sistemas reales, esto no se cumple. Por otro lado la sílice,  $\text{SiO}_2$  y la alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  comerciales tienen pequeñas cantidades de impurezas entre las cuales se encuentran óxidos tales como: óxido de magnesio,  $\text{MgO}$ ; óxido de calcio,  $\text{CaO}$ ; óxido ferroso,  $\text{FeO}$ ; óxido de sodio,  $\text{Na}_2\text{O}$  y óxido de potasio,  $\text{K}_2\text{O}$ . Todos estos óxidos disminuyen la temperatura eutéctica, los más eficaces son los dos últimos.

Decoración

Para decorar y colorear artículos cerámicos existen varias técnicas que se pueden aplicar



directamente a la pasta o durante el vidriado y puede ser realizada en las diferentes etapas de la fabricación.

#### Decoración de la pasta

a) Pastas coloreadas. En la mayoría de las materias primas utilizadas en la fabricación de productos cerámicos existen como impurezas agentes colorantes que imparten color a los productos fabricados: así, se tiene como ejemplo, el caso de los ladrillos rojos de construcción en donde el agente colorante es el hierro o el de los ladrillos amarillos en donde el color se debe a la presencia combinada de hierro y calcio. También se emplean arcillas coloreadas para artículos más finos como por ejemplo: vajillas. En este caso se recomienda efectuar una molienda bastante fina con el fin de obtener colores muy homogéneos. En algunos casos se aplica un teñido intencional a las pastas añadiendo un agente colorante.

b) Engobe. El engobe es un recubrimiento superficial de una pieza de cerámica con una suspensión muy fina de partículas de barro que puede tener el mismo color de la pieza o diferente.

c) Trabajos de relieve e incrustaciones de pastas. Los trabajos de relieve e incrustaciones de pastas son métodos aplicados sobre la superficie de la pieza, que está parcialmente seca y son los siguientes:

Dibujos rayados, modelado de la superficie, perforación, aplicaciones y relieves. Como su nombre lo indica, esto se logra rayando solamente la superficie de la pasta cerámica.

Modelado de la Superficie. En piezas cuyo espesor de pared sea medianamente grueso se pueden efectuar modelados superficiales como por ejemplo rizados.

Perforación. La perforación es una técnica que consiste en dibujar el diseño sobre la pieza y después se inicia el orificio con un taladro en espiral y finamente se trabaja con un cuchillo de hoja fina.

Aplicaciones. Es la formación de un relieve a partir de un molde. La arcilla plástica que puede tener el mismo o diferente color de la pasta de la pieza por decorar se prensa en un molde y se aplica a la superficie de la pieza y cuando el relieve se ha adherido, se desprende del molde.

Relieves. Los relieves se efectúan por medio de un procedimiento de modelado o de talla haciendo que la figura quede en desnivel.

#### **Refractarios**

Materiales refractarios son aquellos que soportan altas temperaturas sin fundirse ni disociarse, sin embargo, el término refractario ampara estrictamente a los materiales de

CPE (Cono Pírométrico Equivalente) superior al cono No. 26, esto es de 1595 °C.

La determinación del cono pírométrico equivalente, corresponde al ensayo C-24-84 de los métodos ASTM (American Society for Testing and Materials). A grandes rasgos se describirá en qué consiste dicho método.

La muestra se pulveriza hasta un tamaño de malla 65, se mezcla con agua y pequeñas cantidades de dextrina o cola para formar una pasta con la cual se forme un cono de las dimensiones especificadas en el método. Por otro lado se prepara una serie de conos pírométricos testigos (es decir, de temperatura de ablandamiento conocida). Se colocan los conos de la muestra por probar y conos testigos en una placa y se calienta en un horno que tenga distribución de temperatura uniforme y a una velocidad de calentamiento especificada en una atmósfera oxidante o neutra.

La temperatura de ablandamiento de un cono corresponde a la temperatura a la cual el cono se dobla de tal manera que la punta toque la placa. En el momento que un cono muestra se dobla coincidiendo con un cono testigo se dice que aquel tiene un número de cono ASTM o equivalentemente una temperatura de ablandamiento igual que el cono testigo.

Las propiedades más importantes de los refractarios son:

- a) Temperatura de fusión y ablandamiento altas.
- b) Gran resistencia a los esfuerzos mecánicos, por lo tanto alta estabilidad dimensional.
- c) Resistente al desgaste, especialmente por las escorias.

#### Clasificación de Refractarios

Los refractarios pueden clasificarse por su composición química mineralógica o por su refractariedad. El análisis químico de refractarios se expresa en porcentajes de los óxidos, esto es, de sus componentes tales como: Si O<sub>2</sub>, Mg O, Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, Fe O, etc.

En general la estructura de un cuerpo refractario consiste en granos y cristales sólidos en una matriz o magma vítrea, esto es, no cristalina. La matriz puede ser un cristal, una masa cristalina o mezcla de ambos, siendo su principal papel actuar como cemento o liga para los granos primarios del refractario.

Los refractarios de acuerdo a su composición química mineralógica se pueden dividir en los siguientes grupos:

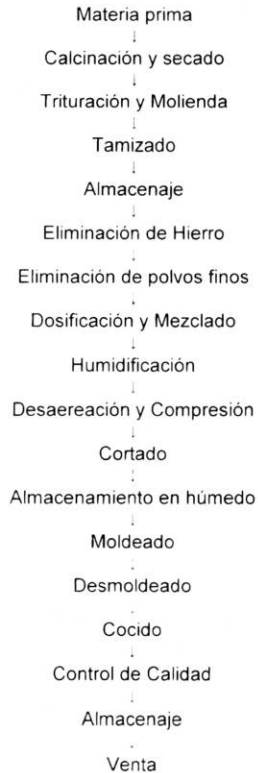
Ácidos	Oxido de Zirconio Zircón Sílice Semisílice Arcilla refractaria Caolín Silimanita Mulita
Neutros	Bauxita Alúminas Carbono Carburo de silicio Óxido de cromo Óxido de cromo - alúmina Óxido de cromo - magnesita
Básicos	Magnesita Periclasa Dolomita Forsterita

Por su refractariedad los refractarios se pueden clasificar en tres clases:

- Para servicio a temperatura baja: CPE 19 - 28, 1520 a 1625 °C
- Para servicio a temperatura intermedia: CPE 28 - 30, 1615 a 1650 °C
- Para servicio a temperaturas extremas: CPE > 33, más de 1745 °C

Entre las industrias que dependen de materiales refractarios se encuentran las siguientes: Hierro y Acero, Metales no Ferrosos, Vidrio, Cerámica, Propulsión por turbinas de gas y propulsión a chorro, Energía nuclear, Fabricación de cemento y cal, Incineradores, Fábricas de papel, Talleres de esmaltado, Calefacción doméstica, etc.

## Proceso de Fabricación de un Refractario



## CEMENTOS

Cemento es una substancia que actúa como agente de unión o recubrimiento en la mampostería. Las principales características del cemento son: el fraguado y el endurecimiento, cuando se mezcla con agua para formar una pasta.

**Clasificación de los cementos:** Hidráulicos y no hidráulicos. Los primeros son los que son capaces de fraguar y endurecer dentro del agua por ejemplo: el cemento portland. Los segundos endurecen en el aire y no se pueden utilizar bajo el agua, como ejemplo se tendría la cal apagada  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ .

El cemento portland está formado por:

Silicato tricálcico	$3 \text{ Ca O Si O}_2$
Silicato dicálcico	$2 \text{ Ca O Si O}_2$
Aluminato tricálcico	$3 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3$
Aluminoferrita-tetracálcica	$4 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3 \text{ Fe}_2 \text{ O}_3$

En la industria del cemento estos compuestos se manejan con los siguientes símbolos:

Silicato tricálcico	$\text{C}_3 \text{ S}$
Silicato dicálcico	$\text{C}_2 \text{ S}$
Aluminato tricálcico	$\text{C}_3 \text{ A}$
Aluminoferrita-tetracálcica	$\text{C}_4 \text{ A F}$

Donde obviamente las abreviaturas:

C	representa	$\text{Ca O}$	S	representa	$\text{Si O}_2$
A	representa	$\text{Al}_2 \text{ O}_3$	F	representa	$\text{Fe}_2 \text{ O}_3$

La "Portland Cement Association", PCA, da la composición química en porcentajes de los elementos básicos para los cinco tipos básico de cementos:

%	$\text{C}_3 \text{ S}$	$\text{C}_2 \text{ S}$	$\text{C}_3 \text{ A}$	$\text{C}_4 \text{ AF}$	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	Pérd.
Tipo I	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2
Tipo II	46	29	6	12	2.8	0.6	3.0	1.0
Tipo III	56	15	12	8	3.9	1.3	2.6	1.9
Tipo IV	28	49	5	18	3.0	0.3	2.7	1.0
Tipo V	38	43	4	9	2.7	0.5	1.9	0.9

Las columnas de  $\text{Ca O}$  y  $\text{Mg O}$  corresponden a los óxidos presentes, pero en forma de óxidos libres. La columna Pérd. representa la pérdida producida en la ignición. Todos los valores son en por ciento en peso.

#### PROPIEDADES GENERALES DE LOS CEMENTOS

*Finura.* La finura es considerada como el área total en centímetros cuadrados de la superficie de los granos de un gramo de cemento. Existe una relación muy estrecha entre

la actividad química de un sólido y su área de superficie, ya que a menor tamaño de partícula mayor será la actividad química, lo que influye en el tiempo de fraguado y la resistencia del cemento endurecido, debido a que la hidratación se efectúa de la parte exterior a la parte interior de la partícula.

*Firmeza.* Cuando hay cantidades excesivas de cal libre,  $\text{Ca} [\text{OH}]_2$ , o de óxido de magnesio,  $\text{Mg O}$ , al efectuarse las reacciones químicas durante el fraguado, la pasta aumenta su volumen causando deformaciones destructivas. A la falta de estas deformaciones se le llama sanidad o en otras palabras firmeza.

*Fraguado.* El fraguado se define como el espesamiento de la masa de cemento y agua. Al añadir agua al cemento para formar una pasta se inicia la reacción de hidratación durante la cual se forman productos de gel y cristalinos que unen las partículas inertes del agregado en una masa coherente.

*Tiempo de fraguado.* Corresponde a las primeras horas en que el cemento empieza a endurecer y comprende el fraguado inicial y el fraguado final.

*Fraguado inicial.* Éste se presenta generalmente entre las 2.15 y 2.30 horas a  $23^\circ\text{C}$  de temperatura.

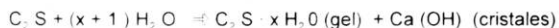
*Fraguado final.* Para los cementos Portland números I, II, III, IV y V el tiempo de fraguado final no es mayor de ocho horas.

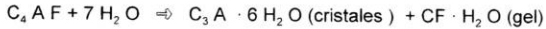
*Peso específico.* Para los cementos Portland del número I al V se toma el promedio de 3.08 y  $3.15 \text{ kg / dm}^3$ .

*Resistencia a la compresión.* Para medir la resistencia a la compresión, se hacen cubos de 5 cm de arista con una relación agua/cemento de 0.485 y una relación de peso de una parte de cemento por 2.75 partes de arena, arena normalizada. Las normas señalan los valores mínimos de resistencia después de 24 horas 3, 7 y 28 días para cada tipo de cemento.

*Calor de hidratación.* Los factores que intervienen en la generación de calor son la composición química del cemento, tamaño de partícula y temperatura ambiente (temperatura de curado).

*Reacciones de hidratación.* Las siguientes ecuaciones químicas representan de una manera breve las reacciones de hidratación que se producen:





Cuando los productos anhidros están en solución inmediatamente se forman los hidratos correspondientes los cuales tienen una solubilidad menor y cuando la solución se satura con los productos anhidros éstos empiezan a cristalizarse.

La hidratación de  $C_3 A$  aparece rápidamente con la formación de cristales de hidrato,  $C_3 A \cdot H_2 O$ , lo que ocasiona un fraguado ultrarrápido.

La aluminoferrita tetracálcica al combinarse con agua forma cristales de aluminato tricálcico y un gel que posiblemente sea ferrita monocálcica hidratada. Los silicatos dicálcico y tricálcico se hidratan menos rápido que el aluminato tricálcico produciendo un gel de silicato dicálcico.

#### Teoría del fraguado y endurecimiento

Para una mejor comprensión, se ilustran las fases del fraguado en la figura 4.12.

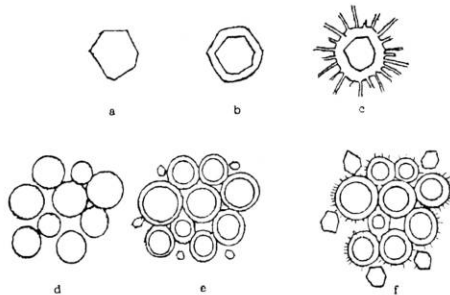


Figura 4.12. Proceso de fraguado del cemento

En (a) de la figura 4.12 se ven granos de cemento sin reaccionar con el agua. Para obtener una mezcla se necesita una relación agua /cemento de 0.3 a 0.7 en peso. Durante la reacción con el agua se produce una capa superficial de productos de hidratación sobre cada grano. Ver figura (b). Debido a la presión osmótica, el agua penetra a través de la película produciéndose una presión interna que perfora la película y el gel empieza a formar fibras tubulares como las que se ven en la figura (c) que crecen en función de la

reacción. En (d) en la pasta, los granos de cemento se encuentran próximos y entran en contacto entre ellos y con los agregados. Cuando se forma el gel éste empieza a unirlos y al mismo tiempo da comienzo la formación de cristales de forma exagonal de hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , como se ven en la figura (e) y a consecuencia de la formación de las fibras, éstas empiezan a formar huecos trabándose entre sí y penetrando en los poros microscópicos de los agregados como se observa en la figura (f) y por la unión entre ellos se convierte la pasta en una masa resistente llamada matriz.



## Capítulo 5

### POLÍMEROS

El término "Polímero" se deriva del griego "poli" que significa muchos y "mero" que significa unidad. Los polímeros son sustancias formadas por cantidades grandes de moléculas o unidades que se unen entre sí formando cadenas. La molécula básica repetitiva es llamada mero, un ejemplo es la molécula  $\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—}$  del etileno, así que repitiéndola "n" veces se tendría una cadena que se puede mostrar como:  $\text{R—(CH}_2\text{—CH}_2\text{)}_n\text{—R}$ , donde R son dos radicales que completan la cadena y se tendría un material se llama polietileno. Donde n se conoce como el **grado de polimerización**.

#### PESO MOLECULAR

El **peso molecular** de un monómero se obtiene sumando el peso atómico de los elementos que lo componen. Por ejemplo, si se tiene el propileno, como se ven en la figura 5.1, que tiene 3 átomos de carbono y 8 átomos de hidrógeno, así 3 átomos de carbono cada uno con un peso es 12 y 8 átomos con un peso atómico de 1 se obtiene sumando en total un peso molecular de 42 en unidades atómicas de masa. Si se utiliza las unidades más utilizadas por los químicos sería en gramos por mol y en este caso por un elemento o mero.

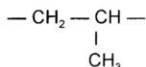


Figura 5.1. Propileno

Por otro lado se tiene que el **grado de polimerización** es el peso molecular del polímero completo entre el peso molecular del mero. Si se supone, como ejemplo, que se tiene un polipropileno con una masa total de 21 000 unidades atómicas de masa, uam, o gramos por mol. El peso molecular total de la cadena se divide entre 42 y se obtiene que n, el grado de polimerización, GP, que en este caso es de 500.

$$\text{GP} = 21\,000 / 42 = 500$$

El resultado es 500 meros por mol o 500 meros por uam, según la unidad utilizada. Por lo tanto el peso molecular de un polímero es igual al peso molecular del mero multiplicado por "n", el grado de polimerización. Hay que tener cuidado, ya que se tiene que tener en cuenta además, la contribución de los radicales de los extremos, aunque casi siempre esta contribución es pequeña, si la cadena tiene muchos meros más de 1 000 o más, por ejemplo.

## DISTRIBUCIÓN DE PESO MOLECULAR

Durante la polimerización, los polímeros que se forman, están sujetos a una secuencia de eventos aleatorios, como el contacto con un iniciador, con otras moléculas o con un terminador. En consecuencia, ninguna de las moléculas poliméricas crece a la misma longitud y el producto final contiene una serie de polímeros con una gran variedad de pesos moleculares. Se puede determinar en forma experimental la distribución de los pesos moleculares con varios métodos y se puede definir de varias formas. Sin embargo sólo se estudiarán dos métodos de definición: **número promedio del peso molecular**,  $M_n$  y el **peso promedio del peso molecular**,  $M_w$ . El número promedio del peso molecular es una media numérica en la cual el peso total de la muestra del polímero se divide entre la cantidad de moléculas. Este número promedio es igual al grado de polimerización,  $GP_n$ ,

$$M_n = GP_n = \frac{w}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i}$$

En donde

$w$  = peso total de la muestra

$n_i$  = cantidad de moléculas con el peso molecular  $M_i$

$M_i$  = peso molecular medio de la fracción  $i$ .

El **peso promedio molecular**,  $M_w$ , es el peso fraccionario de cada grupo polimérico multiplicado por el peso molecular medio correspondiente de la fracción  $M_i$ , dividido entre el peso total de la muestra,  $w$ . Se puede calcular el peso promedio molecular  $M_w$  con la siguiente ecuación:

$$M_w = \frac{\sum w_i M_i}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i}$$

En donde

$w_i$  = peso fraccionario de las moléculas con peso molecular  $M_i$

$n_i$  = cantidad de moléculas con peso molecular  $M_i$

Estas distribuciones de peso molecular son importantes por el punto de vista del control de los procesos de manufactura. Los polímeros con pesos moleculares más altos son más duros y tenaces.

## CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Desde el punto de vista de su **origen** los polímeros se pueden clasificar en naturales y

sintéticos. Los naturales a su vez se subdividen en los que son de origen **vegetal** como es el caucho, algodón, lino, ramio, celulosa; que se encuentra en la madera y en tallos de algunas plantas, y el hule; que ese extrae de los árboles de hevea o caucho. Entre los polímeros de origen **animal** se tiene la lana de las ovejas y la seda; que se obtiene de ciertos gusanos.

Por otro lado por su **origen** se tiene a los **sintéticos**, productos artificiales producidos gracias a la ciencia y la química; actualmente existen muchísimos, los más comunes son el polietileno, polipropileno, poliestireno, etc.

En función de su **composición química** se dividen en **orgánicos** que son los que llevan solamente átomos de carbono en su cadena principal y los **inorgánicos**, que contienen otro tipo de átomos, que generalmente son: silicio, boro, fósforo o azufre.

Otra clasificación importante es por su **ESTRUCTURA** en la forma en que se encuentran sus cadenas: lineales, ramificadas o entrecruzadas. Un esquema se presenta en al figura 5.2.

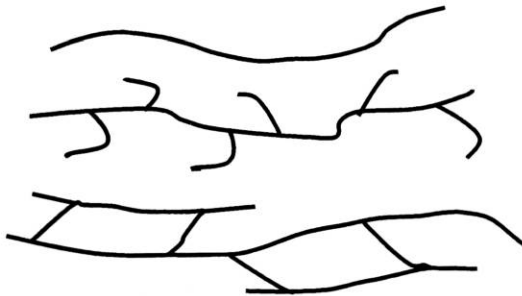


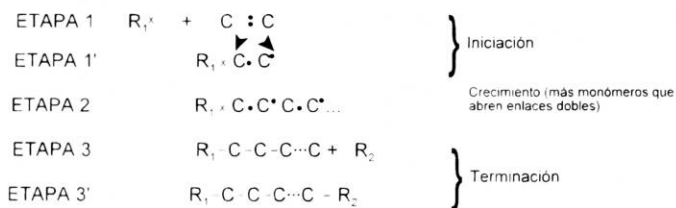
Figura 5.2. Cadenas de polímeros lineales, ramificados o entrecruzados

Existe otra forma de dividir a los polímeros y es por su **comportamiento con la temperatura** en: **Termoplásticos** y **Termofijos**, dependiendo, si se ablandan o se queman cuando la temperatura aumenta.

Por el **método de obtención** de los polímeros se pueden clasificar en función de la reacción por la cual se forman; donde se pueden tener polímeros por **adición** y polímeros por **condensación**.

### Obtención de polímeros de **adición**

Es la unión entre monómeros semejantes y/o diferentes que se produce al unirlos en posiciones funcionales. Se necesita un iniciador que se añade al monómero, como por ejemplo: el peróxido de benzoilo, cuya vida media es de 200 horas a 323 K y que al calentarlo queda como un radical  $R^*$  con un electrón libre que atrae a uno de los electrones del doble enlace del carbono, el otro electrón del enlace roto está incompleto y a su vez atrae a un electrón de otro monómero y de este modo crece la molécula, al final de la cadena se detiene cuando dos segmentos en crecimiento se encuentran o también cuando un segmento encuentra a un elemento terminador R.

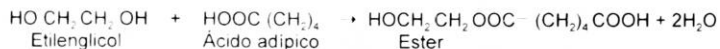


Algunos polímeros que se obtienen por adición son el polietileno, el cloruro de polivinilo, el poliestireno, el poliacrilo - nitrilo, etc.

### Obtención de polímeros por **condensación** ó reacción de polimerización por etapas

Para este tipo de reacción es necesario que haya dos o más grupos funcionales, entendiéndose que ellos son los que van a entrar en reacción, como son: OH,  $NH_2$  o COOH y además se van a producir subproductos como:  $H_2O$ , alcoholes y ácidos.

Un ejemplo, sería la obtención del poliéster, de tipo lineal de acuerdo a la reacción:



Algunos polímeros que se obtienen por condensación son los poliésteres, las poliamidas (nylons), los policarbonatos, los poliácetatos, etc.

Las fuerzas de atracción intermoleculares están en función de la composición química de la cadena y pueden ser de varias clases, de acuerdo con las fuerzas presentes, tales como las del tipo van der Waals, del tipo de puente de hidrógeno, o del tipo de fuerzas cohesivas.

### NOMENCLATURA

Si se tiene la molécula del etileno como la mostrada en la figura 5.3 y en los radicales terminales R y R' se sustituyen otras moléculas en lugar de los hidrógenos normales, se pueden producir nuevos polímeros, si además se añaden otras moléculas de etileno, esto es añadiendo más meros. En la tabla siguiente se mencionan los nombres de algunos de estos polímeros.



Figura 5.3. El etileno

### HOMOPOLÍMEROS Y COPOLÍMEROS

**Homopolímeros:** Están formados por un sólo tipo de monómero. Ejemplo: El polietileno  $R - (CH_2 - CH_2)_n - R$ , donde:  $CH_2 = CH_2$  es el monómero.

**Copolímeros:** Cuando los polímeros se obtienen por dos o más clases de monómeros. Ejemplo: el acrilonitrilo, el butadieno y el estireno unidos y repetidos muchas veces forman el polímero conocido como el ABS, mostrado en la figura 5.4.

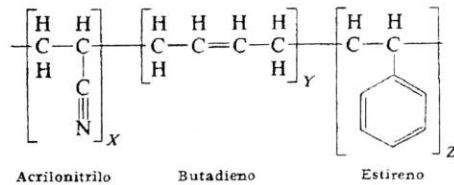



Figura 5.4. El polímero ABS

TABLA 1 ALGUNOS POLÍMEROS BASADOS EN EL ETILENO

R	R'	Nombre
- H	- H	Polietileno
- H	- CL	PVC
- H	- 	Poliestireno
- H	- C $\equiv$ N	Poliacrilato - Nitrilo
- H	- CH <sub>3</sub>	Polipropileno
- H	- OH	Alcohol Polivinílico
- H	- O - C(=O) - CH <sub>3</sub>	Acetato de Polivinil
- CH <sub>3</sub>	- CH <sub>3</sub>	Poli - isobutileno
- CH <sub>3</sub>	- C(=O) - O - CH <sub>3</sub>	Polimetilmetacrilato

Las propiedades de los copolímeros varían en función de las proporciones de los monómeros así como en la posición de estos en las en la cadena. Si en una cadena se tienen los monómeros A y B, las posiciones de los monómeros en la cadena podrían ser:

Al azar



En bloque





En el polímero atáctico, no hay regla fija para la posición del radical. Como se puede observar en la figura 5.7. La posición del radical determina algunas propiedades, por ejemplo, en el caso específico del polipropileno, el atáctico es ceroso y con malas propiedades mecánicas. Mientras que el isotáctico tienen muy buenas propiedades mecánicas

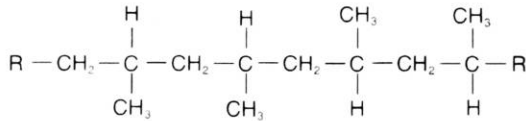


Figura 5.7. Polipropileno atáctico

### TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

La temperatura de transición vítrea,  $T_g$ , la presentan los materiales amorfos. Es cuando se da un cambio en la pendiente en la recta del volumen específico contra temperatura de un polímero que no cristaliza. En un polímero caliente sus cadenas tienen cierta movilidad pero si se enfría estas pierden su movilidad hasta que de un líquido metaestable se forma un líquido viscoso y finalmente un vidrio frágil. Este proceso se ve en la parte superior de la figura 5.8

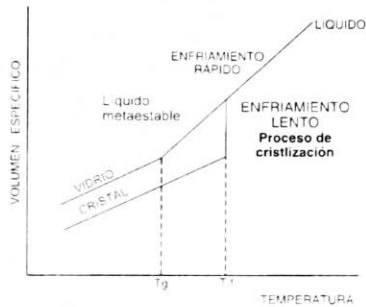


Figura 5.8. Se muestra la solidificación y enfriamiento de un polímero y se observa el cambio de volumen específico con la temperatura.



## CRISTALINIDAD

La cristalinidad en polímeros lineales produce materiales más firmes y fuertes, pero por lo general cambia la transparencia completa de un material amorfo por una apariencia translúcida u opaca por la dispersión de la luz en los límites de grano.

En los sólidos cristalinos las moléculas se ordenan en tres dimensiones, es decir, presentan un acomodo periódico como moléculas pequeñas, pero en el caso de los polímeros, como las cadenas son muy largas, fácilmente se enredan y al encontrarse en un medio fundido éstas se mueven en un estado viscoso en el cual los movimientos son más difíciles por lo que algunos polímeros se ordenan parcialmente formando regiones llamadas cristalitas.

El grado de cristalinidad depende de las condiciones de cristalización y se mide como el por ciento de material cristalino en un volumen determinado.

Los factores que influyen en el grado de cristalinidad son: *Simetría* de la cadena, si el número de átomos de carbono es par, las cadenas son más simétricas. *Ramificaciones* de la cadena, ya que éstas impiden la cristalización. *Tacticidad*, los polímeros isotácticos y los sindiotácticos, debido a su regularidad estructural presentan mayor cristalinidad, los atácticos son amorfos y presentan mayor densidad, más alta temperatura de fusión y su resistencia a los disolventes es mayor.

*Copolimerización*, en la mayoría de los casos ésta destruye la regularidad estructural. Por otro lado se sabe que la inclusión de plastificantes reduce la cristalinidad.

## CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS POLÍMEROS

**Polietileno** —  $(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n$  —

Existen tres clases principales de polietileno en el mercado:

Alta densidad	HDPE del ingles
Baja densidad	LDPE del ingles

*Polietileno de alta densidad:*

Densidad: 0.94 a 0.97 g / cm<sup>3</sup>

Cristalinidad: 83 a 94 %

Temperatura de fusión: 129 a 135 °C

Resistencia química: inerte en ácidos y bases, sensible a los hidrocarburos alifáticos.

Se utiliza en: filamentos para cuerdas y tejidos, fabricación de rodamientos, rodillos, bombas y válvulas para la industria química, empaques, engranes, chumaceras y fabricación de bolsas de alta resistencia. Otras aplicaciones son: frascos, cajas de refrescos, tubos para agua potable, frascos, tubos flexibles,

sondas, frascos para productos corrosivos, etc.

*Poliétileno de baja densidad:*

Color : blanco

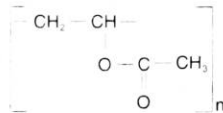
Densidad: 0.910 a 0.935 g / cm<sup>3</sup>

Tacto : se raya con la uña

Temperatura de deformación: 35 - 90 °C

Se utiliza en: películas para bolsas, usos agrícolas como el acolchado, cubiertas para invernaderos y túneles, películas para alimentos, para aislar cables y alambres eléctricos, para botellas, fabricación de tuberías de varios tipos incluyendo la que se usa en el riego por goteo. La desventaja es que tiene una temperatura baja de deformación.

*Copolímeros de etileno con acetato de vinilo (EVA):*



Se utiliza para adhesivos con un contenido de 18 a 35 %.

## TRANSFORMACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Se acepta que un **plástico**, es un polímero al que se le han efectuado procesos de manufactura, tales como extrusión, inyección, moldeo, etc.

### Aditivos

Es una sustancia que se agrega a los polímeros para modificar y en general mejorar ciertas propiedades.

Se dice que los aditivos **modificadores** cambian las propiedades físicas del polímero. Así los aditivos de *relleno* incrementan tenacidad, como es el caso del negro de humo o de carbono que se añade al caucho de las llantas. Los *plastificantes* se añaden para aumentar la plasticidad ya que reducen la fricción interna y evitan la cristalinidad. Para evitar la oxidación y la corrosión se pueden agregar *estabilizantes*. Existen estabilizadores especiales para dar a los polímeros cierta resistencia a temperaturas elevadas.

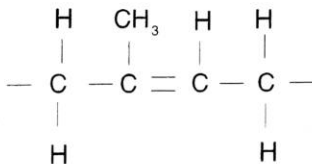
Los aditivos **protectores** tienen como función, como su nombre lo dice, proteger al

polímero, sin variar sus propiedades mecánicas, así se tienen los *absorbedores de luz ultravioleta* que protegen a los polímeros de la degradación por la radiación solar. Existen los **antiestáticos** que evita que se carguen los polímeros con electricidad estática. Los aditivos **lubricantes** tienen la función de evitar la fricción con la maquinaria.

## ELASTÓMEROS

Son los polímeros que se pueden estirar repetidamente por lo menos el doble de su longitud y que al retirar el esfuerzo regresan a su tamaño original. Esta elasticidad se debe a que en sus estructuras hay grandes cadenas, pero cuya movilidad se ve un poco disminuida mediante pequeñas cadenas transversales, que son muchas y muy separadas entre sí. El más conocido es el hule o caucho natural.

El hule natural se obtiene del látex, líquido lechoso, producido por el árbol de la Hevea brasiliensis. Se encuentra mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos, sales inorgánicas y otros componentes menores. Este árbol se cultiva principalmente en Asia. Mediante un cierto tratamiento se obtiene el hule. Su estructura es el cis - 1,4 polisopreno: cuya fórmula básica es:



Normalmente es un polímero de cadena muy larga y se encuentran enredadas y enmarañadas y su peso molecular medio es de  $5 \times 10^5$  g/mol.

En 1839 Charles Goodyear descubrió que sus propiedades mejoraban mucho cuando se añadía azufre y se calentaba. A este proceso se le llama vulcanización. Lo que sucede es que se entrecruzan algunas cadenas formando moléculas más grandes cuyo movimiento queda restringido. Se añade como 5 % de azufre y además un poco de carbonato de plomo.

### Cauchos Sintéticos

Por la gran necesidad de llantas para vehículos militares, se fortaleció la búsqueda de cauchos sintéticos. En 1980 el suministro de cauchos sintéticos a nivel mundial

corresponde al 70 % del total. Los más conocidos son: a) el butadieno-estireno, b) cauchos de nitrilo y el policloropropileno o neopreno.

Alguna propiedades de los elastómeros se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. PROPIEDADES DE LOS ELASTÓMEROS

Elastómero	Resistencia X 1000 psi*	Elongación %	Densidad g / cm <sup>3</sup>	T. operación ° C
Natural	2.5 - 3.5	770 - 850	0.93	- 50 a 82
Butadieno - estireno	0.2 - 3.5	400 - 600	0.94	- 50 a 82
Butadieno - acronitrilo	0.5 - 0.9	450 - 700	1.0	- 50 a 120
Neopreno	3.0 - 4.0	800 - 900	1.25	- 40 a 115
Silicona	0.5 - 1.3	100 - 500	1.1 - 1.6	- 115 a 315

\* 1 psi = 6.89 MPa

## ALEACIONES

Una solución sólida se puede llamar **aleación**, si por lo menos uno de los componentes es un metal. Una aleación es binaria si está formada de dos metales. Cuando la aleación está formada por tres elementos se dice que es un sistema ternario. Un sistema de aleación comprende todas las aleaciones que pueden formarse con un metal de base.

En una aleación se pueden encontrar muchas fases y se define **fase** como: una porción de material homogénea que se puede diferenciar por su composición y por su estructura cristalina de otra porción del material.

### Ley de las fases ó Regla de Gibbs

Esta ley permite determinar la cantidad de grados de libertad que se tiene en una reacción con cierto número de componentes o elementos en una aleación y el número de fases que se pueden presentar en un cierto equilibrio termodinámico. La ley de Gibbs que dice que:

$$G_L = C - F + 2$$

Donde:

- $G_L$  = el número de grados de libertad o de variables independientes
- $C$  = número de componentes en el sistema en equilibrio
- $F$  = número de fases presentes.

Se utiliza el número dos en la ecuación, cuando la presión, la temperatura y la composición son variables, pero si el experimento se hace a presión constante, esto es, se fija esta variable, entonces en lugar de dos se pone un número uno.

*Ejemplo: Un metal puro que se enfría desde el estado líquido. Si se trata de un metal puro, entonces se tiene un sólo componente y entonces  $C = 1$ . Como el experimento se hace a presión constante, entonces se utiliza la ecuación con un 1 del lado derecho. Mientras se enfría el metal, sólo hay líquido, es decir existe una sola fase  $F = 1$ . Por lo tanto la ley de las fases dice que los grados de libertad son:*

$$G_L = 1 - 1 + 1 = 1$$

*por lo tanto, se puede tener cualquier valor en la temperatura mientras el metal está en estado líquido, ya que la otra variable la composición, está también fija, ya que se trata de un metal puro. Ahora, si se enfría el metal y se inicia la solidificación, entonces están en equilibrio dos fases: el líquido y el sólido, por lo tanto  $F = 2$ , entonces Gibbs establece que:*

$$G_L = 1 - 2 + 1 = 0$$

*entonces no existe ningún grado de libertad y la transición debe ocurrir a una temperatura fija o constante. Finalmente, si se sigue enfriando y ya no hay líquido, nuevamente hay un grado de libertad y la temperatura ya puede variar, en este caso descender. Esto es, lo que se observa experimentalmente.*

Lo mismo se puede obtener cuando se calienta agua, en cuanto el agua se empieza a evaporar, esto es, existen dos fases en equilibrio, el agua y el vapor, entonces la temperatura del sistema ya no aumenta, si no que se mantiene constante. Es claro que en este caso el agua se considera como un sólo componente.

### **Reglas de solubilidad de Hume - Rothery**

Para que exista una solución sólida completa se deben cumplir los siguientes requisitos:

1. - El sistema de cristalización de los dos elementos debe ser el mismo.
2. - Que la diferencia de radio atómico sea menor que el 15 %. Si esta diferencia es mayor, la solubilidad, será restringida.
3. - Que la valencia del solvente sea menor que la valencia del soluto.
4. - Que la electronegatividad de los metales sea parecida, de lo contrario formarán compuestos y no una solución sólida.

*Por ejemplo, el caso del  $Au^+$  y el  $Mn^{++}$ . Sus sistemas de cristalización son diferentes, el oro es cúbico centrado en las caras y el manganeso es cúbico simple, sus radios atómicos sólo difieren en 8 % ya que valen 1.46 y 1.35 Å respectivamente. En cuanto a la solubilidad se sabe que el  $Au^+$  acepta en solución como un 5 % de  $Mn^{++}$ , mientras que el  $Mn^{++}$  solamente puede aceptar en solución un 0.1 % de  $Au^+$ . En cuanto a la electronegatividad el Au es 2.4 y la del Mn es 1.5. Por todo lo anterior, **no** forman una solución sólida completa.*

*La plata y el plomo. Ambos cristalizan en el sistema cúbico centrado en las caras, pero los átomos tienen una diferencia de tamaños mayor del 15 %, muy cerca del 18 %, los valores de los radios atómicos son 1.44 y 1.75 Å respectivamente. La solubilidad del plomo en plata es de 1.5 % y de plata en plomo es de 0.1 %. En cuanto a la electronegatividad tienen los valores 1.9 y 1.8 respectivamente. Por lo tanto, **no** forman una solución sólida completa.*

*En cambio, el antimonio y el bismuto son completamente solubles uno en el otro en todas las proporciones ya que tienen la misma estructura cristalina, tetragonal y su diferencia en*

radio atómico es de apenas del 7 %, los valores son 1.59 y 1.7 Å respectivamente. Su electronegatividad es 1.9 para ambos.

## DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO

Son una representación gráfica de una aleación de dos o más elementos, mostrando las fases presentes en función de la temperatura y la concentración de los dos elementos. Como son diagramas de equilibrio, los enfriamientos y los calentamientos considerados deberán ser muy lentos.

**Diagrama de equilibrio isomorfo.** Es aquél donde los elementos son totalmente solubles en el estado líquido y en el estado sólido.

Obtención de diagrama isomorfo. Experimentalmente se preparan crisoles con diferentes composiciones de dos elementos calentándolos hasta que fundan y después se dejan enfriar, midiendo la temperatura, después de ciertos periodos de tiempo.

Se observa que, en ciertos momentos la temperatura parece mantenerse estable y esto ocurre cuando se presenta un cambio de fase, éste es el caso del enfriamiento de dos metales. Como ya se vio antes, la regla de las fases establece que el grado de libertad es cero. Si se representa en un gráfico la temperatura leída en cada intervalo de tiempo, el gráfico tendrá la forma como los de la figura 6.1. Donde la temperatura se mantiene constante, es donde se presenta la transformación y existe equilibrio entre el líquido y el sólido. En ambas figuras se grafica el enfriamiento del metal puro, cobre y níquel, respectivamente.

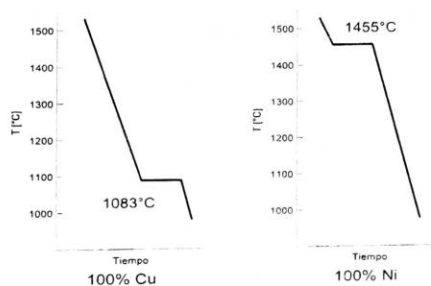


Figura 6.1. Curva de enfriamiento de cobre y níquel puros

Ahora, si lo que se enfría es una aleación de dos metales, la gráfica que se obtiene tiene la forma de la figura 6.2.

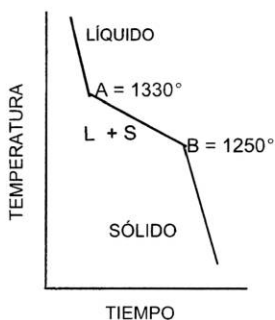


Figura 6.2. Diagrama de enfriamiento de una aleación 50 % Ni - 50 % Cu

Se observa que en lugar del trazo horizontal, en la parte central, donde están en equilibrio el líquido y el sólido, hay una línea inclinada, pero con pendiente diferente a la del primer y tercer tramo de la curva. En esta recta, la regla de Gibbs indica que se tiene un grado de libertad, ya que se tienen dos componentes y dos fases, así que puede variar la temperatura durante la transformación. Si se pudiera ver lo que pasa en el interior de los crisoles se notaría que el primer cambio de pendiente en el punto A, en este caso a 1330 °C, corresponde a la temperatura en la que aparece el primer sólido, se dice que inicia la solidificación. En el segundo cambio de pendiente, en el punto B, que aquí son 1250 °C, corresponde a la temperatura en la que la última porción de líquido solidifica. A partir de este momento la gráfica muestra el enfriamiento de un sólido. Como se sabe, a este tipo de curvas se les llama "curvas de enfriamiento".

Se pueden reunir todas las curvas obtenidas, en una sola gráfica, para todas las posibles composiciones que se pueden obtener como se muestra en la figura 6.3 y se resume en la figura 6.4, eliminado el tiempo. Para ello se coloca en la línea horizontal, eje "x", la concentración, en porcentaje, de cada uno de los metales en cada crisol, de 0 a 100 y el otro elemento al contrario de 100 a 0. En la vertical se coloca la temperatura. El valor máximo será la temperatura en donde los dos metales están en estado líquido, por ejemplo 1500 °C, para el caso del diagrama del níquel y cobre, porque la temperatura de fusión del níquel es de 1455 °C, mientras que la del cobre es de 1083 °C. Por lo tanto, para empezar, en el diagrama se pueden trazar los dos puntos de fusión, uno en cada



extremo de la gráfica, es decir, donde se tiene los metales puros. A continuación se marcan sobre la vertical, correspondientes a las composiciones escogidas, las temperaturas donde se encuentran los puntos A, de cada aleación. Se unen ahora, todos los puntos A con una línea y se repite el proceso con los puntos B. Entonces se tiene así el diagrama de equilibrio composición - temperatura de la aleación níquel - cobre como se muestra en la figura 6.4.

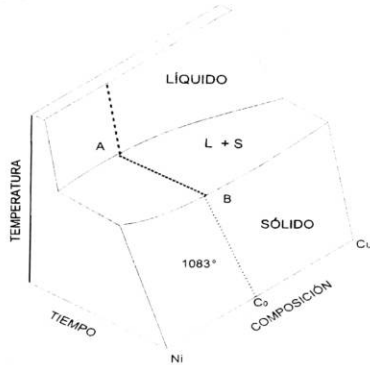


Figura 6.3. Diagrama ternario tiempo - Ni - Cu formado por las curvas de enfriamiento

La línea que une a los puntos A describe el comienzo de la eliminación del líquido de la aleación y por ello se le llama **línea de "liquidus"**, mientras que la línea que une los puntos B, representa las temperaturas a las que se termina el cambio de líquido a sólido, por lo que se le llama **línea de "solidus"**. Si se quiere saber a que temperatura comenzará o terminará de solidificar una aleación de cierta composición, bastará con trazar la vertical a la concentración deseada y su corte con las curvas A y B dará dichas temperaturas. Estos diagramas ya se han hecho para casi todas las aleaciones que se comportan de la misma manera. Esto es, que forman una **solución sólida completa**. En la figura 6.4 se muestra el caso níquel - cobre.

**Composición química de las fases.** Si se quiere saber la composición química de una fase a una determinada temperatura en un diagrama de equilibrio temperatura composición lo que se debe hacer es:

a) Trazar una vertical a la composición de la aleación de interés, en el diagrama de fases.

b) Trazar una línea isotérmica a la temperatura a la cual se requiere conocer la composición química.

Si lo que se requiere es conocer composición química en la fase líquida entonces hay que mover la isoterma hacia la línea del "liquidus" y en el punto de corte se baja una recta para poder leer la composición en la línea de "liquidus". Para saber la composición química de la fase sólida: la isoterma se corre hacia la línea de "solidus", en la intersección se traza una vertical para conocer la composición del sólido.

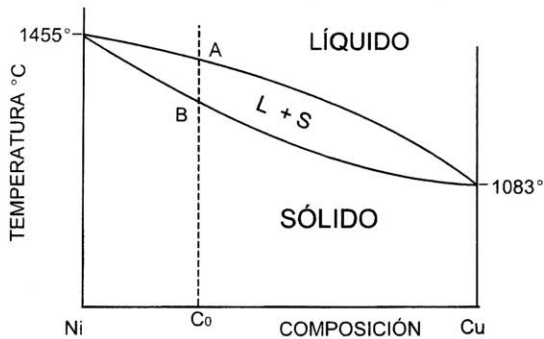


Figura 6.4. Diagrama binario Ni - Cu formado por las curvas de enfriamiento

### CANTIDAD DE FASES RELATIVAS PRESENTES

Si se quiere saber la cantidad de las fases presentes a una determinada temperatura se debe aplicar **LA REGLA DE LA PALANCA** que consiste en:

- 1) Trazar una vertical a la composición de la aleación de interés en el diagrama de fases. En la figura 6.5 el valor **b**, 20 %.
- 2) Trazar una línea isotérmica a la temperatura a la cual se requiere conocer el porcentaje de fases, se marca la isoterma hasta los límites de la zona. En la figura 6.5 es la recta **a - c**.
- 3) Los brazos de la palanca, son las rectas que cortan los puntos: de la línea "solidus", punto **a** y la línea de "liquidus", punto **c**, con la isoterma correspondiente.

- 4) Se toma como centro de la palanca la composición de la aleación, punto **b**.
- 5) Se aplica la regla de la palanca de acuerdo con las ecuaciones:

$$\% \text{ s\u00f3lido} = (b c / a c) \cdot 100$$

$$\% \text{ l\u00edquido} = (a b / a c) \cdot 100$$

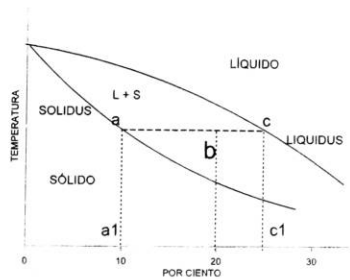


Figura 6.5. Determinación de las fases por la regla de la palanca

*Ejemplo:*

Para un porcentaje de 20 % del elemento B y 80 % del elemento A, esto es la posición de la línea **b**, se tienen las siguientes fases relativas, como se muestra en la figura 6.5:

$$\text{El porcentaje del líquido} = (10 / 15) \cdot 100 = 66.66 \%$$

$$\text{El porcentaje del sólido} = (5 / 15) \cdot 100 = 33.34 \%$$

se puede calcular la suma de los dos porcentajes y se tiene que:  $66.66 \% + 33.34 \% = 100 \%$ , como era de esperarse.

Si se quiere conocer la composición química de cada fase, se toman los valores donde interceptan los dos componentes las líneas de "liquidus" y "solidus", en este caso las

líneas **c - c1** y **a - a1** respectivamente, así:

en la fase líquida se tiene: 25 % B y 75 % A

y en la fase sólida se tiene: 10 % B y 90 % A.

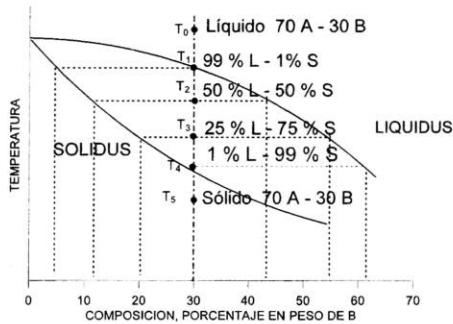


Figura 6.6. Enfriamiento lento y en equilibrio de una aleación 70 % A - 30 % B, muestra la composición en varias temperaturas durante la solidificación, de acuerdo a la regla de la palanca

## IDENTIFICACIÓN METALGRÁFICA DE LAS SOLUCIONES SÓLIDAS

Al pulir y atacar una muestra formada por una solución sólida, en general se espera que su aspecto no difiera mucho al de un metal puro, así se tendrá una superficie donde se puedan identificar, al microscopio, granos bien delimitados. Si se desconoce un reactivo de pulido y ataque para una aleación, siempre se puede intentar con el reactivo que se conoce para el metal puro. Seguramente se deberán hacer algunas variaciones en la composición del reactivo para mejorar sus cualidades y observar la aleación en estudio.

## SOLIDIFICACIÓN FUERA DE EQUILIBRIO

El fenómeno de la segregación química es la aparición de regiones en el sólido que difieren de la composición química nominal de la aleación. Ésto se relaciona con el hecho de que en la solidificación se presenta un cierto rechazo del soluto, si la solidificación es rápida, ésto es, fuera de equilibrio, donde la difusión normalmente es lenta.

En la figura 6.6 se presenta la transformación en equilibrio y las estructuras resultantes deben estar en equilibrio y de acuerdo a la regla de la palanca. Pero si el enfriamiento es

rápido, las estructura que se obtienen no están en equilibrio y por lo tanto pueden tener un aspecto de composición no uniforme. Este fenómeno se llama segregación y aparece como zonas alternadas de diferente composición química, que no pudieron homogeneizarse por la gran velocidad de enfriamiento y que pueden ser fácilmente

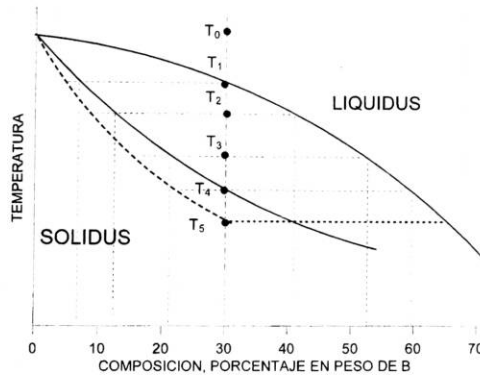


Figura 6.7. El enfriamiento rápido y fuera de equilibrio de una aleación 30 % B - 70 % A, muestra que la línea de solidus se desplaza a la izquierda de la original

reconocibles por observación metalográfica. Las zonas de diferente composición química se atacan y colorean de distinto tono al de la aleación en equilibrio.

En el sistema de aleación Ni - Cu se puede observar una estructura segregada, como la que se muestra en la figura 6.8. Se produjo en una aleación de 70 % Ni y 30 % Cu que se enfrió rápidamente desde una alta temperatura.

En analogía con la estructura de equilibrio según la figura 6.6, el primer sólido se forma a una temperatura  $T_1$ , pero como ahora el enfriamiento es muy rápido, no se alcanza la composición de equilibrio, la línea continua, si no se tiene la composición de la línea punteada que es ligeramente menor, como muestra la figura 6.7. Lo mismo ocurre para todas la otras temperaturas. La difusión es lenta y no permite que la aleación llegue a los valores de la concentración de equilibrio, que forman la línea continua o de "solidus" en equilibrio. Así, en condiciones normales la aleación ya debía estar completamente sólida en  $T_4$ , pero no es hasta que llega a  $T_5$ , como muestra la figura 6.7, donde cruza la línea de solidificación por un enfriamiento rápido, línea de "solidus" fuera de equilibrio y

punteada, en este caso y entonces es cuando la aleación solidifica completamente.

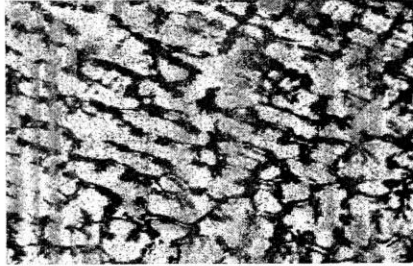


Figura 6.8. Estructura que muestra la segregación en la solidificación del Ni - Cu y se dice que forman dendritas por enfriamiento rápido

#### **ELIMINACIÓN DE LA SEGREGACIÓN POR TRATAMIENTO TÉRMICO**

Por regla general se puede decir que, cuanto más separados están los puntos que representan la concentración entre las curvas de enfriamiento lento y rápido, más pronunciado es el fenómeno de segregación.

Para eliminar la segregación de las aleaciones que presentan este fenómeno, se calientan en un horno a una temperatura abajo de la temperatura de fusión de la aleación y se dejan en el horno el tiempo suficiente para que las zonas de composición diferente, igualen su composición química, por difusión. Este tratamiento térmico se llama de *homogeneización*. Y de deben de eliminar todas la dendritas presentes.

Por ejemplo, para el caso de la aleación de Cu - Ni de composición 85 % Cu y 15 % de Ni, la homogeneización se completa con un tratamiento de 9 horas a 900 °C.

#### **LICUACIÓN**

El tratamiento térmico de homogeneización deberá efectuarse a una temperatura inferior a la de solidificación de la aleación y menor a la temperatura de fusión del elemento con más bajo punto de fusión, como ejemplo: el cobre tiene el punto de fusión más bajo en la aleación cobre - níquel. Porque si se sobrepasa esta temperatura en la aleación puede presentarse una fusión localizada o *licuación*. La apariencia que se tiene es como la

mostrada en la figura 6.9, donde se produce nuevamente una segregación. La consecuencia es la pérdida de la resistencia mecánica.

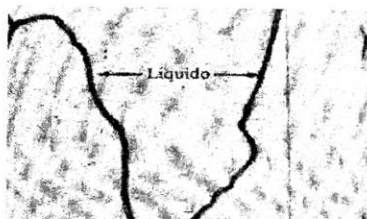


Figura 6.9. Licuación del cobre en una aleación de 70 % Ni - 30 % Cu

En la región del límite de grano se produce la fusión y en el enfriamiento subsiguiente, la zona fundida se hace cada vez más rica en cobre y da lugar a que los límites de grano aparezcan como líneas oscuras gruesas, donde se acumula el cobre.

#### LA DUREZA EN FUNCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Una de las ventajas que se pueden obtener en la fabricación de aleaciones completamente solubles al estado líquido y sólido, es que en algunos casos, se obtienen cambios notables en las durezas. Por ejemplo, en la aleación cobre - níquel se tiene que la dureza brinell varía como se muestra en la tabla siguiente, según cambia la composición química:

TABLA 6.1. VARIACIÓN DE LA DUREZA CON LA COMPOSICIÓN

METAL	DUREZA BRINELL
Cu puro	35
80 % Cu + 20 % Ni	60
60 % Cu + 40 % Ni	70
40 % Cu + 60 % Ni	75
20 % Cu + 80 % Ni	65
Ni puro	55

Es decir, que casi cualquier aleación de Cu - Ni, más exactamente con más de 20 % de níquel, es más dura que el cobre o el níquel puro, en la figura 6.10 se muestra la gráfica con estos los valores.

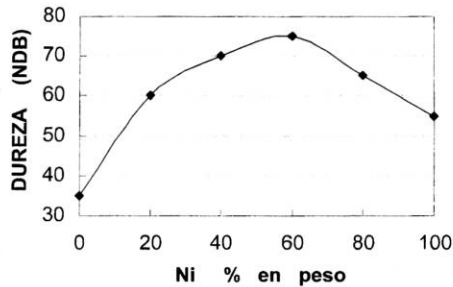


Figura 6.10. Variación de la dureza con la composición

#### ALEACIONES DE ELEMENTOS TOTALMENTE SOLUBLES AL ESTADO LÍQUIDO PERO INSOLUBLES AL ESTADO SÓLIDO

En el diagrama de la figura 6.11, se observa el diagrama de equilibrio entre dos fases que en estado líquido son totalmente solubles y sólo presentan una fase líquida pero al solidificar son completamente insolubles y forman una mezcla de dos fases para todas las composiciones posibles.

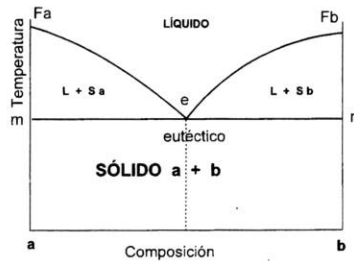


Figura 6.11. Diagrama de dos fases completamente solubles en estado líquido pero insolubles en estado sólido, presentando una transformación eutética



Se pueden distinguir tres puntos importantes: Punto de fusión del elemento "a", el  $F_a$ , el punto de fusión del elemento "b", el  $F_b$  y el punto eutéctico, "e". Además hay dos líneas especiales, la línea de "liquidus":  $F_a$ -e y e- $F_b$ , y la línea de "solidus" m-e y e-n.

Se pueden distinguir además, una zona de una fase, el líquido y tres zonas de dos fases: líquido más sólido "a"; líquido más sólido "b" y una zona de sólido "a" más sólido "b".

Por cierto, se pueden nombrar a las aleaciones que se encuentren a la izquierda del punto eutéctico, punto e, como hipoeutécticas, mientras que las aleaciones que se encuentran a la derecha del punto e, como hipereutécticas.

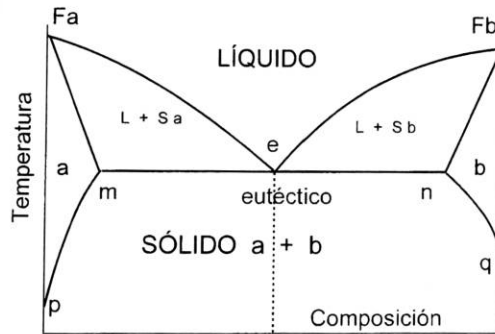


Fig. 6.12. Diagrama de equilibrio de dos metales completamente solubles en el estado líquido pero parcialmente solubles en el estado sólido, con la formación de un eutéctico

### ALEACIONES DE DOS METALES TOTALMENTE SOLUBLES AL ESTADO LÍQUIDO Y PARCIALMENTE SOLUBLES AL ESTADO SÓLIDO

En la figura 6.12 se muestra el diagrama correspondiente a dos metales completamente solubles en estado líquido y sólo parcialmente solubles en estado sólido. Se pueden observar diferentes zonas: una zona donde los dos metales están en forma de líquido, como una sola fase. En los extremos del diagrama se encuentran zonas de una fase, del lado izquierdo se encuentra la fase "a" que puede contener un poco de "b" y del lado derecho la fase "b" que puede contener un poco de "a". Nuevamente se tienen tres zonas de dos fases: líquido más sólido "a", líquido más sólido "b" y finalmente sólido "a" más sólido "b". Las líneas importantes son la de "liquidus",  $F_a$ , e,  $F_b$  y la de "solidus"  $F_a$ , m, e, n,  $F_b$ . Ahora, además aparecen unas líneas nuevas llamadas de "solvus" que muestran la máxima solubilidad de "b" en "a", a la izquierda es la línea m - p y la solubilidad de "a"

en "b" a la derecha es la línea n - q.

Un ejemplo típico de este tipo de aleaciones es el sistema de aleación plomo - estaño, en la figura 6.13 se muestra el diagrama correspondiente. Como ejercicio se mostrará, a partir del diagrama, un análisis de fases de la solidificación en equilibrio para varias temperaturas. Este análisis de fases va a incluir el porcentaje de fases presentes y la composición química de cada fase, las temperaturas son:

- A una temperatura justo por debajo de  $183^{\circ}\text{C}$  y en la composición eutéctica
- En el punto A con 40 % Sn y  $T = 230^{\circ}\text{C}$
- En el punto B a 40 % Sn y  $T = 183^{\circ}\text{C} + \Delta T$
- En el punto C a 40 % Sn y  $T = 183^{\circ}\text{C} - \Delta T$

Donde  $\Delta T$  vale como unos  $5^{\circ}\text{C}$

- Graficar la curva de enfriamiento de la aleación de 40 % Sn y 60 % Pb.

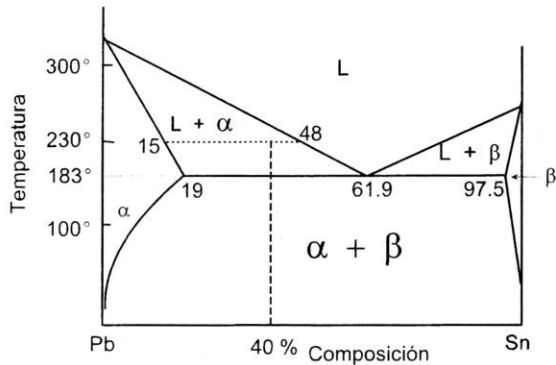


Fig. 6.13. Diagrama de equilibrio plomo - estaño

Solución :

- La composición eutéctica es de 61.9 % de Sn y justo por debajo de  $T = 183^{\circ}\text{C}$  se tiene:

<b>Fases presentes</b>	<b>Alfa <math>\alpha</math></b>	<b>Beta <math>\beta</math></b>
<b>Composición</b>	19 % Sn	97.5 % Sn
<b>Cantidad de las fases</b>	$(97.5 - 61.9)/(97.5 - 19) \cdot 100$ = 45.4 %	$(61.9 - 19) / (97.5 - 19) \cdot 100$ = 54.6 %

b) El punto A corresponde a  $T = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ , y la composición de la aleación es 40 % Sn.

<b>Fases presentes</b>	<b>Líquido L</b>	<b>Alfa <math>\alpha</math></b>
<b>Composición</b>	48 % Sn	15 % Sn
<b>Cantidad de las fases</b>	$(40 - 15) / (48 - 15) \cdot 100$ = 75.76 %	$(48 - 40) / (48 - 15) \cdot 100$ = 24.24 %

c) El punto B corresponde a  $T = 183 \text{ }^\circ\text{C} + \Delta T$ , y la composición de la aleación es 40 % Sn.

<b>Fases presentes</b>	<b>Líquido L</b>	<b>Alfa <math>\alpha</math></b>
<b>Composición</b>	61 % Sn	18.5 % Sn
<b>Cantidad de las fases</b>	$(40 - 18.5) / (61 - 18.5) \cdot 100$ = 50.59 %	$(61 - 40) / (61 - 18.5) \cdot 100$ = 49.41 %

d) El punto C corresponde a  $T = 183 \text{ }^\circ\text{C} - \Delta T$ , y la composición de la aleación es 40 % Sn.

<b>Fases presentes</b>	<b>Beta <math>\beta</math></b>	<b>Alfa <math>\alpha</math></b>
<b>Composición</b>	97.8 % Sn	18.5 %
<b>Cantidad de las fases</b>	$(40 - 18.5)/(97.8 - 18.5) \cdot 100$ 27.11 %	$(97.8 - 40)/(97.8 - 18.5) \cdot 100$ 72.89 %

e) Curva de enfriamiento de la aleación 40 % Sn - 60 % Pb:

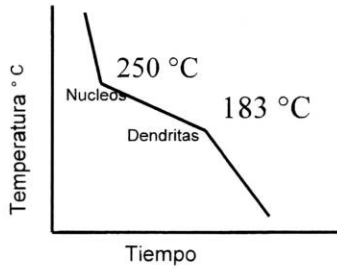


Figura 6.14. Curva de enfriamiento de la aleación 40 % Sn - 60 % Pb

### REACCIONES INVARIANTES

Se llaman así, porque según la regla de las fases, su grado de libertad es cero, es decir ocurren a una temperatura y composición fija y por lo tanto son fijas o invariantes. Estas reacciones se producen por enfriamiento, representado por la flecha hacia la derecha, pero se puede invertir la reacción en calentamiento y entonces se utiliza una flecha hacia la izquierda.

#### Reacción tipo eutéctico

La reacción que caracteriza un eutéctico, como se ha visto antes, es la transformación :



por enfriamiento. En un diagrama de fases esta transformación se representa como se indica en la figura 6.15.

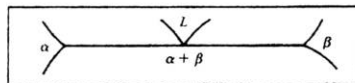


Figura 6.15. Reacción tipo eutéctica

### Reacción de tipo eutectoide

La reacción de tipo eutectoide en el enfriamiento consiste en que:



en principio es semejante a la eutéctica pero aquí es en el estado sólido, éste tipo de reacción se verá en el diagrama de hierro - carburo de hierro. En términos generales la reacción es como la mostrada en la figura 6.16.

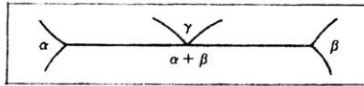
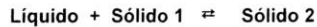


Figura 6.16. Reacción tipo eutectoide

### Reacción del tipo peritética

Esta reacción de tipo peritética consiste en :



éste tipo de reacción también se verá en el diagrama de hierro - carburo de hierro. En general se puede observar que se representa como en la figura 6.17.

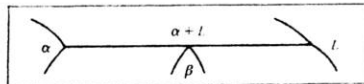


Figura 6.17. Reacción tipo peritética

### Reacción de tipo peritectoide

Este tipo de reacción es la misma que la peritética pero que se realiza en el estado sólido de tal forma que queda como:

**Sólido 1 + Sólido 2  $\rightleftharpoons$  Sólido 3**

se puede observar que esta reacción es parecida a la reacción eutectoide, pero durante el calentamiento pero la peritectoide se realiza durante el enfriamiento. La forma típica en un diagrama de fases se muestra en la figura 6.18

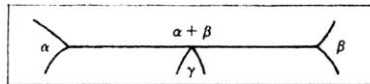


Figura 6.18. Reacción peritectoide

**Reacción monotéctica**

Ésta reacción es:

**Líquido 1  $\rightleftharpoons$  Líquido 2 + Sólido**

Esta reacción se puede representar en un diagrama de fases como se muestra en la figura 6.19. Esta transformación ocurre durante el enfriamiento y en general es poco común.

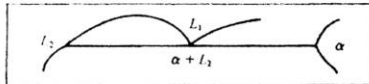


Figura 6.19. Reacción monotéctica

## Capítulo 7

### DIAGRAMA DE FASES DE HIERRO - CARBURO DE HIERRO

El acero es una aleación de hierro y hasta un 2 % de carbono, del tipo intersticial. Con más exactitud se dice que es una aleación de hierro y de carburo de hierro. Para entender mejor las fases presentes se utiliza el Diagrama de Equilibrio hierro - carburo de hierro.

El hierro es un elemento alotrópico, es decir, que puede presentarse en diferentes sistemas cristalográficos y estados magnéticos en función de la temperatura, sin cambiar sus propiedades químicas, éstos cambios de estructura cristalina se pueden observar en la figura 7.1.

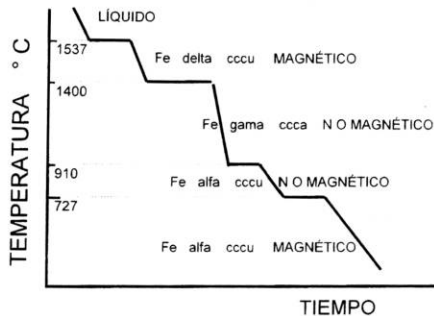


Figura 7.1. Diferentes estados alotrópicos de hierro puro

Es muy importante conocer la posición de las temperaturas críticas del hierro, pero en el caso del acero se debe estudiar el diagrama de equilibrio hierro carburo de hierro, como el que se presenta en la figura 7.3, que tiene todo el intervalo de temperaturas y composición de relevancia tecnológica.

Para estudiar con más detalle el diagrama se recomienda empezar por las transformaciones que ocurren a más bajas temperaturas e ir aumentando la temperatura para entender las diferentes partes en que está formado.

Así, la primera parte que se ha de estudiar es la zona cercana a la isoterma de los 723 °C. La línea inclinada que se encuentra cerca de esta temperatura que inicia a 910 °C y a la izquierda en la figura 7.3, se denomina comercialmente **A<sub>3</sub>** y muestra la transición entre

la ferrita mas austenita a austenita, en un calentamiento o de la austenita a ferrita mas austenita en enfriamiento, para una composición química e inferior al 0.8 % de carbono. La línea indica las diferentes temperaturas de equilibrio ferrita + austenita a austenita para diferentes composiciones. También se le conoce como la línea de transición superior. Se propone en se llame transición ferrita + austenita a austenita, **f - a**. Si la transición ocurre en calentamiento, al nombre, se le agrega una "c" por la palabra en francés "*chauffage*" que significa calentamiento y entonces se tiene la notación que normalmente se suele escribir para definir esta línea, **A<sub>3c</sub>**. Ahora si la transición se realiza en enfriamiento entonces se agrega una "r", por la palabra en francés "*refroidissement*", para enfriamiento, así que entonces se dice que la transformación es la **A<sub>3r</sub>**.

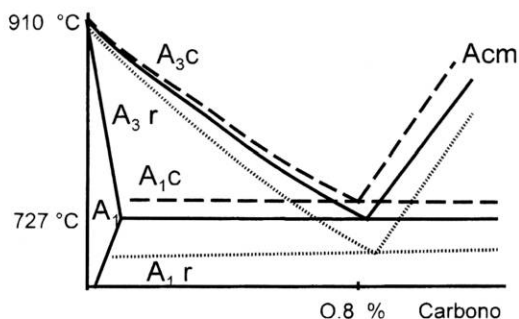


Figura 7.2. Porción del diagrama de fases de hierro - carbono, que muestra las líneas críticas en los aceros

Con la regla que se sugiere, la notación para esta transformación sería **f - a** en calentamiento ó **a - f** en enfriamiento. Como se puede observar en la figura 7.2 existen 3 líneas para esta transformación, la que se obtiene en equilibrio, está en medio y está dibujada como una línea continua. La curva que se obtiene, si se sigue un enfriamiento, está abajo y mostrada como una línea punteada y la que se obtiene durante un calentamiento, está arriba de la de equilibrio y está dibujada con guiones. Esto es, cuando se hace un calentamiento la transformación ocurre a temperaturas mayores que la de equilibrio y cuando la transformación es durante el enfriamiento la transición se presenta a temperaturas menores que la de equilibrio, para cualquier composición, entre 0 y 0.8 % de carbono. En general estas variaciones se aplican para todas las líneas de transformación que se verán adelante.



La siguiente línea es la conocida como **A<sub>2</sub>**, ésta es una línea horizontal que define dónde se produce la transformación entre la ferrita magnética a la ferrita no magnética, en los aceros, con composición entre 0 y 0.8 % de carbono. Este dato, es poco utilizado y ocurre como a 780 °C y sólo se encuentra en zona de ferrita + austenita, no se encuentra indicada ni en la figura 7.2 ni en la 7.3, para evitar confusión.

La línea horizontal a 727 °C en la figura 7.2, se conoce como la **A<sub>1</sub>**, y marca la transformación de la ferrita + perlita a austenita + ferrita, **fp - fa**, en calentamiento en el caso de aceros con contenido menor de 0.8 % de carbono. A esta línea se le llama línea de transición inferior. Se pueden encontrar los tres tipos de curvas: en equilibrio, en enfriamiento o en calentamiento y por lo tanto es posible ponerle los dos subíndices, r ó c respectivamente. Se sugiere el nombre **fp - fa** para esta transformación en calentamiento ó **fa - fp** en enfriamiento.

Para los aceros con contenido de carbono entre 0.8 y casi 2 %, para temperaturas entre 727 y 1154 °C se tienen líneas inclinadas llamadas **Acm**, que muestran el cambio entre la austenita y la cementita y se pueden observar en la figura 7.2. Se pueden encontrar tres tipos de rectas: la de equilibrio, la de enfriamiento y la de calentamiento. Por lo tanto se tienen tres posibles **Acm**.

Algunas veces a la cementita se le identifica incorrectamente como **ledeburita**. La aleación eutéctica de austenita y cementita con 4.3 % de carbono se define como ledeburita, mientras que la cementita contiene 6.67 % de carbono.

#### RELACIÓN DE LÍNEAS CRÍTICAS MENCIONADAS

<b>A<sub>3</sub></b>	Temperatura crítica superior
<b>A<sub>2</sub></b>	Temperatura crítica magnética
<b>A<sub>1</sub></b>	Temperatura crítica inferior
<b>Acm</b>	Temperatura crítica de la cementita

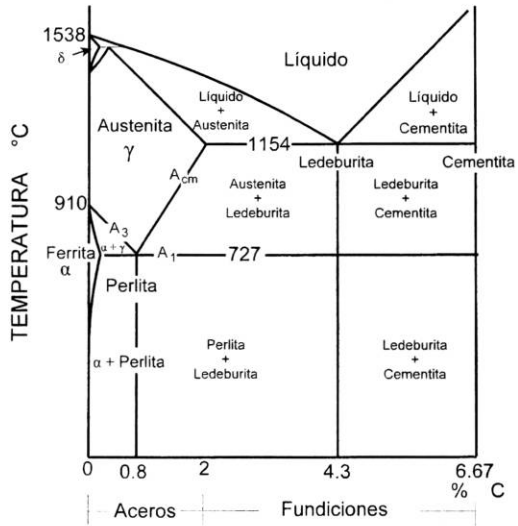
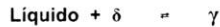


Figura 7.3. Diagrama completo hierro - carburo de hierro

La siguiente línea horizontal que se analiza corresponde a la temperatura de 1495 °C, está en la parte del diagrama que está situada en el ángulo superior izquierdo y que se denomina región δ, es decir para muy alta temperatura pero con casi nada de carbono. Ahí se puede encontrar una reacción **peritética**, para 0.18 % de carbono, como se muestra en la figura 7.4, la reacción como se sabe es:



Se puede observar, de acuerdo a la gráfica de la figura 7.4, que la máxima solubilidad del carbono en el hierro δ en estructura cúbica centrada en el cuerpo es de apenas 0.1 % de carbono.

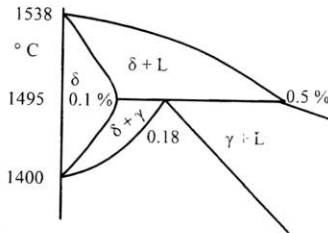
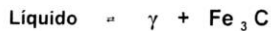
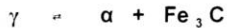


Figura 7.4. Detalle del diagrama de equilibrio en la reacción peritética

La siguiente línea horizontal interesante se muestra en la figura 7.3, es la de la temperatura de 1154 °C y 4.3 % de carbono, donde se verifica la reacción **eutéctica**, que en este caso se escribe como :



Finalmente a la temperatura de 723 °C hay otra línea horizontal, en la figura 7.5, aquí ocurre la transformación **eutectoide**, para un contenido de 0.8 % de carbono, donde durante el enfriamiento en equilibrio la fase austenítica,  $\gamma$ , se descompone en:



Por otro lado, por el contenido de carbono se puede dividir el diagrama de hierro - carburo de hierro, en dos partes: la primera corresponde a las aleaciones cuyo contenido de carbono es hasta 2 %, a éstas aleaciones se llaman **aceros**. La segunda parte del diagrama son las aleaciones con más del 2 % de carbono, a estas se les denomina **fundiciones**, como se muestra en la figura 7.3.

La parte que corresponde a aceros se subdivide en porciones, la primera para las aleaciones cuyo contenido de carbono es menor a 0.8 % se le denominan aceros **hipoeutectoides** y las aleaciones cuyo contenido de carbono oscila entre 0.8 y 2 % de carbono se llaman aceros **hipereutectoides**.

Un ejercicio interesante es observar como se producen estos dos tipos de aceros y entender su estructura diferente. Así, suponiendo que se tiene una aleación con la

composición **hipoeutectoide**, sea por ejemplo 0.6 % y a una temperatura tal que se encuentre en la fase gama ó austenita, como un sólido con granos de fase gama ó austenita, como lo muestra la figura 7.5. Enfriando lentamente se pasa a la zona de ferrita más austenita. Como debe aparecer la ferrita, el lugar donde aparece es en el límite de los granos de la austenita. A medida que se enfría la aleación aumenta la cantidad de austenita que se transforma en ferrita hasta que se llega a la línea  $A_1$ , entonces toda la austenita debe transformarse en cementita, que está formada por placas de ferrita y austenita alternándose. Así que, la estructura final es: límites de grano de ferrita y granos de cementita. A esta última fase también se le conoce como **perlita**.

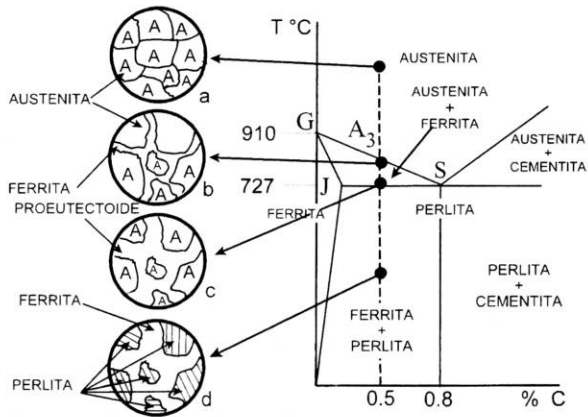


Figura 7.5. Desarrollo de la microestructura hipoeutectoide de los aceros durante el enfriamiento en relación con el diagrama de fases

Ahora, si se parte de otra composición sea, por ejemplo, 1.0 % de carbono a cierta temperatura donde la estructura sea la fase austenítica y se enfría lo que ahora se tiene es que se debe pasar a la zona de austenita más cementita. De la misma manera que en el caso anterior se nuclea la nueva fase en el límite de grano y empieza a crecer pero en este caso lo que crece no es austenita sino lo que crece es cementita. Esta zona crece hasta que se alcanza la temperatura  $A_1$ . Donde toda la austenita debe transformarse en cementita. Así la estructura final son granos de perlita y en los límites de grano está la cementita, como se muestra en al figura 7.6.

Para las fundiciones también se ha hecho una división así si su composición es menor que el 4.3 % de carbono, la composición eutéctica, se llaman: hierros fundidos **hipoeutécticos** mientras los que están a la derecha de esa composición se llaman **hipereutécticos**.

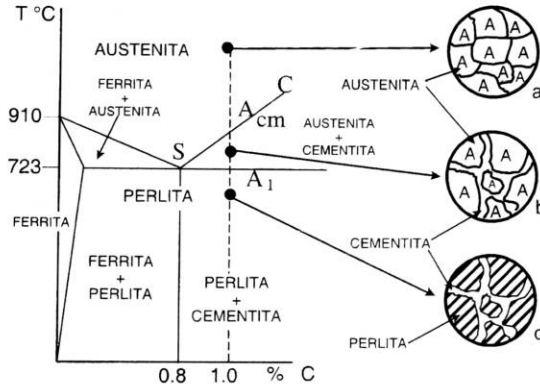


Figura 7.6. Desarrollo de la microestructura hipereutectoide de los aceros durante el enfriamiento en relación con el diagrama de fases

Definición de las estructuras del acero de la temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión:

**Ferrita  $\alpha$ .** Es la solución sólida de tipo intersticial de carbono en hierro  $\alpha$ , su red es cúbica centrada en el cuerpo, su solubilidad máxima es de 0.025 % C a 723 °C. Esta estructura es blanda y los valores promedio de sus propiedades son: resistencia a la tracción 28 kg / mm<sup>2</sup>, alargamiento en 2 pulgadas del 8 %.

**Austenita.** Es una solución sólida de tipo intersticial de carbono en hierro  $\gamma$  y a 1129 °C disuelve casi un 2 %, presenta una red cúbica centrada en las caras. Algunas de sus características son: resistencia a la tracción de 105 kg / mm<sup>2</sup>, alargamiento en 5 cm es del 10 %, con una dureza aproximadamente 40 HRC.

**Ferrita  $\delta$ .** Es la solución sólida de tipo intersticial de carbono en hierro  $\delta$ , su red es cúbica centrada en el cuerpo, su solubilidad máxima es de 0.1 % C a 1495 °C. Esta estructura es blanda y los valores promedio de sus propiedades son: resistencia a la tracción 28 kg / mm<sup>2</sup> y un alargamiento en 5 cm de 1.6 cm.

Otros componentes: **Perlita**. Es una mezcla de capas alternadas de cementita y ferrita. Esta estructura se presenta a 0.8 % de carbono. Es la estructura que resulta de la transformación eutectoide.

**Ledeburita**. Es la estructura que se obtiene de la transformación eutéctica, esto es para 4.3 % de carbono.

**Cementita o carburo de hierro  $Fe_3C$** . Esta estructura que se presenta a un contenido de 6.67 % de carbono en peso, es la estructura de mayor dureza.

### Ejemplo

En el diagrama de Fe -  $Fe_3C$ , realizar un análisis de fases en el equilibrio a 600 °C y a la composición de 0.6 % de carbono. El análisis de fases debe incluir el porcentaje de fases presentes y la composición química de cada fase.

Solución :

a) Si la composición de la aleación es de 0.6 % C y 99.4 % Fe y está a  $T = 600$  °C se tiene de acuerdo con el diagrama de la figura 7.4.

Fases presentes	Alfa $\alpha$	Perlita P
Composición química de las fases	0.024 % C	0.8 % C
Porcentaje de cada fase	$(0.8-0.6)/(0.8-0.024) \cdot 100$ 25.77 %	$(0.6-0.024)/(0.8-0.024) \cdot 100$ 74.23 %

### Clasificación de los aceros según su utilización

+ Aceros para carrocerías de automóviles y para tubos, estirados y sin costuras. El contenido de carbono es de 0.07 % a 0.15 %, éstos aceros pueden soportar fuertes deformaciones en frío.

+ Aceros que generalmente se someten a tratamientos térmicos e incluyen a los aceros maleables y a los empleados para árboles de transmisión, ejes, alambres, rieles y rodillos, etc. el porcentaje de carbono varía de 0.25 a 0.55 %.

+ Aceros con resistencia al desgaste, utilizados en martillos, llaves de tuercas, cinceles y taladros, el contenido de carbono varía de 0.55 a 0.9 %.

### **Influencia de los elementos de aleación en los aceros**

**Manganeso.** Forma una solución sólida con la ferrita, algunas veces se une con el azufre y forma  $MnS$ , sulfuro de manganeso o también se le puede encontrar como  $Mn_3C$ .

**Níquel y Cromo.** Aumentan la rigidez y la resistencia a la corrosión. Para que un acero pueda ser inoxidable necesita tener como mínimo 11 % de cromo.

**Tungsteno.** Es adicionado al acero para que se pueda emplear en la fabricación de herramientas y matrices.

**Silicio.** Provoca la grafitización de la cementita en aceros con alto contenido de carbono.

**Azufre.** Es un elemento nocivo para el acero por la tendencia al agrietamiento de los aceros que lo contienen.

**Fósforo.** Generalmente no existe en solución sólida en la ferrita y se presenta como fosfuro de hierro  $Fe_3P$ , éste es perjudicial porque provoca que la ferrita se segregue cuando se trabaja a altas temperaturas.

Los aceros aleados se dividen en aceros estructurales y aceros inoxidables. Los aceros inoxidables se clasifican de acuerdo a su composición en:

Aceros inoxidables **austeníticos**: Su contenido de níquel va de 0.1 a 8 % y aproximadamente 18 % de cromo. Se conocen como la serie 300, de estos los más utilizados son el: 301, 304, 304L, 321 y 347 que se emplean especialmente en la construcción de plantas químicas o de alimentos, se utilizan para decoración por su acabado final y en utensilios domésticos, como cubiertos, sartenes, etc.

Aceros inoxidables **martensíticos**: Contienen de 0.07 a 0.1 % de carbono y 13 % de cromo, su aplicación es: fabricación de cuchillas de turbinas, remaches, pasadores de aleta y cubiertos. Los que contienen de 0.2 a 0.4 % de carbono y 13 % de cromo se utilizan para la manufactura de resortes, cojinetes de bola e implementos quirúrgicos. Los que contienen 0.1 % de carbono, 18 % de cromo y 2 % de níquel son empleados en la fabricación de ejes de transmisión de bombas, válvulas reguladoras, accesorios de aeronaves y en cuchillas de turbinas.

Aceros inoxidables **ferríticos**: Contienen de 0.05 a 0.15 % de carbono y 16 a 30 % de cromo, se emplean especialmente en aplicaciones donde se requieran altas temperaturas, como son los calentadores.

Los aceros aleados se dividen en aceros estructurales y aceros inoxidable. Los aceros inoxidable se clasifican de acuerdo a su composición en:

**Aceros inoxidable austeníticos:** Su contenido de níquel va de 0.1 a 8 % y aproximadamente 18 % de cromo. Se conocen como la serie 300, de éstos los más utilizados son el: 301, 304, 304L, 321 y 347 que se emplean especialmente en la construcción de plantas químicas o de alimentos, se utilizan para decoración por su acabado final y en utensilios domésticos, como cubiertos, sartenes, etc.

**Aceros inoxidable martensíticos:** Contienen de 0.07 a 0.1 % de carbono y 13 % de cromo, su aplicación es: fabricación de cuchillas de turbinas, remaches, pasadores de aleta y cubiertos. Los que contienen de 0.2 a 0.4 % de carbono y 13 % de cromo se utilizan para la manufactura de resortes, cojinetes de bola e implementos quirúrgicos. Los que contienen 0.1 % de carbono, 18 % de cromo y 2 % de níquel son empleados en la fabricación de ejes de transmisión de bombas, válvulas reguladoras, accesorios de aeronaves y en cuchillas de turbinas.

**Aceros inoxidable ferríticos:** Contienen de 0.05 a 0.15 % de carbono y 16 a 30 % de cromo, se emplean especialmente en aplicaciones donde se requieran altas temperaturas, como son los calentadores.

## TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Debido a que el hierro tiene diferentes estados alotrópicos es posible tener muchas fases cuando se le combina con el carbono. Los tratamientos térmicos permiten modificar las estructuras y la fase presentes en los aceros. En principio se debe obedecer las transformaciones que predice el diagrama de equilibrio. Pero se debe recordar que el diagrama que se mostró es en equilibrio y esto supone que los enfriamientos y calentamientos son muy lentos, esto es equilibrio termodinámico. A continuación se presentan algunos de los tratamientos más comunes:

### Recocido total

- Objetivos:
- + Refinar el grano
  - + Proporcionar suavidad
  - + Mejorar propiedades eléctricas y magnéticas
  - + En algunos casos para mejorar la maquinabilidad.



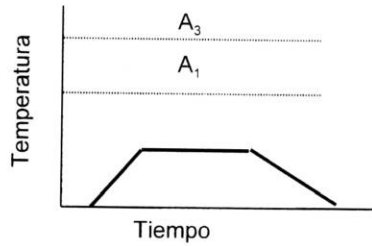


Figura 7.7. Tratamiento de recocido total

Procedimiento : Como se muestra en la figura 7.7 se calienta por debajo de  $A_1$ . Se calienta y enfría lentamente

#### Recocido de esferoidización

Objetivo: Aumentar la maquinabilidad y ductilidad

Proceso : Permanencia prolongada a temperaturas por debajo de la línea crítica inferior.

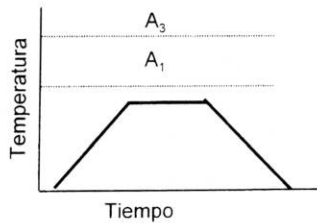


Figura 7.8. Tratamiento de recocido de esferoidización

2) Ciclo oscilante de calentamiento y enfriamiento a temperaturas por debajo y por encima de la línea crítica inferior.

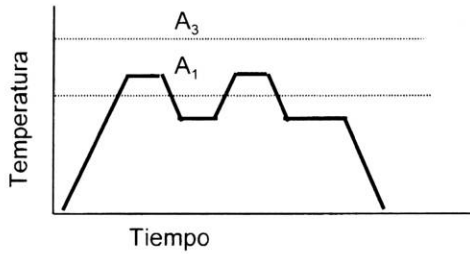


Figura 7.9. Tratamiento de recocido de esferoidización oscilante

### Normalizado

- Objetivos:
- + Aumentar dureza en relación a la dureza obtenida en el recocido
  - + Aumentar resistencia. Afinar el tamaño de grano
  - + Homogeneizar la estructura y mejorar la maquinabilidad

Procedimiento :

- 1) Calentar el acero por encima de  $A_3$  ó  $A_{cm}$
- 2) Dejar un tiempo de permanencia
- 3) Enfriar al aire quieto

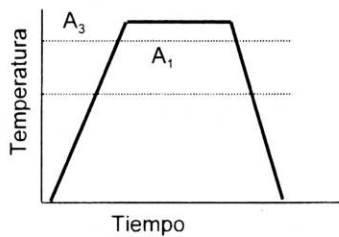


Figura 7.10. Tratamiento de normalizado

## Temple

En general, temple es un enfriamiento rápido. De esta forma se transforma toda la austenita en martensita y no se forman los compuestos más blandos: la perlita y la bainita. La velocidad crítica de temple, es la rapidez con que debe enfriarse la pieza para que se forme sólo martensita.

Los factores que afectan la templabilidad de los aceros son:

- + Tamaño de grano austenítico. El grano grueso produce mayor templabilidad para la misma composición del acero
- + Homogeneidad en el acero
- + Composición del acero. Los aleantes al disolverse en austenita disminuyen la velocidad de migración del carbono en hierro por lo tanto disminuyen la formación de martensita

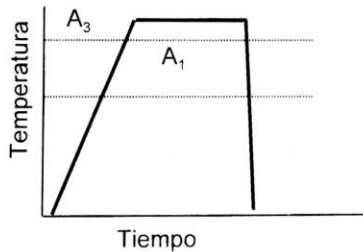


Figura 7.11. Tratamiento de temple

Medios de temple: Solución de cloruro de sodio al 10 %

Agua corriente

Sales líquidas o fundidas

Soluciones acuosas de aceite sulfonado

Aceite

Aire, etc.

En general, al aumentar la temperatura del medio de temple disminuye la velocidad de

enfriamiento. La atmósfera oxidante, el agua ó el oxígeno, producen durante el enfriamiento una capa de óxido sobre el metal llamada cascarilla.

Los mecanismos de disipación de calor son tres, cuando una pieza metálica caliente se coloca dentro de un líquido a temperatura ambiente y actúan en este orden:

Enfriamiento por una capa de vapor. Al entrar en contacto el metal y el líquido se forma una capa continua de vapor. Como el calor del metal se transmite por conducción y radiación a través de esta capa gaseosa al líquido, la velocidad de enfriamiento es pequeña, ya que el metal y el líquido no están en contacto directo.

Enfriamiento por la ebullición del líquido. De repente la capa de vapor se rompe y un nuevo líquido entra en contacto con una porción pequeña del metal, el líquido se calienta y se forma una burbuja de vapor que rápidamente se mueve, dejando que otra porción de líquido toque el metal, se calienta y forme una nueva burbuja y se repita el proceso anterior. De esta forma, muchas burbujas están eliminando el calor. Entonces el metal se enfría muy rápidamente. Se pueden medir velocidades de enfriamiento de miles de grados por segundo en esta etapa, claro está, dependiendo de muchas condiciones.

Enfriamiento por medio del líquido. Una vez que el metal ya se ha enfriado y está relativamente frío, ya no puede calentar el líquido para formar burbujas. Así que el líquido se calienta y transporta el calor por conducción a través de él mismo. El transporte del calor es muy lento nuevamente.

Características generales del templado:

Durante el enfriamiento rápido no se presenta el fenómeno de la difusión y se realiza sin cambio en la composición química. La velocidad de enfriamiento es de miles de grados por segundo en su etapa más rápida. El templado está en función de las temperaturas inicial y final y no del tiempo. Sin embargo la cantidad de martensita no es lineal con el gradiente a la temperatura, ya que también ocurre con una ley del tipo sigmoidal. Esto es, un inicio lento un aumento muy rápido y un final lento. Los aceros que han experimentado un temple de endurecimiento simple, generalmente son mezclas de austenita y martensita, ambas estructuras son inestables. Los aceros con estructura martensítica son frágiles.

## **Revenido**

- Objetivos:
- + Aumentar la ductilidad y tenacidad del acero templado
  - + Relajar las tensiones internas del temple

+ Llevar la pieza a una estructura que presente mayor resistencia a la deformación pero menor dureza

Este tratamiento generalmente se da para bajar un poco la dureza producida por un templado. Se elimina un poco de la martensita y la pieza adquiere un poco de ductilidad. El revenido produce la descomposición de la martensita a **bainita**. Por supuesto a mayor temperatura de tratamiento y tiempo de tratamiento se tiene menor dureza. El procedimiento es calentar a baja temperatura por periodos cortos y enfriar al aire.

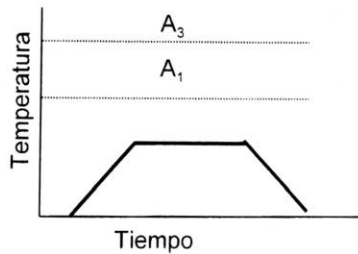


Figura 7.12. Tratamiento de revenido

En los aceros de alto carbono la temperatura de revenido está entre 38 y 204 °C, se favorece la precipitación de un carburo  $Fe_3C$ , con lo que se aumenta un poco la dureza. Si lo que se desea es dureza o resistencia al desgaste se debe revenirse a temperaturas inferiores a 204 °C.

Entre 200 y 400 °C continúa la precipitación y el crecimiento del carburo, aunque también existe la transformación de austenita retenida a bainita.

Entre 400 y 650 °C en el revenido, existe una transformación del carburo a cementita.

A 725 °C se produce la formación de partículas grandes de cementita globular.

Si se requiere tenacidad deben revenirse los aceros de bajo carbono a temperaturas mayores a 426 °C y para los aceros aleados entre 538 y 676 °C.

El enfriamiento lento produce fragilidad en el revenido y con ello una disminución de la

resiliencia. La **resiliencia** mide la energía por unidad de volumen que puede absorber el material sin que se produzcan deformaciones permanentes. Este valor se conoce también como módulo de resiliencia. Mientras que la **tenacidad** es la energía por unidad de volumen que puede absorber el material antes de la rotura.

Temas avanzados

### Diagrama TTT

Construcción de un diagrama TTT. Para poder construir un diagrama TTT, T tiempo, T temperatura y T transformación, se deben tener una serie de muestras de algún acero del cual se va a construir el diagrama. Estas muestras se someten a calentamientos a diferentes temperaturas dentro de un baño de sales o un horno de calentamiento, abajo de la temperatura de austenitización del acero. Escogida la temperatura, se espera a que sea homogénea en todas las probetas. Se procede a sacar una probeta a un cierto tiempo sea  $t_1$ , inmediatamente se temple en agua, en seguida se saca una segunda probeta a un tiempo  $t_2$  y se temple nuevamente, el proceso se repite para muchos tiempos y para otras temperaturas. Posteriormente todas las probetas se someten al proceso de metalografía, para determinar con ayuda del microscopio el porcentaje de las fases presentes, esto es, de ferrita y/o perlita que se formó en cada una de las muestras, por el tratamiento térmico. Este porcentaje se puede obtener recortando de las fotomicrografías de las fases presentes y dividiendo el peso, entre el peso total de la fotografía y si el resultado se debe expresar en porciento, se multiplica por cien. Finalmente se unirán todos los puntos que tienen el mismo contenido de una de las fase y se obtienen las curvas como la que aparecen en la figura 7.13. Ahí se muestra el inicio de la transformación, en realidad un 5 ó un 10 %, un 50 % en la línea punteada y la línea final, que normalmente se refiere a un 90 % de fase transformada.

### Interpretación

Los diagramas TTT muestran la transformación de fase de la muestra de acero a medida que la temperatura disminuye por abajo de las temperaturas críticas. También se le pueden usar para mostrar las diferencias en la transformación isotérmica que resultan de los cambios en el contenido de carbono o de los elementos de aleación.

La naturaleza de la transformación a martensita puede entenderse mejor usando las curvas tiempo temperatura transformación (TTT), para tal caso, se presenta como un ejemplo, un acero 1080, como se muestra en la figura 7.13. La velocidad de enfriamiento, por ejemplo la curva D, que se enfría dentro de un horno, produce a partir de la austenita

un primer cambio a ferrita, luego aparece cementita y finalmente desaparece toda la austenita y se produce la transformación a bainita, con cambios en la dureza. Si la velocidad de enfriamiento es mayor, por ejemplo en agua, curva A, entonces la única transformación que ocurre es por debajo de los 300 °C, toda la austenita se convierte en martensita. En muchos diagramas se muestra el inicio y el final de la transformación conforme ocurre el tiempo, indicando las regiones de fase con los subíndices "s" y "f" respectivamente, para iniciar y terminar la transformación.

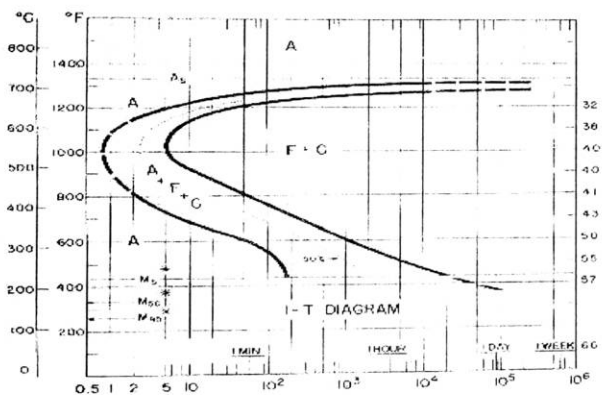


Figura 7.13. Diagrama TTT: Temperatura, Transformación, Tiempo, mostrando la transformación de austenita en otras fases, como función del tiempo y temperatura para un acero 1080





## PROPIEDADES MECÁNICAS

En general, se acepta que las propiedades químicas son aquellas que existen cuando aparecen reacciones entre los materiales o con el medio ambiente. Las propiedades físicas están relacionadas con el comportamiento del material de acuerdo a su estructura. Se puede decir también, que las propiedades mecánicas describen el comportamiento del material cuando se aplican fuerzas.

Para definir el buen o mal comportamiento de un material cuando se aplican fuerzas, se pueden utilizar ciertos números que resultan de ensayos que definen algunas características de los materiales. Estas características pueden ser: Maleabilidad, Ductilidad, Tenacidad y Dureza. En términos muy generales, se dice que la capacidad de hacer placas se llama maleabilidad, pero si se hacen alambres se llama ductilidad, en ambos casos es la capacidad del material para ser deformado. La tenacidad es la propiedad de un material a soportar esfuerzos mientras que la dureza es la propiedad de los materiales de resistirse a ser penetrados.

Pero se pueden diseñar muchos más tipos de ensayos, dependiendo de la propiedad que se desea medir. Así, además de los ensayos de Tensión o Compresión, que miden la respuesta del material con esfuerzos opuestos uniaxiales, se puede ensayar materiales en Torsión: cuando se mide la respuesta del material a un esfuerzo de giro. O en un ensayo de Impacto cuando se mide la energía que absorbe un material al fracturarse, existe muchos más ensayos como flexión, doblado, fatiga, etc. En cada caso se mide alguna característica en especial.

### DUREZA

La *dureza* se define como la resistencia que tiene el material a ser rayado o a ser penetrado. Existen multitud de formas para medir la dureza. La más simple es la utilizada por los geólogos, se conoce como la escala Mohs.

*Ensayo de Dureza Mohs.* Consiste en asignar un número del 1 al 10, de acuerdo a la lista adjunta de minerales, según sea la capacidad de cada uno de rayar a los demás. Así el talco, el primero de la lista, puede ser rayado por el yeso y por todos los demás. El yeso, número 2, puede ser rayado a su vez por la calcita número 3 y todos los otros que tiene un número mayor a él y así para los demás materiales.

De esta forma, el cuarzo, número 7, raya a todos los minerales que tienen número menor que él, pero es rayado por aquellos que tienen mayor número. El mineral más duro es el diamante con número 10, que raya a todos los demás. Es claro que es una escala muy poco exacta, pero es muy fácil de aplicar. Por cierto el material número 2 significa que tiene el doble de dureza que el número 1 y así en adelante. Sólo en el caso del número 10, el diamante, su dureza es muchas veces la dureza del corindón. Como se sabe, el

diamante es el material natural mas duro en toda la naturaleza, por lo que su estudio es un tema muy importante.

TABLA 1. DUREZAS MOHS

Mineral	Número	Vickers
Talco	1	20
Yeso	2	70
Calcita	3	110
Fluorita	4	180
Apatita	5	500
Ortoclasa	6	700
Cuarzo	7	1 300
Topacio	8	1 600
Corindón	9	2 000
Diamante	10	8 000

Los ensayos de dureza que se tratarán en adelante, se basan en la capacidad de ser o no penetrados por medio de un indentador que puede ser una punta de diamante o una esfera de acero endurecido. En cada caso se aplica una carga constante al indentador o penetrador.

*Ensayo de Dureza Vickers.* Esta dureza se considera como una dureza absoluta, es la preferida en el campo científico. Entre mayor sea la dureza del material, la huella producida es más pequeña y no depende de la carga aplicada. El NDV, Número de Dureza Vickers se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$NDV = \frac{2 P \operatorname{sen}(\theta / 2)}{d_1 d_2} = \frac{1.72 P}{d_1 d_2}$$

donde P es la carga que se aplica a un diamante de forma piramidal con un ángulo en la

punta de 136° y las d son las longitudes de las diagonales en la marca dejada en el material. Si las dos d son iguales, quiere decir, que el material es isotrópico, esto es, tiene las mismas propiedades en todas las direcciones. En la figura 8.1 se muestra una huella que deja el penetrador en el material y se muestran los dos diferentes valores de la d.

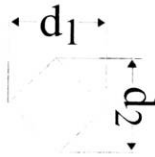


Figura 8.1. Se muestra una huella o marca dejada por el indentador vickers

*Ensayo de dureza Rockwell.* Existen más de 36 escalas y cada una de ellas depende de la masa aplicada y un indentador en cada caso. Los indentadores varían de forma, para las escalas más comunes A, D y C tiene la forma de un cono de diamante de 120 grados y para el resto de las escalas se utilizan esferas de acero endurecidas de diferentes diámetros. Los diámetros están medidos en pulgadas y van como: 1/16, para las escalas F, B y G, de 1/8 para las escalas H, E y K, se tienen otras escalas con esferas de 1/4 y 1/2 pulgada y siempre se utilizan diferentes masas o cargas: 60, 100 y 150 kg, respectivamente para cada indentador.

La prueba se realiza siguiendo el procedimiento que se enlistó a continuación:

- 1) Se coloca el material a probar en el yunque o sujetador adecuado
- 2) Se pone una precarga para eliminar la deformación elástica
- 3) Se aplica la carga completa
- 4) Se elimina la carga completa
- 5) Se anota la dureza marcada en la carátula
- 6) Se elimina la precarga
- 7) Se desmonta el material

*Ensayo de Dureza Brinell.* Se utiliza un indentador en forma de esfera, de acero de 10 mm y se aplican dos cargas diferentes: para los materiales duros 3 000 kg y 500 kg para los blandos. Por medio de la siguiente ecuación se obtiene el NDB, Número de Dureza Brinell:

$$NDB = \frac{P}{\pi D/2 \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} = \frac{P}{\pi D t}$$

donde P es la carga aplicada, D es el diámetro de la esfera de indentador, d es el diámetro de la huella y t es la profundidad de la impresión, esta última es muy difícil de evaluar, por eso no se utiliza mucho, la segunda expresión, en la figura 8. 2, se muestra una huella con los valores que se deben obtener.

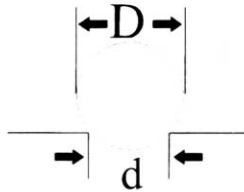


Figura 8. 2. Medidas características para evaluar la dureza brinell

En muchos casos la dureza se puede utilizar para evaluar el esfuerzo máximo obtenido por el ensayo de tensión. El valor calculado de esta forma no es exacto pero son valores muy aproximados. Si se multiplica en NDB por 500 se tiene el valor del esfuerzo máximo pero en psi, libras por pulgada cuadrada, del inglés. Y se sabe que un psi es igual a  $6.89 \times 10^{-3}$  mega pascales MPa, se puede calcular el valor en unidades científicas o sea en MPa con la fórmula:

$$\text{Esfuerzo máximo} = 500 \times (\text{NDB}) \times 6.89 \times 10^{-3}$$

Pero esta expresión es válida solamente para materiales ferrosos, para materiales no ferrosos el factor 500 se cambia por 300. Las definiciones de mega pascales y psi se verán mas adelante.

*Ensayo de Dureza Knoop.* Se utilizada especialmente para tubos. El indentador es un diamante en forma de pirámide de base rómbica, la razón largo al ancho es de 7.11 y la relación para obtener la dureza es:

$$\text{NDK} = \frac{14.2 P}{L^2}$$

como siempre P es la carga y L la longitud de la huella o impronta. En la figura 8.3 se muestra una impronta o huella de esta dureza.



Figuras 8.3. Forma de una impronta o huella de dureza knoop

#### VENTAJAS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA

En principio la escala y prueba de dureza mohs es poco exacta, sobre todo en metales, pero muy útil para tener una idea rápida, pero sobre todo se utiliza fuera del laboratorio. Evidentemente se necesita tener todos los patrones a la mano para hacer una buena determinación.

Entre las durezas con indentadores, los científicos prefieren la dureza vickers, porque es independiente de la carga con la cual se mide, mientras que en las otras escalas los valores de dureza varían según la carga utilizada. Por otro lado en la escala vickers o brinell se debe medir las huellas causadas por los indentadores, mientras que en las otras escalas rockwell el valor de la dureza se lee directamente en un indicador. En el campo industrial, se utilizan más comúnmente la escala rockwell C ó B. La dureza koop por su forma asimétrica es especial para medir la dureza en tubos o materiales con dureza asimétrica.

#### ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo de tensión o de compresión mide la resistencia de un material, al aplicarle una fuerza gradualmente. Se utiliza un extensómetro para medir el alargamiento y una celda de carga para medir la fuerza aplicada. El material se lleva a la fractura en un tiempo no muy largo, pero el ensayo se hace a velocidad de cabezal constante. Se define el esfuerzo y deformación ingenieril de la siguiente forma:

$$\text{Esfuerzo} = \sigma_{\text{ing}} = \text{Fuerza} / \text{Área}$$

$$\text{Deformación} = e_{\text{ing}} = \text{cambio de longitud} / \text{longitud inicial} = (L_f - L_0) / L_0$$

Donde el área es el valor inicial del área de la sección transversal de la probeta,  $L_0$  es la longitud de prueba inicial, ésta es una distancia entre dos marcas en la probeta, y  $L_f$  es la longitud de prueba después de deformación.

Así, las unidades en que se mide el esfuerzo en el sistema científico son Newtons entre metros cuadrados y esto se conoce como una nueva unidad llamada Pascal, Pa, y como esta unidad es muy pequeña se utilizan mejor los mega pascales, M Pa.

$$1 \text{ M Pa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$$

En el sistema inglés, la unidad de esfuerzo es la libra por pulgada cuadrada, psi. En el sistema común, llamado ingenieril la fuerza se sustituye por la masa.

Para la deformación, debe estar claro, que no tiene unidades, ya que se está dividiendo longitud entre longitud y las unidades se eliminan. Así que en general, la deformación se multiplica por cien y el resultado se indica como un por ciento. Una deformación de 0.04 se expresa como una deformación del 4 %.

Al realizarse un ensayo de tensión se tiene, en general, una gráfica como la que se presenta en la figura 8.4. El ensayo se debe realizar de acuerdo a una norma Mexicana equivalente a la E 8M-86 de la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Haciendo los cálculos correspondientes, se obtiene una gráfica del esfuerzo contra la deformación,  $\sigma - e$ , de donde se calculan los siguientes parámetros:

- Zona y deformación elástica
- Zona y deformación plástica
- Límite elástico
- Límite esfuerzo convencional
- Esfuerzo máximo
- Esfuerzo y deformación a la fractura
- Reducción del área

- Módulo elástico
- Resiliencia
- Tenacidad

La **zona elástica** es aquella parte de la curva  $\sigma - e$  donde el material soporta un cierto esfuerzo sin sufrir una deformación permanente. Se le llama **deformación elástica**, a esa deformación que corresponde a la de la parte recta de la gráfica. La **zona plástica** es

donde la deformación que sufre la probeta ya no es reversible y es permanente y se conoce como **deformación plástica** a la deformación que se tiene en la probeta en la parte curva de la gráfica.

Una deformación elástica para un metal es siempre muy pequeña menor a 0.5 %, como se ve en la figura 8.4, mientras que una deformación plástica normal es de un 30 a un 40 %.

El valor conocido como **límite elástico** o **límite de fluencia** es el esfuerzo que se tiene cuando se termina la recta que representa la zona elástica. En muchos casos este valor no se puede observar fácilmente en la curva y entonces se determina el **límite elástico convencional** o **límite de fluencia convencional** que es el valor del esfuerzo que se obtiene cuando una recta, con la misma pendiente de la recta de la parte elástica, pero iniciando en el valor de 0.2 % ó de 0.002 de deformación, intercepta la curva.

El **esfuerzo máximo** o UTS, por el inglés, Ultimate Tensile Strength es, por supuesto, el valor más grande que se tiene del esfuerzo en la gráfica. Finalmente el **esfuerzo a la fractura** o **ruptura** es el valor del esfuerzo al momento de que la probeta se rompe, de la misma forma que la **deformación a la fractura** es la deformación en ese instante.

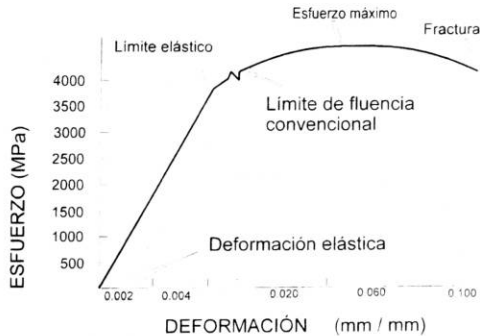


Figura 8.4 Curva de un ensayo de tensión

Se puede calcular la **reducción del área** de la probeta como la diferencia de las áreas antes y al final del ensayo entre el área inicial, como lo muestra la siguiente fórmula:

$$\% \text{ reducción de área} = ((\text{área inicial} - \text{área final}) / \text{área inicial}) \cdot 100$$

En algunos casos este valor se utiliza para evaluar la ductilidad de los materiales.

El **módulo elástico** o de **Young**,  $E$ , se calcula como la pendiente de la parte recta de la gráfica.

La **resiliencia** se define como el área debajo de la curva pero solamente en la parte elástica y es una medida de la energía adsorbida por el material en la deformación elástica. Se puede calcular este valor como si fuese un triángulo:  $= (\sigma_e) / 2$  y si de la ley de Hooke se despeja la deformación, entonces se tiene que la energía vale:

$$U_e = \sigma^2 / 2 E$$

Mientras que la **tenacidad** se calcula como toda el área debajo de la curva esfuerzo - deformación y es la medida de la energía absorbida por el material durante todo el ensayo. Exactamente debería evaluarse como la integral debajo de la curva pero una primera aproximación es como si el área bajo la curva fuese un trapecio de bases  $\sigma_o$  y  $\sigma_F$  y se calcula con la media de las bases por la altura,  $e_F$ , con la fórmula:

$$U_T = ((\sigma_o + \sigma_F) / 2) e_F$$

En el caso de los polímeros, algunos de estos valores son mucho mayores, lográndose alcanzar deformaciones de hasta 1 000 %. Mientras que en los cerámicos casi no se presenta una zona plástica en la curva.

Como se mencionó arriba, la deformación en la parte recta es proporcional al esfuerzo y es la única parte que es reversible del ensayo. Esto significa que al eliminar el esfuerzo la deformación se elimina también. Esta parte se puede representar por la **ley de Hooke**:

$$\sigma = E e$$

Donde  $E$  es el módulo elástico. Esta relación es válida sólo para la parte elástica. Ahora, para predecir el comportamiento de un metal en la zona plástica se puede utilizar otra expresión que se llama la **ecuación de Ludwik**:



$$\sigma = k e^n$$

Donde  $k$  se conoce como el *coeficiente de endurecimiento* y  $n$  es el *exponente de endurecimiento*. Estos valores se deben determinar para cada metal o aleación en particular. Existen algunas reglas para tratar de interpretar los valores de las constantes pero estas no son muy útiles.

### ENSAYO DE COMPRESIÓN

En principio, todo lo que se dice para el ensayo de tensión vale para el de compresión, aunque es claro que se debe cambiar la definición de la deformación, para que ésta sea siempre positiva.

Sin embargo, existen algunas diferencias y estas se presentan debido a que en la compresión la sección transversal de la probeta crece con la deformación mientras que en la tensión la sección transversal se hace menor. Así en tensión, la probeta se llega a romper y esto no ocurre nunca en compresión. Pero en la tensión se pueden lograr deformaciones de más del 100 %, como es el caso de los polímeros y algunos materiales superplásticos y eso es imposible en un ensayo de compresión.

### TORSIÓN

El ensayo de torsión mide el esfuerzo necesario para poder deformar la probeta un cierto ángulo. Se pueden probar probetas en forma de barras o de tubos de paredes delgadas. Afortunadamente parte de la información obtenida con este ensayo se puede deducir de los resultados producidos por ensayos de tensión, mediante la transformación de los esfuerzos normales a esfuerzos tangenciales.

### IMPACTO

El ensayo de impacto es muy simple en principio porque es una medida de la energía absorbida por la muestra en la fractura. Se utiliza una masa muy grande que rompe una probeta que está apoyada en dos puntos o en uno. La probeta tiene una geometría fija y tiene una hendidura, que permite que la fractura se inicie en un lugar determinado.

El equipo consta de un pesado péndulo y un dispositivo que sujeta la probeta en uno o dos puntos. Se puede conocer la pérdida de energía empleada para fracturar la probeta por la diferencia en la altura del péndulo antes y después de la fractura. Este ensayo es muy útil para evaluar el tipo de fractura que se presenta en el material. Se dice que el material es dúctil, si se deforma durante la fractura o es frágil, si no se presenta ninguna deformación al fracturarse el material.

## COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

En términos muy generales se dice que los cerámicos son muy poco dúctiles, esto es cuando se les aplica una fuerza casi no se deforman, sólo unos pocos porcentos (1 ó 2 %), en comparación con los metales, que se pueden deformar entre 20 y 40 %, y éstos a su vez, los metales, son muy poco dúctiles con respecto a los polímeros que llegan a deformaciones que pueden ser mayores a 1 000 %.

### DUCTILIDAD

Se puede definir ductilidad como la deformación que presenta el material hasta el momento anterior a que se fractura y es posible evaluar esta propiedad con dos números, ya sea con:

la deformación, como se calculó antes:

$$\text{Deformación} = e = \text{cambio de longitud} / \text{longitud inicial} = (L_f - L_0) / L_0$$

o como la reducción en área de la sección transversal de la probeta con la fórmula:

$$\text{Reducción de área (en porcentaje)} = (A_0 - A_f / A_0) \times 100$$

donde  $A_0$  y  $A_f$  son respectivamente las áreas inicial y en el momento antes de la fractura.

Por el otro lado se puede decir que los cerámicos son mucho más resistentes que los polímeros, pero los cerámicos son muy poco resistentes si se les compara con los metales.

Sin embargo actualmente ya se están invadiendo los campos entre estos tres principales tipos de materiales, así que ya existen polímeros tan resistentes como los cerámicos y cerámicos que compiten con los metales. Además ya hay muchas aplicaciones para los materiales compuestos de metales y cerámicos como son los cermets y los materiales formados por metales y polímeros llamados compósitos o compuestos.

## Capítulo 9

### PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS

En el caso de los metales se considera que los electrones externos, esto es, los de valencia, son los electrones responsables de la conducción eléctrica. Estos electrones se mueven libremente por todo el metal sin estar sujetos a ningún átomo en particular. Esta es una de las características más importante de los metales. En el caso de los cerámicos los electrones de las últimas órbitas de los átomos están muy sujetos, así que los cerámicos son malos conductores, de hecho son considerados como aislantes. Los polímeros, por otro lado, pueden tener muchas características diferentes y opuestas, en general se consideran malos conductores, pero se pueden producir polímeros especiales que sean conductores, mediante la adición de ciertos elementos.

#### LEY DE OHM

Esta es la ley fundamental de la electricidad y dice que:

$$V = I R$$

Donde V es el voltaje, en volts, I es la corriente en amperes y R es la resistencia en ohms.

Donde el voltaje se considera como la diferencia del potencial, en comparación con el agua de un río, se puede decir que es la altura desde donde cae el agua de una catarata. El amperaje es la cantidad de electrones que pasan por una área en un tiempo dado, en el caso de la comparación con un río, el amperaje será el caudal de agua. Finalmente la resistencia es una medida de la dificultad para que los electrones atraviesen una cierta área, en el caso del río, es claro que la resistencia sería la cantidad de obstáculos que tiene el agua para fluir.

Otra forma de esta analogía es decir que la corriente eléctrica es el diámetro de la tubería mientras que el voltaje es la altura desde donde cae el agua de la tubería. Así, un pequeño chorro de agua, esto es, una corriente muy pequeña no causa daño, si se deja caer desde poca altura. Pero un gran chorro de agua, que pasa por un tubo de gran diámetro, esto es, una gran corriente, es casi mortal, a cualquier altura que se deje caer.

Si se aumenta la corriente en un conductor metálico, después de un cierto valor, la temperatura del metal aumenta y esto es causado por la gran cantidad de choques entre los electrones móviles y los átomos. Por lo tanto se reduce la conductividad. Un ejemplo muy común de este fenómeno en las casas, se presenta cuando se causa un corto circuito en la línea, por ejemplo, los dos cables de la plancha se juntan, entonces empieza a circular una gran cantidad de corriente y si no fuera por los fusible que están en el circuito, se presentaría el riesgo de un incendio causado por el calentamiento de los cables. Los

fusibles, cuando aumenta la temperatura se funden y entonces se interrumpe la corriente y se evita el daño en toda la instalación. Estos fusibles son de un material que es sensible a la temperatura y se funden cuando se sobrepasa un valor de la corriente para el cual están diseñados. El circuito eléctrico de una casa está diseñado para permitir cierta cantidad de aparatos, cuando se instalan demasiados, entonces circula mucha corriente y se calientan primero los fusibles y se funden con mucha frecuencia.

Existe la posibilidad que se calienten los cables y que se produzca un incendio. Así que la solución es instalar otro medidor junto con otra línea que alimente cierta parte de la casa. En general las instalaciones eléctricas de las casa están diseñadas para soportar un máximo de 30 amperios de corriente. La compañía que suministra la energía eléctrica lo que cobra es la energía consumida, es decir, los vatios o watts. Un vatio es el producto de un voltio por un amperio y es una medida de la energía eléctrica:

$$\text{Energía} = V I = I^2 R$$

#### CONDUCTIVIDAD

La conductividad "c" se define como la capacidad de un material para permitir el movimiento de los electrones y es una característica de cada material, depende de sus propiedades elementales y se puede escribir como:

$$c = \frac{L}{A R}$$

donde  $L$  es la longitud,  $A$  el área transversal y  $R$  la resistencia del material del material en estudio. Por otro lado se tiene que la conductividad es el inverso de la resistividad,  $\varphi$  y se escribe como:

$$c = \frac{1}{\varphi} = n \mu q$$

en este caso  $n$  es el número de portadores de carga por unidad de área,  $\mu$  es la movilidad y  $q$  la carga eléctrica del portador de carga.

## SEMICONDUCTORES DE TIPO N Y P

Semiconductor. Es un material con una conductividad controlable, son intermedios entre aislantes y conductores.

*Tipo n.* Material dopado con un elemento tipo n, como ejemplo, se tiene el silicio, dopado con fósforo, el silicio tiene 4 electrones y el fósforo 5 en la última órbita, así las impurezas de fósforo aportan un exceso de electrones al material.

*Tipo p.* Material dopado con elemento de tipo p, en este caso es el silicio dopado con aluminio, aquí el aluminio tiene 3 electrones y el silicio 4 así que la impureza aporta una carencia de electrones y se dice que aporta huecos al material.

Al unir materiales n y p se producen los semiconductores, los más simples son los llamados diodos, cuya característica principal es que sólo conducen electricidad cuando se conectan con una polaridad. Cuando se unen tres elementos se producen los transistores, y pueden ser del tipo npn o pnp según sean los elementos que se unan. El trabajo más común que realizan los transistores es de amplificar el voltaje aplicado entre sus partes.

Existen otros dispositivos electrónicos muy comunes como las resistencias o los capacitores cuya función es evitar el paso de la corriente o almacenar la misma.

Actualmente se ha alcanzado un alto grado de miniaturización, se pueden construir dispositivos con grandes cantidades de diodos, transistores, resistencias y condensadores y se pueden colocar miles de millones de elementos por centímetro cuadrado. La primera computadora del mundo, la Eniac, construida en 1946, ocupaba varias habitaciones y era operada por medio de tubos al vacío o bulbos y necesitaba un suministro eléctrico de miles de watts. Lo que entonces ella podía calcular, ahora lo hace la más pequeña de las calculadoras actuales de bolsillo y como fuente de energía, se utiliza a veces, una celda solar ya incluida en la calculadora. Un ejemplo más reciente: la capacidad de la computadora que tenía la nave que llegó a la luna en 1969 fue sobrepasada muchas veces por una ya vieja pentium uno.

## SUPERCONDUCTORES

Los superconductores son conductores eléctricos que permiten que el flujo de corriente a través de ellos se mueva con una resistencia de 0 ohms. Este valor de la resistencia se alcanza actualmente bajando la temperatura del material. El superconductor más viejo conocido es el mercurio, éste efecto sólo se observa cuando la temperatura llega abajo de los 4 kelvins (K). Pero los superconductores más modernos hechos de óxidos cerámicos formados por itrio (Y), bario (Ba) y cobre (Cu) funcionan a temperaturas mucho más altas, arriba de la temperatura del nitrógeno líquido, 72 K, en vez de helio líquido, 4 K como en el caso del mercurio. Por lo tanto es mucho más simple y barato operar los

nuevos superconductores de esa "alta temperatura". El sueño de los científicos es poder encontrar otros materiales que sean superconductores a temperatura ambiente y en esa dirección se están haciendo enormes esfuerzos de investigación.

## MATERIALES TRANSDUCTORES

Los transductores son dispositivos que pueden cambiar la energía de un tipo a otro tipo. Así, convertir energía mecánica en eléctrica se puede hacer por medio de un material piezo eléctrico, una aplicación muy práctica de este material son los dispositivos para los encendedores, llamados por algunos electrónicos, que no tienen "piedra" para producir la chispa. Otro ejemplo muy importante pero actualmente ya fuera de uso son las pastillas de los tocadiscos de agujas, que "leían" el acetato y la información de la profundidad se transformaba en una señal eléctrica que a su vez era amplificada y enviada a las bocinas en forma de música. Un ejemplo de otro equipo que aún se utiliza y que se basa en este material piezo eléctrico son algunos tipos de micrófonos.

Este proceso puede hacerse al revés y transformar la energía eléctrica en mecánica como sería el caso de una bocina, pero aquí no hay un material de transductor, en este caso, existe una bobina que es excitada por una corriente eléctrica y una membrana que vibra.

En el caso de las celdas solares se transforma energía luminosa en eléctrica y el transductor es un semiconductor. Actualmente, la eficiencia de la mayoría de ellas está por valor de cerca de un 20 %, lo que es aún un valor bajo.

En términos muy generales se considera que una batería o una pila eléctrica es también un transductor, ya que cambia energía química por eléctrica.

## PROPIEDADES MAGNÉTICAS

El magnetismo se debe esencialmente a giro del electrón, pero en general los valores de cada átomo se anulan con los de sus vecinos. Solo para el hierro, el cobalto y el níquel los valores de cada átomo se suman y producen que se observe un magnetismo total. En general este fenómeno se manifiesta macroscópicamente en forma de dominios magnéticos. Estos son algo semejantes a los "granos" en los metales.

La unidad fundamental del magnetismo es el magnetón de Bohr que vale:

$$= q h / 4 \pi m_e$$

donde  $q$  es la carga eléctrica del electrón, con el valor de  $1.6 \times 10^{-19}$  coulombs, la  $h$  es la constante de Planck y vale  $6.63 \times 10^{-34}$  joules segundos y  $m_e$  es la masa del electrón,  $9.11 \times 10^{-31}$  kilogramos, así que el valor para el magnetón de Bohr es:

$$9.27 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$$

Si se define el campo magnético H medido en oersteds se puede determinar la densidad de flujo B en gauss a través de la ecuación:

$$B = \mu_0 H$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética en el vacío. Si en la bobina que produce el campo H se introduce algún otro material se debe cambiar el valor de la permeabilidad por el correspondiente de ese material  $\mu$ . Se puede encontrar un valor relativo de la permeabilidad dividiendo los dos valores:

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

Por eso la densidad del flujo magnético B se va a modificar por la magnetización inducida M por la introducción del material en la bobina de la siguiente forma:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

Casi siempre el segundo sumando es mayor que el primero así que la fórmula queda como:

$$B \approx \mu_0 M$$

Al aplicar un campo magnético los materiales se pueden comportar de varias formas. Una de ellas es oponerse al campo externo y produciendo que la magnetización sea **negativa**, a este efecto se le llama **diamagnetismo**. En cambio cuando los átomos se alinean con el campo externo, normalmente cuando se requiere un campo muy intenso para que se orienten se llaman estos materiales **paramagnéticos**, su permeabilidad es un poco mayor a uno.

En los materiales **ferromagnéticos** los átomos se alinean con campos externos muy bajos y presentan grandes valores de permeabilidad. En el caso de los materiales **antiferromagnéticos** los dipolos se anulan entre sí y muestran una magnetización nula.

---

En el caso del **ferrimagnetismo** que es característica en algunos materiales cerámicos en los cuales no hay el mismo número de dipolos y por lo tanto existe un cierto valor en la magnetización.



## **BIBLIOGRAFÍA**

C. J. ANDERSON, K. D. LEAVER, J. M. ALEXANDER, R. D. RAWLINGS  
Ciencia de los Materiales  
Limusa, México, 1978

Donald R. ASKELAND  
La Ciencia e Ingeniería de los Materiales  
Grupo Editorial Iberoamericana, México, 1987

Sidney H. AVNER  
Introducción a la Metalurgia Física  
McGraw - Hill, México, 1992

William D. CALLISSTER  
Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales  
Reverté, España, 2001

Richard A. FLINN, Paul K. TROJAN  
Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones  
McGraw - Hill Latinoamericana, S. A., México, 1994

Dora M. K. DE GRINBERG  
Tratamientos Térmicos de Aceros  
LIMUSA, México, 1986

Mikell P. GROOVER  
Fundamentos de Manufactura Moderna  
Prentice Hall, México, 1997

Zbigniew JASTRZEBSKI  
Naturaleza y Propiedades de los Materiales para Ingeniería  
Nueva Editorial Interamericana, México, 1979

Pat L. MANGONON  
Ciencia de Materiales, Selección y Diseño  
Prentice Hall, México, 2001

David W. RICHERSON  
Modern Ceramic Engineering Properties, Processing and Use in Design  
Marcel Dekker, Inc., New York, 1982

Miguel Ángel SÁNCHEZ URRUTIA, Carlos ÁLVAREZ GAYOSSO  
Curso Elaborado por Barsan Consultores, México, 1996

James F. SHAKELFORD  
Ciencia de Materiales para Ingenieros  
Prentice - Hall, México, 1992

William F. SMITH  
Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales  
McGraw - Hill, segunda edición, México, 1992

Fernando SINGER, S. S. SINGER  
Ceramica Industrial  
Ediciones Urmo S. A., España, 1979

Lesley SMART, Elaine MOORE  
Química del Estado Sólido  
Addison - Wesley Iberoamericana, Delaware, USA, 1995

Peter A. THORTON, Vito J. COLANGELO  
Ciencia de Materiales para Ingeniería  
Prentice-Hall, México, 1987

Lawrence H. VAN VLACK  
Elemente of Materials Science  
Addison - Wesley Publishing Company, USA, 1960

Ernesto URETA BARRÓN  
Polimeros, estructura, propiedades y aplicaciones  
Segunda reimpresión LIMUSA, México, 1996

Lucio VÁSQUEZ BRISEÑO, Antonio DE ITA DE LA TORRE  
Índices de Miller  
División de Ciencias Básica e Ingeniería  
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, México, 2005

**Introducción a los materiales**

Se terminó de imprimir en el mes de octubre del año 2008 en los talleres de la Sección de Impresión y Reproducción de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. La edición estuvo a cargo de la Sección de Producción y Distribución Editoriales. Se imprimieron 200 ejemplares más sobrantes para reposición.







ISBN: 970-31-0485-1

INT. A LOS MATERIALES  
DE ITA DE LA TORRE • SECCION DE IMPRESION  
52509  
R 40  \$ 29.00  
40-ANTOLOGIAS CBI • 01-CBI

UNIVERSIDAD  
AUTONOMA  
METROPOLITANA  
Casa abierta al tiempo



División de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Departamento de Materiales  
Coordinación de Extensión Universitaria  
Sección de Producción y Distribución Editoriales