

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTTLÁN**

***DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA***

***LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES***

---

**TECNOLOGÍA DE MATERIALES II**

---



**M.I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ**

**Cuauttlán Izcalli. 2007**

## ÍNDICE

Pag.

**INTRODUCCIÓN** ..... 1

### **CAPITULO 1**

#### **CONCEPTOS BÁSICOS**

1.1.- EL ÁTOMO ..... 2  
1.2.- LA TABLA PERIÓDICA Y LA CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS..... 6  
1.3.- DIFERENTES TIPOS DE ENLACES..... 8  
1.4.- REDES ESPACIALES Y SISTEMAS CRISTALINOS..... 11  
1.5.- MECANISMOS DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA..... 15  
    1.5.1.- Dislocaciones de borde ..... 16  
    1.5.2.- Dislocaciones de hélice o tornillo..... 17  
1.6.- LA DUREZA DEL METAL Y SU ENDURECIMIENTO..... 18  
1.7.- DEFORMACIÓN Y ESFUERZO..... 20  
1.8.- FASES EN SÓLIDOS. ALEACIONES ..... 23  
    1.8.1.- Solución sólida ..... 24  
    1.8.2.- Segunda fase ..... 25  
1.9.- CONCEPTO DE ALEACIÓN..... 26  
    1.9.1.- Diagramas de fase..... 27

### **CAPITULO 2**

#### **EL DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C Y LOS ACEROS**

2.1.- DIAGRAMA HIERRO-CARBURO DE HIERRO..... 29  
    2.1.1.- Constituyentes del diagrama..... 30  
    2.1.2.- Reacciones en el diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C..... 35  
    2.1.3.- Temperaturas críticas de los aceros ..... 36  
2.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS..... 38  
    2.2.1.- Sistemas de identificación para aceros simples y aleados ..... 40

### **CAPÍTULO 3**

#### **TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICABLES A LOS ACEROS**

3.1.- DEFINICIÓN..... 42  
3.2.- DIAGRAMAS TTT Y CCT ..... 42  
    3.2.1.- Construcción de un diagrama TTT ..... 43  
    3.2.2.- Zonas que integran un diagrama TTT..... 46  
    3.2.3.- Transformación de la austenita en perlita ..... 48  
    3.2.4.- Transformación de la austenita en bainita ..... 49  
    3.2.5.- Transformación de la austenita en martensita ..... 51  
    3.2.6.- Diagrama CCT ..... 52  
3.3.- TEMPLE DE LOS ACEROS (TEMPLADO) ..... 54  
    3.3.1.- Medios de temple ..... 56

## **TECNOLOGÍA DE MATERIALES II**

3.3.2.- La templabilidad .....	58
3.3.3.- La prueba Jominy .....	60
3.3.4.- Índice de templabilidad .....	63
3.4.- REVENIDO .....	64
3.5.- RECOCIDO .....	67
3.6.- NORMALIZADO .....	70
3.7.- GLOBULIZADO O ESFEROIDIZADO .....	71
3.8.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS ESPECIALES .....	74
3.8.1.- Austemplado .....	74
3.8.2.- Martemplado .....	75
3.8.3.- Temples interrumpidos .....	77

### ***CAPÍTULO 4 CORROSIÓN Y OXIDACIÓN***

4.1.- CORROSIÓN .....	79
4.2.- POTENCIALES ESTÁNDAR DE ELECTRODO PARA UNA SEMIPILA .....	81
4.3.- PILA O CELDA GALVÁNICA .....	82
4.4.- PILAS GALVÁNICAS CON ELECTROLITOS DISTINTOS A 1M .....	84
4.5.- CELDA DE CONCENTRACIÓN DE OXIGENO .....	84
4.6.- CORROSIÓN GALVÁNICA MACROSCÓPICA EN ELECTRODOS SENCILLOS .....	85
4.7.- LAS OCHO FORMAS BÁSICAS DE LA CORROSIÓN .....	86
4.8.- POLARIZACIÓN .....	94
4.9.- PASIVIDAD .....	95
4.10.- VELOCIDAD DE CORROSIÓN (CINÉTICA) .....	96
4.11.- CONTROL DE LA CORROSIÓN .....	98
4.12.- OXIDACIÓN .....	103
4.12.1.- Velocidades de oxidación (cinética) .....	104

### ***CAPITULO 5 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS***

5.1.- PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS .....	107
5.2.- INSPECCIÓN VISUAL .....	109
5.3.- LÍQUIDOS PENETRANTES .....	109
5.4.- PRUEBA DE ULTRASONIDO .....	111
5.5.- PRUEBA MEDIANTE RAYOS X (RADIOGRAFIADO INDUSTRIAL) .....	114
5.6.- INSPECCIÓN MEDIANTE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS .....	118
5.7.- PRUEBAS MEDIANTE CORRIENTES PARÁSITAS (DE EDDY) .....	119

### ***CAPITULO 6 FALLA MECÁNICA DE LOS MATERIALES***

6.1.- INTRODUCCIÓN .....	121
6.2.- TIPOS DE FRACTURAS .....	121
6.3.- TEORÍAS DE FRACTURA .....	124
6.4.- MECÁNICA DE FRACTURA .....	129
6.5.- FATIGA .....	131
6.6.- TERMOFLUENCIA .....	134
6.7.- FRACTOGRAFÍA .....	135
6.8.- DESGASTE .....	138

## **TECNOLOGÍA DE MATERIALES II**

6.9.- MÉTODOS DE PREVENCIÓN CONTRA EL DESGASTE .....	141
--	-----

### ***CAPITULO 7 PLÁSTICOS***

7.1.- ORIGEN E HISTORIA EVOLUTIVA DEL PLÁSTICO .....	144
7.1.1.- Origen .....	145
7.1.2.- Evolución .....	145
7.2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PLÁSTICOS .....	146
7.2.1.- Conceptos .....	146
7.3.- TIPOS DE POLÍMEROS .....	148
7.3.1.- Concepto y clasificación .....	148
7.3.2.- Representación de la estructura de los polímeros .....	148
7.4.- PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN .....	149
7.4.1.- Polimerización por adición .....	150
7.4.2.- Polimerización por condensación .....	150
7.4.3.- Polimerización en suspensión, emulsión y masa .....	151
7.5.- TÉCNICAS DE MOLDEO DE LOS PLÁSTICOS .....	152
7.5.1.- Moldeo a alta presión .....	152
7.5.2.- Moldeo a baja presión .....	153
7.6.- CONFORMADO DE LOS POLÍMEROS .....	154
7.7.- FABRICACIÓN .....	155
7.8.- APLICACIONES .....	155

### ***CAPITULO 8 CERÁMICOS***

8.1.- INTRODUCCIÓN.....	158
8.2.- ORDENAMIENTO DE CORTO ALCANCE EN LOS MATERIALES CERÁMICOS CRISTALINOS .....	159
8.3.- IMPERFECCIONES EN LAS ESTRUCTURAS CERÁMICAS CRISTALINAS .....	163
8.4.- MATERIALES CERÁMICOS NO CRISTALINOS .....	162
8.5.- DIAGRAMAS DE FASES EN LOS MATERIALES CERÁMICOS .....	163
8.6.- PROCESAMIENTO DE LAS CERÁMICAS .....	163
8.7.- APLICACIONES Y PROPIEDADES DE LAS CERÁMICAS .....	165
8.8.- MATERIALES Y APLICACIONES AVANZADAS .....	166
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>168</b>

## *INTRODUCCIÓN*

*El Ingeniero de hoy no debe ni puede utilizar los materiales empíricamente; requiere un conocimiento de ellos que además de enseñarle “¿cómo?” debe utilizarlos, le permita saber el “¿por qué?”. Sin “ello”, no sólo no podría nunca realizar una obra técnicamente perfecta, ya que no habría de lograr más que casualmente aprovechar el máximo rendimiento de los materiales, sino que se expone a graves fracasos.*

*La complejidad extraordinaria de aplicaciones a las que se someten los materiales y los reducidos coeficientes de seguridad que la ligereza y economía de la obra imponen, junto con la enorme gama de aleaciones existentes, imposibilitan una utilización empírica y sólo el conocimiento científico de los materiales nos otorga una orientación para lograr la utilización racional.*

*El Ingeniero debe saber, ante todo, elegir un material adecuado para la obra a realizar, lo que le exige el conocimiento de las propiedades después de adquirir el material, para lo cual debe saber imponerle condiciones y saber comprobar si las cumple, con el fin de seleccionar las buenas de las malas calidades. Después, tiene que manipular aquellos metales, dándoles los tratamientos mecánicos y térmicos que sean más convenientes a los mismos y a las condiciones de trabajo que se les exigen. Finalmente, debe controlar su utilización para que los elementos fabricados se conserven con eficiencia el mayor tiempo posible. Difícil sería esta labor sin otros fundamentos que los conocimientos empíricos de manuales o catálogos.*

*Como consecuencia de lo antes expuesto, en este trabajo, se presentan los temas que se cubren en el curso de Tecnología de Materiales II, pudiendo mencionar entre ellos: el diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, los tratamientos térmicos aplicables a los aceros, corrosión y oxidación, pruebas no destructivas, plásticos, etc.*

*Como siempre, cualquier sugerencia o corrección será bien recibida.*

*ATTE.*

*Prof. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.*

**CAPÍTULO I**  
**CONCEPTOS BÁSICOS**

**1.1 EL ÁTOMO**

*Cinco siglos antes de Cristo, los filósofos griegos se preguntaban si la materia podía ser dividida indefinidamente o si llegaría a un punto que tales partículas fueran indivisibles. Es así, como Demócrito formuló la hipótesis de que la materia se compone de partículas indivisibles, a las que llamó átomos (del griego átomos, indivisible), figura 1.1.*

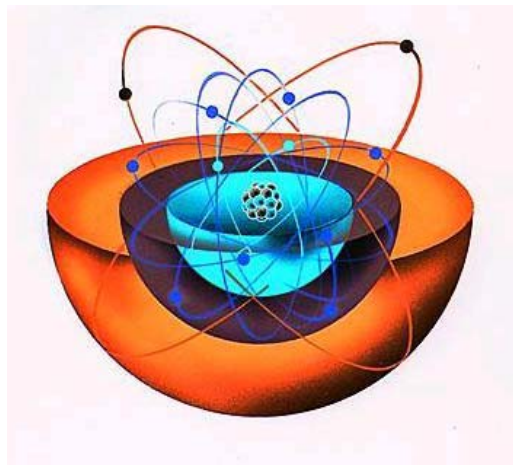


Figura 1.1.- Átomo

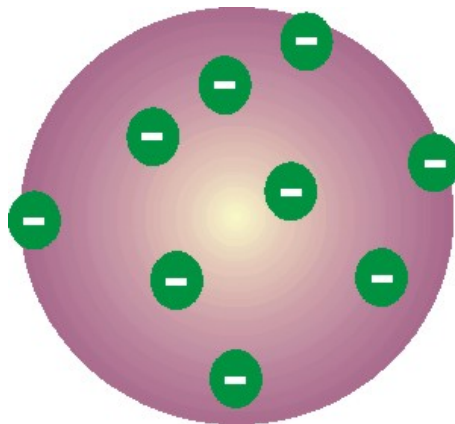
*En 1803, el químico inglés John Dalton propone una nueva teoría sobre la constitución de la materia. Según Dalton toda la materia se podía dividir en dos grandes grupos: los elementos y los compuestos. Los elementos estarían constituidos por esferas macizas, que en honor a Demócrito, denominó átomos. Los compuestos se constituirían de moléculas, cuya estructura viene dada por la unión de átomos en proporciones definidas y constantes. La teoría de Dalton seguía considerando el hecho de que los átomos eran partículas indivisibles, esto es, que eran esferas macizas, figura 1.2*

○ Oxígeno    ⊙ Hidrógeno    ⊕ Azufre    ⊙ Cobre    ● Carbono

Figura 1.2 Representación de distintos átomos según Dalton:

*Hacia finales del siglo XIX, se descubrió que los átomos no son indivisibles, pues se componen de varios tipos de partículas elementales. La primera en ser descubierta fue el electrón en el año 1897 por el investigador Sir Joseph Thomson, quién recibió el Premio Nobel de Física en 1906. Basado en los conocimientos de esa época y en sus resultados propone un modelo para describir al átomo el cual consistía en una esfera uniforme de materia cargada positivamente en la que se hallaban incrustados los electrones de un modo parecido a como lo están las semillas en una sandía, figura 1.3. Este sencillo modelo explicaba el hecho de que la materia fuese eléctricamente neutra, pues en los átomos de Thomson, la carga positiva era neutralizada por la negativa. Además, los electrones podrían ser arrancados de la esfera si la energía en juego era suficientemente importante como sucedía en los tubos de descarga.*

*Fue un primer modelo realmente atómico, referido a la constitución de los átomos, pero muy limitado y pronto fue sustituido por otros.*

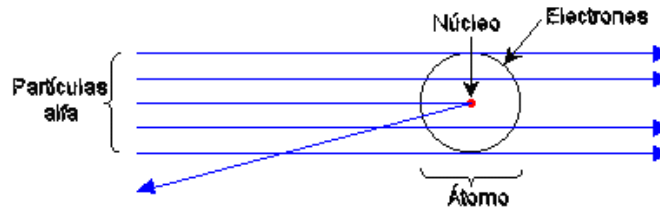


**Figura 1.3.- Modelo atómico de Thomson**

*El núcleo del átomo se descubre gracias a los trabajos realizados en la Universidad de Manchester, bajo la dirección de Ernest Rutherford entre los años 1909 a 1911. El experimento utilizado consistía en dirigir un haz de partículas de cierta energía contra una laminilla de oro, de las probabilidades que tal barrera desviara la trayectoria de las partículas, se dedujo la distribución de la carga eléctrica al interior de los átomos. La importancia del experimento estuvo en que mientras la mayoría de partículas atravesaban la lámina sin*

*desviarse o siendo desviadas solamente en pequeños ángulos, unas cuantas partículas eran dispersadas a ángulos grandes de hasta 180°, figura 1.4*

*El hecho de que sólo unas pocas radiaciones sufriesen desviaciones hizo suponer que las cargas positivas que las desviaban estaban concentradas dentro de los átomos ocupando un espacio muy pequeño en comparación a todo el tamaño atómico; esta parte del átomo con electricidad positiva fue llamado núcleo.*



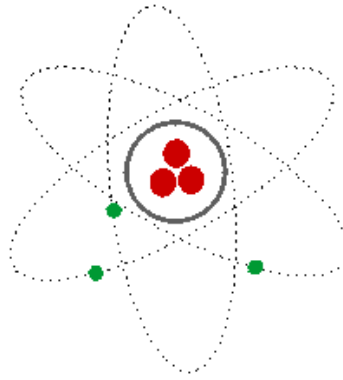
**Figura 1.4. Interpretación del experimento de Rutherford**

*El modelo de Rutherford tuvo que ser abandonado, pues el movimiento de los electrones suponía una pérdida continua de energía, por lo tanto, el electrón terminaría describiendo órbitas en espiral, precipitándose finalmente hacia el núcleo. Sin embargo, este modelo sirvió de base para el modelo propuesto por su discípulo Neils Bohr, marcando el inicio del estudio del núcleo atómico, por lo que a Rutherford se le conoce como el padre de la era nuclear.*

*Con las informaciones que disponía y de las obtenidas de su experiencia, Lord Rutherford propuso en el 1.911 este modelo de átomo:*

- 1. El átomo está constituido por una zona central, a la que se le llama núcleo, en la que se encuentra concentrada toda la carga positiva y casi toda la masa del núcleo, figura 1.5.*
- 2. Hay otra zona exterior del átomo, la corteza, en la que se encuentra toda la carga negativa y cuya masa es muy pequeña en comparación con la del átomo. La corteza está formada por los electrones que tenga el átomo.*
- 3. Los electrones se están moviendo a gran velocidad en torno al núcleo.*
- 4. El tamaño del núcleo es muy pequeño en comparación con el del átomo (unas 100.000 veces menor)*



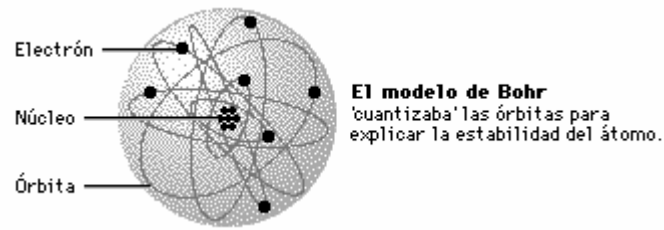


**Figura 1.5.- Modelo atómico de Rutherford**

*Niels Bohr (1885-1962 fue un físico danés que aplicó por primera vez la hipótesis cuántica a la estructura atómica, a la vez que buscó una explicación a los espectros discontinuos de la luz emitida por los elementos gaseosos. Todo ello llevó a formular un nuevo modelo de la estructura electrónica de los átomos que superaba las dificultades del átomo de Rutherford.*

*Este modelo implicaba los siguientes postulados:*

- 1.- El electrón tenía ciertos estados definidos estacionarios de movimiento (niveles de energía) que le eran permitidos; cada uno de estos estados estacionarios tenía una energía fija y definida, figura 1.6.*
- 2.- Cuando un electrón estaba en uno de estos estados no irradiaba pero cuando cambiaba de estado, absorbía o desprendía energía.*
- 3.- En cualquiera de estos estados, el electrón se movía siguiendo una órbita circular alrededor del núcleo.*
- 4.- Los estados de movimiento electrónico permitidos eran aquellos en los cuales el momento angular del electrón ( $m \cdot v \cdot r$ ) era un múltiplo entero de  $h/2 \cdot 3.14$ .*



**Figura 1.6.- Modelo atómico de Bohr**

*La teoría mecano-cuántica se inicia con los estudios del físico francés Luis De Broglie, quién recibió el Premio Nobel de Física en 1929. Según De Broglie, una partícula con cierta cantidad de movimiento se comporta como una onda. En tal sentido, el electrón tiene un comportamiento dual de onda y corpúsculo. De esta forma sólo existe la probabilidad de encontrar un electrón en cierto momento y en una región dada en el átomo, denominada como "nivel de energía".*

## **1.2 LA TABLA PERIÓDICA Y LA CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS.**

*En la actualidad se conocen 108 elementos, de los cuales 91 son naturales y podemos encontrarlos en el suelo, en el agua o en el aire de nuestro planeta y más allá. Muchos resultan familiares, como el cobre que se encuentra en los cables eléctricos, el aluminio que se usa en muchos utensilios de cocina, o el mercurio líquido que esta en la columna de los termómetros.*

*La Tabla periódica constituye un modo de organizar las propiedades de los elementos. Hay tres características generales para destacar del sistema periódico:*

*Las filas horizontales se conocen como períodos. Los períodos se numeran del 1 al 7. Por ejemplo, el segundo período comienza con el litio y termina en el neón. La longitud de los diferentes períodos varía de 2 a 32 elementos.*

*Las columnas verticales se conocen como grupos. Los grupos se numeran del 1 al 18 según la IUPAC o bien en según la forma convencional del I al VIII distinguiendo a los grupos en A o B, pudiendo tener el grupo IA de los metales alcalinos o el IB de los metales de acuñar.*

## TECNOLOGÍA DE MATERIALES II

*Los elementos del centro de la Tabla Periódica desde los periodos 4 a 6, se llaman elementos de transición, y suelen ubicarse por separado al final del sistema. A estos elementos no se les asigna número de grupo, y suelen distinguirse como lantánidos (a los que van del número atómico 57 al 70) y actínidos (a los que van del número atómico 89 al 102).*

*De acuerdo con la Tabla del Sistema Periódico según sus propiedades físicas los elementos químicos se clasifican de la siguiente forma:*

- *Gases nobles*
- *Metales*
- *No metales*
- *Metaloides*

*Metales.* *Son elementos químicos que generalmente contienen entre uno y tres electrones en la última órbita, que pueden ceder con facilidad, lo que los convierte en conductores del calor y la electricidad. Los metales, en líneas generales, son maleables y dúctiles, con un brillo característico, cuya mayor o menor intensidad depende del movimiento de los electrones que componen sus moléculas. El oro y la plata, por ejemplo, poseen mucho brillo y debido a sus características físicas constituyen magníficos conductores de la electricidad, aunque por su alto precio en el mercado se prefiere emplear, como sustitutos, el cobre y el aluminio, metales más baratos e igualmente buenos conductores.*

*No metales.* *Poseen, generalmente, entre cinco y siete electrones en su última órbita. Debido a esa propiedad, en lugar de ceder electrones, su tendencia es ganarlos para poder completar ocho en su última órbita. Los no metales son malos conductores del calor y la electricidad, no poseen brillo, no son maleables ni dúctiles y, en estado sólido, son frágiles.*

*Metaloides.* *Son elementos que poseen, generalmente, cuatro electrones en su última órbita, por lo que poseen propiedades intermedias entre los metales y los no metales. Esos elementos conducen la electricidad solamente en un sentido, no permitiendo hacerlo en sentido contrario como ocurre en los metales. El silicio (Si), por ejemplo, es un metaloide ampliamente utilizado en la fabricación de elementos semiconductores para la industria electrónica, como rectificadores diodos, transistores, circuitos integrados, microprocesadores, etc.*

*Un 75% de los elementos químicos existentes en la naturaleza son metales y el resto no metales y metaloides.*

*Gases nobles. Son elementos químicos inertes, es decir, no reaccionan frente a otros elementos, pues en su última órbita contienen el máximo de electrones posibles para ese nivel de energía (ocho en total). El argón (Ar), por ejemplo, es un gas noble ampliamente utilizado en el interior de las lámparas incandescentes y fluorescentes. El neón es también otro gas noble o inerte, muy utilizado en textos y ornamentos lumínicos de anuncios y vallas publicitarias.*

### 1.3 DIFERENTES TIPOS DE ENLACES

*Los diferentes tipos de enlaces químicos que ocurren entre átomos de elementos simples son los siguientes:*

- *Enlace iónico o electrovalente*
- *Enlace covalente*
- *Enlace metálico*
- *Enlace por fuerzas de Van der Waals*

*Enlace iónico o electrovalente. Debido a la fuerza de atracción que se ejerce entre los iones con cargas de signo contrario (positivas y negativas), se originan enlaces iónicos o electrovalentes, que dan lugar a la creación de moléculas de elementos químicos compuestos. Por ejemplo, las cargas de un ión cloro negativo ( $Cl^-$ ) o anión y la de un ión sodio positivo ( $Na^+$ ) o catión, se atraen mutuamente para dar lugar a la formación de una molécula de cloruro de sodio, más conocida como sal común ( $NaCl$ ).*

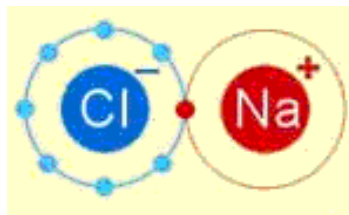
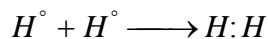


Figura 1. 7.- Enlace electrovalente o iónico entre un ión cloro ( $Cl^-$ ) y un ión sodio ( $Na^+$ )

Enlace Covalente *El enlace covalente, a diferencia del enlace iónico, se caracteriza por una compartición de electrones (electrones de valencia) entre pares de átomos, más que una cedencia de electrones de un átomo a otro, con lo cual ambos átomos involucrados completarán (en la mayoría de los casos) el octeto, es decir, van a adquirir una configuración de gas noble. Cabe mencionar que en este enlace, ninguno de los átomos involucrados obtiene una posesión completa de los electrones que forman la unión.*

*El caso más simple de unión covalente tiene lugar en la formación de la molécula de hidrógeno. Cuando dos átomos de hidrógeno se combinan para formar una molécula, comparten su electrón de valencia, lo cual se puede representar de la siguiente forma:*



*Esta molécula se caracteriza por una densidad electrónica alta (concentración de carga negativa) entre los núcleos (protones) debido a que los electrones compartidos pasan más tiempo en ese lugar. La compartición de electrones, característica de la unión covalente o unión homopolar, también se da en moléculas como:  $N_2, O_2, F_2$ , etc., en esos casos los electrones involucrados son los que se localizan en los suborbitales p. Por la forma del suborbital p, la compartición de estos electrones le confiere un carácter direccional al enlace covalente.*

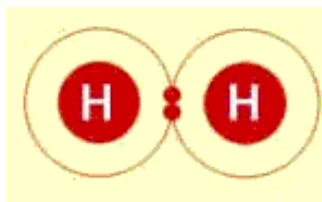


Figura 1.8.- Enlace covalente entre dos átomos de hidrógeno ( $H_2$ ).

Enlace Metálico *Otro tipo de unión química, la cual está confinada a los metales, es el enlace metálico. En la unión metálica ideal los electrones de valencia no se encuentran unidos a ningún par particular de átomos, sino que se mueven libremente a través del metal. Las propiedades conocidas de los metales, tales como la alta conductividad eléctrica y térmica, soportan la visión conceptual de que los electrones de valencia nunca permanecen cerca de algún átomo en particular por mucho tiempo sino que ellos se mueven de una manera al azar*

a través de todo el metal. De esta manera se puede visualizar el arreglo ordenado de iones en un metal, como partículas que son mantenidas juntas por un gas de electrones libres, figura 1.9.

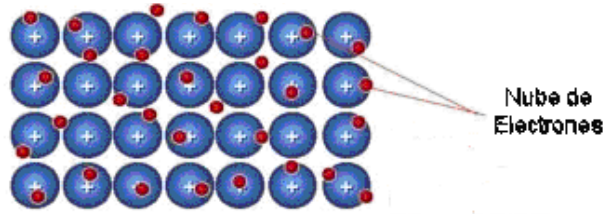


Figura 1.9.- Enlace metálico, una red de iones positivos en una “nube” de electrones

*Esta situación se presenta por el hecho de que el número de electrones de valencia es demasiado pequeño, como para proporcionar capas completas para todos los átomos que forman el metal. Debido a la formación del gas de electrones libres, la unión metálica es no direccional. Actuando con igual fuerza en todas direcciones. Esto nos lleva a tener en muchos de los metales, estructuras cristalinas de una alta coordinación de empaquetamiento, lo que explica las propiedades únicas de los metales, así como su habilidad para formar aleaciones.*

*En general, se dice que los enlaces en los que existe unión de átomo a átomo son “enlaces de primer orden”. Por ello, los enlaces iónico, covalente y metálico pertenecen a este grupo. Por otra parte, existen enlaces de “segundo orden”, llamados “Enlaces de Van der Waals”, los cuales se deben a una débil fuerza de atracción, resultante de la polarización eléctrica de los átomos o moléculas. Un ejemplo es la unión de moléculas de agua en estado líquido, figura 1.10.*

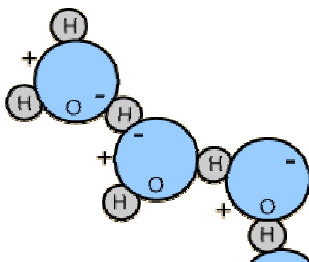


Figura 1.10.- Moléculas de agua

#### 1.4 REDES ESPACIALES Y SISTEMAS CRISTALINOS

*El término sólido generalmente describe un estado en el que se tiene un agregado de átomos, iones o moléculas, en el cual la sustancia posee un volumen y forma definida. La habilidad que poseen los sólidos para soportar fuerzas cortantes, así como recuperar la forma original después de haber sufrido una pequeña deformación, los distingue de los gases y de los líquidos.*

*La estructura de los sólidos puede variar desde cuerpos cristalinos simples a muy complejos y sólidos amorfos, de acuerdo al tipo de enlace y al arreglo geométrico de los átomos o moléculas que lo forman.*

*Se puede decir que la característica fundamental de un sólido cristalino es la periodicidad de su estructura. Ésta periodicidad implica que un cristal representa un arreglo ordenado de átomos o grupos de átomos en una “forma” repetitiva regular. Esta forma resulta de la repetición regular infinita en el espacio de unidades estructurales idénticas o bloques de construcción, los cuales pueden ser muy simples o muy complejos. Los sólidos cristalinos se caracterizan entonces, por poseer un orden de largo alcance, formado por millones y millones de estas unidades estructurales, mejor conocidas como “celdas unitarias”.*

*Con base en lo anteriormente dicho, se puede considerar una red espacial como un ordenamiento infinito de puntos en el espacio arreglados de tal forma que dividen el espacio dentro de volúmenes iguales, llenando totalmente el espacio considerado.*

*Cada punto, conocido como punto propio de la red cristalina, tiene alrededores idénticos con cualquier otro punto. La celda unitaria se considera como el volumen más pequeño que posee el arreglo de la red cristalina. Cuando se apila una celda unitaria con otra cara a cara, llenan totalmente el espacio, generando de esta forma la “red espacial”.*

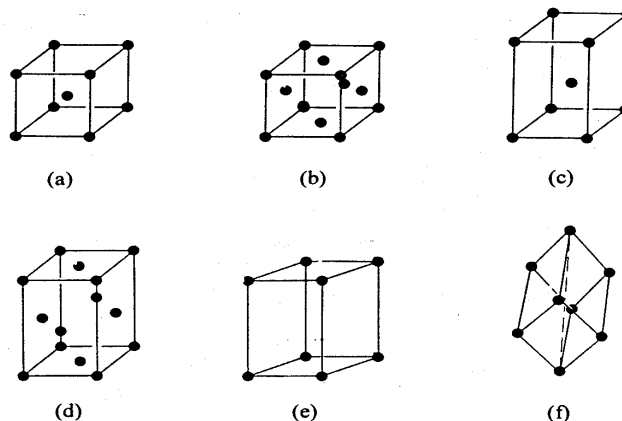
*Bravais demostró que existen únicamente catorce posibles arreglos de puntos en una red tridimensional, conocidas como estructuras cristalinas, las cuales surgen de siete “sistemas cristalinos” en los que todos los sólidos cristalinos entran. Dichos sistemas se muestran en la tabla 1.1.*

**Tabla 1.1.- Sistemas cristalinos.**

<i>Sistema cristalino</i>	<i>Tipos de celda unitaria</i>	<i>Ejes</i>	<i>Ángulos axiales</i>
<i>Cúbico</i>	<i>CS, FCC, BCC</i>	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<i>Tetragonal</i>	<i>TS, BCT</i>	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<i>Ortorrómico</i>	<i>OS. bCO, BCO, FCO</i>	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<i>Romboedral (trigonal)</i>	<i>RS</i>	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
<i>Hexagonal</i>	<i>HS, HC</i>	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
<i>Monoclínico</i>	<i>MS, bCM</i>	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
<i>Triclínico</i>	<i>TS</i>	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

*La geometría de una red espacial o sistema cristalino, está completamente definida por las constantes de la red (longitud de los lados) a, b y c, y los ángulos interaxiales  $\alpha, \beta, \gamma$ . Del total de las catorce celdas unitarias existentes, sólo algunas poseen importancia para el estudio de los metales.*

*La figura 1.11 muestra seis de las celdas unitarias que se presentan con mayor frecuencia en los metales y aleaciones. En los cristales cúbicos el parámetro de la red tiene el mismo valor en las tres direcciones del cristal y suele denotarse por la letra "a". Sin embargo, en otros cristales el parámetro de la red puede tener tres valores diferentes.*

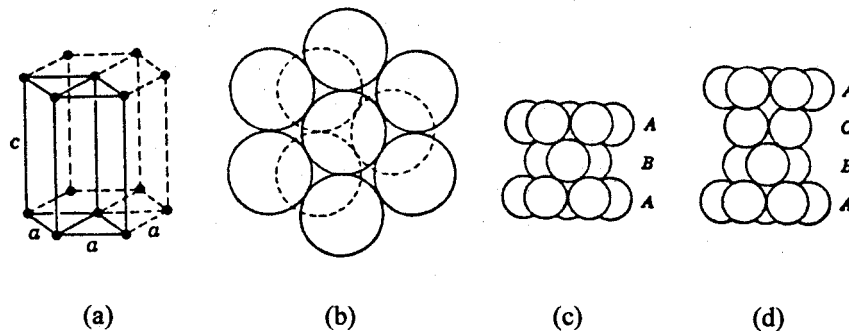


**Figura 1.11.- Representación esquemática de las seis celdas unitarias más importantes en los metales: a) Cúbica de cuerpo centrado, b) Cúbica de caras centradas, c) Tetragonal de cuerpo centrado, d) Ortorrómica de caras centradas, e) Hexagonal simple y f) Romboédrica.**



*La Celda Hexagonal compacta, característica del magnesio y algunos otros metales puros, puede considerarse formada por tres celdas unitarias de la celda Hexagonal simple como se muestra en la figura 1.12 (a)*

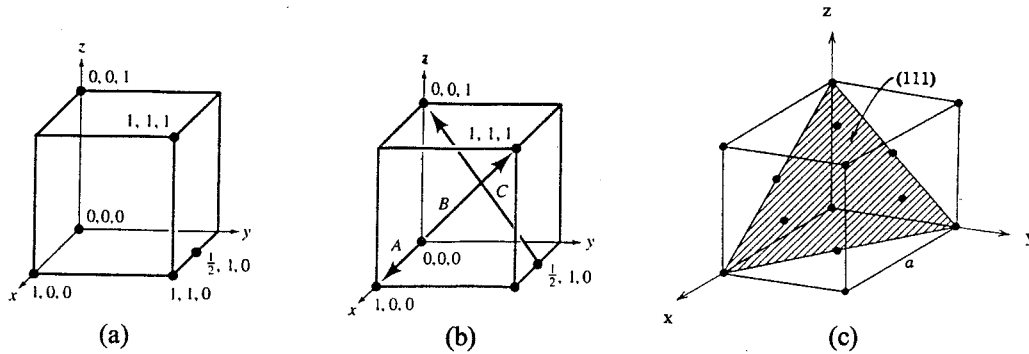
*En la figura 1.12 (b) y (c) se muestra la celda hexagonal compacta, en la que se ve la secuencia de apilamiento de "planos compactos" que la constituyen y que es: AB, AB, AB..., cabe mencionar que dentro del sistema cristalino cúbico, únicamente la estructura cristalina cúbica a caras centradas (FCC), figura 1.12 (d), está formada por planos compactos, pero siguiendo una secuencia de apilamiento dada por: ABC, ABC, ABC..., por lo que esta estructura posee la celda unitaria más compacta del sistema cúbico.*



**Figura 1.12.- Celda Hexagonal Compacta. a) Celda hexagonal compacta con una celda simple mostrada por la línea de trazo continuo; b) Empaquetamiento de esferas de las dos primeras capas; c) Arreglo hexagonal compacto mostrando la secuencia de apilamiento ABA; d) Secuencia de apilamiento ABCA para una estructura FCC.**

*En este punto es importante mencionar que dentro de una celda unitaria se pueden designar posiciones, direcciones y planos a partir de un sistema de ejes coordenados, que para el sistema cúbico se denota por  $a_1, a_2, a_3$ . Las posiciones se denotan por tres números separados por comas y que están dados con base en el valor unitario que posee cada lado de la celda, ver la figura 1.13(a). Las direcciones se denotan por tres números encerrados entre paréntesis cuadrados  $[h k l]$  y puede definirse como una línea o "vector" que une cualquiera dos puntos de la red. Cualquier otra línea paralela a esa dirección cristalográfica forma parte de una familia de direcciones, la cual se identifican por ir encerrada entre paréntesis triangulares,  $\langle h k l \rangle$  y está formada por todas las posibles combinaciones de los tres dígitos que designan la familia, incluyendo los índices negativos. Los índices de una dirección son*

simplemente las componentes vectoriales de ella, resueltas a lo largo de cada eje, figura 1.13(b).



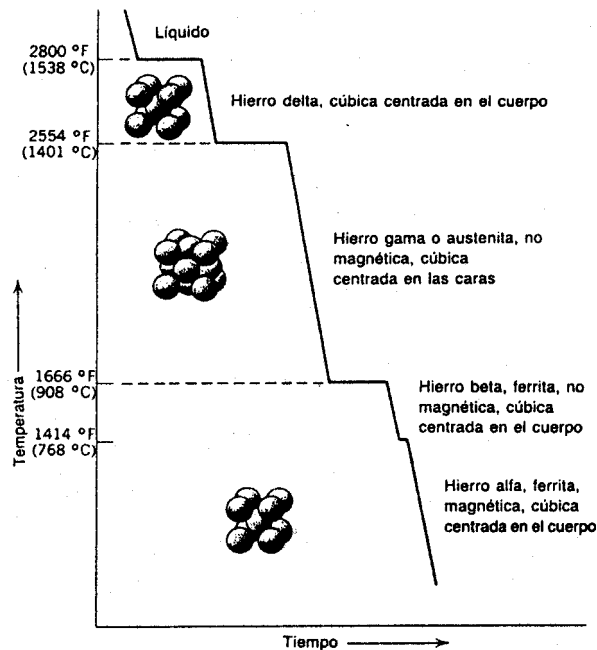
**Figura 1.13-** a) Forma en la que se denotan las posiciones en una celda unitaria cúbica. b) Índices cristalográficos para las direcciones: A [100], B [111], C[122] . c) Índices de Miller para el plano (111) en una celda unitaria cúbica.

Los planos en una celda cúbica se representan por dígitos encerrados entre paréntesis,  $(h k l)$ , conocidos como “Índices de Miller”, los cuales son iguales a los recíprocos de las correspondientes intersecciones con los ejes, figura 1.13 (c). Al igual que en el caso de las direcciones, para los planos también se tienen familias, denotadas por llaves,  $\{h k l\}$  y están formadas por todas las posibles combinaciones de los índices de Miller, incluyendo índices negativos.

Es importante tener presente que muchos de los elementos existen en formas cristalinas diferentes, que dependen de condiciones externas como la temperatura y la presión. Este fenómeno se llama “Alotropía o Polimorfismo”. Bajo las condiciones normales de presión atmosférica, cada estado alotrópico de un metal existe en equilibrio durante un intervalo de temperatura. El ejemplo más conocido es el que presenta el hierro: a temperaturas por debajo de los 908 °C, los átomos de hierro se encuentran formando una red espacial cúbica de cuerpo centrado, (BCC). Al calentar el hierro por arriba de los 908 °C y hasta los 1401 °C los átomos de hierro se encuentran formando una red cúbica a caras centradas, (FCC).

Al calentar el hierro por encima de los 1401 °C y hasta los 1538 °C se produce un segundo cambio alotrópico, formándose nuevamente una estructura cúbica a cuerpo centrado, (BCC), como se muestra en la figura 1.14. Estos cambios alotrópicos son el resultado de un cambio en la temperatura, lo que se refleja en un “reacomodo” de los átomos para formar distintas estructuras cristalinas; la alotropía es un fenómeno que resalta la importancia de los cambios

*de temperatura en los metales, a continuación se analizan otros fenómenos dependientes de la temperatura.*



**Figura 1.14.- Diagrama de enfriamiento mostrando la alotropía del hierro puro.**

### **1.5.- MECANISMOS DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA**

*El deslizamiento entre “planos atómicos” es el mecanismo predominante de la deformación plástica. Sin embargo, se ha podido comprobar que el deslizamiento entre planos se lleva a cabo por el movimiento de defectos que poseen todos los metales llamados “dislocaciones”. Un estudio de la orientación de las “líneas de deslizamiento”, que aparecen sobre la superficie de un metal sujeto a tensión, en unión con un análisis de rayos X de monocristales metálicos, revela que el deslizamiento ocurre con mayor facilidad sobre planos con alta densidad atómica y gran distancia interplanar. Éstos planos de deslizamiento son a menudo los planos compactos para una estructura cristalina dada.*

*Regresando a los defectos responsables de la deformación plástica, se puede considerar a una dislocación como una “región” de una perturbación localizada de la red cristalina, la cual separa aquella región del cristal que ha sufrido deslizamiento, de la región que no lo ha sufrido.*

*Cuando la dislocación se mueve ocurre un deslizamiento en el área sobre la cual pasó, la que puede considerarse como una región que ya se deformó plásticamente, mientras que la región delante de la dislocación se encuentra libre de deformación. En ausencia de obstáculos, una dislocación puede moverse fácilmente al aplicarle una pequeña fuerza; esto ayuda a explicar porqué los cristales reales se deforman mucho más fácilmente, de lo que debería ser esperado para un cristal con una red perfecta.*

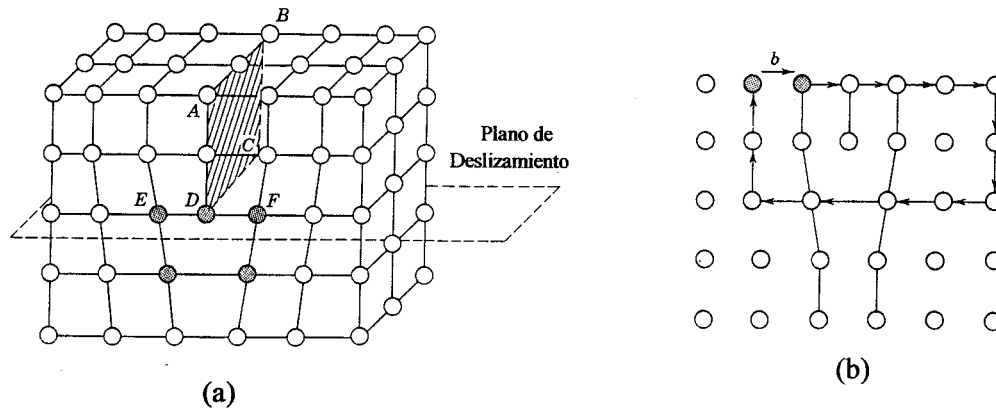
*Las dislocaciones no únicamente son importantes para explicar el deslizamiento de los planos atómicos en cristales, sino que están íntimamente relacionadas con casi todos los fenómenos mecánicos, tales como endurecimiento por deformación, punto de cedencia, termofluencia, fatiga, fractura frágil, etc.*

*Existen dos tipos básicos de dislocaciones, a saber:*

#### 1.5.1.- Dislocaciones de Borde

*La dislocación de borde se puede describir como el intercalamiento de un semiplano extra de átomos dentro de una estructura cristalina, como se muestra en la figura 1.15 (a). Existen zonas de tensión y compresión que acompañan a la dislocación de borde. El desplazamiento de los átomos debido a la dislocación se llama Vector de Burgers; se puede formar un circuito alrededor de la dislocación y el Vector de Burgers será el que cierre el circuito, ver figura 1.15 (b).*

*De la figura 1.15 (b) se puede ver que para una dislocación de borde el Vector de Burgers  $b$  es perpendicular a la línea de la dislocación. Se pueden tener dislocaciones de borde positivas y negativas, denotadas por  $\perp$  y  $\tau$ , respectivamente. Estas dislocaciones poseen un plano de deslizamiento bien definido y único.*



**Figura 1.15.- (a) Dislocación de borde DC la cual resulta de introducir un semiplano extra de átomos ABCD. (b) Circuito de Burgers alrededor de una dislocación de borde;  $b$  es el vector de Burgers.**

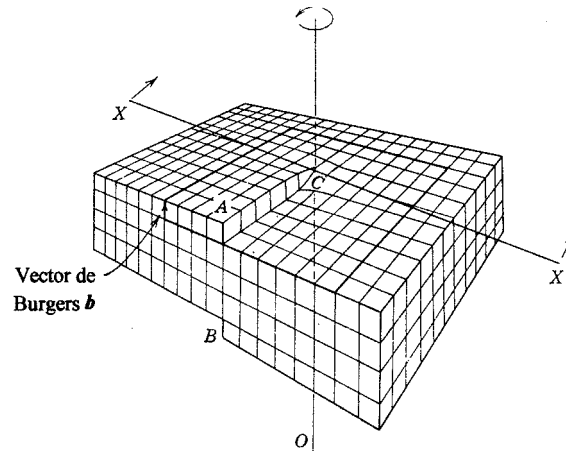
**1.5.2.- Dislocaciones de Hélice o Tornillo**

*El concepto de dislocación puede generalizarse de manera que se puedan incluir aquellos defectos de línea que tienen un Vector de Burgers paralelo a la línea de la dislocación, éstos defectos son llamados dislocaciones de tornillo o hélice, el nombre se deriva de “la rampa helicoidal continua” formada por un conjunto de planos atómicos alrededor de la línea de la dislocación. Cuando un cristal se sujeta a fuerzas cortantes apropiadas, una dislocación de tornillo se puede mover y dar lugar al mismo tipo de deformación plástica que una dislocación de borde. La figura 1.16 muestra una dislocación de tornillo.*

*En una dislocación de tornillo, el Vector de Burgers es paralelo a la línea de la dislocación pero perpendicular a la dirección de movimiento de la misma. Estas dislocaciones no poseen un plano de deslizamiento preferido como sucede en las dislocaciones de borde y por ello su movimiento está menos restringido.*

*Una dislocación puede producir la deformación permanente de una red cristalina por la acción de una fuerza relativamente pequeña. Ésta deformación se lleva a cabo por el movimiento del defecto (dislocación) de una posición reticular a otra (de acuerdo a la dirección de desplazamiento), quedando la distribución atómica semejante a la configuración inicial y, de esta forma, puede repetirse el deslizamiento de los planos atómicos. Para producir este movimiento paso a paso de una dislocación, es necesario solamente una fuerza*

*igual a una milésima parte de la requerida para producir el cizallamiento de una estructura cristalina perfecta.*



**Figura 1.16.- Dislocación de tornillo. El vector de Burgers  $b$  es paralelo a la línea de la dislocación CO, pero perpendicular al movimiento de la dislocación, línea X-X.**

*El deslizamiento corresponde en realidad a un corrimiento de dislocaciones; sin embargo, hay que tener en cuenta que los procesos de deslizamiento se producen sólo en ciertos planos específicos del cristal llamados “planos de deslizamiento” (que son los planos compactos de la estructura cristalina o los de mayor densidad de empaquetamiento) y a lo largo de ciertas direcciones determinadas, llamadas direcciones de deslizamiento (que son las direcciones compactas de la estructura). Cada combinación de un plano y una dirección de deslizamiento proporciona al material un “sistema de deslizamiento”.*

*Entre las estructuras que se presentan con mayor facilidad en los metales y sus aleaciones, la cúbica a caras centradas o FCC es la que posee mayor número de sistemas de deslizamiento, doce en total.*

## **1.6.- LA DUREZA DEL METAL Y EL ENDURECIMIENTO**

*En la sección anterior se estudiaron los mecanismos básicos de la deformación plástica de los metales, en ésta sección se determinarán las posibilidades de endurecimiento de los metales, con el fin de aumentar su límite elástico, lo que permitirá el empleo de secciones más delgadas en los diseños.*

*Generalmente se acostumbra definir la dureza como la resistencia que opone un material a ser penetrado; en términos de la deformación, podemos definir la dureza como la resistencia a la deformación plástica. Conviene aclarar en este punto que la resistencia a la deformación elástica depende únicamente del módulo de elasticidad. El concepto de endurecimiento, desde el punto de vista mecánico, se refiere entonces a aumentar la dureza de un cierto material.*

*Se sabe que el mecanismo básico de la deformación plástica es el corrimiento de las dislocaciones, por lo tanto, para reducir la deformación, es decir, aumentar la resistencia a la deformación plástica, es necesario disminuir el corrimiento de las dislocaciones lo cual se logra poniendo obstáculos en la estructura cristalina. Estos obstáculos serán en su mayoría defectos cristalinos introducidos precisamente con el fin de lograr dicho endurecimiento.*

*Entre los procesos de endurecimiento se tienen:*

- a) *Endurecimiento por deformación.- Éste proceso de endurecimiento se presenta cuando un material es trabajado en frío. Internamente crece el número de dislocaciones pudiendo distinguirse dos procesos de endurecimiento, uno que tiene que ver con el apilamiento de dislocaciones sobre su plano de deslizamiento y otro con la intersección de los planos de deslizamiento activos, creándose en ambos casos un esfuerzo contrario al esfuerzo producido por cargas externas, que tiene que ser vencido a fin de continuar deformando el material.*
- b) *Endurecimiento por afino de grano.- El afino de grano de un metal, es otro de los procesos que llevan al endurecimiento de los metales y aleaciones. Al hacer más pequeño el grano, se reduce la distancia libre que puede recorrer una dislocación, con lo cual no existe la posibilidad de que las dislocaciones dentro de un metal se muevan grandes distancias sin que comiencen a apilarse por la presencia de un obstáculo que en este caso sería el límite de grano.*
- c) *Endurecimiento por solución sólida.- La formación de una solución sólida entre dos elementos nos lleva a un endurecimiento de la aleación, ya que los átomos de soluto sirven*

*de obstáculo al movimiento de las dislocaciones; por éste motivo la aleación resultante de la formación de una solución sólida tendrá mayor dureza y resistencia mecánica que los elementos en su forma pura.*

- d) *Endurecimiento por precipitación.- En la formación de aleaciones aparte de la posibilidad de la formación de una solución sólida, existe la posibilidad de la aparición de una segunda fase en la matriz de la primera fase, buscándose controlar lo mejor posible la precipitación de la segunda fase con el fin de lograr una distribución homogénea, lo que le dará al material sus mejores características mecánicas. En este caso, nuevamente las dislocaciones se encontrarán con obstáculos (la fase dispersa en la matriz de la aleación) los cuales impiden su libre movimiento, llevándonos a un endurecimiento de la aleación.*
- e) *Endurecimiento por dispersión.- Éste tipo de endurecimiento tiene que ver con el uso de partículas ajenas a los elementos de aleación, buscándose que al manejar el material a temperaturas elevadas estas partículas no puedan disociarse, ni disolverse, ni difundirse para formar partículas de mayor diámetro.*
- f) *Endurecimiento por segunda fase.- al alear dos elementos por lo general para una composición mayor del 10<sup>0</sup>/<sub>A</sub>, es difícil que se siga formando una solución sólida entre los átomos de solvente y soluto, produciéndose una precipitación de una segunda fase con las características descritas en la sección 1.8.2. ésta segunda fase produce un endurecimiento de la aleación, mayor que el logrado por la formación de una solución sólida, pero menor que el obtenido por la precipitación homogénea.*

### **1.7.- DEFORMACIÓN Y ESFUERZO**

*Las propiedades mecánicas determinan el comportamiento de los metales de ingeniería bajo fuerzas y cargas aplicadas. La respuesta de los materiales a las fuerzas aplicadas dependerá del tipo de unión, el arreglo estructural de los átomos o moléculas y el tipo y número de imperfecciones, las cuales están presentes en los materiales de uso en ingeniería.*

*Mucho del conocimiento del comportamiento mecánico de los metales, es un resultado de los aspectos microscópicos de la deformación plástica. Se puede decir que los logros más*



*importantes provienen del entendimiento del defecto conocido como dislocación y de la interacción entre ellas y con características de la red cristalina, tales como átomos de impurezas, defectos puntuales, límites de grano y superficies libres del material. Una forma macroscópica de ver la deformación plástica está relacionada con la determinación del flujo plástico, el cual ocurre a un esfuerzo llamado “esfuerzo de cedencia”. Así, las propiedades de un material se especifican por la resistencia a la tensión o a la cedencia, la elongación, la reducción de área y la resistencia a la compresión. Es importante poder correlacionar esas propiedades con la estructura microscópica y su comportamiento.*

*Cuando un material metálico se somete a una carga o fuerza externa, sufrirá inicialmente una deformación de tipo elástica; si la carga sigue aumentando, la deformación pasará a ser de tipo plástica. Básicamente, se puede diferenciar la deformación elástica de la plástica, por el hecho de que la primera desaparece cuando deja de actuar la carga que la produjo, recuperando el metal sus dimensiones originales. Por otra parte, la deformación plástica es una deformación permanente, es decir, aun cuando se retire la carga que la produjo, el metal no recuperará sus dimensiones originales.*

*Dentro del rango de deformación elástica, existe una relación directa entre el esfuerzo y la deformación. El esfuerzo está dado por:*

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (1.1)$$

*Donde:*

*$\sigma$  = Esfuerzo expresado en N/mm<sup>2</sup>, (Psi)*

*F = La carga aplicada en N, (lb)*

*A = Al área de la sección transversal de la probeta en mm<sup>2</sup>, (in<sup>2</sup>)*

*y la deformación producida por éste esfuerzo está dada por la relación:*

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o} \dots\dots\dots (1.2)$$

*Donde:*

*$L_o$  = Longitud inicial de la probeta en mm (pulg)*

*$L$  = Longitud de la probeta deformada elásticamente en mm (pulg)*

*De aquí se puede expresar la relación entre esfuerzo y deformación por medio de la ley de Hooke:*

$$\sigma = E\varepsilon \dots\dots\dots (1.3)$$

*Donde:*

*$E$  = Módulo de elasticidad o módulo de Young, dado en  $N/mm^2$  (Psi)*

*El módulo de Young también se conoce como módulo de elasticidad en tensión, para diferenciarlo del módulo de compresión  $K$  y del módulo de elasticidad al corte  $G$ .*

*El módulo de elasticidad representa la resistencia del metal contra la deformación “elástica”. Para deformar elásticamente un material con alto módulo elástico se requiere un esfuerzo alto, mientras que un esfuerzo menor será suficiente para deformar elásticamente un material con módulo elástico bajo.*

*No es posible modificar en forma apreciable el módulo de elasticidad de un material dado, ya que  $E$  sólo varía sensiblemente en presencia de texturas (orientación preferencial de granos) o modificando apreciablemente la composición. Por ésta razón en el caso de los aceros, por ejemplo, el módulo de Young será el mismo así se trate de un acero aleado o un acero al carbono.*

*Sin embargo, se conoce que ciertos procesos que se llevan a cabo dentro del material, pueden disminuir el valor de  $E$ ; entre estos se puede mencionar: el endurecimiento por precipitación, descomposición eutectoide, deformación en frío, aumento de la temperatura de trabajo, etc.*

La figura 1.17 representa una curva típica esfuerzo - deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) de Ingeniería para un acero de bajo carbono (1020). Se observa la región elástica en la cual se cumple la Ley de Hook, denotada por la Ec. (1.3) en la que la deformación es proporcional al esfuerzo, hasta un valor de  $\sigma_E$  llamado “límite elástico”, a partir del cual empieza una deformación no recuperable, es decir, se entra a la región de deformación plástica, en la que ya no existe una relación directa entre esfuerzo y deformación.

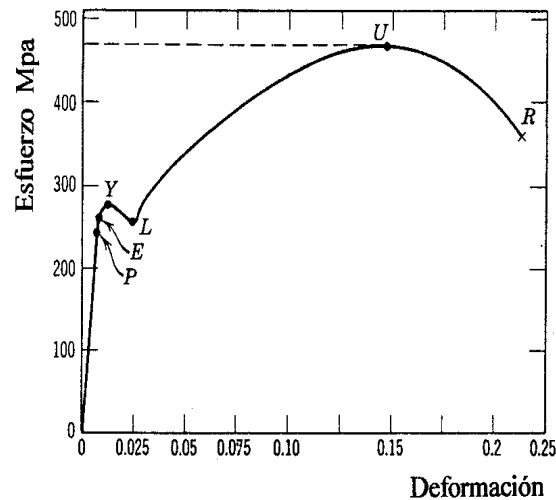


Figura 1.17.- “Diagrama esfuerzo - deformación para un acero de bajo contenido de carbono. En el diagrama, P es llamado Límite de Proporcionalidad, E Límite Elástico, Y punto de Fluencia Superior, L punto de Fluencia Inferior, U Resistencia máxima y R Resistencia a la Fractura.

El límite elástico de los materiales es un dato de suma importancia para el diseño, ya que el rebasar este valor conduciría a una deformación plástica, con pérdida de tolerancia y otros problemas. Uno de los principales objetivos de los tratamientos térmicos es precisamente la elevación del límite elástico, lo que implica un aumento de la resistencia del material a la deformación plástica; esto es lo que se entiende por “aumentar la dureza” de un material. Los principales métodos de endurecimiento de aleaciones metálicas se estudiarán en la siguiente sección, revisando primeramente el mecanismo de la deformación plástica.

## **1.8.- FASES EN SÓLIDOS. ALEACIONES**

Las transformaciones de fase involucran el cambio que tiene lugar entre fases, lo que lleva a la aparición o desaparición de una fase o a la transición de una fase a otra.

*Una fase se puede definir como un agregado homogéneo de materia (una parte de un sistema físicamente distinta), separada de otras partes del sistema por superficies límites bien definidas. Un sistema homogéneo es aquel en el cual las propiedades a una escala macroscópica son las mismas de punto a punto o cambian de una manera continua, de modo que no existen discontinuidades o cambios abruptos dentro del sistema.*

*Debido a que la materia puede existir en tres estados de agregación, es posible distinguir tres fases: sólida, líquida y gaseosa. En el caso de los sólidos al formarse soluciones sólidas se tendrá una sola fase, en este caso se dice que un sistema de una sola fase también puede formarse por la aleación de dos elementos, los cuales al combinarse, para un cierto rango de composiciones, forman una sola fase conocida como “solución sólida”, esto constituye un “sistema homogéneo”. Por otra parte, un sistema formado por más de una fase es un “sistema heterogéneo”. En los sistemas heterogéneos existe un cambio abrupto en los límites o fronteras de fase de un sistema, y este cambio puede ser químico, físico o ambos.*

*De lo anterior se desprende que en la formación de aleaciones binarias, se pueden distinguir dos cambios básicos en la estructura cristalina del elemento base o solvente:*

1. Formación de una solución sólida
2. Formación de una segunda fase

*En el caso considerado, se supone que se tiene una aleación de dos elementos cien por ciento puros, siendo uno el elemento base o elemento solvente y el otro el elemento de aleación o soluto.*

### **1.8.1.- Solución Sólida**

*Se puede definir una solución (líquida) como una mezcla homogénea en la cual los átomos o moléculas de una sustancia se encuentran en una dispersión al azar dentro de otra sustancia. Al aplicar ésta definición a un sólido, se tiene una solución sólida. Sin embargo, existe una diferencia entre una solución sólida y una solución líquida y es que en la primera el tamaño de los átomos de soluto afecta grandemente la solubilidad del elemento y en la segunda no.*

*Las soluciones sólidas en sistemas de aleaciones pueden ser de dos clases:*

a) *Soluciones sólidas sustitucionales*

*Una solución sólida sustitucional se formará cuando los átomos de soluto sustituyen a algunos átomos del solvente en posiciones propias de la red cristalina formada por éstos últimos, figura 1.18. La solubilidad del soluto en el solvente depende principalmente del tamaño comparativo de los átomos de ambos elementos. Sin embargo, algunos otros factores deben tomarse en consideración si se quiere asegurar una solubilidad de 10% de átomos de soluto en la estructura del metal solvente ( $10^0/A$  de soluto en el solvente). Éstos factores se resumen en las “Reglas de Hume - Rothery”:*

*I. Los dos elementos deben de solidificar en la misma estructura cristalina.*

*II. La diferencia en los radios atómicos no debe ser mayor de 15 %.*

*III. La electronegatividad de ambos elementos debe ser semejante.*

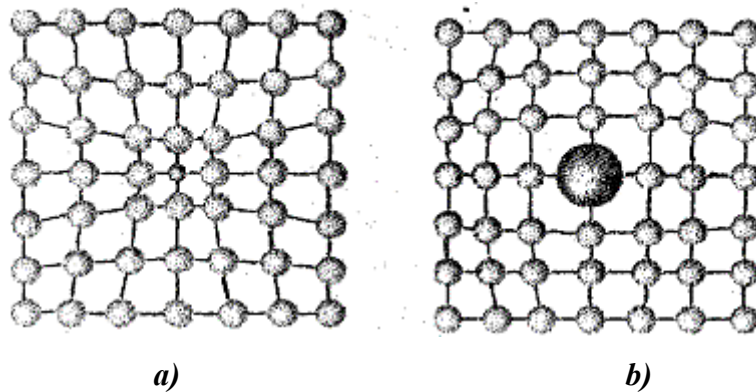


Figura 1.18.- a) Átomo sustitucional más pequeño. b) Átomo sustitucional más grande

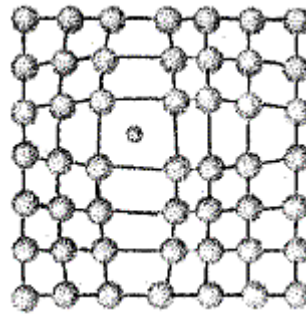
*Se debe tener en consideración que la solubilidad generalmente aumenta conforme aumenta la temperatura y disminuye cuando disminuye ésta. Este hecho es responsable de que se presente la precipitación de una fase, dentro de una solución sólida o fase homogénea, resultando un efecto de endurecimiento de la aleación.*

*Las soluciones sólidas pueden ser primarias o secundarias. Las soluciones sólidas primarias se caracterizan por tener la estructura del elemento solvente, mientras que las soluciones sólidas secundarias se caracterizan por poseer una estructura cristalina diferente de la que poseen sus elementos componentes.*

*Otra característica que exhiben las soluciones sólidas es su punto de fusión incongruente, esto es, la fusión inicia a una temperatura significativamente más baja, que la temperatura a la cual la aleación es completamente líquida y el sólido que cristaliza a partir de ese líquido, tiene una composición diferente de la de éste último.*

*b) Soluciones sólidas intersticiales.*

*Una solución sólida intersticial se forma cuando los átomos de soluto son significativamente pequeños, para ocupar los sitios intersticiales que posee la estructura cristalina del solvente, figura 1.19 .*



*Figura 1.19.- Átomo intersticial.*

*Entre los elementos que pueden formar una solución sólida intersticial, por el tamaño del radio atómico que poseen, se puede mencionar el Hidrógeno, Carbono, Nitrógeno y Boro.*

**1.8.2.- Segunda fase**

*Debido a que en la mayoría de los sistemas de aleación existe una solubilidad limitada en el estado sólido del soluto en el solvente, al solidificar totalmente una aleación, por lo general se presentará una segregación de los átomos del soluto, lo que trae como consecuencia la formación de una segunda fase que se caracteriza por:*

- a) *Poseer la estructura cristalina del elemento de aleación o soluto, disolviendo un pequeño porcentaje de átomos del solvente, formando una solución sólida. Esto sucede principalmente para sistemas que muestran un diagrama de equilibrio sencillo.*
- b) *Formación de soluciones sólidas secundarias para el caso de sistemas binarios de aleación, que muestran un diagrama de equilibrio complejo.*
- c) *Formación de un compuesto intermetálico. Se puede definir como un compuesto de dos o más elementos en una proporción estequiométrica, es decir, un compuesto intermetálico posee una fórmula química bien definida,  $A_mB_n$ , y se mostrarán en un diagrama de fases como una línea recta paralela al eje de las temperaturas.*

### **1.9.- CONCEPTO DE ALEACIÓN.**

*Una aleación es un material que tiene propiedades metálicas y que esta constituida por dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es metal.*

*Las aleaciones pueden ser de una sola fase o también pueden ser combinaciones de varias fases. Una aleación se obtiene cuando dos metales se mezclan entre sí en el estado líquido formando una solución homogénea (uniforme). Cuando la aleación solidifica, la solubilidad que prevelece en el estado líquido, puede detenerse ya sea parcial o completamente en el estado sólido, dando lugar a lo que se llama solución sólida.*

*Para que un metal pueda disolverse en otro y formar una solución sólida, los átomos del soluto (que es el ingrediente que está presente en cantidades menores o la sustancia que se disuelve), deben adaptarse de alguna manera a la estructura reticular de los átomos del solvente (que es el ingrediente que está presente con mayor cantidad o la sustancia que efectúa la solución), esto puede lograrse mediante la formación de una solución sólida sustitucional o una solución sólida intersticial.*

1.9.1.- Diagramas de fases

*Una fase se puede definir como una porción homogénea de un sistema que tiene características físicas y químicas uniformes. Un material puro, un sólido, un líquido, una solución gaseosa, se consideran fases. Si en un sistema hay más de una fase, cada una de ellas tiene sus propias características y un límite de solubilidad que las separa de otras fases. A veces un sistema monofásico recibe el nombre de “homogéneo” y los sistemas de dos o más fases se denominan “mezclas” o “sistemas heterogéneos”. La mayoría de las aleaciones son sistemas heterogéneos.*

*Un sistema está en equilibrio si la energía libre (energía interna) es mínima en condiciones específicas de temperatura, presión y composición. En sentido macroscópico, esto significa que las características del sistema no cambian con el tiempo sino que se mantienen indefinidamente; es decir, el sistema es estable. Un cambio de temperatura, de presión y/o de composición de un sistema en equilibrio conduce a un aumento de la energía libre y a un posible cambio espontáneo a otro estado de menor energía libre*

*Un diagrama de fase es una gráfica o mapa que muestra la fase o las fases presentes en una composición de un material determinado en función de la temperatura y presión.*

*La relación existente entre la temperatura, las composiciones, las cantidades de las fases, y si se supone que las presiones permanecen constantes con valor atmosférico (1 atm), se presentan adecuadamente en un diagrama de equilibrio. A dichos diagramas de equilibrio se les llama, con frecuencia de fases (si muestran las fases que se encuentran presentes) o diagramas de constitución (si muestran cuáles son los constituyentes involucrados). Estos diagramas no proporcionan ninguna información relativa a la velocidad con que se produce la reacción, sólo indica la relación existente al alcanzar el punto de equilibrio, a una temperatura dada.*

*Los diagramas, aportan información acerca de las características del equilibrio de un sistema particular, pero no indican el tiempo necesario para alcanzar el estado de equilibrio. En*



*muchos casos, especialmente en sistemas sólidos, ocurre que el estado de equilibrio nunca se alcanza completamente, ya que la velocidad para llegar al equilibrio es extremadamente lenta; este estado se denomina de no equilibrio o metaestable.*

*La utilidad de los diagramas de equilibrio radica en la posibilidad de la predicción de la transformación y de la microestructura resultante, que puede estar o no en equilibrio. Las condiciones de equilibrio pueden ser aproximadas por medio de calentamiento y enfriamiento extremadamente lento, de modo que se deje suficiente tiempo, si un cambio de fase esta por ocurrir.*

*En muchas aleaciones, y para alguna temperatura específica, existe una concentración máxima de átomos de soluto que se disuelven en el solvente para formar una solución sólida: es el límite de solubilidad. La adición de un exceso de soluto o de este límite de solubilidad forma otra solución sólida, con una composición completamente diferente.*

*Las líneas de los diagramas representan límites entre fases que existen a ciertas temperaturas y con diversas composiciones; por otra parte, las fases se representan por medio de áreas, y estas últimas llevan siempre inscrito el nombre de la fase que representan.*

*Los diagramas de fase se pueden clasificar como:*

- 1. Componentes completamente solubles en estado líquido:*
  - Tipo I. Cuando dos metales son solubles (miscibles) en estado líquido pero también en estado sólido.*
  - Tipo II. Cuando dos metales son solubles en estado líquido pero insoluble en estado sólido.*
  - Tipo III. Cuando dos metales son solubles en estado líquido pero parcialmente solubles en el estado sólido.*
  - Tipo IV. Formación de una fase intermedia de fusión congruente.*
  - Tipo V. La reacción peritética.*
- 2. Componentes parcialmente solubles en estado líquido.*
- 3. Componentes insolubles en estado líquido y en estado sólido.*

CAPÍTULO 2

EL DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C Y LOS ACEROS

2.1 DIAGRAMA HIERRO – CARBURO DE HIERRO

El sistema de aleación más importante es el hierro – carburo de hierro. La temperatura a que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro esta influido por los elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono. En la figura 2.1, se muestra el diagrama hierro – carburo de hierro, el diagrama muestra la porción de interés que es la parte entre el hierro puro y el compuesto intersticial carburo de hierro, Fe<sub>3</sub>C, ya que el Fe<sub>3</sub>C se considera un componente. La convención y la conveniencia imponen expresar la concentración en % C en lugar de % Fe<sub>3</sub>C; 6.70% en peso de C corresponde al 100% de Fe<sub>3</sub>C.

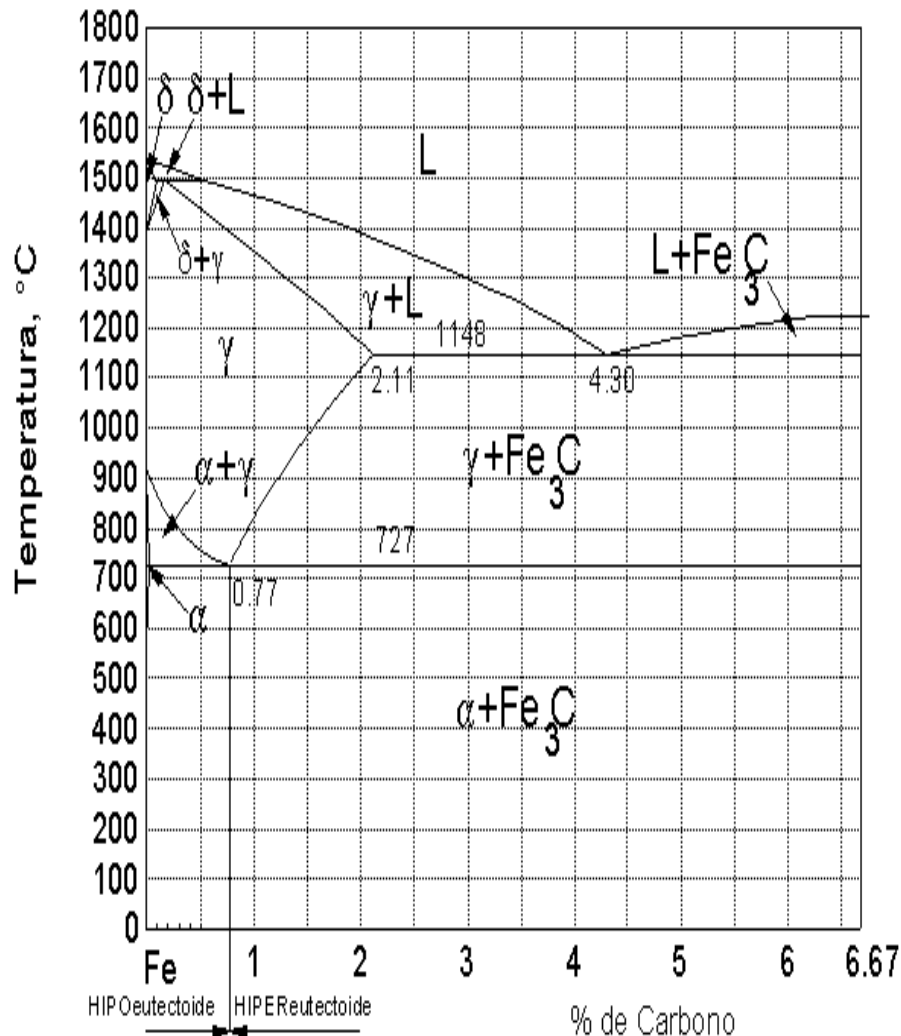


Figura 2.1.- Diagrama de equilibrio hierro - carburo de hierro.

*Es importante saber que éste diagrama no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues equilibrio implica que no hay cambios de fase con el tiempo; sin embargo, es un hecho que el compuesto  $Fe_3C$  se descompone en hierro y carbono (grafito), lo cual tomará un tiempo muy largo a temperatura ambiente, y aun a  $704^{\circ}C$  tardaría varios años en formar grafito, por lo tanto, el carburo de hierro es una fase metaestable (que tiende al cambio).*

**2.1.1. Constituyentes del diagrama.**

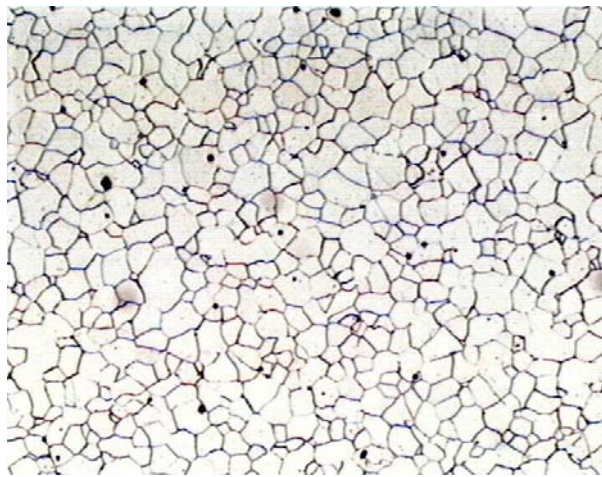
*La ferrita ( $\alpha$ ) ó hierro alfa, es el nombre dado a la solución sólida  $\alpha$  (o sea, hierro casi puro). Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbono disuelto en hierro  $\alpha$  (con estructura cristalina BCC). La máxima solubilidad es 0.025% de carbono a  $727^{\circ}C$ , y disuelve sólo 0.008% de carbono a temperatura ambiente (por esto, prácticamente se considera a la ferrita como hierro  $\alpha$  puro). Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 40000 lb/pulg<sup>2</sup> (28 kg/mm<sup>2</sup>); elongación, 40 % en 2 pulg; dureza, menor que 0  $R_C$ , ó 90  $R_B$ . Es la estructura más suave (blanda) de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable, magnética y de pequeña fuerza coercitiva.*

*La ferrita puede contener pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados, suelen formar soluciones sólidas con la ferrita, el níquel, manganeso, cobre, silicio, aluminio, etc.*

*En los aceros, la ferrita puede aparecer bajo formas muy diversas como a continuación se mencionan:*

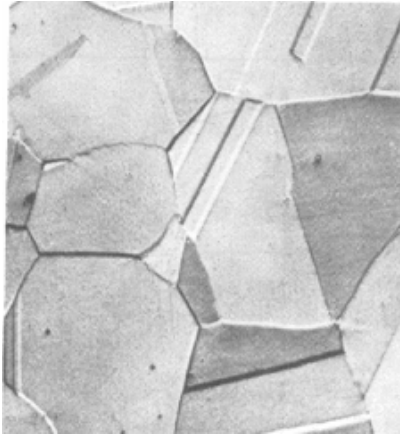
- 1 Como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita. En este caso se presenta:  
(a) En forma de cristales mezclados con los de la perlita en los aceros de menos de 0.55% de carbono, figura 2.2. (b) Formando una red o malla que limita los granos de la perlita en los aceros de 0.55 a 0.85% de carbono.*
- 2 También aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas paralelas, separadas por otras láminas de cementita.*

- 3 *En la estructura globular, propia de los aceros para herramientas recocidos a temperaturas próximas a 721°C, aparece formando la matriz que rodea a los glóbulos de cementita*
  
- 4 *En los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer también mezclada con la martensita o con los demás elementos de transición formando zonas blancas irregulares o agujas finas.*



**Figura 2.2.- Cristales de ferrita proeutectoide en un acero de bajo carbono**

*La austenita o hierro  $\gamma$  (en memoria del metalurgista inglés Robert Austen), es el nombre dado a la solución sólida  $\gamma$  (con estructura FCC). Es una solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro  $\gamma$ . La máxima solubilidad es del 2% de carbono a 1148°C (punto C). Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 150000 lb/pulg<sup>2</sup> (105 kg/mm<sup>2</sup>); elongación, 10 % en 2 pulg; dureza, 40 R<sub>C</sub>, aproximadamente. No es magnética, es blanda, muy dúctil y con tenacidad alta. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros.*



**Figura 2.3.- Cristales de austenita (325X)**

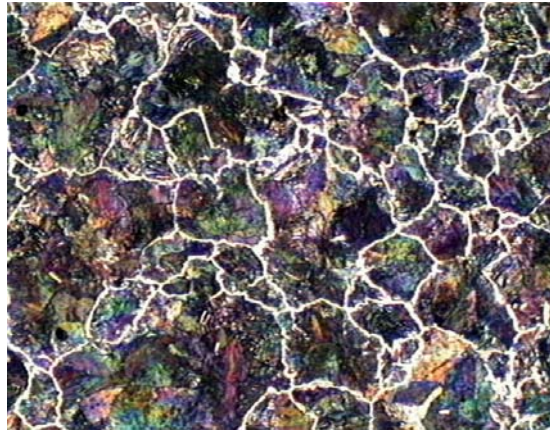
*La austenita en los aceros al carbono, empieza a formarse a la temperatura de 727°C y a partir de la temperatura crítica superior ( $A_3$ ), la totalidad de la masa del acero está formada por cristales de austenita. Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente, enfriando muy rápidamente una probeta de alto contenido de carbono o de muy alta aleación desde una temperatura por encima de  $A_3$ .*

*La cementita o carburo de hierro ( $Fe_3C$ ), contiene 6.67% de C por peso y 93.33% de hierro. Es un compuesto intermetálico con estructura ortorrómbica, de baja resistencia a la tensión (5000 lb/pulg<sup>2</sup> aproximadamente), pero de alta resistencia a la compresión, y una dureza superior a 68  $R_C$ . Es la estructura más dura y frágil de los aceros y cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico (estructura cristalina ortorrómbica), de gran tamaño. Es magnética a la temperatura ordinaria, pero pierde su magnetismo a la temperatura de 218 °C.*

*La cementita puede aparecer de las siguientes formas:*

- 1. Como cementita proeutectoide en los aceros con más de 0.8% de carbono, formando una red que envuelve los granos de perlita, figura 2.4, y también en forma de agujas finas.*

2. *Formando parte de la perlita, y en ese caso se le llama cementita perlítica o eutectoide, y toma la forma de láminas paralelas separadas por otra de ferrita.*
3. *Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos redondos dispersos en una matriz de ferrita, cuando los aceros de 0.8 a 1.4% de carbono han sufrido un recocido a temperaturas próximas a 721°C.*
4. *En los aceros hipereutectoides templados, aparece la cementita rodeada de martensita o de otros constituyentes de transición.*
5. *Como cementita terciaria, de forma alargada vermicular (forma de gusano), en las uniones de los granos de los aceros de bajo contenido en carbono (inferior a 0.25%).*



**Figura 2.4.- Red de Fe<sub>3</sub>C proeutectoide en un acero con 1.10% de carbono**

*La perlita ( $\alpha + Fe_3C$ ), es la mezcla eutectoide que contiene 0.80% de carbono y se forma a 727 °C bajo un enfriamiento muy lento o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de los 650 a 725°C. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene placas delgadas de cementita. Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 120000*

*lb/pulg<sup>2</sup> (80 kg/mm<sup>2</sup>); elongación, 20 % en 2 pulg; dureza, 20 R<sub>C</sub>, 95 – 100 R<sub>B</sub> ó BHN 250 – 300.*

*La distancia interlaminar de la perlita sirve para clasificarla en: Perlita gruesa con una separación entre las laminas de unas 400µm (400 milimicras), y una dureza de 200 Brinell, que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno. La perlita normal tiene 350µm y 250 Brinell de dureza. La perlita fina, que se obtiene cuando, se enfría dentro del horno muy rápido o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene 300 Brinell de dureza. Si la perlita se calienta durante algún tiempo a una temperatura un poco inferior a la temperatura crítica inferior (inferior a 727°C), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo el nombre de perlita globular. Para observar con claridad las laminas de la perlita gruesa en el microscopio óptico, suele ser necesario emplear unos 500 aumentos.*



**Figura 2.5.- Perlita en un acero eutectoide**

*La ledeburita es la mezcla eutéctica de austenita y cementita, contiene 4.3% de carbono y se forma a 1148°C. No es un constituyente de los aceros, sino de las fundiciones. Se encuentra en las aleaciones de hierro – carbono, cuando el porcentaje de carburo de hierro aleado es superior al 25%.*

*En la tabla 2.1, se resumen algunas propiedades de las estructuras presentes en el diagrama hierro – carburo de hierro.*

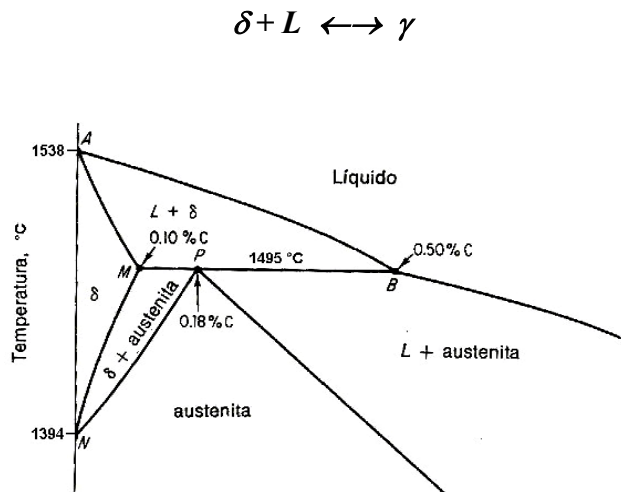
**Tabla 2.1** Propiedades más importantes de las estructuras del diagrama hierro - carburo de hierro.

ESTRUCTURA	$\sigma_{\text{Máx}}$ (Psi)	DUREZA (R <sub>C</sub> )	$\epsilon$ (%)
$\gamma$	150,000	40	10
Fe <sub>3</sub> C	5,000	68	0
Perlita.	120,000	20	20
$\alpha$	40,000	90 R <sub>B</sub>	40

**2.1.2.- Reacciones en el diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C**

*Del diagrama de equilibrio se puede ver que existen puntos importantes, en los que se llevan a cabo reacciones entre fases, a saber:*

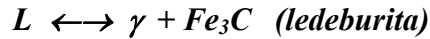
- a) *Una reacción peritética ocurre a 1495 °C entre la fase  $\delta$ , conteniendo 0.10 %C, y el líquido conteniendo 0.5 % C, dando como resultado fase  $\gamma$  conteniendo 0.18 %C, figura 2.6.*



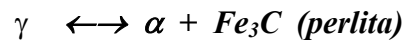
**Figura 2.6.-** Región delta del diagrama hierro - carburo de hierro.

- b) *Una reacción eutéctica ocurriendo a 1148 °C y una composición de 4.3 %C. A esta temperatura y composición la fase líquida esta en equilibrio con la fase sólida cementita, con 6.69 %C y austenita saturada conteniendo 2.11 %C. El producto de esta reacción se conoce como “ledeburita”.*





- c) Una reacción eutectoide ocurriendo a 727 °C y a una composición de 0.8 %C. Esta reacción se lleva a cabo en el estado sólido. Aquí la fase  $\gamma$  conteniendo 0.8 %C se encuentra en equilibrio con la fase  $\alpha$ , conteniendo 0.025 %C y con la fase cementita con 6.69 %C. El producto de esta reacción se conoce como “perlita”.



2.1.3.- Temperaturas críticas de los aceros.

Al estudiar el diagrama hierro – carburo de hierro, se ha visto que existen para cada acero diferentes temperaturas, en las que el calentamiento y en el enfriamiento, muy lento ocurren transformaciones de los constituyentes microscópicos. Ahora se estudiará con más detalle esas temperaturas, que se muestran en la figura 2.7.

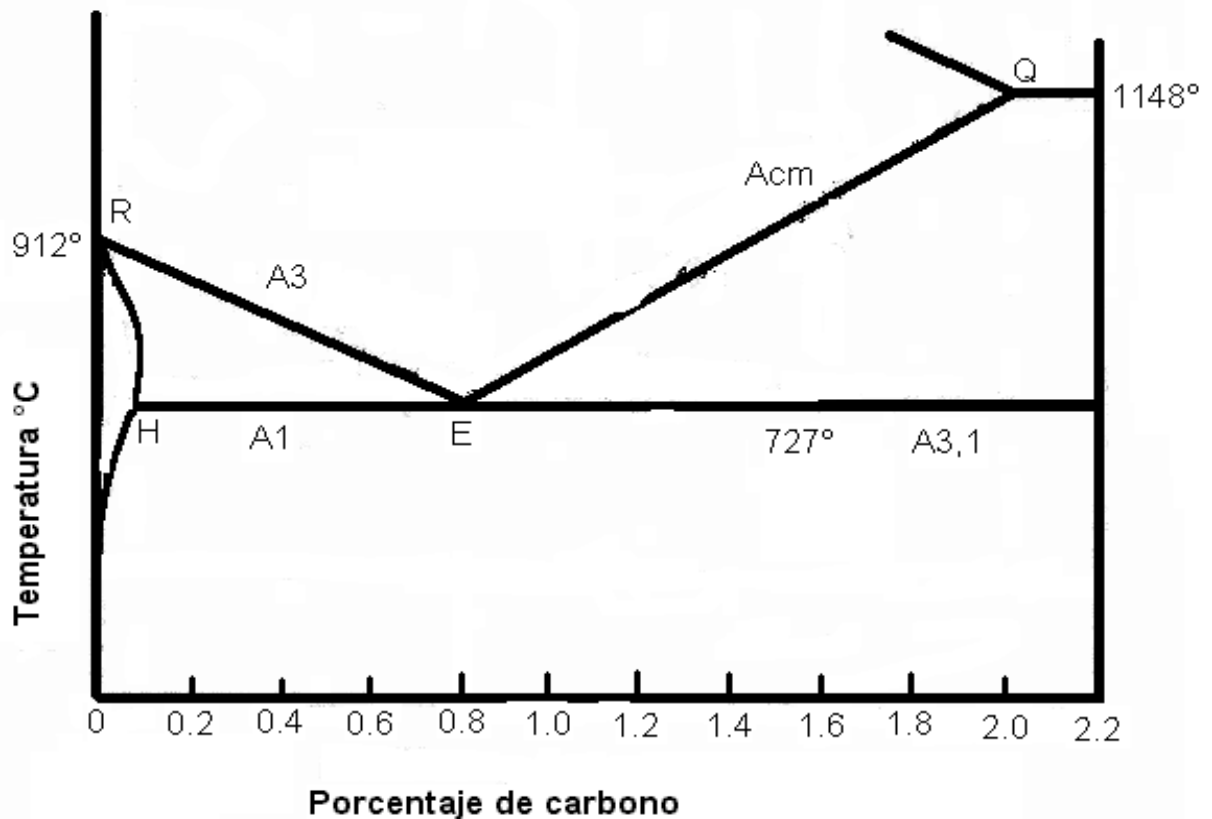


Figura 2.7.- Temperaturas críticas en los aceros.

*La línea  $A_3$ , esta formada por la unión del punto R con el punto E, a esa línea se le conoce como línea de temperatura crítica superior (y a cualquier temperatura que se encuentre en esa línea se le llama temperatura crítica superior), esta línea durante el enfriamiento marca el principio de la transformación de austenita en ferrita proeutectoide. Conforme disminuye la temperatura (912°C a 727°C), la cantidad de carbono se incrementa hasta alcanzar la composición eutectoide.*

*La línea  $A_1$ , formada por la unión del punto H con el punto E, se le conoce como línea de temperatura crítica inferior, y marca el fin de la transformación de la austenita en ferrita y perlita del lado hipoeutectoide. Esta línea se encuentra ubicada a temperatura constante de 727° C y (a esta temperatura se le conoce como temperatura crítica inferior) para cualquier composición de carbono hasta de 0.8% de carbono, en donde toda la austenita se transforma en perlita.*

*La línea  $A_{cm}$ , se forma al unir los puntos E y Q, y se conoce como línea de temperatura crítica superior, (del lado hipereutectoide) dicha línea parte del punto E que se encuentra a la temperatura de 727°C y con 0.8% de carbono, y llega hasta el punto Q que está a la temperatura de 1148°C y con 2% de carbono. Esta línea marca el inicio de la transformación de la austenita a cementita proeutectoide.*

*La línea  $A_{31}$ , se conoce como línea de temperatura crítica inferior (del lado hipereutectoide), ésta línea marca el fin de la transformación de la austenita en perlita durante el enfriamiento y se encuentra a una temperatura de 727°C, con un intervalo de composición entre 0.8% a 6.67% de carbono.*

*A las líneas antes mencionadas, con frecuencia se les designa con subíndices adicionales, los cuales son c ó r. En pocas palabras, estos subíndices se usan para indicar un corrimiento de las temperaturas a las cuales ocurre la transformación, debido al tiempo requerido para la*

*difusión o precipitación, y al hecho de que es impráctico aproximarse a un calentamiento o enfriamiento infinitamente lentos.*

*La letra c, indica calentamiento, y denota el corrimiento de la línea con el aumento de temperatura conforme se agrega calor. La letra r, indica enfriamiento, y denota un corrimiento de la línea con la disminución de la temperatura con forme se quita calor. La posición de las líneas  $A_c$  y  $A_r$  depende de la relación de calentamiento o enfriamiento. Mientras más rápida es la relación mas lejos se separaran de las líneas básicas, que solo se aplican a las condiciones de equilibrio.*

## 2.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.

*Un acero es una aleación de hierro (Fe) con carbono (C), con un contenido de éste último en un rango de 0.0025 hasta el 2% y pequeñas cantidades de otros elementos que se consideran como impurezas, tales como; P, S, Mn, Si, Cu, etc.*

*Los aceros se pueden clasificar de varias formas, describiéndose a continuación las más importantes:*

- 1. Clasificación de los aceros atendiendo a su procedimiento de fabricación. Según el procedimiento de fabricación se clasifican los aceros en: aceros Bessemer, aceros Thomas, aceros Siemens (en Francia e Italia, éstos aceros se denominan aceros Martín), aceros eléctricos, aceros al crisol y hierros pudelados.*
- 2. Clasificación de los aceros atendiendo a su porcentaje de carbono. Se denominan aceros hipoeutectoides a los aceros cuyo porcentaje de carbono es inferior al del punto eutectoide; se denominan aceros eutectoides, si su porcentaje de carbono es igual al del punto eutectoide, y se denominan aceros hipereutectoides si su porcentaje de carbono es superior al del punto eutectoide. El punto eutectoide tiene un porcentaje de carbono del 0.8%.*

3. *Clasificación de los aceros atendiendo al grado de desoxidación. Los aceros calmados son los que se han desoxidado por completo y al solidificarse no desprenden gases. Los aceros efervescentes son los que se han desoxidado incompletamente y al solidificarse desprenden abundantes gases.*
  
4. *Clasificación de los aceros atendiendo a su estructura final. La clasificación se podrá hacer sin reservas, haciendo constar que se refiere a la estructura final de los aceros de un diámetro máximo de 25 mm, o el redondo equivalente en perfiles de otra sección, calentados hasta la austenitización completa y enfriados al aire. Con arreglo al constituyente predominante con que quedan los aceros en las condiciones antes dichas, se acostumbra clasificarlos en aceros perlíticos, aceros martensíticos, aceros austeníticos, aceros ferríticos y aceros con carburos.*
  
5. *Clasificación de los aceros atendiendo a su composición. Según sea su composición, se pueden dividir los aceros en tres clases fundamentales a saber: aceros al carbono, aceros aleados y aceros alta aleación.*
  - *Los aceros al carbono o aceros simples, están formados fundamentalmente por hierro y carbono y se dividen en:*
    - *Aceros de bajo carbono. Con un contenido de carbono desde 0.025%, hasta 0.3%.*
    - *Aceros de medio carbono. Con un contenido de carbono desde 0.3%, hasta 0.65%.*
    - *Aceros de alto carbono. Su rango comprende desde 0.65% de carbono, hasta 2% de carbono.*
  
  - *Los aceros aleados son los que contienen además de carbono e impurezas, elementos de aleación voluntaria como: cromo, níquel, molibdeno, vanadio, tungsteno, silicio, etc, pero con la condición de que la suma de los elementos aleantes sea menor del 5%.*

- *Los aceros alta aleación se dividen en aceros inoxidable y aceros para herramienta. Todos los aceros inoxidables contienen un mínimo de 12% de Cr, y de ellos se hablará más adelante*
  
- *Los aceros para herramienta son aquellos aceros especiales de alta calidad, utilizados para cortar, moldear o para dar forma a otro material. Estos aceros son duros y resistentes al desgaste, tiene excelente templabilidad, mínima distorsión durante la aplicación de algún tratamiento térmico y contienen buena dureza al rojo. Los aceros para herramienta se dividen en siete grupos de acuerdo a la clasificación desarrollada por AISI (American Iron and Steel Institute) y adoptado en México como Norma Oficial Mexicana (NOM), y a cada grupo se le ha asignado una letra del alfabeto; se clasifican en:*
  - ◆ *Templables en agua. (grupo W)*
  - ◆ *Resistentes al impacto. (grupo S)*
  - ◆ *Trabajo en frío. (grupos O, A y D)*
  - ◆ *Trabajo en caliente. (grupo H)*
  - ◆ *Alta velocidad. (grupos T y M)*
  - ◆ *Para moldes. (grupo P)*
  - ◆ *Propósitos especiales. (grupos L y F)*

**2.2.1.- Sistemas de identificación para aceros simples y aleados.**

*Este sistema de identificación esta constituido por cuatro dígitos, los cuales proporcionan diferente información acerca del acero. Esta designación para los aceros simples y aleados es aceptada como norma por el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), y que en nuestro país fue aceptada como Norma Oficial Mexicana (NOM), en la tabla 2.2 se muestra dicho sistema de identificación.*

**Tabla 2.2.- Sistema de identificación de los aceros simples y aleados.**

<b>Elementos de aleación</b>	<b>Familia</b>
<b>C</b>	<b>1xxx</b>
<b>Ni</b>	<b>2xxx</b>
<b>Cr. – Ni.</b>	<b>3xxx</b>
<b>Cr. – Mo.</b>	<b>4xxx</b>
<b>Cr.</b>	<b>5xxx</b>
<b>Cr. – V.</b>	<b>6xxx</b>
<b>Cr. – Ni. – Mo.</b>	<b>8xxx</b>
<b>Cr. – Si.</b>	<b>9xxx</b>

*El sistema de identificación AISI-SAE-NOM para los distintos grados de acero indica cual es el contenido de carbono, así como algunas otras características de acuerdo a lo siguiente:*

- AISI establece una categoría para los aceros dentro de un sistema de grados identificados por los dos primeros dígitos. En un grado AISI 1018, el “10” significa que este acero es un acero al carbono no resulfurado. El azufre se añade típicamente al acero para aumentar su maquinabilidad.*
- El segundo conjunto de dígitos proporciona el rango de carbono en porcentaje, dado como el nominal. Esto es, un grado identificado como 1018 significa que es un acero al carbono no resulfurado con contenido de carbono nominal de 0.18 %. Así, añadiendo el decimal después de los primeros dos dígitos, permite conocer el contenido nominal de carbono de todos los aceros en el sistema de graduación AISI.*

## TECNOLOGÍA DE MATERIALES II

- *Si hay una letra en el centro de la designación, tal como 12L14 o 11L17, la letra indica un elemento añadido. Para determinar el contenido de carbono, hay que añadir el decimal después del carácter alfa.*

## **CAPÍTULO 3**

### **TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICABLES A LOS ACEROS**

#### **3.1.- DEFINICIÓN**

*Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento cuidadosamente controlados, y que se aplican a un metal o aleación en estado sólido, con el fin de obtener ciertas propiedades deseadas para su empleo.*

*Los tratamientos térmicos no modifican la composición química del acero, y sí tres factores que caracterizan las aleaciones hierro – carbono, como son: constitución, estructura y estado mecánico.*

*Con los tratamientos térmicos se modifica la constitución del acero, modificando el estado en que se encuentra el carbono, y el estado alotrópico del hierro; se modifica la estructura variando el tamaño del grano y el reparto de los constituyentes. El estado mecánico también queda afectado por los esfuerzos a que quedan sometidos los materiales después de algunos tratamientos térmicos, principalmente después del temple.*

*Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.*

#### **3.2.- DIAGRAMAS TTT Y CCT.**

*Hasta principios del siglo XX, el único diagrama utilizado para el estudio de las transformaciones de la constitución de las aleaciones era el diagrama hierro –carburo de hierro. Pero en 1930, los metalurgistas Bain y Davenport, estudiando la transformación de la austenita a temperaturas constantes, desarrollaron un diagrama que denominaron TTT*



*(diagrama de Transformación-Tiempo- Temperatura), que constituye el más valioso auxiliar para el estudio de los tratamientos térmicos. Como no es posible tomar en consideración todas las condiciones de enfriamiento que se dan en la práctica, se han seleccionado en general dos tipos de procesos de enfriamiento, a saber: la transformación isotérmica y la transformación por enfriamiento continuo.*

*La transformación isotérmica significa que la transformación tiene lugar a temperatura constante. Para conseguirlo, es necesario enfriar el acero desde, la temperatura de temple (zona austenítica), tan rápido como sea posible hasta una temperatura determinada, de tal modo que al llegar a ella no se haya producido ninguna transformación, luego, se mantiene el acero a esa temperatura y se fija el tiempo hasta que se inicie la transformación y hasta que la misma haya concluido.*

*Los diagramas de transformación isotérmicas, no son diagramas de equilibrio. Ellas indican los cambios que ocurrirían con el tiempo como variable. Un diagrama de equilibrio no muestra cambios con el tiempo.*

### **3.2.1.- Construcción de un diagrama TTT.**

*La mejor forma de entender los diagramas de transformación isotérmica es estudiando su obtención. La composición de 0.8% de carbono es la más simple de estudiar.*

*Los pasos que generalmente se siguen para determinar un diagrama TTT son:*

- 1. Cortar un gran número de muestras. La sección transversal tiene que ser pequeña para que reaccione rápidamente a los cambios de temperatura.*
- 2. Colocar las muestras en el horno a la temperatura de austenitización adecuada (para un acero 1080 esta temperatura es de 774°C, aproximadamente). Se deben*

*dejar a la temperatura dada por un tiempo suficiente para que toda la estructura del acero se transforme en austenita.*

3. *Colocar las muestras en un baño de sal fundida que se mantenga a una temperatura constante subcrítica (por ejemplo 704°C), es decir, a una temperatura por debajo de la línea  $A_1$ .*
4. *Después de variar los intervalos de tiempo en el baño de sal, cada muestra se temple en agua fría o en salmuera enfriada con hielo.*
5. *Después del enfriamiento, a cada muestra se le toma la dureza y se estudia microscópicamente.*
6. *Los pasos anteriores se repiten a diferentes temperaturas subcríticas hasta que se determinen suficientes puntos para graficar las curvas en el diagrama.*

*Realmente hay interés en saber qué efectos tiene la austenita a 704°C, pero las muestras no pueden estudiarse a esa temperatura, por lo tanto, se debe relacionar de alguna manera el examen microscópico a temperatura ambiente con lo que está sucediendo a la temperatura elevada. Dos puntos deben tener en cuenta:*

- *La martensita se forma sólo de la austenita casi instantáneamente a bajas temperaturas.*
- *Si la austenita se transforma a una temperatura mayor a una estructura estable a temperatura ambiente, un rápido enfriamiento no cambiará el producto de transformación. En otras palabras, si la perlita se forma a 704°C, la perlita será exactamente la misma a temperatura ambiente no importa qué tan drásticamente se temple, ya que no hay razón para que la perlita cambie.*

La figura 3.1 muestra esquemáticamente los pasos 3, 4 y 5.

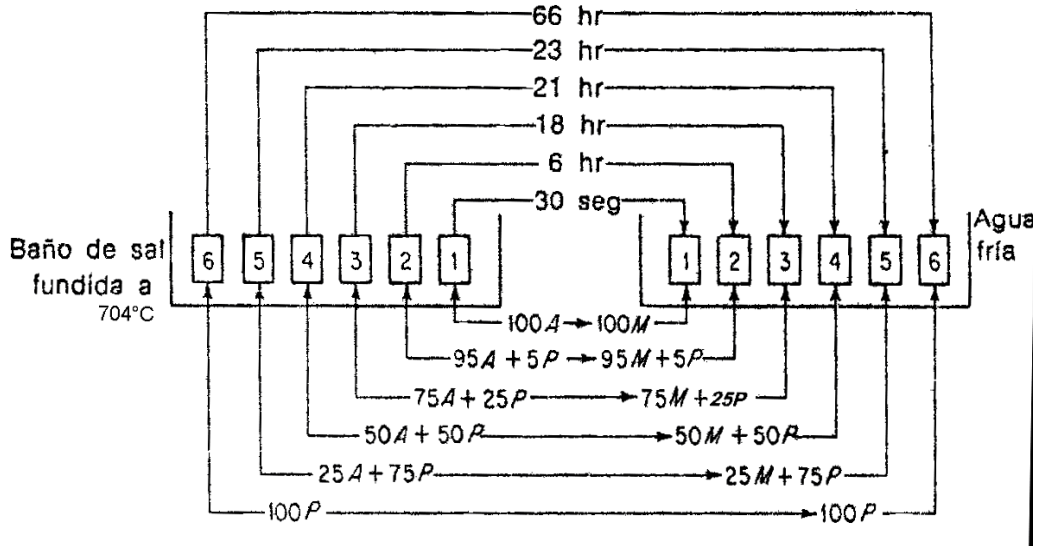
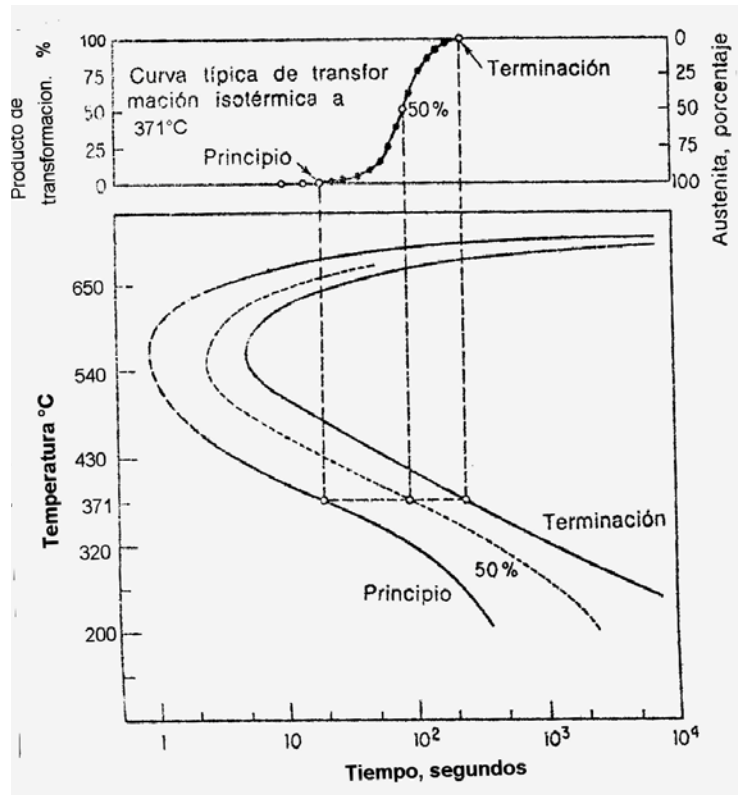


Figura 3.1.- Proceso de transformación de la austenita a 704°C, para la construcción de un diagrama TTT.

La muestra 1, después de 30 segundos a 704 °C y templada, mostró sólo martensita a temperatura ambiente. Como la martensita se forma sólo de la austenita a bajas temperaturas, significa que al final de los 30 segundos a 704 °C sólo había austenita presente y que la transformación todavía no había empezado. La muestra 2, después de 6 horas a 704 °C y templada, reveló un 95% de martensita y 5% de perlita gruesa a temperatura ambiente, significa que al final de las 6 horas a 704 °C había 95% de austenita y 5% de perlita gruesa. Empleando el mismo razonamiento anterior se pueden estudiar el avance de transformación de las muestras restantes.

Como resultado de este experimento, la representación de la transformación isotérmica de la austenita, se realiza llevando al eje de las ordenadas las temperaturas de transformación, y al eje de las abscisas los tiempos de duración de la transformación en escala logarítmica, partiendo de un tiempo muy pequeño, pero nunca de cero.

*Las curvas se trazan anotando en la horizontal que pasa por cada temperatura los puntos de inicio y fin de la transformación de la austenita, y muchas veces también los de un 25% de transformación, un 50% y un 75%. Se unen todos los puntos de iniciación de la transformación y de los del 25%, del 50%, del 75% y del fin de la transformación de la austenita. Esto se repite a diferentes temperaturas subcríticas hasta que se determinan suficientes puntos para dibujar una curva que muestra el principio de la transformación, otras curva que indique el fin de la transformación, y una curva punteada entre ambas que muestre el 50%, con esto se obtiene una serie de curvas que en general tiene forma de S, como se muestra en la figura 3.2*

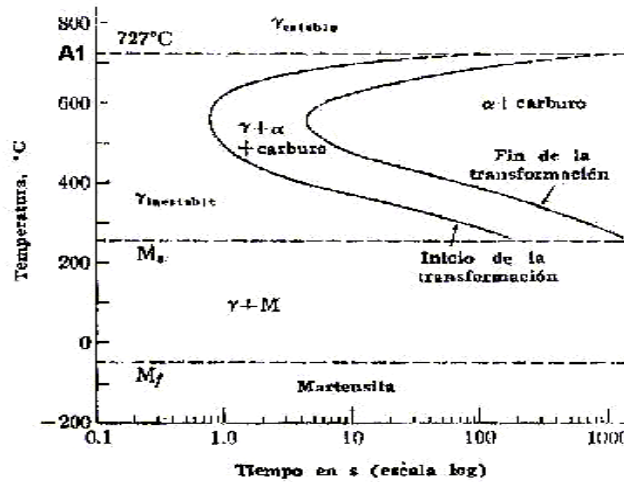


**Figura 3.2.- Esquema de un diagrama TTT**

*Para construir un diagrama razonablemente, se requiere del estudio de más de 100 muestras.*

**3.2.2.- Zonas que integran un diagrama TTT.**

*En la figura 3.3 se muestra un diagrama TTT, de un acero eutectoide, en el cual se muestran las zonas que lo integran.*



**Figura 3.3.- Zonas que integran un diagrama TTT**

*Por arriba de  $A_1$ , la austenita es estable. El área a la izquierda del principio de la transformación consta de austenita inestable; el área a la derecha de la línea del fin de la transformación es el producto al que se transformará la austenita a temperatura constante; y el área entre el principio y el fin de la transformación, consta de tres fases, austenita, ferrita y carburo, o austenita más el producto al que se transforma. El punto al principio de la línea de transformación más alejado a la izquierda se conoce como nariz del diagrama.*

*La línea recta  $M_s$ , representa la transformación de la austenita en martensita a una temperatura constante. En algunos diagramas, los datos de formación de la martensita se obtuvieron mediante una técnica metalográfica; o con la fórmula:*

$$M_s = 500 - 350*(\%C) - 40*(\%Mn) - 35*(\%V) - 20*(\%Cr) - 17*(\%Ni) - 10*(\%Cu) - 10*(\%Mo) - 5*(\%W) + 15*(\%Co) + 30*(\%Al)$$

De acuerdo con esto, se completo el diagrama TTT con dos líneas horizontales:  $M_S$ , que representa la temperatura de inicio de la transformación de la austenita en martensita, y la otra línea,  $M_F$ , que representa la temperatura a la cual termina la transformación, las cuales dependen de la cantidad de carbono que esté presente, como se muestra en la figura 3.4.

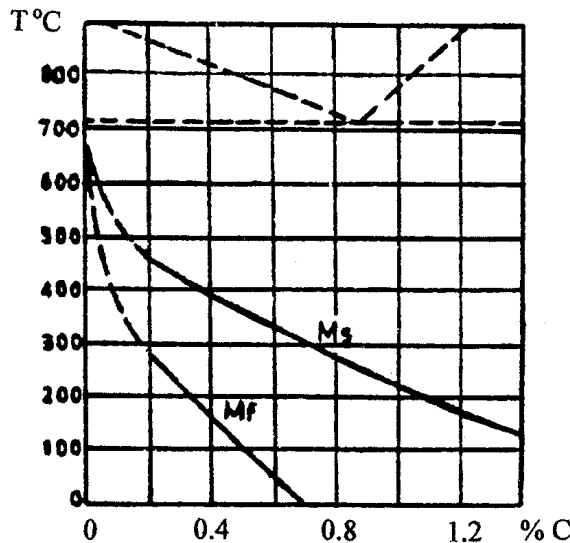


Figura 3.4.- Temperaturas de formación de la martensita en función del contenido de carbono

El efecto de los elementos aleantes (por ejemplo, Cr, Ni, Si, Mn, Mo, Ti, etc.), en el diagrama TTT, es desplazar dicho diagrama a hacia la derecha, esto se debe a que se difunden más lentamente en el hierro que en el carbono. De hecho, es fácil enfriar muchos aceros de baja aleación hasta temperatura ambiente evitando totalmente la nariz de la curva de transformación y formar así martensita.

Los diagramas de transformación isotérmica, muestran que las reacciones ocurren con lentitud a temperaturas relativamente bajas y a temperaturas cercanas a la transformación intermedias, la transformación ocurre más rápido porque hay suficiente fuerza impulsora, para ayudar a nuclear las nuevas fases y la difusión atómica es muy rápida. Con un enfriamiento extremadamente rápido, es posible evitar la nariz de la curva de transformación, y enfriar el acero hasta la temperatura ambiente sin obtener ferrita y carburo, debido a que la

*descomposición es sustituida por la transformación martensítica. De hecho, este es el propósito de templar el acero en las operaciones de tratamientos térmicos*

**3.2.3.- Transformación de la austenita en perlita.**

*En el producto de la transformación por encima de la nariz es perlita. De 717°C a 550°C, la austenita se transforma isotérmicamente en hierro  $\alpha$  + carburo de hierro en la forma de perlita. Si un acero se temple justo por debajo de la temperatura eutectoide, la austenita se subenfria sólo un poco. Se requieren tiempos prolongados antes de que se formen núcleos estables para la ferrita y la cementita. Después de que la perlita empieza a crecer, los átomos se difunden rápidamente, a temperaturas muy próximas al eutectoide, para formar láminas de ferrita ( $\alpha$ ) y de  $Fe_3C$ , a esta microestructura se le llama perlita gruesa.*

*La austenita obtenida a una temperatura menor esta sumamente subenfriada. En consecuencia, la nucleación ocurre más rápidamente. Sin embargo, la difusión es también lenta, de modo que los átomos sólo se difunden a distancias cortas. A medida que disminuye la temperatura, se forman láminas más delgadas, ya que la velocidad de difusión del carbono decrece, a esta estructura de láminas delgadas se le llama perlita fina.*

*Aunque las velocidades de crecimiento son menores, el tiempo total requerido para la transformación se reduce debido a la nucleación rápida. Fácilmente, se forma una perlita más fina en tiempos más cortos conforme se reduce la temperatura de transformación isotérmica hasta unos 550°C, lo cual determina la nariz de la curva TTT,*

**3.2.4.- Transformación de la austenita en bainita.**

*A una temperatura justo por debajo de la nariz del diagrama TTT (aproximadamente 550°C), y hasta la temperatura  $M_s$ , aparece un microconstituyente de ferrita y cementita, la nucleación ocurre rápidamente pero la difusión es lenta. No se detecta transformación hasta tiempos un poco mayores, y los tiempos de transformación total se incrementan debido a un crecimiento muy lento.*

*Además, se tiene una microestructura diferente. A bajas temperaturas de transformación, las laminillas en la perlita tendrían que ser sumamente delgadas y en consecuencia, el área límite entre la ferrita y las laminillas  $Fe_3C$  sería muy grande. Debido a la energía asociada con la interfase ferrita – cementita, la energía total del acero tendrían que ser muy alta. El acero puede reducir su energía interna permitiendo que la cementita se precipite como partículas discretas redondeadas en una matriz de ferrita. Este nuevo microconstituyente, o arreglo de ferrita y cementita, es llamado bainita.*

*Fue Bain, al estudiar la transformación de la austenita a temperatura constante, cuando enfriaba una serie de probetas desde altas temperaturas (estado austenítico) en baños de sales fundidas y observaba las estructuras obtenidas. Los discípulos de Bain llamaron bainita a este constituyente que se forma en la transformación de la austenita, cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250°C a 600°C aproximadamente.*

*Los tiempos requeridos para que la austenita inicie y termine su transformación a bainita se incrementan y la bainita se vuelve más fina conforme la temperatura de transformación continúa decreciendo. En la bainita se aprecian dos tipos de estructuras:*

- *La bainita que se forma justo por debajo de la nariz del diagrama TTT, se denomina bainita gruesa, bainita superior o bainita tipo pluma. La bainita superior de aspecto arborescente, formada en el rango de 500°C a 550°C, esta constituida por una matriz ferrítica conteniendo carburos (en los aceros al carbono, cementita). Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de la aguja de la propia bainita.*
- *La bainita que se forma a temperaturas más bajas se llama bainita fina, bainita inferior o bainita acicular. La bainita inferior, formada entre 250°C – 400°C, que tiene un aspecto acircular bastante parecido a la martensita. La bainita inferior esta constituida por agujas alargadas de ferrita que contiene placas delgadas de*



*carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre sí y su dirección forma un ángulo de 60° con el eje de las agujas de ferrita.*

*La dureza de la bainita varía desde 40 R<sub>C</sub> (para la bainita superior), hasta 60 R<sub>C</sub> aproximadamente (para la bainita inferior). Este incremento de dureza (como en la perlita), es el reflejo del decremento en tamaño y espaciamiento de las plaquetas de carburo conforme la temperatura de transformación disminuye, es decir, la dureza aumenta por que el carburo se está volviendo cada vez más fino y, en consecuencia, la distancia a la cual puede ocurrir el deslizamiento en la ferrita se hace más pequeño*

### 3.2.5.- Transformación de la austenita en martensita.

*Por debajo de 215°C y hasta -20°C, la austenita se transforma de una manera bastante diferente a las transformaciones isotérmicas que se mencionaron con anterioridad a la cual se le denomina martensita.*

*La martensita se obtiene enfriando rápidamente el acero desde la zona austenítica hasta una temperatura inferior a M<sub>s</sub>.*

*Después de los trabajos de Bain y Davenport, se comprobó que la martensita es una fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión. Debido a que la reacción no depende de la difusión, la reacción martensítica es atérmica, es decir, que la reacción depende sólo de la temperatura y no del tiempo.*

*En contraste a la transformación de nucleación y crecimiento de la perlita y la bainita, en la transformación martensítica no está involucrada ninguna difusión del carbono. Por el contrario, ocurre por el corte coordinado sistemático de la malla de la antigua fase en tal forma que la distancia que recorre un átomo es menor a un espaciado atómico, lo que significa que un átomo retiene a los mismos vecinos; en consecuencia, una transformación*

*martensítica puede conducir solamente a cambios de la estructura cristalina, y no en la composición de las fases.*

*La transformación de la estructura cristalina significa que la austenita FCC. experimenta una transformación polimórfica a la martensita tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). La celda unitaria de esta estructura cristalina es un cubo, alargado en una de sus tres dimensiones, centrado en el cuerpo; esta estructura es diferente a la ferrita BCC. Todos los átomos de carbono permanecen como solutos intersticiales en la martensita y constituyen una disolución sólida sobresaturada capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a temperaturas que implican una apreciable velocidad de difusión. La mayoría de los aceros retiene la estructura martensítica casi indefinidamente a temperatura ambiente.*

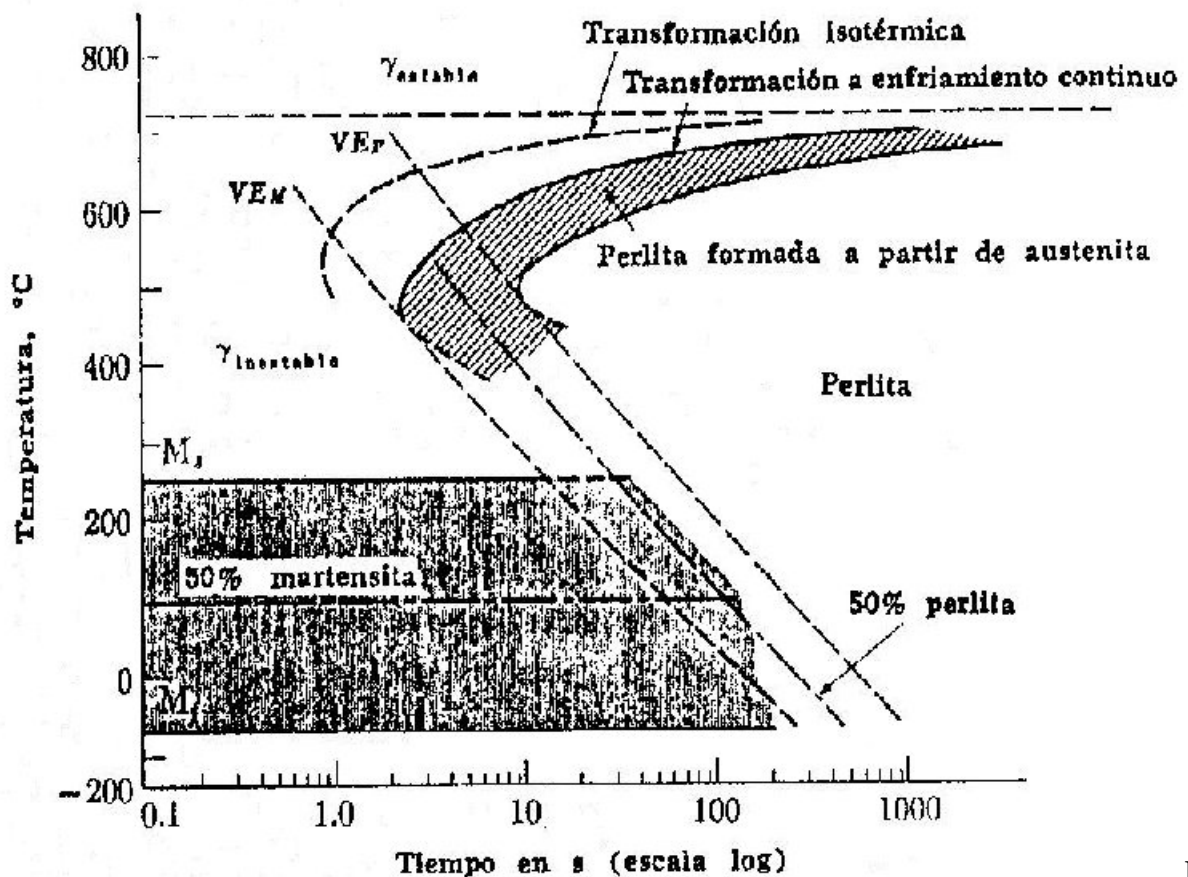
*Por último, es de especial importancia, observar que una vez que la austenita se ha transformado en alguna de las estructuras mencionadas antes, perlita por ejemplo, no se puede transformar en otra a menos que se caliente la pieza a la temperatura de equilibrio de la austenita (por encima de 727 °C). Sin embargo, es posible transformar una muestra en una mezcla de productos de transformación si se le mantiene primero durante un momento en el intervalo de transformación de la perlita y la bainita y luego se le enfría a través del intervalo de la martensita.*

### 3.2.6.- Diagrama CCT.

*Las curvas obtenidas en los diagramas TTT, corresponden a transformaciones de la austenita a temperatura constante. Pero, como en general, los procesos de enfriamiento seguidos en los tratamientos de los aceros no son isotérmicos, sino de enfriamiento continuo, a estos diagramas se les conoce como diagramas CCT. Hay una pequeña diferencia entre la temperatura de principio de transformación determinadas gráficamente en los diagramas TTT y las comprobadas en los enfriamientos de los tratamientos térmicos.*

*Vamos a considerar los avances de la composición de la austenita con diferentes velocidades de reacción dadas por el enfriamiento continuo. Un temple severo evitará la nariz de la curva de transformación, con el resultado que la austenita se transforma en martensita en vez de*

perlita. El enfriamiento lento y continuo permite la formación de perlita; sin embargo, la primera descomposición ocurre después de un tiempo mayor (y por lo tanto, a una menor temperatura), que el necesario en una transformación isotérmica, simplemente porque parte del tiempo se mantuvo a altas temperaturas, donde la rapidez de reacción se inició con más lentitud. Así las curvas de transformación isotérmicas se desplazan hacia abajo y a la derecha en el caso de las transformaciones durante enfriamiento continuo, como se muestra en la figura 3.5.



Fig

Figura 3.5.- Diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo de un acero eutectoide

Existen dos velocidades críticas de enfriamiento para la descomposición de la austenita bajo enfriamiento continuo y se encuentran incluidas en la figura 3.5. La primera es la velocidad de enfriamiento,  $VE_M$ , la cual apenas evita la nariz de la curva de transformación; velocidades de enfriamiento más rápidas que se encuentran a la izquierda de la curva  $VE_M$ , producen sólo

*martensita. La segunda es la velocidad de enfriamiento  $VE_P$ , la cual no produce martensita; velocidades de enfriamiento menos rápidas, que se encuentran hacia la derecha de la curva  $VE_P$ , producen sólo perlita. En un acero eutectoide, estas dos velocidades críticas de enfriamiento son aproximadamente  $1470^\circ\text{C/s}$  y  $35^\circ\text{C/s}$ , respectivamente, en el intervalo de  $750$  a  $500^\circ\text{C}$ . Ambas velocidades son significativamente menores en cualquier acero que contenga elementos de aleación, pues el contenido de aleantes disminuye la velocidad de la reacción  $\gamma \rightarrow (\alpha + C)$ .*

### **3.3.- TEMPLE DE LOS ACEROS (TEMPLADO)**

*El temple es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros y algunas aleaciones no ferrosas. Su principal finalidad es, aumentar su dureza y resistencia mecánica, aunque al mismo tiempo su ductilidad y tenacidad se ven seriamente afectadas*

*El temple consiste en calentar el acero por arriba de la temperatura crítica superior (sumándole de  $30$  a  $50^\circ\text{C}$ ), después, hay que dejar un cierto tiempo a esa temperatura ( $1$  hora \*  $25$  mm ó  $1$  hora \*  $1$  pulgada de espesor o diámetro), y para finalizar se enfría rápidamente, para evitar la transformación de la austenita en ferrita + carburo, figura 3.6.*

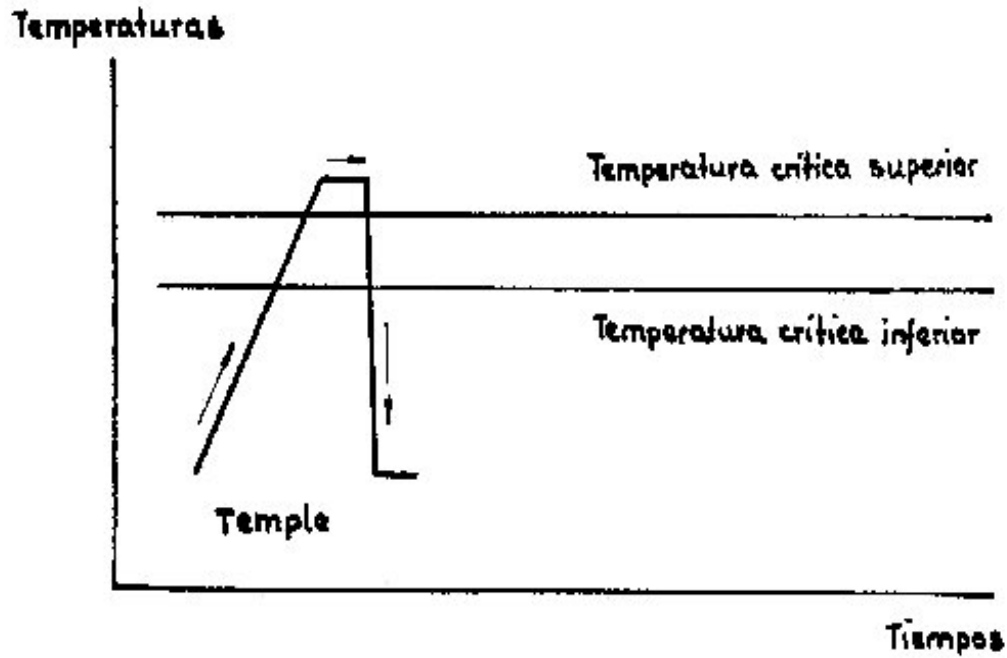


Figura 3.6.- Esquema del temple en los aceros

De esta manera, se obtiene una fase metaestable conocida como martensita con una estructura tetragonal de cuerpo centrado (BCT) que posee una alta dureza pero que es extremadamente frágil, figura 3.7.

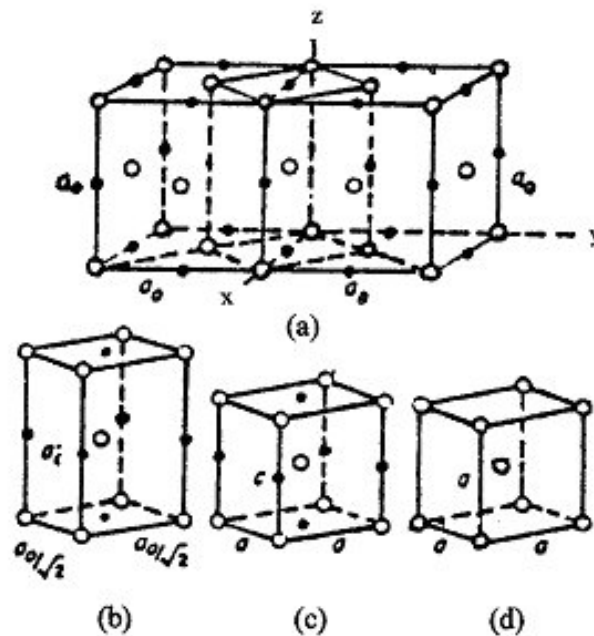
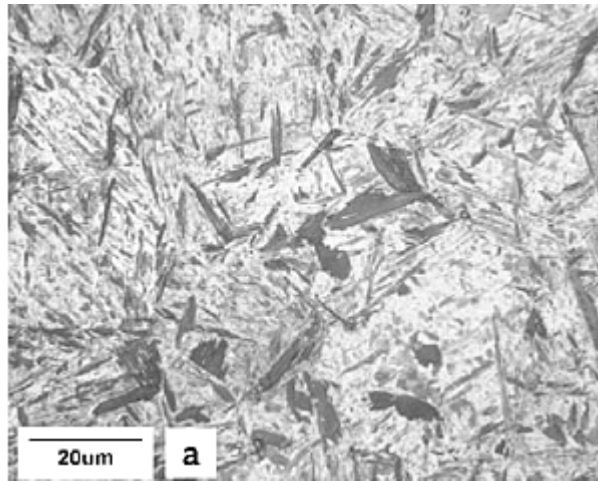


Figura 3.7.- Distorsión de Bain en la transformación martensítica de los aceros. (a) Dos celdas FCC de la Austenita mostrando una celda tetragonal; (b) Representación tetragonal de la austenita; (c) Celda Tetragonal de la martensita y (d) Celda cúbica a cuerpo centrado de la ferrita.

*Vista al microscopio, Osmod describía así a la martensita: “pueden verse agujas o fibras rectilíneas aún más finas orientadas en direcciones paralelas y separadas o no por una matriz de apariencia granular o vermicular”, figura 3.8.*



**Figura 3.8.- Agujas de martensita**

*Para tener un buen templeado, el contenido de carbono debe ser al menos, mayor o igual a 0.35%, independientemente del tipo de acero de que se trate.*

### **3.3.1.- Medios de temple**

*El medio de enfriamiento más adecuado para templear un acero es aquel que consiga una velocidad del temple ligeramente superior a la crítica. No sólo es necesario, sino que es perjudicial que la velocidad de temple sea excesivamente grande, pues se corre el peligro de producir grietas y esfuerzos, debido al desigual enfriamiento de las piezas entre la superficie y el interior de ellas. Si el enfriamiento es lento es más uniforme.*

*A continuación se mencionan los principales medios de temple (ordenados en forma descendente de acuerdo a la severidad con que extrae el calor), así mismo, se especifican los aceros en que son aplicables:*

- ✧ *Salmuera → Acero simple.*
- ✧ *Agua → Acero simple.*
- ✧ *Aceite → Aceros aleados y de alta aleación*
- ✧ *Sales fundidas → Aceros de alta aleación*
- ✧ *Aire → Aceros de alta aleación*

Al sumergir un acero (con una temperatura alta) en un líquido, tienen lugar las siguientes etapas, como se muestra en la figura 3.9, y que posteriormente se describen.

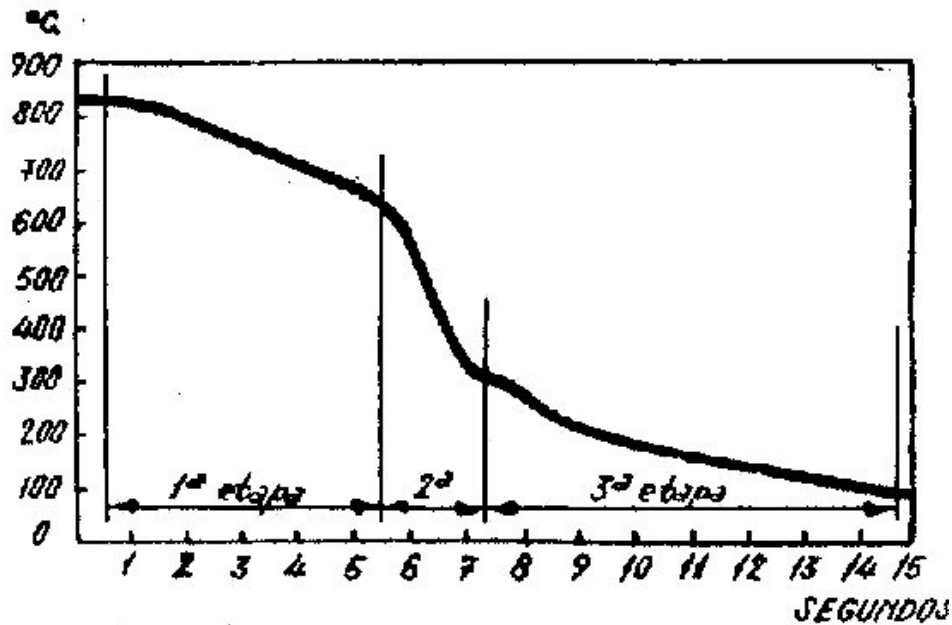


Figura 3.9.- Etapas presentes en el temple de un acero

- ❖ *Etapa I. Inmediatamente después de introducir el acero, se forma una capa de vapor que envuelve el metal y que dificulta el enfriamiento, por esta razón el enfriamiento es bastante lento. Influyen en esta etapa la temperatura del baño, la temperatura de ebullición, la conductividad de su vapor y el grado de agitación del baño, que remueve el líquido en contacto con el acero.*
- ❖ *Etapa II. Al descender la temperatura desaparece la envolvente de vapor aunque el líquido en contacto con el metal sigue hirviendo y produciendo burbujas. El enfriamiento es rápido y se denomina enfriamiento por transporte de vapor. Influye en esta etapa el calor de evaporización y la viscosidad del líquido.*
- ❖ *Etapa III. Cuando la temperatura del metal desciende por debajo de la temperatura de ebullición del líquido de temple, el enfriamiento se hace por conducción y por convección, pero como entonces la diferencia de temperatura*

*entre el metal y el medio es pequeña, el enfriamiento es lento, dependiendo de la conductividad térmica del líquido y de su grado de agitación.*

### 3.3.2.- La templabilidad.

*Se puede definir la templabilidad como la capacidad que tiene un acero de endurecer a profundidad por medio del temple.*

*Cuando un acero se temple, la velocidad de enfriamiento es máxima en la superficie y disminuye hacia el centro. La formación de martensita sólo ocurre en la parte de la pieza, donde se logró superar “la velocidad crítica” de enfriamiento. Para aceros no aleados la velocidad crítica es tan alta, que sólo se obtiene una capa relativamente delgada, aún templando en agua. El transcurso de la velocidad de enfriamiento desde la superficie hasta el centro de la pieza, está determinado por la relación entre masa y superficie y es función del diámetro de la pieza.*

*La figura 3.10 representa en forma esquemática la velocidad de enfriamiento en función del diámetro de una barra cilíndrica para tres tipos de acero con un templado en agua, aceite y al aire.*

*De la figura, se puede ver que el acero al carbono, I, templado en agua, sólo alcanza la velocidad crítica  $V_{CI}$  en una capa delgada. Después del temple este acero sólo presentará una zona muy delgada con estructura martensítica.*

*La velocidad crítica  $V_{CII}$  para el acero al níquel, II, es mucho más baja, de modo que aún templado en aceite, el material experimenta una transformación martensítica más profunda.*

*Finalmente, la velocidad crítica  $V_{CIII}$  es tan baja que el acero al Cr-Ni, III, se transformará completamente en martensita con un enfriamiento al aire.*



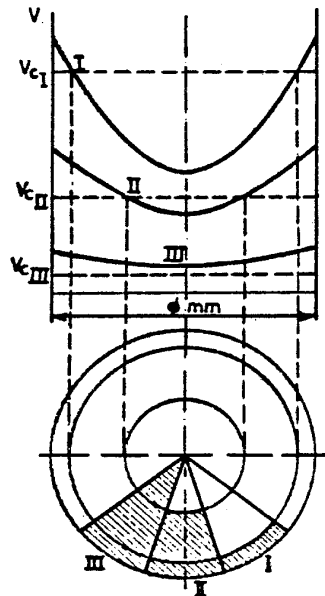


Figura 3.10.- Representación esquemática del endurecimiento de los siguientes aceros: I acero al carbono templado en agua. II: acero con 2% Ni, templado en aceite. III: acero con 1%Cr, 4 % Ni, templado al aire.

*La templabilidad de un acero depende de varios factores:*

1. *La velocidad crítica de enfriamiento depende de la estabilidad de la austenita y de la nucleación durante la transformación.*
2. *La estabilidad de la austenita depende principalmente de los elementos de aleación. Como también el carbono extiende la zona  $\gamma$ , la descomposición de la austenita en  $\alpha$  y  $cm$  se reprime cuando aumenta la concentración de carbono, de modo que la velocidad crítica disminuye.*
3. *La descomposición o transformación de la austenita, como fenómeno de nucleación y crecimiento, se ve influenciada por la presencia de límites de grano y carburos no disueltos que actúan como núcleos, aumentando la velocidad crítica de enfriamiento.*

*Un calentamiento prolongado a una temperatura de austenitización alta, disolverá gran parte de los núcleos y hará crecer el grano, lo que bajará la velocidad crítica.*

*De lo anterior se puede concluir lo siguiente:*

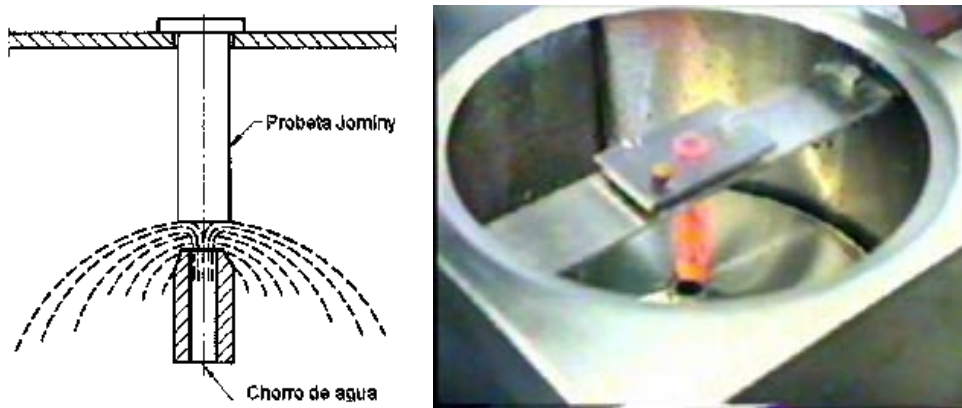
1. *En las mismas condiciones de templado, la profundidad de templado y la dureza máxima obtenida en un acero al carbono aumentará hasta el contenido de carbono correspondiente a la concentración eutécticoide*

2. *A un contenido constante de carbono, es posible aumentar la profundidad de templado por una austenitización a temperaturas superiores*

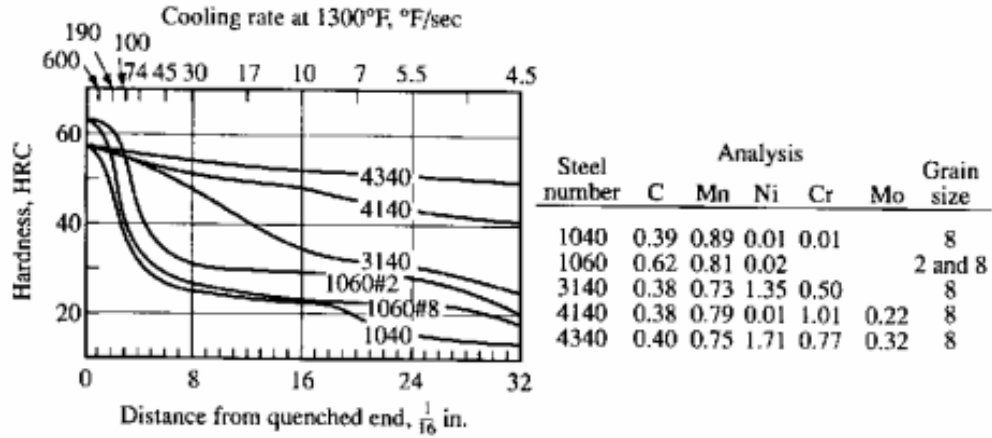
*Debido a los numerosos factores que tienen influencia sobre la templabilidad de un acero, se propusieron varios métodos para determinar experimentalmente un factor de templabilidad. Se trata de poder reproducir siempre y con toda exactitud las condiciones experimentales, como son: temperatura y tiempo de austenitización, método de templado, volumen y forma de las probetas. La prueba más conocida es la de Jominy, propuesta originalmente por Jominy y Boegehold.*

### **3.3.3.- La Prueba Jominy.**

*Este ensayo normalizado, según la norma ASTM Designation A255-48T End Quench Test for Hardenability of Steel, consiste en enfriar una probeta de 1 pulg. de diámetro y 4 pulg. de largo previamente austenitizada, por medio de un chorro de agua a una presión definida por la norma, que se hace incidir en uno de sus extremos, figura 3.11. De esta forma cada punto a lo largo de la probeta, a partir de la punta templada, presentará una cierta velocidad de enfriamiento. La dureza de la probeta se mide sobre uno de sus bordes ya rectificado, efectuando estas mediciones cada dieciseisavo de pulgada en la primera pulgada de longitud y después más espaciadas, permitiendo construir una gráfica de Dureza contra distancia desde el extremo templado, como la mostrada en la figura 3.12.*



**Figura 3.11.- realización de la prueba Jominy**



**Figura 3.12.-** Curvas Jominy o de Templabilidad para varios aceros.

*La velocidad de enfriamiento varía a todo lo largo de la barra, siendo más elevada en el extremo templado por estar en contacto con el agua. La velocidad de enfriamiento en cualquier punto a lo largo de la barra se ha determinado con toda exactitud. La tabla 3.1 muestra los valores correspondientes. Así, este método describe el procedimiento para determinar la templabilidad de un acero.*

**Tabla 3.1.-** Relación entre velocidad de enfriamiento y la distancia Jominy.

<i>Distancia Jominy en 16-avos de pulg.</i>	<i>Velocidad de Enfriamiento °C/s</i>
<i>1</i>	<i>315</i>
<i>2</i>	<i>110</i>
<i>3</i>	<i>50</i>
<i>4</i>	<i>36</i>
<i>5</i>	<i>28</i>
<i>6</i>	<i>22</i>
<i>7</i>	<i>17</i>
<i>8</i>	<i>15</i>
<i>10</i>	<i>10</i>
<i>12</i>	<i>8</i>
<i>16</i>	<i>5</i>
<i>20</i>	<i>3</i>
<i>24</i>	<i>2.8</i>
<i>28</i>	<i>2.5</i>
<i>36</i>	<i>2.2</i>

*La templabilidad se hace aparente en el grado al cual el material se endurece cuando se temple a diferentes velocidades de enfriamiento. En la prueba de Jominy la “profundidad de endurecimiento” es la distancia a lo largo de la probeta desde el extremo templado o punta templada.*

*Se puede considerar que cualquier acero forma martensita en el extremo templado, por lo que la dureza en este punto está determinada exclusivamente por el contenido de carbono. Sin embargo, a una cierta distancia del extremo templado es más probable que se forme bainita o perlita en lugar de la martensita, lo que se verá reflejado en una baja en la dureza de la probeta.*

*Un acero aleado con una alta templabilidad, tal como un acero 4340, mantiene una curva de templabilidad más bien plana, es decir, mantiene su dureza, sin embargo, un acero al carbono simple, tal como el 1060, tiene una curva que cae rápidamente lo cual indica que tiene una templabilidad muy limitada. El poder de Endurecimiento o Templabilidad está determinado por el contenido de elementos de aleación.*

*Existen algunas ecuaciones que pueden utilizarse para calcular la curva Jominy y una muy conocida es la ecuación desarrollada por Just que se presenta a continuación:*

$$J_{6..80} \approx 95 \sqrt{C} - 0,00276 E^2 \sqrt{C} + 20 Cr + 38 Mo + 14 Mn + 5,5 Ni + 6,1 Si + 39 V + 96 P - 0,81 K - 12,28 \sqrt{E} + 0,898 E - 13 \quad [HRC] \quad \dots\dots(3.1)$$

*Donde:*

*J = Dureza Jominy*

*E = Distancia desde el extremo templado*

*K = Tamaño de grano ASTM de la austenita*

### 3.3.4.- Índice de Templabilidad.

*La templabilidad de un acero se designa mediante un código que indica la distancia o distancias desde el extremo templado dentro de la cual se obtiene la dureza deseada.*

Por ejemplo: Un acero aleado conteniendo 0.40 % de carbono (4140) podría especificarse que tiene una templabilidad de  $J_{50} = 6$ , lo que significa una dureza  $Rc = 50$  a una distancia de 6/16 de pulgada desde el extremo templado, figura 3.5, curva inferior.

La AISI ha establecido curvas de templabilidad máxima y mínima, conocidas como bandas de templabilidad, figura 3.13, entre las cuales debe de estar cualquier barra de acero de esa composición. En la figura, el sufijo H se establece para aquellos aceros que se compran con base a una especificación de templabilidad, siendo de importancia secundaria aspectos como la composición química, tamaño de grano, etc.

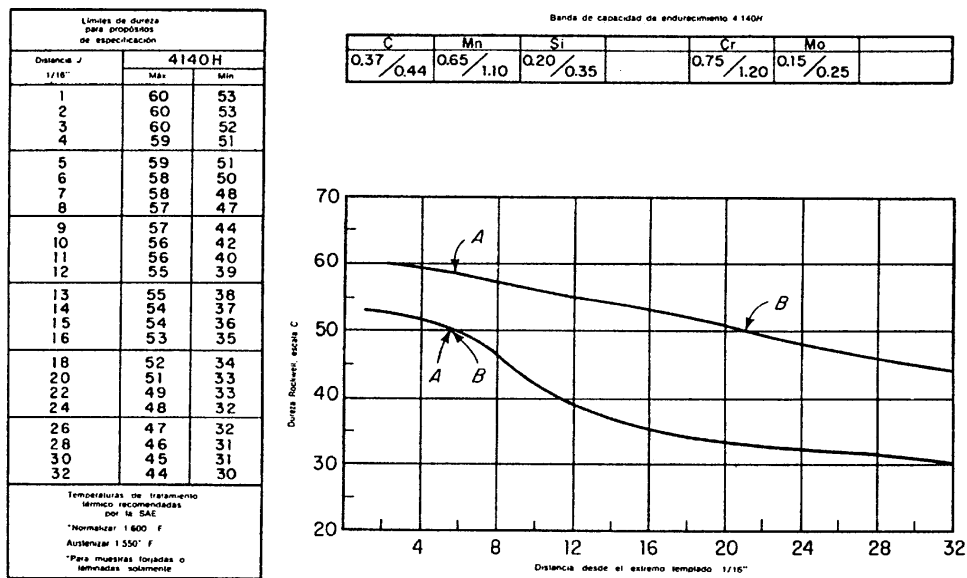


Figura 3.13.- Bandas de templabilidad para un acero 4140H

Al especificar la templabilidad de un acero pueden emplearse alguno de los dos métodos siguientes:

1.- En este primer método se especifica primero la dureza en la curva inferior, seguida de la dureza en la curva superior igualándolas a la distancia en que se encuentran:

Por ejemplo, de la figura 3.13 los puntos A denotan durezas de 50 y 58, ambas a 6/16 “ por lo tanto esto se denota por:

*J 50/58 = 6/16 de pulg.*

2.- *Para un valor de dureza seleccionado, se indican las distancias primero en la curva inferior y luego en la curva superior:*

*J 50 = 6/16 a 21/16 de pulg.*

### 3.4.- REVENIDO.

*Los aceros después de templearlos suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido ya que con este tratamiento se consigue mejorar la tenacidad de las piezas templadas, a costa de disminuir su dureza, su resistencia mecánica y su límite elástico. También se consigue eliminar, o por lo menos disminuir, los esfuerzos internos del material, producidos a consecuencia por el temple. A veces, sin embargo, al revenir un acero de alta aleación, puede ocurrir que en lugar de disminuir la dureza, aumente. Esto es debido, a la transformación de la austenita residual en martensita y, por lo tanto, al aumentar el porcentaje de este constituyente, aumenta también la dureza.*

*El revenido consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior ( $A_1$ ), como se muestra en la figura 3.14 enfriándolo luego generalmente al aire, aunque algunos tipos de aceros se enfrían en agua o aceite.*

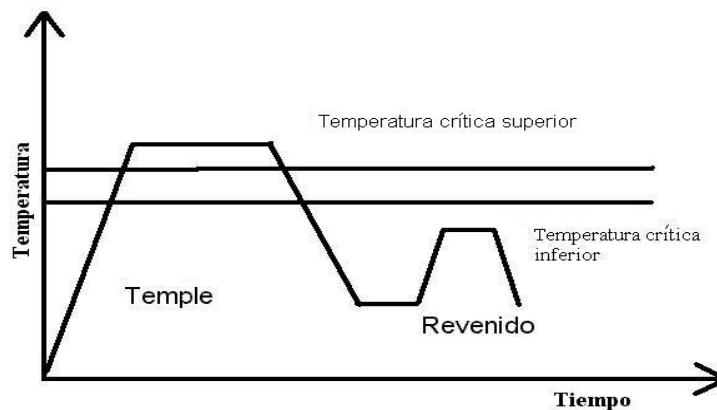


Figura 3.14.- Esquema del revenido de los aceros

Las variaciones y características que experimentan los aceros por efecto del revenido son debidas a cambios de microestructuras que consisten, principalmente, en la descomposición más o menos completa de la martensita que se había obtenido en el temple y que se transforma en otros constituyentes más estables. Recientemente, con ayuda del microscopio electrónico y de los rayos X, se han podido estudiar con más detalle todos estos fenómenos y se ha llegado actualmente a la conclusión de que el revenido se produce en tres etapas principales, como se muestra en la figura 3.15.

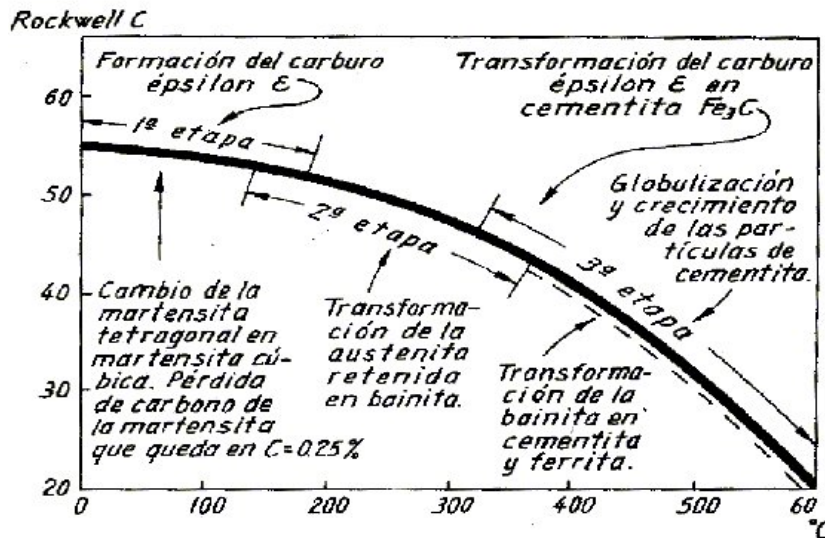


Figura 3.15 Principales etapas y transformaciones que sufren los aceros en el revenido.

La primera etapa se realiza a bajas temperaturas, inferiores a 300 °C, y en ella se precipita el carburo de hierro  $\epsilon$  (épsilon). Esa precipitación se realiza en los límites de los subgranos heredados de la austenita, los cuales se siguen manifestando en la martensita. En esa fase, la formación de carburo épsilon origina, una pérdida importante de carbono en la martensita, que al final de esta fase queda aproximadamente con 0.25% de carbono y su celda tetragonal se transforma en celda cúbica

La segunda etapa sólo se presenta cuando aparece austenita retenida en la microestructura del acero templado, y en esta etapa la austenita retenida se transforma en bainita. Esa bainita,

*al ser luego calentada en el revenido a altas temperaturas, sufre también una precipitación de carburo de hierro con formación final de cementita y de ferrita.*

*En la tercera etapa el carburo épsilon (que aparece en la primera etapa), se transforma en cementita ( $Fe_3C$ ). Al aumentar progresivamente la temperatura del acero, se forma primero un precipitado de cementita en los límites de las agujas de martensita y también en su interior. Luego, al aumentar la temperatura se redisuelve la cementita en el interior de las agujas, mientras se engruesa. Al continuar elevándose todavía más la temperatura, se va rompiendo la envolvente de la cementita, que se va presentando cada vez más discontinua en las zonas límites de las antiguas agujas de martensita. Al progresar el calentamiento, la coalescencia y globulización de la cementita prosigue, y a  $600^{\circ}C$ , con grandes aumentos, ya es clara y definida, además, la matriz queda ya constituida por ferrita. Al final, la martensita se ha transformado en cementita y ferrita.*

*En los aceros de alta aleación se presenta una cuarta etapa, en las altas temperaturas del revenido, que corresponde a la precipitación de carburos de aleación que dan lugar a un endurecimiento secundario.*

*En los aceros para herramienta, con un elevado porcentaje de cromo, se acostumbra aplicar dos revenidos sucesivos después del temple, con el que eliminan los esfuerzos residuales y se evita que las herramientas terminadas queden algo frágiles*

### **3.5.- RECOCIDO**

*Es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros de medio y alto carbono y cuyos principales objetivos son:*

- *Mejorar sus propiedades físicas*
- *Obtener una estructura de equilibrio*
- *Mejorar maquinabilidad*
- *Aumentar ductilidad para poder realizar operaciones de trabajo en frío*



*Existen diversas variantes de este tratamiento térmico, siendo las más importantes las siguientes:*

**- Recocido supercrítico o total.**

*Este tratamiento térmico consiste en calentar el acero hipoeutectoide a 20 o 30 °C por arriba de la temperatura crítica superior ( $A_3$ ), manteniéndolo durante cierto tiempo a esta temperatura para lograr un calentamiento uniforme del acero y el enfriamiento se realiza lentamente en el horno, como se muestra en la figura 3.16.*

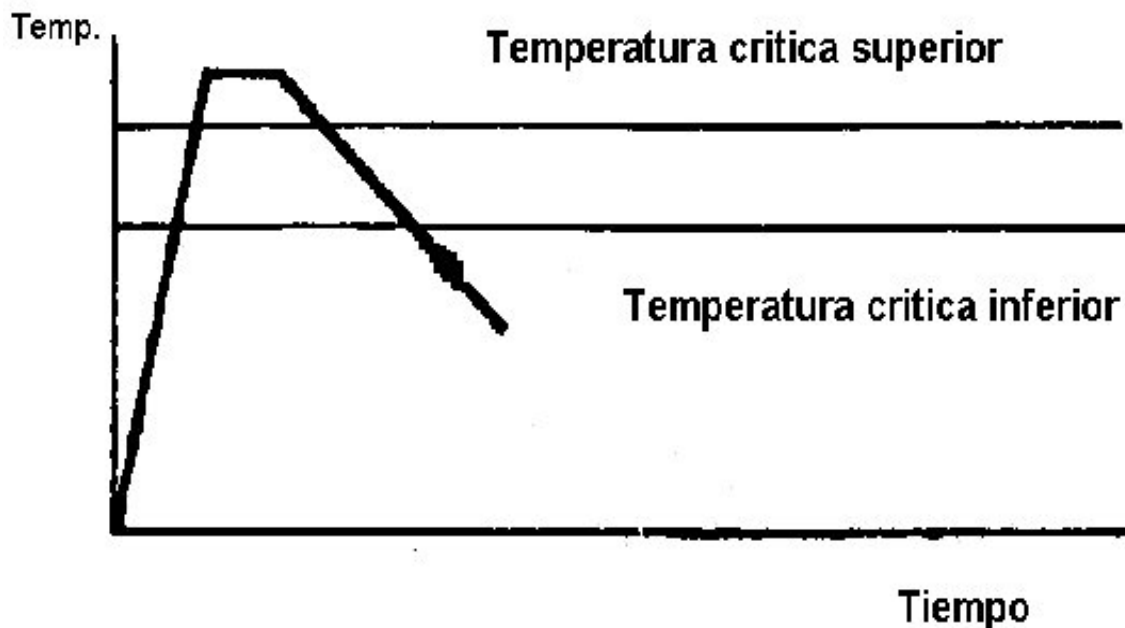


Figura 3.16.- Representación esquemática del recocido total.

*La velocidad de enfriamiento durante el recocido se puede regular efectuando el enfriamiento del horno con su puerta abierta o cerrada, con el calentamiento parcial o totalmente desconectado. El enfriamiento lento, sobre todo, el de los aceros aleados, que tienen tendencia a la fragilidad, es necesario realizarlo hasta los 500 o 600 °C.*

*El recocido total generalmente se aplica a los productos laminados, forjados, fundiciones perfiladas, como también a los lingotes de aceros aleados.*

*El propósito del recocido total es refinar el grano ablandando del acero, mejorando las propiedades eléctricas y magnéticas y, en algunos casos, mejorar el maquinado.*

*Recocido subcrítico o incompleto.*

*En este recocido, el calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior ( $A_1$ ), no teniendo tanta importancia la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire, sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento térmico se eliminan los esfuerzos internos del material y se aumenta su ductilidad.*

*Para los aceros hipoeutectoides, el recocido incompleto se usa para eliminar los esfuerzos internos y para mejorar la facilidad de conformado por corte.*

*Para los aceros hipereutectoides el recocido incompleto se emplea, en lugar del recocido total. En estos aceros el calentamiento es por encima de  $A_1$  y produce prácticamente una recristalización total. Junto con esto se obtiene una perlita granular en lugar de laminar*

*Recocido isotérmico.*

*Es un tratamiento de ablandamiento que consiste en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior  $A_3$  o de la temperatura crítica inferior  $A_1$ , según sea el caso (generalmente de 740 a 880 °C) y luego enfriar hasta una temperatura de 600 ó 700 °C, que se mantiene constante durante varias horas, para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita y finalmente se enfría al aire, como se muestra en la figura 3.17. Este tratamiento es muy rápido y se obtienen durezas muy bajas.*

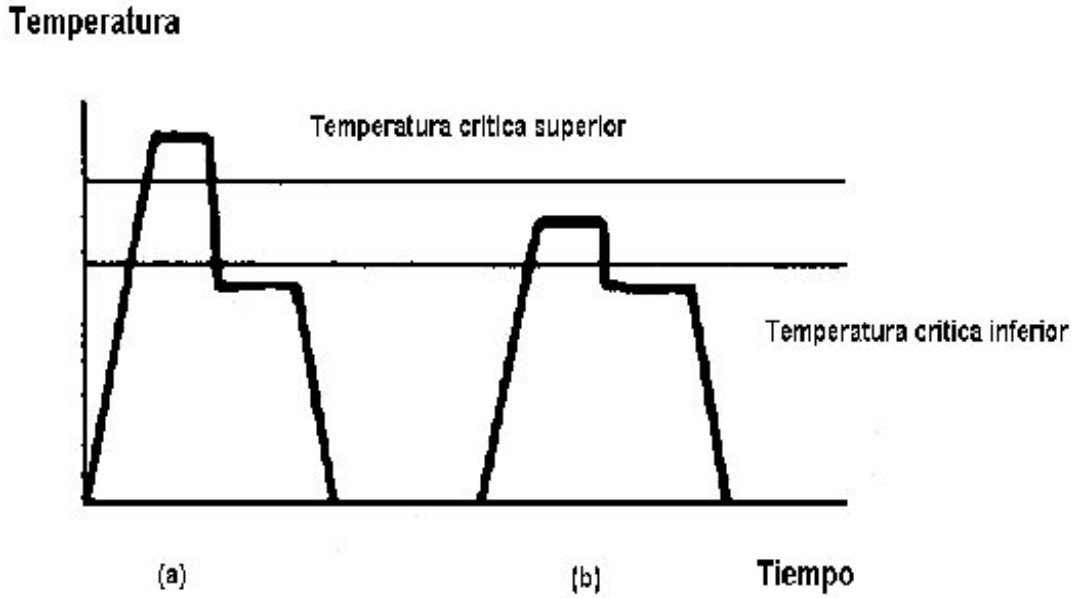


Figura 3.17.- Representación esquemática del recocido isotérmico, (a) austenitización completa, (b) austenitización incompleta.

*Si la temperatura de calentamiento ha sido superior a  $A_3$ , se denomina recocido isotérmico de austenitización completa, por que al terminar el calentamiento, el acero estar en su totalidad formado por austenita, como se muestra en la figura 2.19. Si la temperatura del calentamiento está comprendida entre  $A_1$  y  $A_3$ , se denomina recocido isotérmico de austenitización incompleta, por que solamente la perlita se habrá transformado en austenita al terminar el calentamiento.*

*Este tratamiento térmico se emplea mucho para el recocido de aceros para herramienta de alta aleación, por durar aproximadamente la mitad del tiempo que el recocido de regeneración. También se utiliza en gran escala para recocer piezas forjadas que deben calentarse a temperaturas superiores a  $700^{\circ}\text{C}$  para la forja.*

*El procedimiento clásico utilizado para recocer piezas forjadas consiste en recalentar las piezas por encima de la temperatura  $A_1$ , manteniéndolas a esta temperatura durante un cierto tiempo que depende del espesor, y después enfriarlas lentamente. En cambio, en el recocido isotérmico, se pasan las piezas directamente de la prensa o martillo, antes de que su temperatura descienda de  $700^{\circ}\text{C}$ , con un baño de sales, se mantiene el acero durante un*

*cierto tiempo, que depende de la composición y del tamaño de la pieza y se enfría al aire. La temperatura de las sales se determina en el diagrama TTT del acero, dependiendo de la dureza que se desea obtener.*

**-Recocido para relevado de esfuerzos o recocido subcrítico:**

*Este tratamiento se aplica a los aceros que han sido sometidos a fuertes operaciones de maquinado o trabajo en frío. Es el único tipo de recocido que no implica durante el calentamiento un cambio en estructura, figura 3.18.*

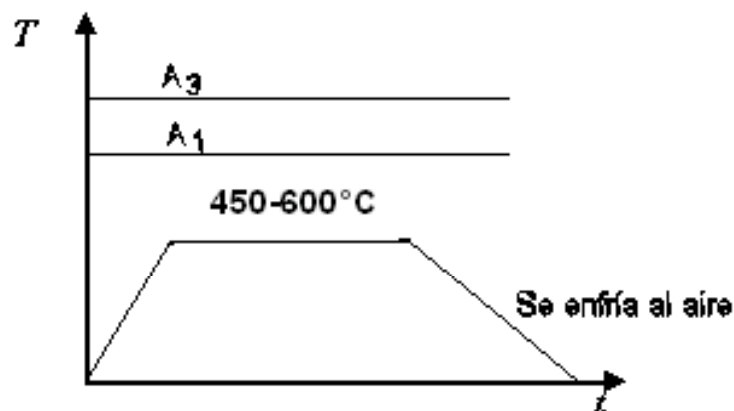


Figura 3.18.- Recocido subcrítico o relevado de esfuerzos

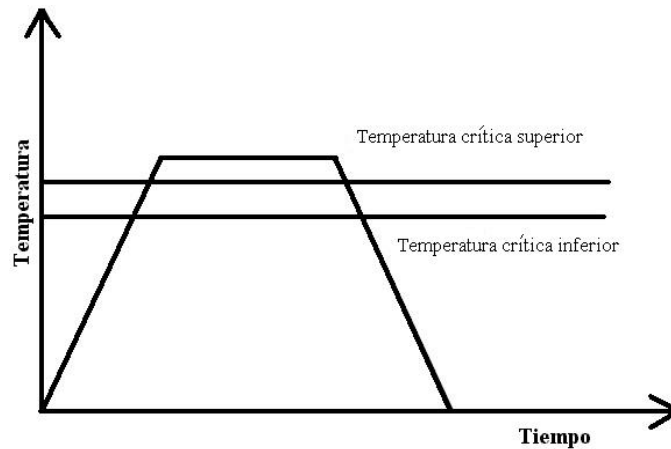
**3.6.- NORMALIZADO**

*Se trata de un tratamiento térmico que se aplica a los aceros de bajo y medio (0.6% C máximo) con los objetivos siguientes.*

- *Homogeneizar estructura*
- *Mejorar respuesta del acero al tratamiento de temple y revenido*
- *Mejorar propiedades físicas.*
- *Mejorar maquinabilidad.*
- *Romper estructura dendrítica de colada.*

*El normalizado consiste en calentar el acero a una temperatura de 30 a 50 °C por arriba de la temperatura crítica superior, A<sub>3</sub>, y una vez que haya pasado todo el acero al estado*

*austenítico (una hora x cada 25 mm de espesor o diámetro) y después, se enfría el acero al aire, como se muestra en la figura 3.19.*



**Figura 3.19.- Representación esquemática del normalizado.**

*La velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en el recocido, es un tratamiento típico de los aceros al carbono, con un contenido de 0.15 a 0.5% de carbono, y rara vez se emplea en los aceros para herramienta, ni en los aceros aleados.*

### **3.7.- GLOBULIZADO O ESFEROIDIZADO.**

*El globulizado es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros de alto contenido de carbono ( $\%C > 0.60\%$ ) y cuyos principales objetivos son:*

- ❖ *Romper la red de carburo y formar un carburo esferoidal.*
- ❖ *Obtener la menor dureza posible en el acero.*
- ❖ *Optimizar la respuesta del material a operaciones de deformación plástica.*
- ❖ *Mejorar la maquinabilidad del acero.*

*Pueden emplearse los siguientes métodos para la aplicación de este tratamiento térmico.*

- 1) *Mantener el acero durante un tiempo prolongado a una temperatura justamente por debajo de la línea crítica inferior, como se muestra en la figura 3.20.*

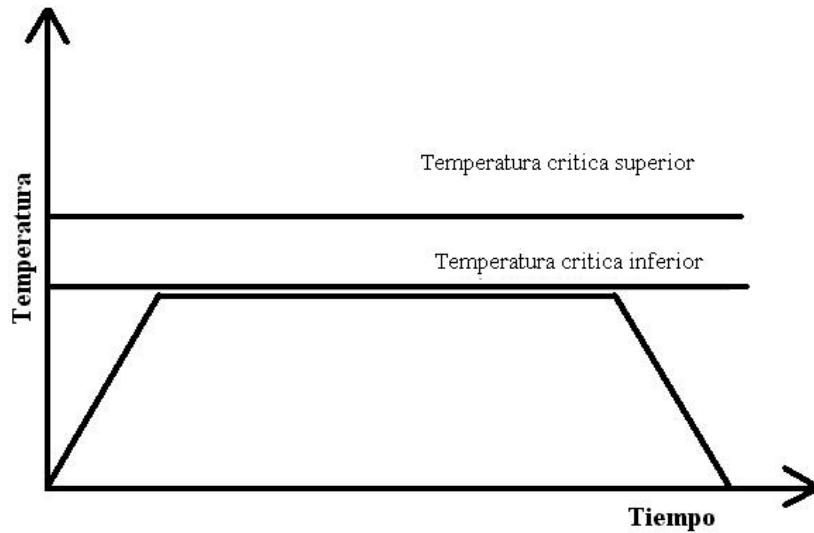


Figura 3.20.- Representación esquemática del primer método.

- 2) *Calentar y enfriar alternadamente entre las temperaturas que están justamente por encima y por debajo de la línea crítica inferior, como se muestra en la figura 3.21.*

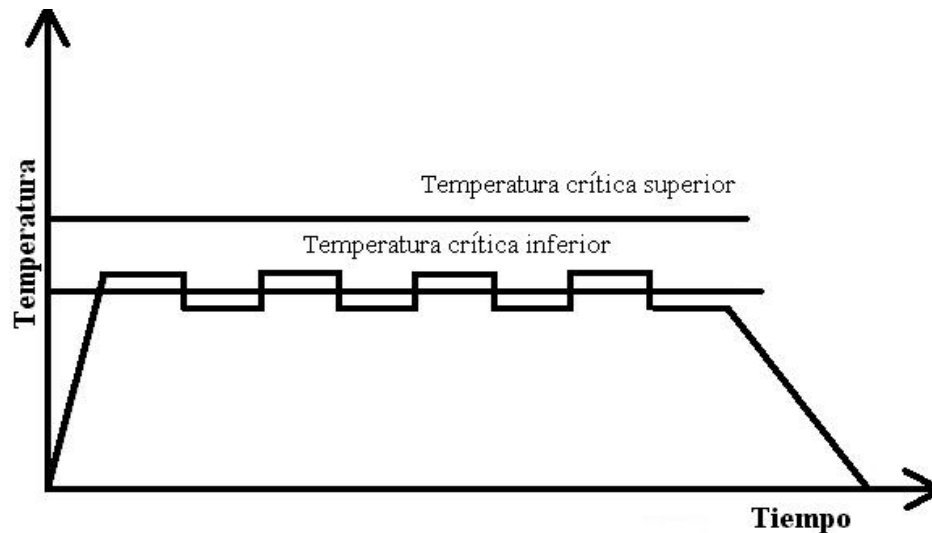
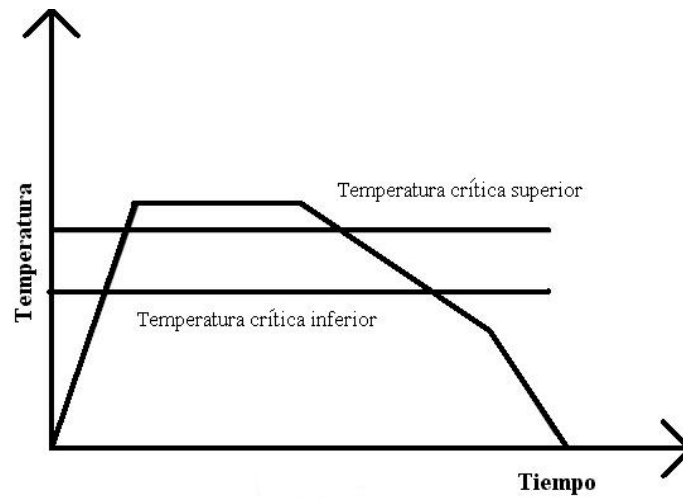


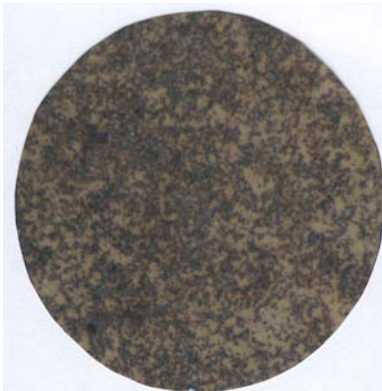
Figura 3.21.- Representación esquemática del segundo método.

- 3) *Calentar a una temperatura por encima de la temperatura crítica superior y luego enfriar muy lentamente en el horno o mantener a una temperatura justo por debajo de la línea crítica inferior, como se muestra en la figura 3.22..*



**Figura 3.22.- Representación esquemática del tercer método.**

*Mantener durante un tiempo prolongado a temperatura elevada despedazará completamente la estructura perlítica y la red de cementita. La cementita se convertirá en esferas. Las partículas de cementita y la estructura completa se puede llamar esferoidita, figura 3.23.*



**Figura 3.23.- Estructura esferoidizada de un acero con 1 % de C**

*La estructura esferoidizada es deseable cuando es importante una mínima dureza, una máxima ductilidad o una máxima maquinabilidad en aceros al alto carbono. Los aceros al bajo carbono rara vez se esferoidizan, porque en la condición esferoidizada son excesivamente suaves. La acción de corte tenderá a empujar el material en lugar de cortarlo, provocando*

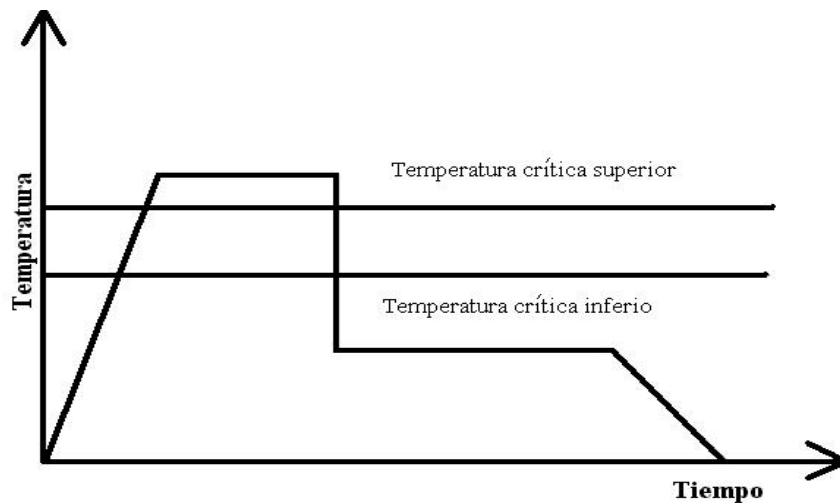
*excesivo calor y deterioro en la punta de la herramienta de corte. Algunas veces, los aceros al medio carbono se esferoidizan mediante recocido para obtener máxima ductilidad, para ciertas operaciones de deformación plástica.*

### **3.8.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS ESPECIALES**

#### **3.8.1.- Austemplado.**

*Es un tratamiento isotérmico, y en él, la austenita se transforma en bainita a temperatura constante.*

*El austemplado (también llamado austempering, temple diferido ó temple bainítico), consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica (hasta la temperatura de austenitización), seguido de un enfriamiento rápido en un baño de sales, que se encuentra una temperatura justo por arriba de la línea  $M_s$ , como se muestra en la figura 3.24 manteniéndose a una temperatura constante, durante un tiempo suficiente, hasta que se realice la total transformación de la austenita en bainita.*



**Figura 3.24.- Representación esquemática del austemplado.**

*La temperatura del baño, debe ser superior a la temperatura del punto  $M_s$  (iniciación de la martensita), y suele variar de 250 °C a 550 °C. En la figura 3.25, se muestra una representación esquemática del austemplado en un diagrama TTT.*



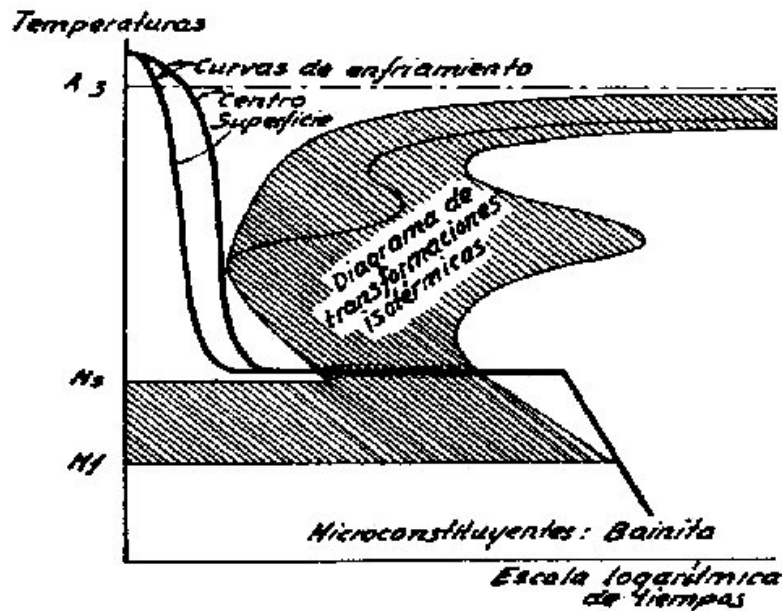


Figura 3.25.- Representación esquemática del austemplado en un diagrama TTT.

*La principal ventaja del austemplado es la ausencia de esfuerzos internos y grietas microscópicas que se producen en los temples ordinarios martensíticos. Además, la tenacidad es mucho más elevada en las piezas tratadas con austemplado, que en las piezas templadas y revenidas, a pesar de tener ambas piezas la misma dureza. Cuenta con una mayor ductilidad, también hay menos distorsión y peligro de fisuras, por que el temple utilizado no es tan drástico como en el método convencional.*

*La principal limitación del austemplado, es el efecto del tamaño de la pieza que se trata térmicamente. Sólo son adecuadas las secciones que pueden enfriarse con suficiente rapidez para evitar la transformación a perlita, por lo tanto, se aplica a piezas de espesor menor o igual a ½ pulgada. Este espesor puede incrementarse un poco para los aceros aleados, pero entonces el tiempo para terminar la transformación a bainita puede ser excesivo.*

### 3.8.2.- Martemplado.

*Es un tratamiento isotérmico y se efectúa calentando el acero y manteniéndolo a una temperatura por arriba de la temperatura crítica superior  $A_3$ , durante un tiempo suficiente para su completa austenitización y enfriándolo luego en un baño de sales fundidas (como se muestra en la figura 3.26, cuya temperatura suele oscilar entre 200 y 300°C y debe ser superior a la temperatura del punto  $M_s$ ).*

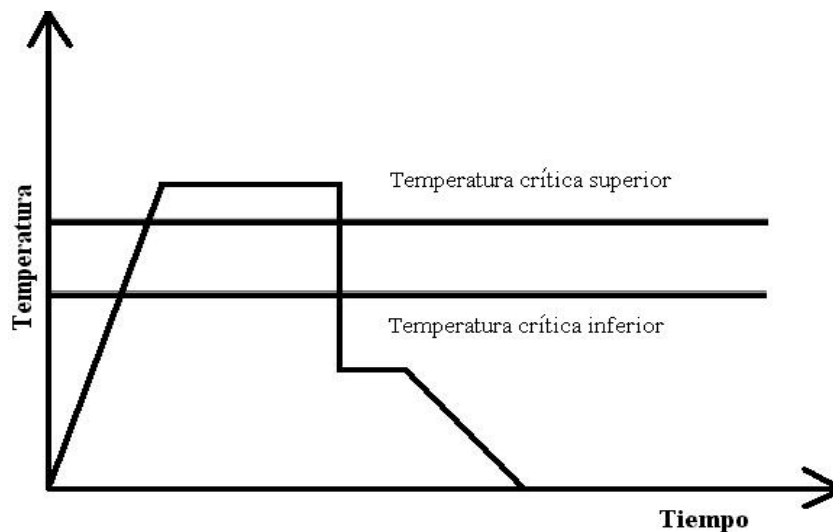


Figura 3.26.- Representación esquemática del martempleado.

*El acero debe permanecer en el baño de sales el tiempo suficiente para conseguir que toda la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño, enfriándose luego la pieza al aire. De esta forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocos esfuerzos internos. Cuando convenga disminuir la dureza o resistencia obtenida, se debe dar posteriormente al acero un revenido, para obtener martensita revenida.*

*Es necesario que el enfriamiento sea suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento no corte la nariz del diagrama TTT (como se muestra en la figura 3.27) en ningún punto, pues si lo hiciera, parte de la austenita se transformaría en otros constituyentes.*

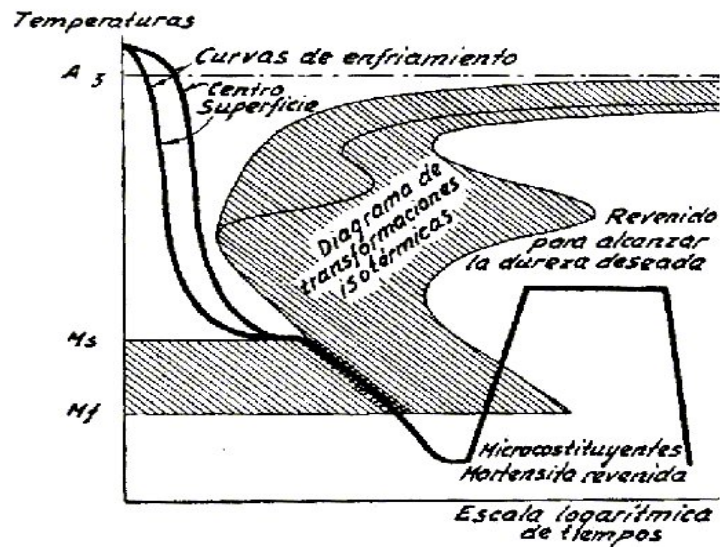


Figura 3.27.- Representación esquemática del martempleado en un diagrama TTT.

*Es muy importante que la temperatura del baño sea próxima y superior a la temperatura del punto  $M_s$ , pues si fuera inferior, parte de la austenita de la periferia se transformaría en martensita antes de que el resto de la austenita del centro, y el proceso sería imperfecto. La temperatura del punto  $M_s$ , varía en algunos casos con la temperatura de austenitización.*

*El martempleado se emplea en la fabricación de engranes del mecanismo diferencial de automóviles, troqueles, cojinetes de bolas, etc. En realidad, este tratamiento térmico es una variante del temple interrumpido en agua y aire.*

*La principal ventaja, es evitar las deformaciones y tensiones internas. Su aplicación queda limitada a piezas que no sean muy grandes.*

### 3.8.3.- Temples interrumpidos.

*Este es un tratamiento de gran utilidad, en especial para los aceros para herramienta. Hay dos tipos de temples interrumpidos, que son:*

Temple interrumpido en agua y aceite. En éste temple se suele enfriar generalmente en agua bajando la temperatura de la pieza hasta unos 300 ó 400 °C, enseguida y rápidamente se mete el acero en aceite, sin que antes haya tenido lugar un equilibrio de temperaturas, entre el núcleo y la superficie del acero. Este tratamiento se usa para templar herramientas de forma complicada, fabricadas con acero templado en agua, y tiene como objetivo evitar (con el enfriamiento en aceite), que las diferencias de temperaturas en el acero sean demasiado grandes durante la transformación de la austenita en martensita, lo que evita que se desarrollen esfuerzos que produzcan deformaciones y grietas. En la figura 3.28 se muestra un esquema de este tipo de temple.

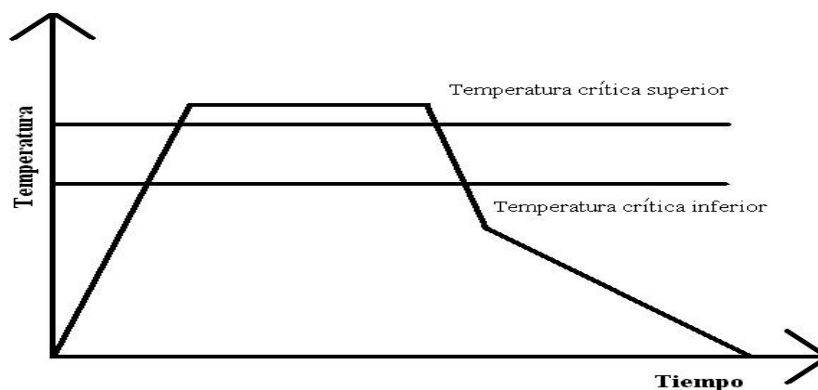
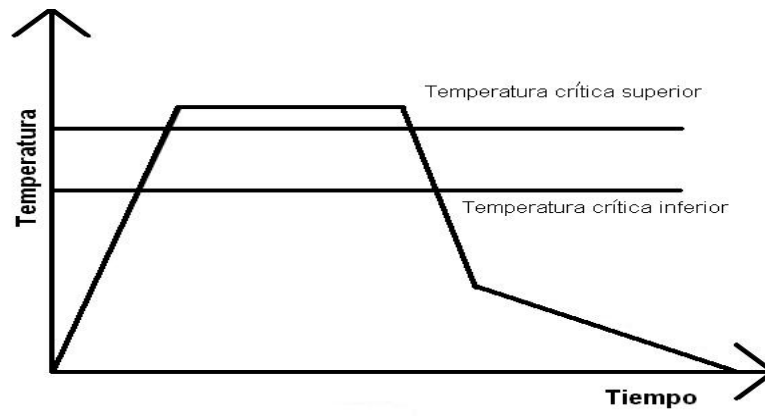


Figura 3.28.- Representación esquemática del temple interrumpido en agua y aceite

Temple interrumpido en agua y aire. Consiste en interrumpir el enfriamiento de un acero en agua, sacándolo al aire cuando la temperatura del acero haya bajado hasta unos 250°C. Esto tiene la ventaja de que se igualan las temperaturas en diferentes zonas y se evitan deformaciones y agrietamientos. También se practica en aceite y después al aire. Este tratamiento se emplea desde hace mucho tiempo para el temple de las limas. En la figura 3.29 se muestra un esquema de este tipo de temple.



**Figura 3.29.- Representación esquemática del temple interrumpido en agua y aire.**

## **CAPITULO 4**

### **CORROSIÓN Y OXIDACIÓN**

#### **4.1.- CORROSIÓN**

*Es el deterioro que sufre cualquier metal al exponerse a un medio ambiente específico.*

*Algunos factores que influyen en la velocidad de la corrosión son: temperatura, concentración del medio, la reactividad del producto de corrosión y la presencia de esfuerzos mecánicos.*

*La corrosión es fácil advertirla, por ejemplo, en piezas de acero, la herrumbre que se forma en zonas donde se ha desprendido la pintura en carrocerías de automóviles. En piezas de aluminio se observa un polvo blanquizco que es óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ); en el cobre y sus aleaciones se observa la formación de una película oscura.*

*Se puede clasificar el deterioro del metal de acuerdo al mecanismo, mediante el cual se lleva a cabo tal como se describe a continuación:*

**Corrosión química:** *se presenta por el efecto de gases y de no electrolitos sobre el metal.*

**Corrosión electroquímica:** *esta forma de corrosión es el resultado de la acción de electrolitos ya sea ácidos, álcalis o bases incluyendo la corrosión atmosférica y en el suelo.*

**Oxidación a altas temperaturas:** *se presenta cuando un metal se expone a altas temperaturas prácticamente en ausencia de humedad y se caracteriza por la formación de una cascarilla de óxido.*

*Durante los últimos años se ha venido aceptando la corrosión como un fenómeno que es esencialmente electroquímico, ya que el ataque depende de la presencia simultánea de humedad y oxígeno por lo tanto es primordial entender los principios básicos de la reacción electroquímica.*

Considérese un trozo de zinc metálico que se introduce en un vaso de precipitados conteniendo ácido clorhídrico diluido (HCl), como se muestra en la figura 4.1.

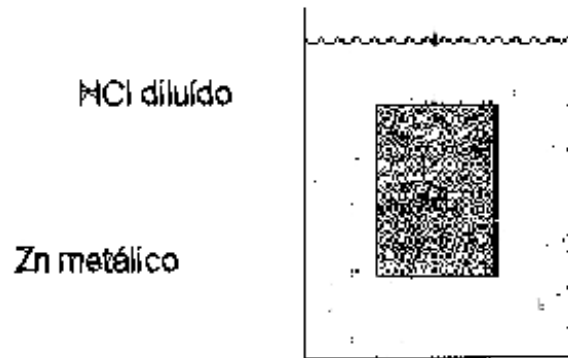
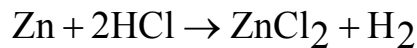
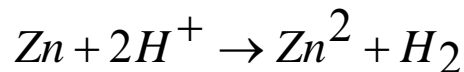


Figura 4.1.- Zinc reaccionando con HCl diluido para producir hidrógeno gas

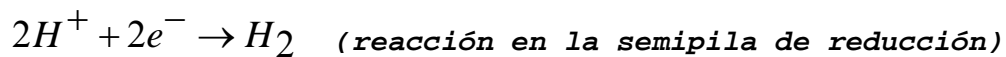
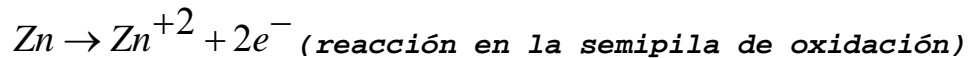
*El zinc se disuelve o se corroe en el ácido y se produce cloruro de zinc e hidrógeno que se desprende en forma de gas, como indica la siguiente reacción química.*



*Esta reacción puede escribirse en forma iónica simplificada, omitiendo los iones cloruros, como:*



*La ecuación anterior consta de dos semireacciones, una relativa a la oxidación del zinc y la otra, a la reducción de los iones hidrógeno para formar hidrógeno gaseoso. Dichas reacciones de semipila se pueden escribir así:*



*Se deben remarcar los siguientes puntos:*

- *Se presenta una reacción de oxidación mediante la cual los metales forman iones que pasan a la solución acuosa recibiendo el nombre de reacción anódica.*

- *También se presenta una reacción de reducción en la cual un metal o un no metal gana electrones reduciendo su carga de valencia por lo tanto se trata de una reacción catódica.*
- *Ambas reacciones deben ocurrir a la misma velocidad y al mismo tiempo.*

**4.2.- POTENCIALES ESTÁNDAR DE ELECTRODO PARA UNA SEMIPILA.**

*Cada metal tiene una tendencia distinta a corroerse, como ya se vio el zinc es atacado por ácido clorhídrico mientras que el oro no lo es.*

*Un método para medir la tendencia de un metal ha corroerse es comparando su potencial de semipila con respecto a un electrodo estándar que generalmente es hidrógeno (figura 4.2). Consiste en un electrodo inerte de platino sumergido en una disolución 1M de iones  $H^+$ , saturada con burbujas de gas hidrógeno que atraviesan la disolución a una presión de una atmósfera a 25 °C. El platino no interviene directamente en la reacción; sólo actúa como una superficie sobre la cual, los átomos de hidrógeno pueden ser oxidados o los iones de hidrógeno pueden ser reducidos. La serie de fuerzas electromotrices (fem) se obtiene acoplando semipilas estándar de varios metales al electrodo estándar de hidrógeno y clasificándolas de acuerdo con el voltaje medido.*

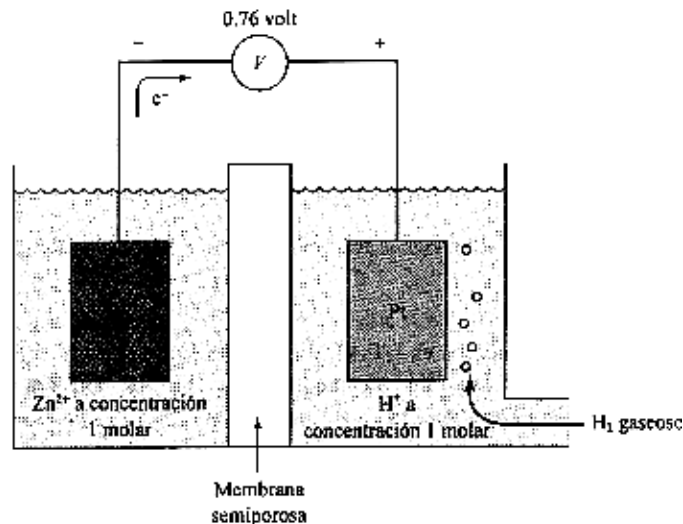


Figura 4.2.- Semipila estándar de hidrógeno utilizada como referencia.



La tabla 4.1 muestra los potenciales de semipila para los metales mas comunes, nótese que aquellos que son mas activos que el hidrógeno se le asigna un valor negativo y se dice que son anódicos con respecto a dicho elemento; por el contrario aquellos que son menos activos se les asigna un valor positivo y se dice que son catódicos con respecto al hidrógeno, debiendo remarcar el hecho que entre mas activos, mas fáciles de corroer

Tabla 4.1.- Potenciales estándar de electrodo (Eo)

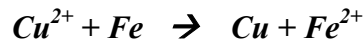
Reacción de reducción	Potencial (V)	
$Au^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Au$	+1.50	↑ Catódica
$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$	+1.23	
$Pt^{4+} + 4e^{-} \rightarrow Pt$	+1.20	
$Pd^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pd$	+0.99	
$Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag$	+0.80	
$Hg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Hg$	+0.79	
$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$	+0.77	
$O_2 + H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4(OH)^{-}$	+0.40	
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$	+0.34	
$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$	0.00	
$Pb^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pb$	-0.13	↓ Anódica
$Sn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Sn$	-0.14	
$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ni$	-0.25	
$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Fe$	-0.44	
$Cr^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cr$	-0.56	
$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn$	-0.76	
$Mn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mn$	-1.63	
$Ti^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ti$	-1.63	
$Al^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Al$	-1.66	
$Be^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Be$	-1.85	
$Mg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mg$	-2.36	
$Na^{+} + e^{-} \rightarrow Na$	-2.71	
$Ca^{+} + e^{-} \rightarrow Ca$	-2.76	
$K^{+} + e^{-} \rightarrow K$	-2.92	
$Rb^{+} + e^{-} \rightarrow Rb$	-2.93	
$Li^{+} + e^{-} \rightarrow Li$	-2.96	

### 4.3.- CELDA O PILA GALVÁNICA

Se denomina celda o pila galvánica a dos metales conectados eléctricamente y sumergidos en un electrolito, mientras uno se convierte en ánodo y se oxida, el otro actúa como cátodo y se reduce. A continuación se explica con más detalle.

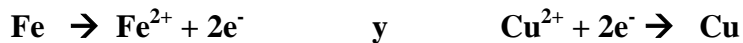
Considérese la pila electroquímica que se muestra en la figura 4.3. La mitad de la pila es un trozo de hierro puro sumergido en una disolución que contiene iones  $Fe^{2+}$  con una concentración de una molaridad  $(1M)^A$ . La otra mitad de la pila consiste en un electrodo de

*cobre puro en una disolución de 1M de iones  $Cu^{2+}$ . Las semipilas están separadas por una membrana que impide la mezcla de las dos disoluciones. Si los electrodos de hierro y de cobre están conectados eléctricamente, el cobre se reduce a expensas de la oxidación del hierro (ver tabla 4.1), según la siguiente reacción:*



*Los iones  $Cu^{2+}$  se depositan (electrodeposición) como cobre metálico sobre el electrodo de cobre, mientras que el hierro se disuelve (corroe) en la otra semipila y se incorpora a la disolución como iones  $Fe^{2+}$ .*

*Las reacciones de las dos semipilas están representadas por las reacciones siguientes:*

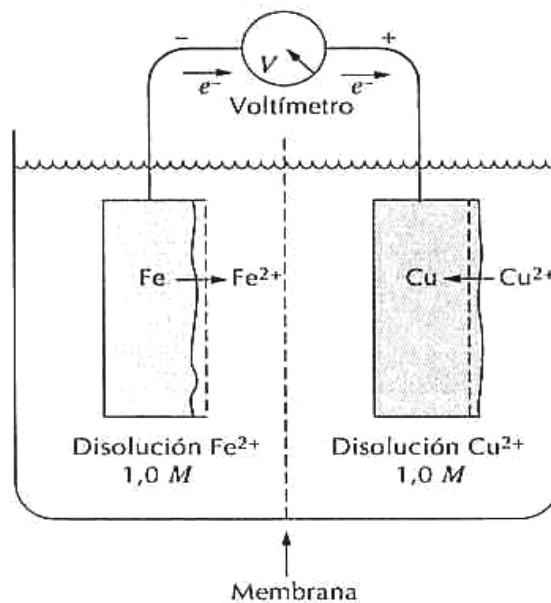


*La fuerza electromotriz generada en la pila electroquímica se puede calcular así:*

$$f.e.m = E_{o\text{ánodo}} - E_{o\text{cátodo}}$$

*En consecuencia, para la pila Fe-Cu el voltaje generado es:*

$$f.e.m = -0.44 - (0.34) = -0.78 \text{ V}$$



**Figura 4.3.- Pila electroquímica formada por electrodos de hierro y de cobre sumergidos en una disolución 1 M de sus iones. El hierro se corroe mientras el cobre se electrodeposita.**

*Los electrones generados en la oxidación del hierro pasan a través del circuito externo y fluyen al electrodo de cobre para reducir al  $\text{Cu}^{2+}$ . Además, existe un movimiento iónico a través de la membrana. A este dispositivo descrito se le conoce como celda o pila galvánica.*

#### **4.4.- PILAS GALVÁNICAS CON ELECTROLITOS DISTINTOS A 1M**

*La mayoría de los electrolitos de las pilas galvánicas de corrosión no son 1M, mas bien se trata de soluciones diluidas, por lo tanto, si la concentración de iones del electrolito que rodea al ánodo es menor que 1M, la fuerza conductora de la reacción para corroer o disolver el ánodo es mayor, ya que existe una concentración de iones para provocar una reacción opuesta. Así, el efecto de una menor concentración iónica se puede calcular mediante la ecuación de Nernst que establece lo siguiente:*

$$E_1 = E_0 + \frac{0.0592}{n} \log C_{ion}$$

*Donde:*

*$E_1$  es el potencial de electrodo para una solución diluida*

*$E_0$  es el potencial estándar de electrodo*

*$n$  es la valencia del metal*

*$C_{ion}$  es la concentración del electrolito*

#### **4.5.- CELDA DE CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO.**

*Se puede desarrollar ese tipo de celdas cuando existe una diferencia en la concentración de oxígeno en la superficie húmeda de un metal. Este tipo de celdas cobra gran importancia en la corrosión de metales fácilmente oxidables como lo es el hierro ya que no son capaces de formar un óxido protector.*

*En la figura 4.4 se ilustra que la existencia de oxígeno en las profundidades de la hendidura es nula, y que hay pocas probabilidades de que pueda ser reemplazado. En los extremos de la junta (marcados con C en la figura), un flujo de solución nueva con alta concentración de oxígeno reemplaza continuamente todo el oxígeno que tenga tendencia a consumirse en esa zona. Por eso, el área anódica A se encuentra, en este caso, muy al interior de la hendidura, y la zona catódica C, está a cierta distancia del remache. En comparación con la*

*celda de concentración de iones metálicos, se invierte la posición de las zonas del ánodo y el cátodo.*

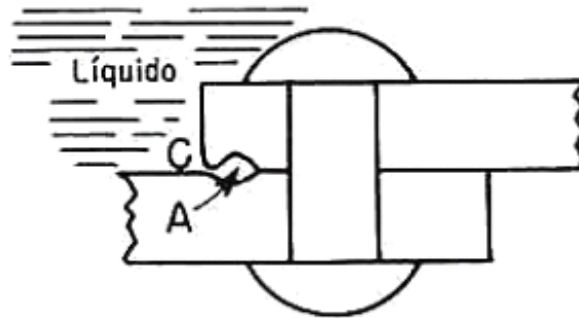


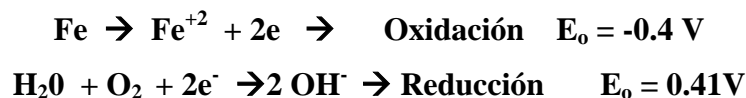
Figura 4.4- En esta figura, A es anódica, con baja concentración de oxígeno, ya que el oxígeno no puede ser reemplazado por el líquido, a medida que se usa en la corrosión; C es catódica, con elevada concentración de oxígeno, debido a que el suministro de oxígeno está siendo reemplazado continuamente por la nueva solución móvil.

La corrosión en una celda de concentración de oxígeno puede demostrarse, colgando verticalmente un pedazo de lámina delgada de acero en un vaso picudo de agua. La corrosión se producirá con mayor rapidez en torno al fondo de la lámina de acero que cerca de la superficie, porque el aire se disuelve en la superficie del agua y se difunde hacia abajo. Por lo tanto, en la parte superior de la lámina metálica, la concentración de oxígeno será mayor y esa zona se hace catódica. A mayores distancias bajo la superficie del agua, disminuye la concentración de oxígeno y el acero se vuelve anódico.

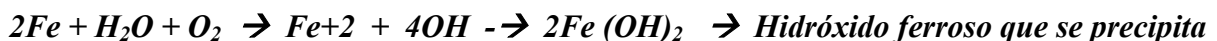
#### 4.6.- CORROSIÓN GALVANICA MACROSCÓPICA EN ELECTRODOS

##### SENCILLOS.

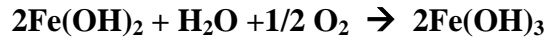
*Un ejemplo de corrosión en un electrodo sencillo es la formación de herrumbre en el hierro. Si se sumerge un pedazo de hierro en agua con oxígeno disuelto (solución aireada) se formará en la superficie hidróxido férrico de acuerdo a la siguiente reacción:*



*Sumando ambas reacciones se obtiene la siguiente:*



*Este hidróxido ferroso precipita, ya que es insoluble en agua. Más tarde, al reaccionar con más agua y oxígeno se forma hidróxido férrico [Fe(OH)<sub>3</sub>] que tiene un color marrón-rojizo y que conocemos como herrumbre.*



#### **4.7.- LAS OCHO FORMAS BÁSICAS DE CORROSIÓN**

*Los tipos de celdas antes expuestos dan lugar a los siguientes tipos de corrosión;*

- *Corrosión uniforme*
- *Corrosión galvánica*
- *Corrosión en grietas o hendiduras*
- *Corrosión por picadura*
- *Corrosión - erosión*
- *Corrosión intergranular*
- *Disolución selectiva*
- *Corrosión bajo esfuerzo*

*A continuación se explican brevemente cada una de ellas:*

##### **Corrosión uniforme**

*Es la forma más común de corrosión y se caracteriza por una reacción química o electroquímica que actúa sobre una gran porción o sobre la totalidad de la superficie dispuesta, figura 4.5. A pesar de que produce grandes pérdidas del metal no es la más insidiosa, ya que es relativamente fácil de predecir la vida útil de un elemento.*



**Figura 4.5.- Corrosión uniforme en el acero**

*Esta forma de corrosión puede reducirse o evitarse usando las técnicas siguientes.*

- *Seleccionar el material adecuado*
- *Utilizar recubrimientos.*
- *Uso de sustancias inhibidoras*
- *Protección catódica*

### **Corrosión galvánica**

*Si dos metales distintos se unen eléctricamente en presencia de un electrolito se producirá un flujo de electrones del más anódico al más catódico, de esta manera uno se corroe y el otro se protege.*

*Formas de evitarlo:*

- *Prevenir la unión de dos metales distintos en presencia de medios corrosivos.*
- *Si no es posible lo anterior, utilizar elementos de separación entre ellos (Juntas) debiendo ser de materiales no absorbentes.*
- *Utilizar un elemento más anódico que los otros dos.*

*La Serie Galvánica: Tomando en cuenta que los metales mas utilizados en la ingeniería forman películas pasivadoras protectoras, su comportamiento no es siempre el que debiera esperarse de acuerdo a la serie electromotriz, así, para aplicaciones prácticas donde la resistencia a la corrosión es un factor importante, se han desarrollado las llamadas series*

*galvánicas que nos dicen cual va a ser el comportamiento del material en un medio específico. En la tabla 4.2 se presenta la serie galvánica en agua de mar.*

**Tabla 4.2.- Serie galvánica en agua de mar.**

	Platino
	Oro
	Grafito
	Titanio
	Plata
	Acero inoxidable 316 (pasivo)
	Acero inoxidable 304 (pasivo)
	Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (pasivo)
	Níquel (pasivo)
	Monel (70Ni-30Cu)
	Aleaciones cobre-níquel
	Bronce (Cu-Sn)
	Cobre
	Latón (Cu-Zn)
	Inconel (activo)
	Níquel (activo)
	Estaño
	Plomo
	Acero inoxidable 316 (activo)
	Acero inoxidable 304 (activo)
	Fundición
	Hierro y acero
	Aleaciones de aluminio
	Cadmio
	Aluminio comercialmente puro
	Zinc
	Magnesio y aleaciones de magnesio

↑  
Inactividad creciente (catódicos)

↓  
Actividad creciente (anódicos)

**Corrosión en grietas**

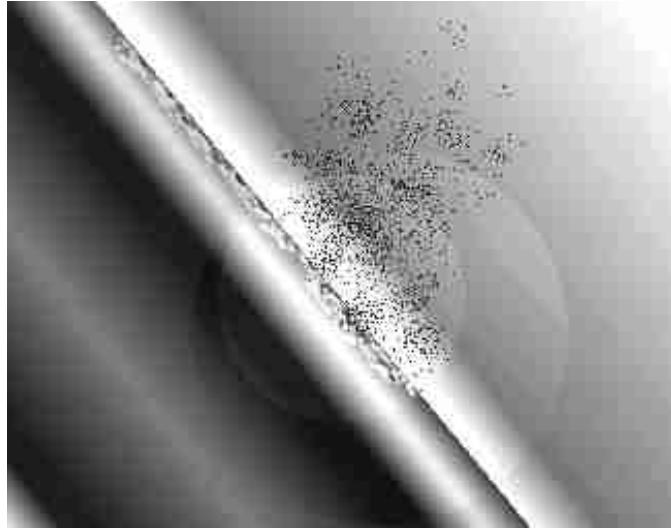
*Esta forma de corrosión se encuentra frecuentemente en grietas, hendiduras, y otras áreas semicubiertas. Usualmente se asocian con pequeños volúmenes estancados de solución y algunos ejemplos son agujeros, juntas de materiales porosos, juntas a traslape, hendiduras bajo cabezas de tuercas y remaches, como podemos darnos cuenta esta forma de corrosión es una consecuencia directa de las celdas de concentración de oxígeno.*

*Algunas formas de control son las siguientes:*

- *Mejorar el diseño.*
- *Limpieza frecuente de los equipos.*
- *Utilizar juntas de materiales no absorbentes (por ejemplo, hule vulcanizado, Neopreno)*

**Corrosión por picaduras:**

*Es una forma extrema de corrosión y puede dar como resultado la formación de agujeros en el metal, los cuales pueden ser grandes o pequeños en relación de su diámetro aunque casi siempre son relativamente pequeños, figura 4.6. Pueden estar cercanos entre sí o pueden estar relativamente lejanos; se considera como una de las formas de corrosión más insidiosas y destructivas, ya que el metal puede fallar con un pequeño % de pérdida en peso en relación al total.*



**Figura 4.6.- Picadura en acero inoxidable expuesto a un ambiente salino**

*Algunos métodos de control son los siguientes:*

- *Utilizar un material más resistente a la picadura.*
- *Limpieza frecuente de los equipos.*

**Corrosión - erosión:**

*Es el incremento de la velocidad de corrosión que experimenta un metal al exponerse a un fluido en movimiento, interviniendo de manera adicional el desgaste metálico.*

*Esta forma de corrosión se caracteriza por la presencia de muescas o agujeros redondos que casi siempre exhiben un patrón direccional, figura 4.7. Todos los equipos expuestos a fluidos en movimiento están sometidos a este deterioro, por ejemplo: tuberías, bombas, accesorios de tuberías, agitadores, turbinas, intercambiadores de calor.*



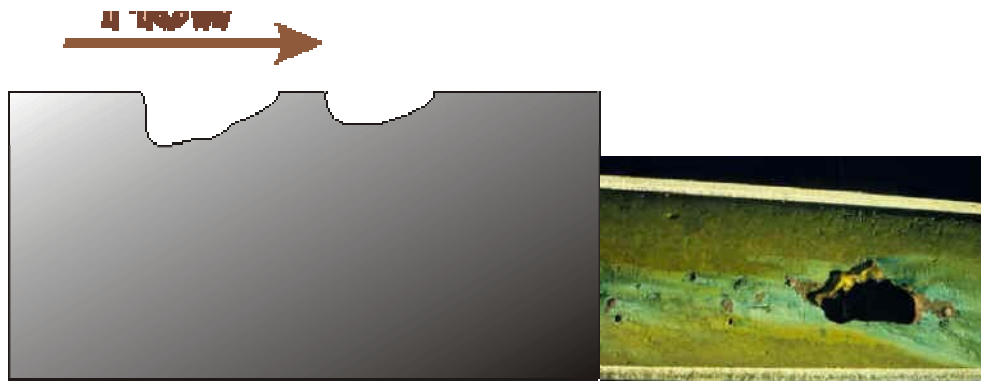


Figura 4.7.- Ejemplo de la corrosión-erosión

*Algunos métodos de control son los siguientes:*

- *Mejorar diseño*
- *Utilizar mejor material*
- *Utilizar sustancias inhibidoras.*

*Corrosión intergranular o en el límite de grano*

*Los efectos de límite de grano son generalmente pequeños o sin consecuencia en la mayor parte de aplicaciones de los metales, esto es, bajo ataque uniforme, el límite de grano es solo un poco más reactivo que la matriz y no tiene consecuencias graves.*

*Sin embargo, bajo ciertas condiciones el ataque puede ser severo y se conoce como corrosión intergranular y que puede ser causado por impurezas en el límite de grano, enriquecimiento o empobrecimiento de alguno de los elementos de aleación y como ejemplos se tienen los siguientes: pequeñas cantidades de aluminio en el hierro y el fenómeno de sensibilidad en un acero inoxidable, pero antes, de explicar este problema hablaremos un poco de los aceros inoxidables:*

*Aceros inoxidables: aleación hierro-cromo o hierro- cromo - níquel con al menos 12% de cromo (que hace posible la formación de una película de  $Cr_2O_3$ ) y la menor cantidad posible de carbono.*

*Se clasifican de acuerdo a la microestructura que se puede obtener en ellos y según AISI-NOM se identifican mediante un sistema de tres dígitos:*

## TECNOLOGÍA DE MATERIALES II

- *Martensíticos* ..... 4XX seguido de 2 dígitos
- *Ferríticos* ..... 4XX
- *Austeníticos* ..... 3XX Aleación Hierro, cromo y níquel  
2XX Aleación Hierro, cromo y manganeso.

*Martensíticos: son los que mas carbono contienen dentro de los aceros inoxidables , esto es, su composición química se encuentra de los siguientes rangos:*

$$12 < \%Cr < 14 \text{ y } \%C \leq 0.4\%$$

*Características:*

- *Moderada resistencia a la corrosión y a la oxidación*
- *Son magnéticos*
- *Se pueden tratar térmicamente (Templar y Revenir)*
- *No son soldables*
- *Son baratos.*

*Ferríticos: para los tipos pertenecientes a esta familia, su composición química se encuentra de los rangos siguientes:*

$$15 < \%Cr < 20 \text{ y } \%C < 0.1$$

*Características:*

- *Buena resistencia a la corrosión y a la oxidación.*
- *Son magnéticos.*
- *No se pueden tratar térmicamente.*
- *Se endurece por medio del trabajo en frío*
- *Soldables*
- *Son caros.*

*Austeníticos: son los más importantes dentro de la industria y su composición química es:*

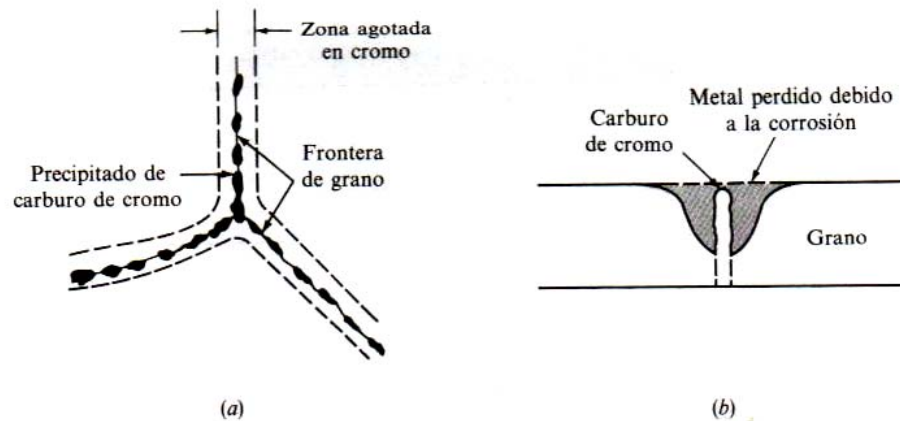
$$15 < \%Cr > 25, \ 8 < \%Ni < 15 \text{ y } \%C < 0.08$$

*Características:*

- *Posee una excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación*
- *No son magnéticos*
- *No se pueden temprar ni revenir.*
- *Se endurecen por medio del trabajo en frío*

- *Muy caros.*

*La sensibilización de un acero inoxidable se presenta cuando se expone a una temperatura en el intervalo de 500 a 800 °C , y consiste en la precipitación de carburo de cromo ( $Cr_{23}C_6$ ) en el límite de grano, dejando con menos de 12 % de cromo las zonas cercanas, dando como resultado una zona con poco cromo y susceptible a la corrosión, figura 4.8.*



**Figura 4.8.- a) Sensibilización en un acero inoxidable 304. b) Corte transversal en el límite de grano .**

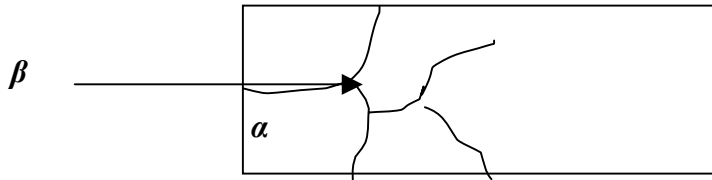
*Para evitar la sensibilización de un acero inoxidable se recomiendan las técnicas siguientes:*

- *Mantener reducido el contenido de carbono.*
- *Agregar Titanio o niobio como elementos estabilizadores.*
- *Aplicar un tratamiento térmico de solución a altas temperaturas, seguido de un enfriamiento rápido.*

### **Disolución selectiva (lixiviación)**

*Es la disolución de un elemento de una aleación sólida mediante un proceso de corrosión siendo el mejor ejemplo la remoción del zinc en los latones amarillos, ya que estas aleaciones están formadas por dos fases: la fase  $\alpha$  que es rica en cobre y la fase  $\beta$  que es rica en zinc, de acuerdo a la serie electromotriz, esta última como es más anódica y por lo tanto si la aleación trabaja en un ambiente corrosivo, esta fase se disolverá poco a poco y el material se volverá esponjoso y perderá resistencia mecánica.*

- *Latones rojos -----  $\alpha$  rica en cobre*
- ❖ *Latones amarillos ----- $\alpha+\beta$  rica en zinc*



**Figura 4.9.- Disolución de la fase  $\beta$  en los latones amarillos**

*Para reducir la velocidad de ataque se recomienda lo siguiente:*

- *Emplear un mejor material, por ejemplo, latón rojo.*
- *Modificar el medio ambiente.*

**- Corrosión bajo esfuerzo**

*Es la falla producida por la influencia combinada de un esfuerzo y un medio corrosivo. El esfuerzo puede ser directamente aplicado o puede ser en forma de esfuerzo residual. La corrosión en la superficie es mínima, pero a través del metal se desarrollan fisuras muy finas que pueden conducir a la destrucción del elemento, figura 4. 10. Este efecto será mayor si el material esta sometido a esfuerzos variables.*



**Figura 4.10.- Fisuras creadas bajo la condición de corrosión bajo esfuerzo.**

4.8.- POLARIZACIÓN

Es el retraso que ocurre en una reacción electroquímica y existen dos formas de ella, a saber:

- a) Polarización por activación.
- b) Polarización por concentración.

Un ejemplo de la primera es la reducción del hidrógeno sobre la superficie del zinc cuando se expone a la acción del HCl diluido, figura 4.11, en donde se distinguen las siguientes etapas.

- *Migración de los iones hidrógeno a la superficie del zinc.*
- *Flujo de electrones hacia los iones hidrógeno.*
- *Formación de hidrógeno atómico*
- *Formación de moléculas diatómicas de hidrógeno.*
- *Formación y desprendimiento de moléculas de gas hidrógeno.*

Cada paso requiere de cierto tiempo y sumándolos, finalmente resulta un retraso en la reacción que se conoce como polarización.

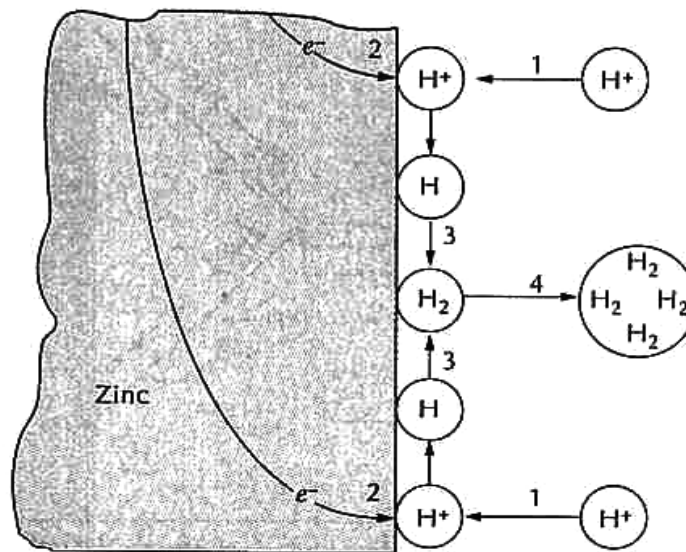


Figura 4.11.- Representación esquemática de las posibles etapas de la reacción de reducción del hidrógeno. La velocidad está controlada por polarización de activación.

*La polarización por concentración esta asociada con las reacciones electroquímicas que son controladas por la difusión de iones en el electrolito, por ejemplo, en el ejemplo anterior si la concentración de iones de hidrógeno es baja, tomara una mayor cantidad de tiempo el desplazamiento de estos hacia la superficie del metal y consecuentemente, la reacción sufrirá un retraso.*

#### **4.9.- PASIVIDAD**

*Es la perdida de reactividad química que sufren algunos metales al exponerse a un medio especifico, algunos ejemplos son: el hierro, el níquel, el aluminio y el cromo.*

*Dos teorías tratan de explicar este comportamiento a saber.*

- *Teoría de la película de oxido y*
- *Teoría de la adsorción:*

*La primer teoría trata de explicar el fenómeno en base a la formación de una película de oxido compleja que se adhiere firmemente a la superficie del metal base, protegiéndolo de una corrosión posterior.*

*La segunda teoría dice que sobre la superficie del metal se forma una película de oxígeno químicamente adsorbida que aísla al metal del entorno y protege al metal de la corrosión.*

*Si se grafica el poder oxidante de una solución contra la velocidad de la corrosión se puede observar que en forma inicial la relación es lineal esto es, aumenta el poder oxidante y aumenta la velocidad de corrosión, figura 4.12.*

*Sin embargo, al llegar a cierta concentración, la velocidad de ataque o corrosión se hace prácticamente cero y se dice entonces que metal se ha pasivado.*

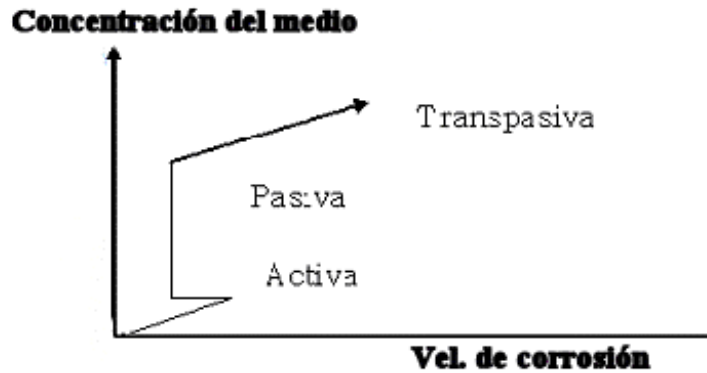


Figura 4.12.- Etapas en la pasivación de un metal

#### 4.10.- VELOCIDAD DE CORROSIÓN (CINÉTICA)

*Hasta ahora nuestro estudio de la corrosión en los metales se ha basado en la serie electromotriz y en condiciones de equilibrio, sin embargo en la práctica, los potenciales termodinámicos no informan sobre la velocidad de corrosión real.*

*La cantidad de metal uniformemente corroído o depositado electroquímicamente sobre un cátodo durante cierto tiempo se puede calcular aplicando la ecuación de Faraday que establece lo siguiente.*

$$W = I \cdot T \cdot M / n F$$

*Donde:*

*W = la cantidad de metal que se ha corroído o depositado [g]*

*I = corriente [A]*

*T = tiempo que dura el proceso [s]*

*F = constante de Faraday= 96500 [A.s/mol]*

*M = masa atómica del metal.[g/mol]*

*n = la valencia del metal*

*En el trabajo experimental la velocidad de corrosión en un ambiente específico se puede medir de varias formas y que se mencionan a continuación:*

## TECNOLOGÍA DE MATERIALES II

- *Midiendo el peso perdido de una muestra durante un cierto periodo de tiempo teniendo como unidades (g/h).*
- *También se puede medir como el peso perdido en miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd)*
- *Por último, se puede expresar la velocidad de corrosión en términos de la pérdida de espesor del material por unidad de tiempo. En la práctica se manejan dos unidades: milipulgadas por año (mpy) y milímetros por año (mmpa) pudiéndose calcular así:*

$$\text{mpy} = \frac{534W}{DAT}$$

Donde:

*D = densidad del material [g/cm<sup>3</sup>]*

*A = Área [pulg<sup>2</sup>]*

*T = tiempo[horas]*

**W = pérdida de peso de la muestra [g]**

*Y para el sistema métrico:*

$$\text{mmpa} = \frac{8760W}{DAT}$$

Donde:

*D = densidad del material [g/cm<sup>3</sup>]*

*A = Área [mm<sup>2</sup>]*

*T = tiempo[horas]*

*W = pérdida de peso de la muestra [g]*

*La electrodeposición o galvanoplastia es una operación mediante la cual se deposita una capa de metal sobre otro metal gracias a la electrolisis de una solución que contiene una sal de aquel metal.*

*La mayor parte de los metales pueden ser depositados de esta manera pero los mas usados son Ni, Cr, Cu, Cd, Zn, Hg, Au, plata y oro.*



*En aplicaciones comerciales se coloca el objeto a recubrir en un recipiente que contiene un electrolito adecuado, figura 4.13, el ánodo va a ser un metal que va ser depositado y que debe ser de alta pureza, el objeto o pieza que se va a recubrir es el cátodo y además se requiere una fuente de CD que va actuar como una bomba, cuya función es extraer los electrones del ánodo.*

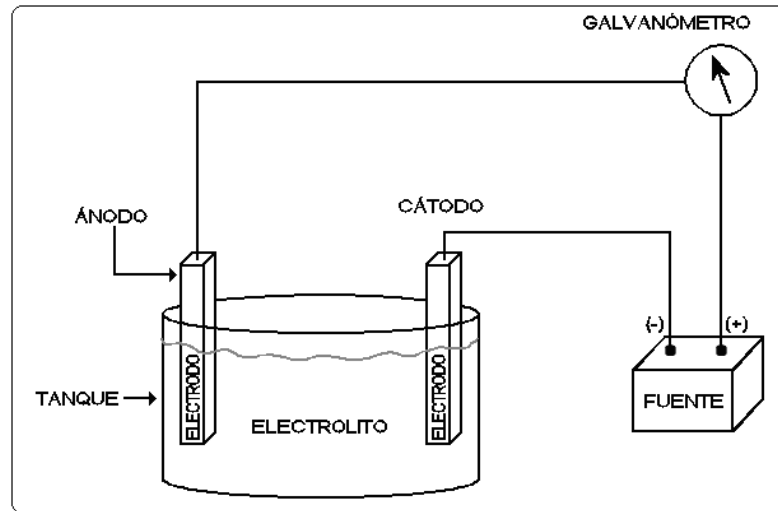


Figura 4.13.- Circuito básico para electrodeposición o galvanoplastia

#### **4.11.- CONTROL DE LA CORROSIÓN**

*La corrosión no se puede evitar al 100% pero existen varios métodos y técnicas para su control, siendo las mas usadas las que a continuación se mencionan:*

- *Selección del material adecuado*
- *Mejorar el diseño*
- *Uso de recubrimientos*
- *Ánodos de sacrificio y corrientes impresas.*
- *Uso de sustancias inhibidoras.*

*Selección del metal.*

*Uno de los métodos más sencillos para el mejoramiento de la resistencia a la corrosión, es el empleo de un metal o una aleación que sea más resistente a ella. Aunque este procedimiento*

*puede hacer que sean más altos los costos iniciales, no deben pasarse por alto los ahorros resultantes de los costos más bajos de mantenimiento y sustitución.*

*Las predicciones relativas a la resistencia específica a la corrosión en un medio ambiente particular, son arriesgadas. Afortunadamente, hay numerosas referencias que indican los resultados de muchas investigaciones sobre el comportamiento de la corrosión.*

*Mejoras en el diseño:*

*En el diseño de algún equipo deben considerarse los siguientes factores.*

- *No unir metales distintos, si van a trabajar en un ambiente corrosivo.*
- *Si no hay manera de evitar lo anterior cuidar que el área anódica sea mucho mas grande que el área catódica.*
- *Evitar la presencia de hendiduras o huecos donde pueda acumularse sustancias corrosivas.*
- *Cuidar que no haya estancamientos de líquidos sobre una superficie metálica.*

*Recubrimientos:*

*La forma mas económica de disminuir la velocidad de corrosión en un equipo es aplicando un recubrimiento, el cual puede ser de los tipos siguientes.:*

➤ *Recubrimientos orgánicos.*

*Se utilizan comúnmente para mejorar la resistencia a la corrosión. La expresión recubrimientos orgánicos incluye las películas orgánicas, tales como pinturas, resinas, barnices, grasa, placas adhesivas de material plástico, y otros materiales similares. Aunque algunos de los recubrimientos orgánicos, como las pinturas, tienen probabilidades de contener materiales inorgánicos, el material predominante es orgánico. La calidad de esos recubrimientos puede mejorarse, o reducirse el costo, mediante el uso de rellenos inorgánicos; sin embargo, básicamente, la protección se proporciona mediante la exclusión de la humedad, el aire y otros medios corrosivos. Puesto que los recubrimientos son orgánicos, se*

*descomponen a temperaturas elevadas. Dichos recubrimientos se recomiendan principalmente para usarse a temperaturas inferiores a la de ebullición del agua.*

➤ *Recubrimientos inorgánicos.*

*Incluyen materiales cerámicos, tales como los vidriados. Buenos ejemplos son los utensilios de cocina esmaltados, las tinas del baño y los lavabos. Esas cubiertas son eficaces a causa de la exclusión de medios corrosivos. Resisten temperaturas muy por encima de las que provocan que los recubrimientos orgánicos pierdan su eficiencia. Aunque los recubrimientos inorgánicos son duros y resistentes al desgaste, son frágiles y se encuentran sujetos a daños causados por los choques térmicos.*

➤ *Recubrimientos metálicos.*

*Se utilizan para protección contra los daños estructurales superficiales o para mejorar la apariencia. Se aplican por medio de muchas técnicas, que incluyen la electrodeposición, la inmersión, la aspersión con metales fundidos atomizados o pulverizados, y la reacción con metales en polvo que lo rodean, a temperaturas elevadas. A veces se logra una protección, debido a que el recubrimiento metálico es más resistente al efecto del medio ambiente que el material básico. El estaño aplicado al acero proporciona una protección de este tipo. Puesto que el acero es anódico con respecto al estaño, la eficiencia del recubrimiento sólo es válida mientras la capa es continua. Si se desarrolla un orificio diminuto o se la superficie tiene raspaduras, se acelera la corrosión del acero. La razón desfavorable de la superficie anódica a la catódica, hace aumentar la gravedad de la perforación de la capa de estaño. A ciertos tipos de recipientes se les aplican recubrimientos resinosos, para completar o reemplazar el recubrimiento de estaño sobre el acero.*

*En otras aplicaciones, se selecciona un recubrimiento anódico con respecto al metal básico. Es este procedimiento, el metal básico catódico se protege y al método se le llama protección catódica. En tanto queda algo del recubrimiento anódico, se tiene cierta protección. Los defectos en el recubrimiento anódico no son graves, debido a que la razón del área del ánodo a la del cátodo es favorable. Un ejemplo de este tipo de recubrimiento es el zinc aplicado al alambre de acero para cercas o a las láminas de acero, para producir acero galvanizado.*

*- Protección catódica.*

*Los principios de la protección catódica se aplican a las estructuras subterráneas, tales como tuberías, tanques de almacenamiento y cimientos estructurales. También, se usa para proteger las superficies internas de los depósitos de almacenamiento de agua y los condensadores.*

*Dicha protección se puede aplicar mediante dos métodos , a saber:*

- Utilizando ánodos de sacrificio*
- Por medio de corrientes impresas*

*En el primer método, se puede utilizar un ánodo de sacrificio que generalmente es el zinc o magnesio, el cual se encuentra inmerso en una mezcla de yeso con arcilla (back fill) con el fin de proteger al elemento principal como se muestra en la figura 4.14. Estos metales se disuelven selectivamente, proporcionando protección para cualquier superficie expuesta de acero.*

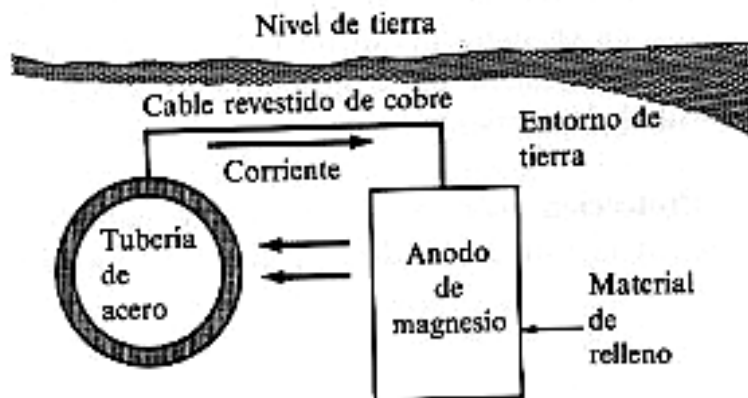


Figura 4.14.- Protección de una tubería enterrada utilizando un ánodo de sacrificio

*También, la prevención de la corrosión de los cascos, el timón, las hélices y los cigüeñales de los barcos, se lleva a cabo por medio de ánodos de zinc o magnesio que se colocan en el casco, cerca de los tornillos, figura 4.15. Sin esos ánodos, las porciones de acero del barco serían*

*anódicas con respecto a los tornillos de latón. La fijación de los ánodos hace que el acero sea catódico, lo cual le da protección.*



**Figura 4.15.- Protección de un casco de barco utilizando ánodos de sacrificio**

*La protección mediante corrientes impresas se logra cuando una estructura metálica que normalmente sería atacada, se hace catódica, haciendo pasar por ella una corriente inversa. La electricidad puede provenir de cualquier fuente de CD, como un generador, un rectificador o una celda galvánica. El borne positivo de la fuente se conecta a un ánodo auxiliar que puede ser de grafito o de una mezcla de grafito más chatarra de hierro y el borne negativo al elemento que se va a proteger, como se ve en la figura 4.16.*

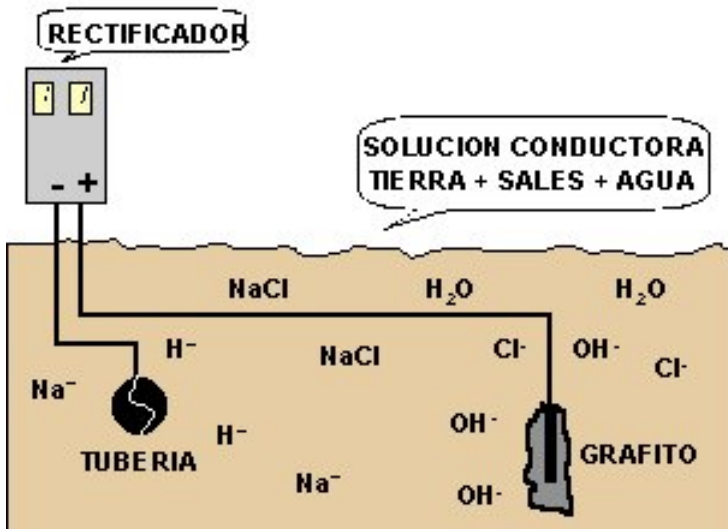


Figura 4.16.- Protección mediante corrientes impresas.

-Sustancias inhibidoras

*Un método de reducir la corrosión en sistemas cerrados es mediante el uso de sustancias inhibidoras solubles. El principio de funcionamiento de estas sustancias es el de formar en la superficie del metal ya sea un compuesto insoluble o la fijación de materia orgánica con el objeto de polarizar la pila de corrosión.*

4.12.- OXIDACIÓN

*Es un efecto no deseado en metales sometidos a altas temperaturas y si bien la oxidación se refiere en forma general a una reacción productora de electrones, este término, se utiliza en este caso para designar la reacción entre un metal y oxígeno en ausencia de humedad, conociéndose también como escamado, deslustrado o corrosión en seco. Actualmente en muchos procesos industriales se utilizan diversas máquinas y equipos que deben trabajar a temperaturas elevadas tal y como es el caso de turbinas de gas, hornos, motores para avión, y en procesos petroquímicos a altas temperaturas. La figura 4.17 muestra como se puede considerar a la oxidación de manera análoga a la corrosión electroquímica; nótese que los iones metálicos se forman en la interfase óxido-metal y el oxígeno se reduce a iones en la interfase óxido-gas.*

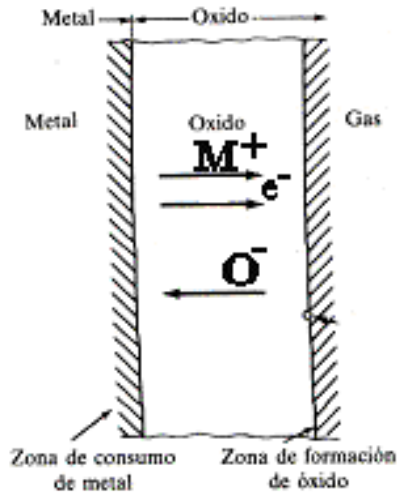


Figura 4.17.- Oxidación de un metal

De la figura, se puede observar que la capa de óxido cumple con las siguientes funciones:

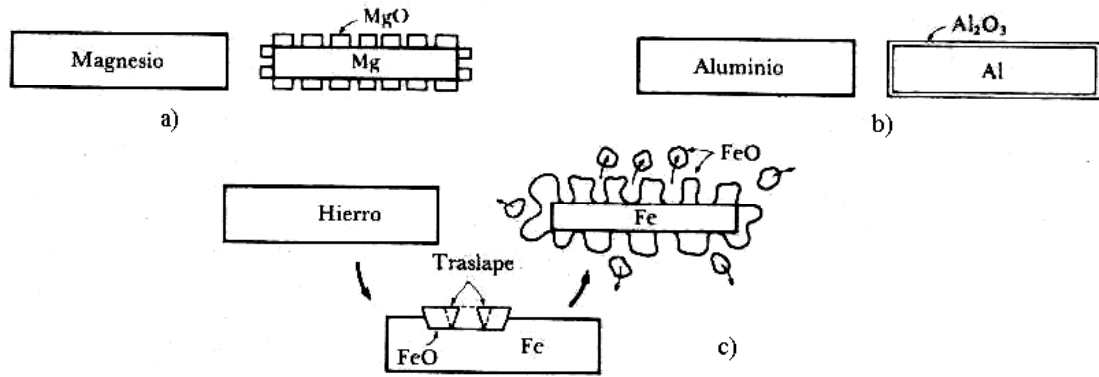
- Actúa como un conductor iónico.
- También lo hace como un conductor de electrones.
- Actúa Como un electrodo en el cual se reduce el oxígeno
- Y como un electrodo en el cual se oxida el metal.

Para que un óxido sea protector debe tener las siguientes características

- El coeficiente de dilatación debe tener un valor cercano al del metal base.
- Debe tener buena adherencia.
- Debe tener un alto punto de fusión.
- Debe poseer buena plasticidad a altas temperaturas para resistir fracturas.
- Debe tener una baja conductividad térmica.
- Debe poseer una relación P.B (relación Pilling- Bedworth) entre 1 y 2

$$P. B = \frac{\text{Volumen del metal que se ha oxidado}}{\text{Volumen del óxido}}$$

Si la relación P.B es mayor que 2, el óxido es muy espeso y se desprende con facilidad, y si menor que uno, no alcanza a cubrir la totalidad de la superficie de la pieza, figura 4.18.



**Figura 4.18.- Capas de óxido en diferentes metales**

**4.12.1.- Velocidades de oxidación (Cinética)**

*Desde el punto de vista de la Ingeniería, la velocidad a la que se oxidan los metales y aleaciones es muy importante ya que permite establecer la duración o vida útil de un elemento y se mide generalmente como la ganancia en peso por unidad de área.*

*Durante la oxidación de diversos metales se han observado algunas leyes de velocidad empíricas siendo las más comunes las que se describen a continuación:*

**-Ley de oxidación lineal**

*Este comportamiento lo exhiben aquellos metales que producen películas porosas de óxido, por ejemplo, el paladio con un  $PB = 0.45$  o el tantalio con una relación  $PB = 2.5$ . Esta ley es descrita por la ecuación siguiente:*

$$W_L = k_L t$$

**Donde:**

$W_L$  = ganancia en peso por unidad de área.

$k_L$  = Constante

$t$  = tiempo



*-Ley de oxidación parabólica*

*En esta la ley, la difusión de los iones es la etapa que controla la oxidación del metal siguiendo la ecuación que a continuación se proporciona.*

$$W_p^2 = K_p t + C$$

*Donde:*

*K<sub>p</sub> y C son constantes*

*Muchos metales se oxidan de acuerdo a esta ley y exhiben óxidos coherentes y espesos; por ejemplo, el hierro, cobre y el cobalto a temperaturas elevadas.*

*-Ley de oxidación logarítmica*

*Algunos metales como el aluminio, el cobre o el hierro se oxidan a temperatura ambiente o temperaturas ligeramente elevadas formando películas delgadas que siguen la ley de la velocidad logarítmica dada por la ecuación siguiente.*

$$W_e = K_e \log (C \cdot t + A)$$

*Donde:*

*W<sub>e</sub> = ganancia en peso*

*t = tiempo*

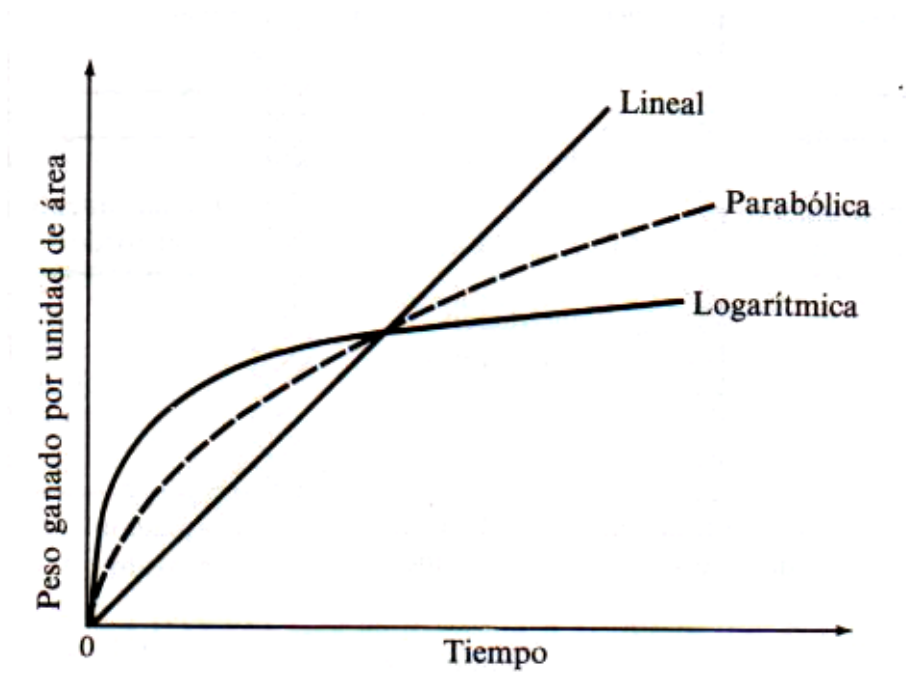
*K<sub>e</sub>, C y A son constantes.*

*Aquellos materiales que siguen la ley lineal tienden a oxidarse catastróficamente por ejemplo el tungsteno, paladio, tantalio y molibdeno.*

*Los metales que exhiben la ley parabólica se oxidan a menor velocidad, sin embargo lo continúan haciendo hasta que se destruye el metal por ejemplo, el hierro a altas temperaturas.*

*Los que exhiben la ley logarítmica a principio se oxidan muy rápido pero posteriormente la capa de óxido sirve como protección al metal base.*

*En la figura 4.19 se hace una comparación entre las Leyes antes descritas.*



**Figura 4.19.- Comparación entre las distintas leyes de oxidación**

## **CAPÍTULO 5**

### **PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS**

#### **5.1.- PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS**

*Los Ensayos No Destructivos, END (NDT en inglés), son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que eran relativamente desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado ofreciendo calidad en sus productos.*

*Las actividades que revisten mayor importancia para los fines de esta introducción son las pruebas e inspecciones que normalmente se practican a los materiales y que se pueden dividir de diferentes formas. Una de las clasificaciones más usuales es la siguiente:*

- *Pruebas Destructivas*
- *Pruebas no destructivas*

*El objetivo principal de las pruebas destructivas es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza. La ejecución de las pruebas destructivas involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en la determinación correspondiente, por lo que podemos concluir que los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección.*

*Este tipo de pruebas siempre ha sido necesario para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño. Debe observarse que estas pruebas no se pueden aplicar a todas las partes o componentes, ya que serían destruidos y perderían su utilidad.*

*Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, como es el caso de la industria aeroespacial, la núcleo -eléctrica o la petroquímica, impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se*

*estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos; lo que planteó una severa dificultad a los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de otras técnicas de inspección, diferentes a la visual, con las cuales se medía la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto fue posible al medir alguna otra propiedad física del material y que estuviera relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección; es decir, se inició la aplicación de las pruebas no destructivas.*

*Las pruebas no destructivas son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación, etc., y que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, sino que más bien los complementan.*

*Las pruebas no destructivas, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen.*

*De acuerdo con su aplicación, los Ensayos no Destructivos (nombre más comúnmente usado para las pruebas no destructivas) se dividen en:*

- *Técnicas de Inspección Superficial.*
- *Técnicas de Inspección Volumétrica.*
- *Técnicas de inspección de la integridad o hermeticidad.*

*Y las más usadas hoy en día son:*

- *Inspección visual*
- *Líquidos penetrantes*
- *Ultrasonido*
- *Rayos X*
- *Partículas magnéticas*
- *Corrientes parásitas.*

### **5.2.- INSPECCIÓN VISUAL**

*Esta prueba no destructiva es la más sencilla de todas y permite la detección de defectos superficiales fácilmente observables como pueden ser grietas. Su eficiencia depende de los factores siguientes:*

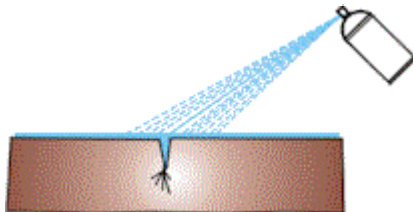
- *Limpieza de la pieza*
- *Forma de la pieza.*
- *Agudeza visual del probador o cateador.*

### **5.3.- LÍQUIDOS PENETRANTES**

*Con esta prueba se puede detectar discontinuidades en la superficie como puede ser grietas y fisuras y consiste básicamente en lo siguiente:*

*1.- Preparación de la superficie para el ensayo:*

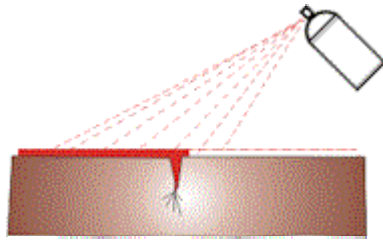
- a) Remueva pinturas, suciedad, y/u óxidos por algún método apropiado.*
- b) Aplique limpiador / removedor (CLEANER) sobre la superficie, figura 5.1. Luego remueva con un paño limpio o papel absorbente tipo toalla (no utilice estopa). En caso de ser necesario un mayor grado de limpieza, repita esta operación.*



**Figura 5.1.- Limpieza de la superficie**

*2.- Aplicación del líquido penetrante (PENETRANT):*

*Estando la superficie seca, aplique una película uniforme de penetrante (PENETRANT), manteniendo para esto, el aerosol a una distancia de 30 cm. de la superficie, figura 5.2. Deje transcurrir un tiempo de penetración de 5 a 10 minutos.*



**Figura 5.2.- Aplicación del líquido penetrante**

**3.- Remoción del exceso de penetrante :**

**a) Penetrantes no lavables con agua (PRS) :**

*- Remueva el exceso de la superficie utilizando un paño limpio y seco o papel absorbente tipo toalla ( no utilice estopa ), levemente humedecido con limpiador / removedor (CLEANER), figura 5.3.*

*- Repita esta operación hasta que todo el exceso de penetrante sea removido de la superficie de ensayo.*

**b) Penetrantes lavables con agua (PRA):**

*Remueva el exceso de penetrante de la superficie en ensayo rociando con agua aplicada a muy baja presión.*



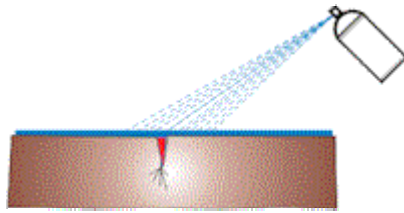
**Figura 5.3.- Retirando el exceso de líquido penetrante**

**4.- Aplicación del revelador (DEVELOPER) :**

*- AGITE BIEN el aerosol del revelador (DEVELOPER) para homogeneizar la suspensión del mismo.*

*- Aplique enseguida una película fina y uniforme del revelador sobre la superficie, manteniendo el aerosol a una distancia de aproximadamente 30 cm. de la misma.*

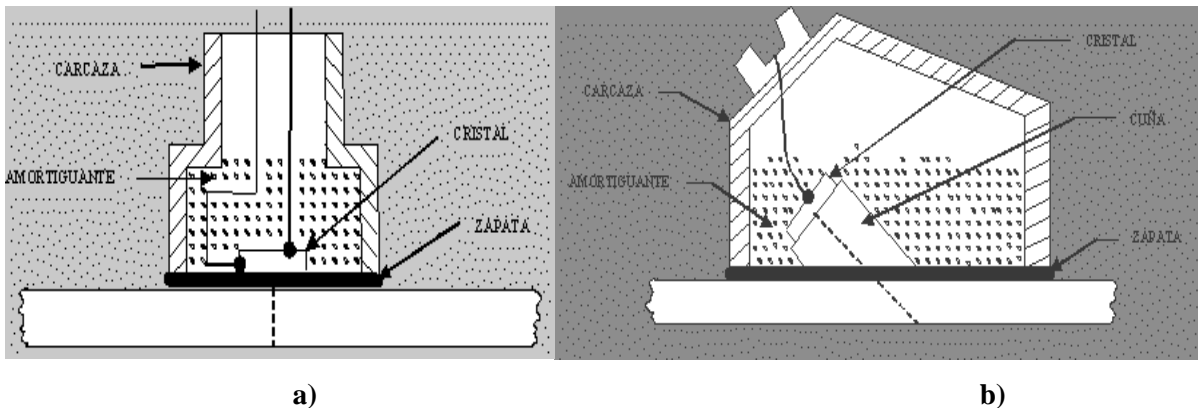
*- Espere de 3 a 10 minutos antes de iniciar la inspección del área respectiva.*



**Figura 5.4.- Revelado de las grietas**

**5.4.- PRUEBA DE ULTRASONIDO**

*En la inspección por ultrasonido se utilizan por lo general ondas longitudinales (haz recto), figura 5.5a) u ondas transversales (haz angular), figura 5.5b). Las frecuencias más comúnmente utilizadas son de 1 a 5 MHz con haces de sonido o ángulos de 0°, 45°, 60° y 70°. En la inspección con haz recto; el sonido es transmitido perpendicularmente a la superficie de entrada del sonido.*

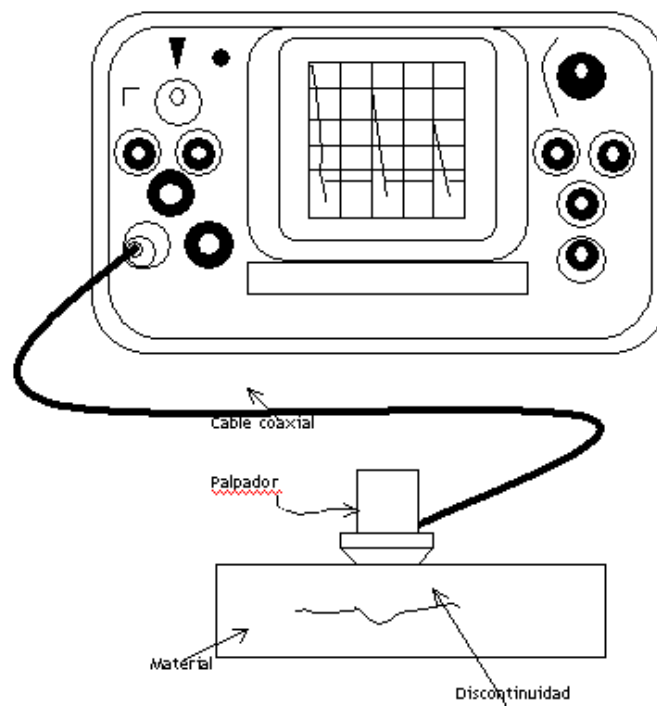


**Figura 5.5.- Ondas de ultrasonido**

*Es frecuente su empleo para la medición de espesores, detección de zonas de corrosión, detección de defectos en piezas que han sido fundidas, forjadas, roladas o soldadas; en las aplicaciones de nuevos materiales como son los metal cerámicos y los materiales compuestos, ha tenido una gran aceptación, por lo sencillo y fácil de aplicar como método de inspección para el control de calidad. Las nuevas tendencias indican que su campo de aplicación se mejorará con el apoyo de las computadoras para el análisis inmediato de la información obtenida.*

*Los equipos de ultrasonido que se emplean actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0.25 hasta 25 MHz.*

*Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico dentro del palpador, figura 5.6, este elemento, que llamaremos transductor, tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente, y por el efecto piezoeléctrico, el transductor vibra a altas frecuencias (lo que genera ultrasonido); estas vibraciones son transmitidas al material que se desea inspeccionar. Durante el trayecto en el material, la intensidad de la energía sónica sufre una atenuación, que es proporcional a la distancia del recorrido. Cuando el haz sónico alcanza la frontera del material, dicho haz es reflejado. Los ecos o reflexiones del sonido son recibidos por otro (o por el mismo) elemento piezoeléctrico y su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos, en donde la trayectoria del haz es indicada por las señales de la pantalla; también puede ser transmitida a un sistema de graficado, donde se obtiene un perfil acústico de la pieza a una pantalla digital, donde se leerá un valor o a una computadora, para el análisis matemático de la información lograda*



**Figura 5.6.- Prueba mediante ultrasonido**



**-Ventajas de la prueba mediante ultrasonido**

- *Se detectan discontinuidades superficiales y subsuperficiales.*
- *Puede delinarse claramente el tamaño de la discontinuidad, su localización y su orientación.*
- *Sólo se requiere acceso por un lado del material a inspeccionar.*
- *Tiene alta capacidad de penetración y los resultados de prueba son conocidos inmediatamente*

**-Limitaciones de la prueba de ultrasonido**

- *Está limitado por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección.*
- *Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido.*
- *Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por este método.*
- *El equipo puede tener un costo elevado, que depende del nivel de sensibilidad y de sofisticación requerido.*
- *El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método que para cualquier otro de los métodos de inspección.*
- *La interpretación de las indicaciones requiere de mucho entrenamiento y experiencia de parte del operador.*
- *Requiere de patrones de referencia y generalmente no proporciona un registro permanente*

5.5.- PRUEBA MEDIANTE RAYOS X (RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL)

*Ésta prueba tiene una amplia gama de aplicaciones en áreas como son soldadura, industria metal mecánica en general por ejemplo, en uniones soldadas esta prueba permite visualizar defectos como porosidades y fusión incompleta rechupes y grietas.*

*En piezas fundidas esta prueba permite identificar inclusiones no metálicas, porosidades, grietas rechupes, etc.*

*El caso de la Radiografía Industrial, como prueba no destructiva, es muy interesante; pues permite asegurar la integridad y confiabilidad de un producto; además, proporciona información para el desarrollo de mejores técnicas de producción y para el perfeccionamiento de un producto en particular.*

*En la actualidad, dentro del campo de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiográfica:*

- *Radiografía con rayos X.*
- *Radiografía con rayos gamma.*

*La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación electromagnética; ya que, mientras los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico, los rayos gamma se producen por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo.*

*Los rayos X son generados por dispositivos electrónicos y los rayos gamma por fuentes radioactivas naturales o por isótopos radioactivos artificiales producidos para fines específicos de Radiografía Industrial, tales como: iridio 192, cobalto 60, cesio 137 y tulio 170.*

*La fuente de rayos X es el ánodo en un tubo eléctrico de alto voltaje. Cuando se pone en funcionamiento, el haz de electrones generado en el cátodo impacta sobre el ánodo y esto provoca la emisión de los rayos X en todas direcciones, figura 5.7. La capa de blindaje alrededor del tubo absorbe los rayos X, excepto aquellos que escapan a través de un orificio o ventana que existe para tal fin. Los rayos que pasan se emplean para producir la radiografía. Cuando se apaga la máquina de rayos X, la radiación cesa y la pieza inspeccionada no*

*conserva radioactividad*

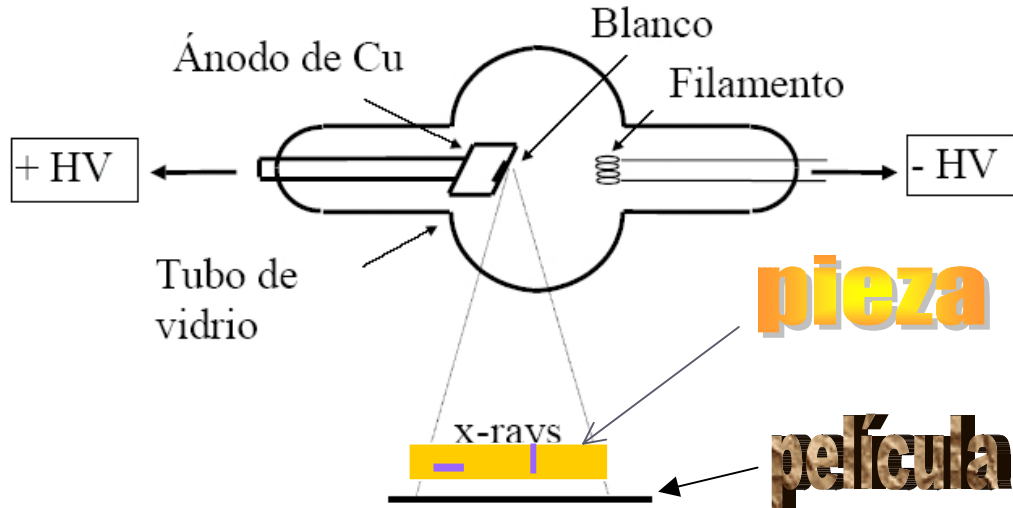


Figura 5.7.- Inspección mediante rayos x.

*Aunque existen arreglos especiales, diseñados para casos determinados, el equipo que se emplea con más frecuencia para la inspección radiográfica es el siguiente:*

- 1. Fuente de radiación (rayos X o rayos gamma).*
- 2. Controles de la fuente.*
- 3. Película radiográfica.*
- 4. Pantallas intensificadoras.*
- 5. Indicadores de calidad de la imagen.*
- 6. Accesorios*

**-Requisitos y secuencia de la inspección por radiografía industrial.**

*El procedimiento que normalmente se sigue para obtener una radiografía se describe a continuación:*

- Inicialmente, deben conocerse algunas características del material que se va a examinar, como son: tipo del metal, su configuración, el espesor de la pared a ser radiografiada, etc. Todo ello con el fin de seleccionar el radioisótopo o el voltaje más adecuado.*

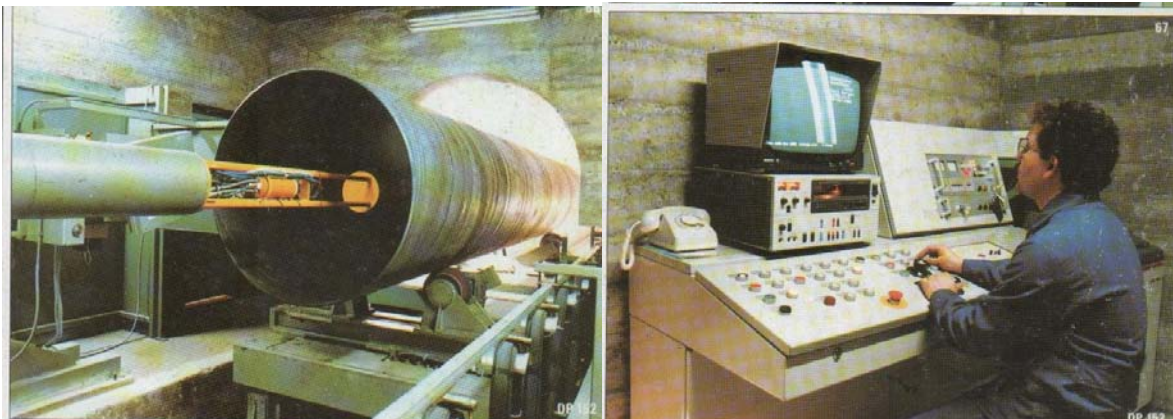
- *Una vez establecida la fuente de radiación, se deben calcular las distancias entre ésta, el objeto y la película, para así poder obtener la nitidez deseada. Igualmente, se selecciona la película con ciertas características que permitan una exposición en un tiempo razonable y una calidad de imagen óptima. Esta se coloca dentro de un porta película que sirve como protección para evitar que la luz dañe la emulsión fotográfica, y que además contiene las pantallas intensificadoras que sirven para reducir el tiempo de exposición, mejorando con esto la calidad de la imagen. Este último proceso se efectúa en el laboratorio.*
- *Una vez realizado lo anterior, se procede a poner en práctica las medidas de seguridad radiológica en la zona en la que se va a efectuar la radiografía con el fin de evitar una sobredosis al personal que pueda estar laborando cerca de la zona de inspección.*
- *A continuación, se hace el arreglo para colocar la fuente a la distancia calculada con respecto al objeto y se coloca la película radiográfica del otro lado de éste para registrar la radiación que logre atravesar al material sujeto a inspección.*
- *Esta radiación provoca la impresión de la película radiográfica, que corresponde al negativo de una fotografía. Entre mayor sea la cantidad de radiación que incida sobre la película, más se ennegrecerá ésta. Con el objeto de determinar la sensibilidad y la calidad de una radiografía, se emplean indicadores de calidad de imagen, mal llamados penetrámetros. Al realizar la inspección, los indicadores de calidad de imagen se eligen normalmente de manera que el espesor de éstos represente aproximadamente el 2% del espesor de la parte a inspeccionar y, siempre que sea humanamente posible, se colocarán del lado de la fuente de radiación.*
- *La exposición se realiza, bien sea sacando la cápsula que contiene al radioisótopo o encendiendo al aparato de rayos X; esto se lleva a cabo durante el tiempo previamente calculado para realizar la exposición. Una vez terminada la exposición, se recupera la cápsula o se apaga el instrumento de rayos X y la película se lleva a revelar.*
- *Si se comprueba que la imagen es satisfactoria, entonces se interpreta para conocer qué tipo de indicaciones están presentes; las cuales posteriormente serán evaluadas para conocer su nivel de severidad y su posible efecto en el material que se inspecciona.*

***-Fluoroscopia o radioscopia***

*Una de las mayores desventajas de los ensayos por radiografía es el tiempo involucrado en la exposición y revelado de la película, así, la prueba por radioscopia disminuye el tiempo de ensayo, pudiendo ser incorporado en una línea de producción.*

*Radioscopia o fluoroscopia es el proceso de inspección por observación directa de una pantalla, la cual flúorese por la radiación transmitida por la pieza que se esta ensayando.*

*Las áreas de menor espesor (o con defectos) transmiten mayor cantidad de radiación a la pantalla fluorescente produciendo áreas de mayor brillante, figura 5.8. Desde este punto de vista, se puede decir que con la fluoroscopia se obtiene una imagen “positiva” de la pieza y con la radiografía tradicional la imagen es en “negativo”.*



**Figura 5.8.- Inspección mediante fluoroscopia de una tubería.**

**Ventajas de la radiografía industrial.**

- *Es un excelente medio de registro de inspección.*
- *Su uso se extiende a diversos materiales.*
- *Se obtiene una imagen visual del interior del material.*
- *Se obtiene un registro permanente de la inspección.*
- *Descubre los errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.*

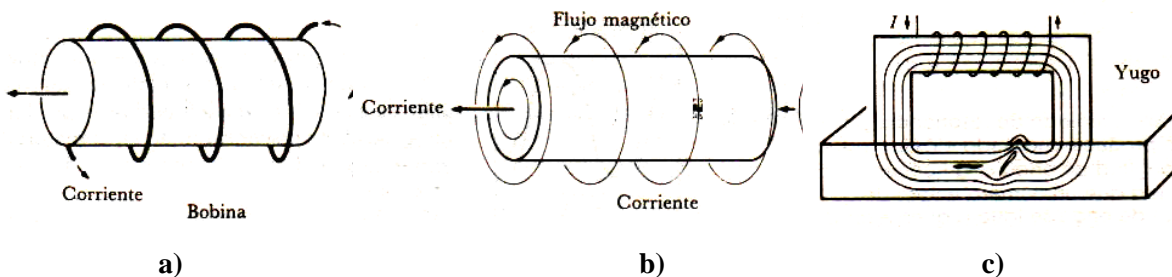
**Limitaciones de la radiografía industrial.**

- *No es recomendable utilizarla en piezas de geometría complicada.*
- *No debe emplearse cuando la orientación de la radiación sobre el objeto sea inoperante, ya que no es posible obtener una definición correcta.*
- *La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados.*
- *Su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.*
- *Requiere personal altamente capacitado, calificado y con experiencia.*
- *Requiere de instalaciones especiales como son: el área de exposición, equipo de seguridad y un cuarto oscuro para el proceso de revelado.*
- *Las discontinuidades de tipo laminar no pueden ser detectadas por este método.*

**5.6.- INSPECCIÓN MEDIANTE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

*Ésta prueba detecta los defectos cercanos en la superficie en materiales ferromagnéticos; se basa en la producción de un campo magnético en la pieza a probar y que puede ser producido en las tres formas siguientes.*

- *Colocando la pieza dentro de una bobina por la que se hace circular una corriente alterna, figura 5.9a)*
- *Haciendo circular una corriente alterna a través del metal, figura 5.9b)*
- *Tocando la pieza con una sonda que tiene forma de herradura, figura 5.9c)*



**Figura 5.9.- Creación de un campo magnético**

*Si existe algún defecto en el metal se producirá un pequeño imán con sus polos norte y sur que atraerá partículas magnéticas en polvo que pueden añadirse en seco o en suspensión en un fluido como el agua o aceite ligero para un mejor movimiento.*

*También se puede teñir o recambiar un material fácilmente para una mejor observación.*

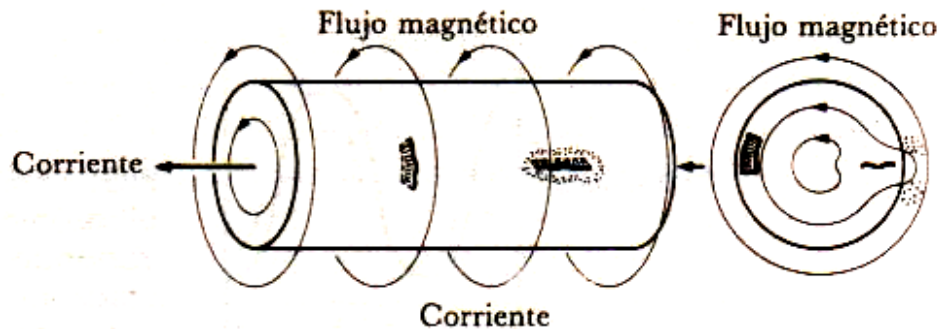


Figura 5.10.- Detección del defecto

### 5.7.- PRUEBAS CON CORRIENTES PARÁSITAS (DE EDDY):

*Es el adelanto más notable en cuanto a pruebas no destructivas y tienen las siguientes aplicaciones.*

- *Detectar defectos como grietas, porosidades e inclusiones,*
- *Evaluar conductividad eléctrica y modulo de elasticidad.*
- *Medir características como dureza, composición química y espesor de los materiales (por comparación)*

*Se basa en el principio de que una bobina o devanado que conduce una corriente alterna , produce una corriente parásita de características similares y que fluye a través de la muestra. Si existe un efecto dicha corriente deberá desviarse entorno al mismo y con ello se debilita, hecho que es detectado mediante un galvanómetro o bobina auxiliar, figura 5.11.*

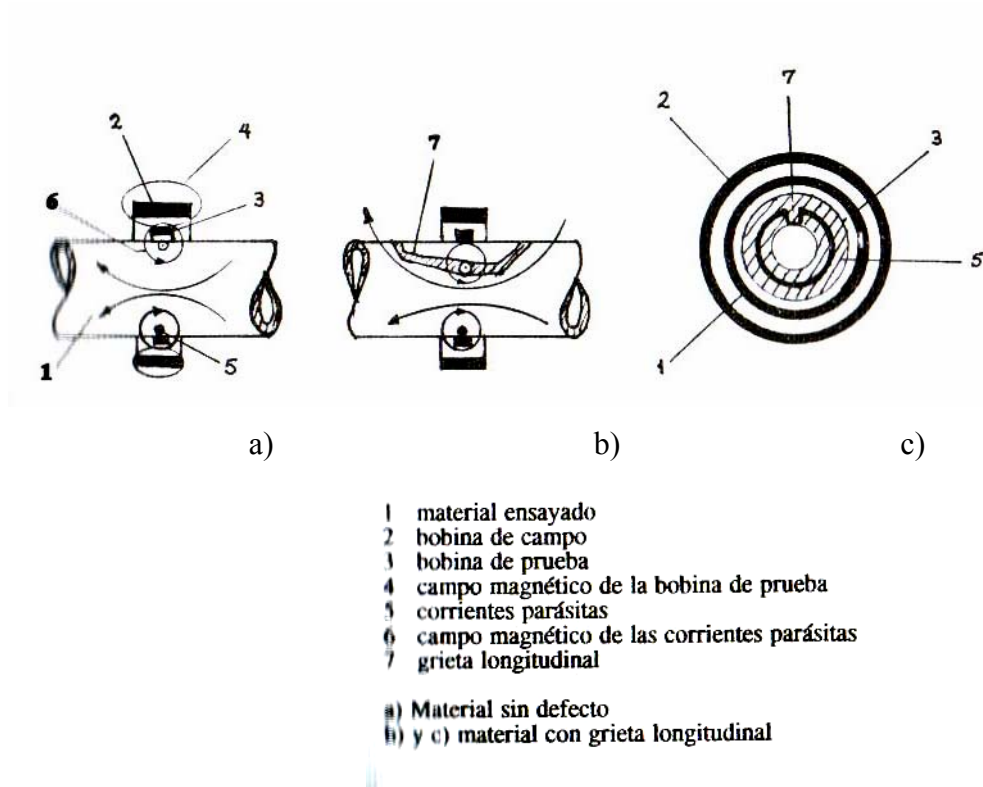


Figura 5.11.- prueba mediante corrientes parásitas utilizando el método de envolvente

*Con el estudio y evaluación cuidadosos de los cambios ocasionados por las diferencias en las propiedades del metal se puede diferenciar los defectos o evaluar dichas propiedades.*



## **CAPÍTULO 6**

### **FALLA MECÁNICA DE LOS MATERIALES**

#### **6.1.- INTRODUCCION**

*Se dice que un elemento mecánico ha fallado cuando se presenta cualquiera de los hechos siguientes:*

- a) La parte llega a ser completamente inoperable (ya sea porque se fracturó o porque sufrió una gran cantidad de deformación plástica).*
- b) La pieza aún está en operación pero no durará mucho tiempo más funcionando satisfactoriamente.*
- c) Serios daños han hecho a la pieza inconfiable o insegura para un uso continuo y por lo tanto es necesario removerla inmediatamente para repararla o cambiarla.*

*Los principales factores que pueden producir falla son los siguientes:*

*Estado de esfuerzos: Tensión, compresión, torsión y cortante.*

*Condiciones de carga: estática, cíclica y de impacto*

*Condiciones térmicas: Calentamientos ó enfriamientos rápidos ó cíclicos.*

*Condiciones ambientales: Atmósfera oxidante ó corrosiva*

*Los factores anteriores conducen a diversos tipos de falla como pueden ser: por distorsión, por fatiga, corrosión, desgaste, temperaturas elevadas, etcétera, las cuales se describirán a continuación con mayor detalle.*

#### **6.2.- TIPOS DE FRACTURA**

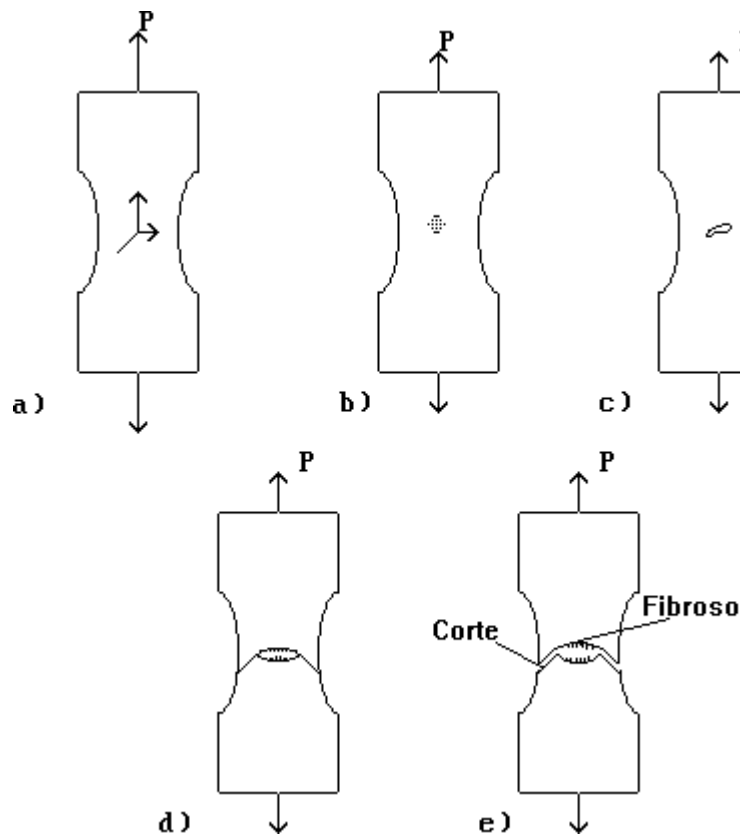
*Una fractura es la separación de un cuerpo en dos partes. La naturaleza de una fractura es distinta dependiendo del tipo de material y se encuentra afectada por el origen de los esfuerzos aplicados, las características geométricas de la muestra , las condiciones de temperatura, así como de la velocidad de deformación. Las diferencias entre los tipos de fractura producidas en materiales dúctiles y frágiles sometidos a esfuerzos variables o a altas temperaturas varían desde su nucleación hasta su propagación.*

*Los daños que ocurren en una pieza durante su servicio pueden causar fracturas dúctiles o frágiles en la misma: La fractura frágil o dúctil es el proceso a través del cual la separación*

*final ocurre en partes que se han agrietado en servicio debido a la acción de otros mecanismos como pueden ser fatiga, corrosión bajo esfuerzo, termofluencia, etc.*

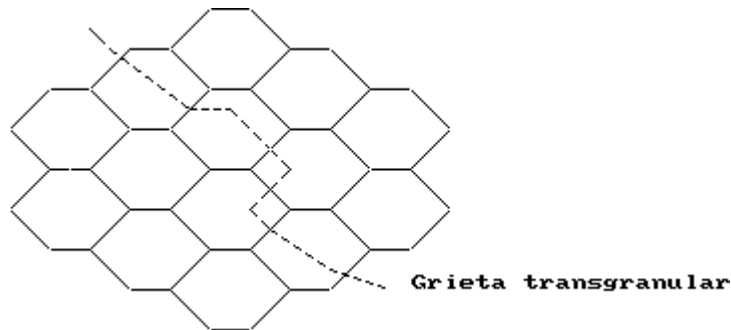
*Fracturas dúctiles.- Este tipo de fracturas se caracterizan por desgarrar al metal, produciendo una gran cantidad de deformación plástica y un gasto considerable de energía. La fractura dúctil por tracción casi siempre tiene una apariencia fibrosa y gris (opaca) y se pueden reconocer tres estados o fases diferentes en la fractura dúctil, a saber:*

- 1.- La probeta forma un cuello o garganta formándose cavidades en ella como se aprecia en la figuras 6.1a) y 6.1b).*
- 2.- Las cavidades que se han formado en el cuello coalescen en una grieta en el centro de la muestra y se propagan a lo largo de la superficie en dirección perpendicular a la fuerza aplicada, como se aprecia en la figura 6.1c)*
- 3.- Cuando la grieta se acerca a la superficie, la dirección de la grieta cambia a 45° con respecto al eje de tensión y da lugar a una fractura de taza y cono, figuras 6.1d) y 6.1e).*



**Figura 6.1.- Etapas en la formación de una fractura dúctil de taza y cono**

*Fractura frágil.- Muchos metales y aleaciones se fracturan de manera frágil con muy poca deformación plástica. La fractura frágil normalmente se presenta bajo planos cristalográficos específicos conocidos como planos de escisión bajo un esfuerzo normal al plano de escisión. Muchos metales con estructura HCP muestran por lo general una fractura frágil debido a su número limitado de planos de deslizamiento. Así un monocristal de zinc, por ejemplo, bajo un alto esfuerzo normal a los planos (0001) se fracturará de manera frágil. Muchos metales BCC (estructura cúbica de cuerpo centrado) como el hierro, molibdeno y el tungsteno se fracturarán de manera frágil a bajas temperaturas y altas velocidades de deformación. La mayoría de las fracturas frágiles en metales policristalinos son transgranulares (ver figura 6.2), esto es, las grietas se propagan a lo largo de la matriz de los granos, sin embargo, la fractura frágil puede presentarse de manera intergranular si los límites de granos contienen una película o capa frágil, o si la región del límite de grano ha sido quebrada por la segregación de elementos perjudiciales.*



**Figura 6.2.- Grietas transgranulares en aleaciones policristalinas**

*Se cree que la fractura frágil en los metales se lleva a cabo de la manera siguiente:*

- 1.- La deformación plástica concentra las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento en los puntos de obstáculo.*
- 2.- Los esfuerzos cortantes se incrementan en los lugares donde se han bloqueado las dislocaciones y como resultado se forman microgrietas*
- 3.- Un nuevo esfuerzo propaga las microgrietas y la energía de deformación elástica almacenada puede también contribuir a la propagación de las fisuras.*

*Las bajas temperaturas y los incrementos de deformación pronunciados favorecen la fractura frágil. También un estado triaxial de esfuerzos , tal y como el que existe en un corte, puede contribuir a la fractura frágil.*

### 6.3.- TEORIAS DE FRACTURA

*Las teorías de fractura, o más generalmente teorías de falla, tratan de predecir el momento en que un elemento puede fallar. Dicha falla se puede describir como una deformación plástica excesiva o en el peor de los casos fractura del elemento. La suposición básica que constituyen el marco de referencia para todas las teorías de fractura es que está se dará cuando el valor máximo del parámetro en el estado multiaxial de esfuerzos (esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ) alcance ó supere el valor del mismo parámetro en la prueba de tensión simple.*

*Se han postulado un sinnúmero de teorías de falla mencionándose a continuación las más importantes , así como el tipo de material para él que son válidas.*

- 1.- Teoría del esfuerzo normal máximo (materiales frágiles)*
- 2.- Teoría del esfuerzo cortante máximo ( materiales dúctiles)*
- 3.- Teoría de la energía máxima de distorsión (materiales dúctiles)*
- 4.- Teoría de Mohr modificada (materiales frágiles)*

*A continuación se describe cada una de las teorías antes mencionadas:*

*a) Teoría del esfuerzo normal máximo*

*Esta teoría establece lo siguiente:*

*"La falla de un elemento sometido a un estado multiaxial de esfuerzos se presentará cuando cualquiera de los dos esfuerzos principales (  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ) alcancé o supere la resistencia máxima del material obtenida en un prueba de tensión simple". Esto es, un elemento será seguro siempre que se cumplan las dos condiciones siguientes:*

$$\sigma_1 \leq \sigma_{\max} \quad \text{y/o} \quad |\sigma_2| \leq \sigma_{\max}$$

*donde:*

$\sigma_1, \sigma_2$  = *Esfuerzos principales*

$\sigma_{\max}$  = *Resistencia máxima del material a tensión*

*Esta teoría puede expresarse gráficamente como se muestra en la figura 6.3.*

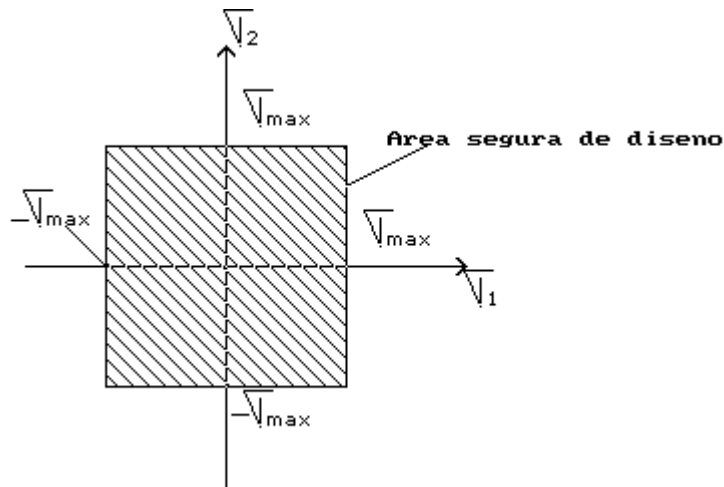


Figura 6.3.- Representación gráfica de la teoría del esfuerzo normal máximo.

*Se puede apreciar que si se gráfica un punto cuyas coordenadas sean  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  y cae dentro del cuadrado el elemento será seguro, por el contrario si cae fuera, el elemento será inseguro, esto es, que podría darse la falla.*

*Esta teoría tiene como principal inconveniente que se asume que la resistencia máxima del material a tensión es la misma que a compresión y en los materiales frágiles casi nunca se cumple con tal situación.*

**b) Teoría del esfuerzo cortante máximo**

*Esta teoría que se aplica a materiales dúctiles establece lo siguiente:*

*"La falla en un elemento sometido a un estado multiaxial de esfuerzos se producirá cuando el esfuerzo cortante  $\tau$  producido en el mismo alcance ó supere el esfuerzo cortante que se tiene en el punto de fluencia en un elemento sometido a una prueba de tensión simple", esto es, un elemento será seguro siempre que :*

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_f$$

*donde:*

*$\sigma_f$  = resistencia a la fluencia del material*

*debiéndose cumplir con la condición de que  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  sean de signos opuestos, esto es, uno debe actuar a compresión y el otro a tensión. En dado caso, que ambos sean a tensión ó ambos a compresión debe satisfacerse lo siguiente:*

$$|\sigma_1| \leq \sigma_f \quad \text{y} \quad |\sigma_2| \leq \sigma_f$$

La solución gráfica de esta teoría la desarrolló el ingeniero Paolo Tresca y se muestra en la figura 6.4.

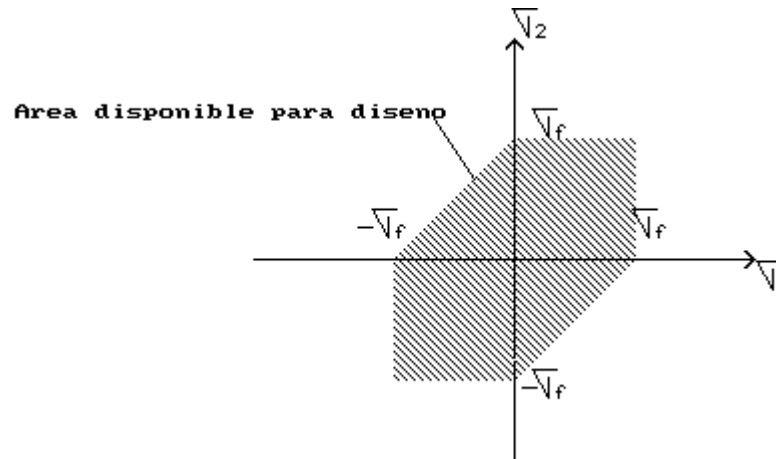


Figura 6.4.- Representación gráfica de la teoría del esfuerzo cortante máximo.

c) *Teoría de la energía máxima de distorsión.*

Esta teoría fue propuesta por Huber y mejorada posteriormente por Von Mises y Hencky por lo que también se le conoce como criterio de Mises-Hencky. Esta teoría puede expresarse de la manera siguiente:

" La falla en un elemento sometido a un estado multiaxial de esfuerzos ocurrirá cuando la energía por distorsión por unidad de volumen alcance o supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se tiene al momento de la falla en una prueba de tensión simple"

Tal teoría surgió como una explicación al hecho de que los materiales sometidos a cargas hidrostáticas presentaban un límite de fluencia por encima de los obtenidos en una prueba de tensión simple. Así, se puede establecer que la energía de distorsión por unidad de volumen ( $U_d$ ) en un material isotrópico sometido a esfuerzos biaxiales se puede calcular mediante la expresión siguiente:

$$U_d = \frac{1}{6 \cdot G} (\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2)$$

Donde:

$G$  = Es el módulo de elasticidad al corte

Por tanto, la energía de distorsión por unidad de volumen en una prueba de tensión simple se puede evaluar haciendo:

$$\sigma_2 = 0 \text{ y } \sigma_1 = \sigma_f$$

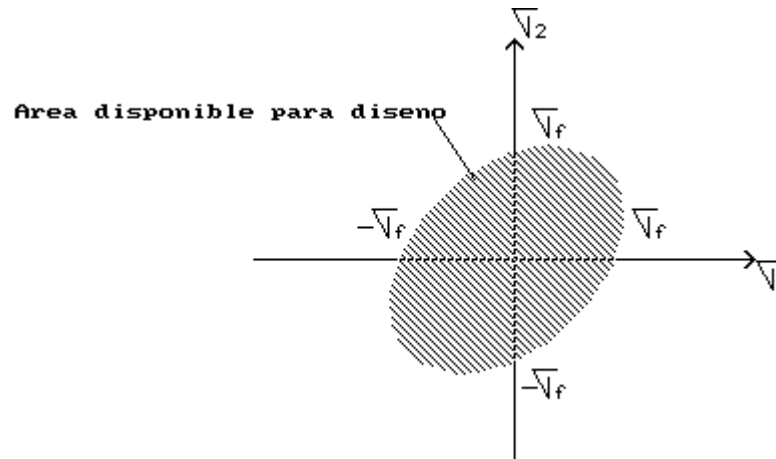
así la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto de fluencia es igual a:

$$Ud_f = \frac{1}{6 \cdot G} (\sigma_f^2)$$

*Igualando ambas expresiones se puede establecer que un elemento será seguro siempre y cuando se cumpla lo siguiente:*

$$(\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2) \leq \sigma_f^2$$

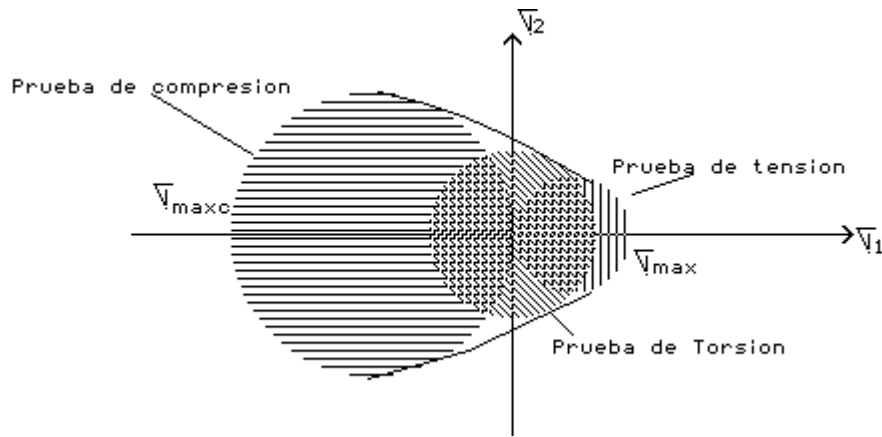
*La representación gráfica de esta teoría es una elipse como la que se muestra en la figura 6.5.*



**Figura 6.5.- Representación gráfica de la teoría de la energía máxima de distorsión**

*d) Teoría de Mohr modificada*

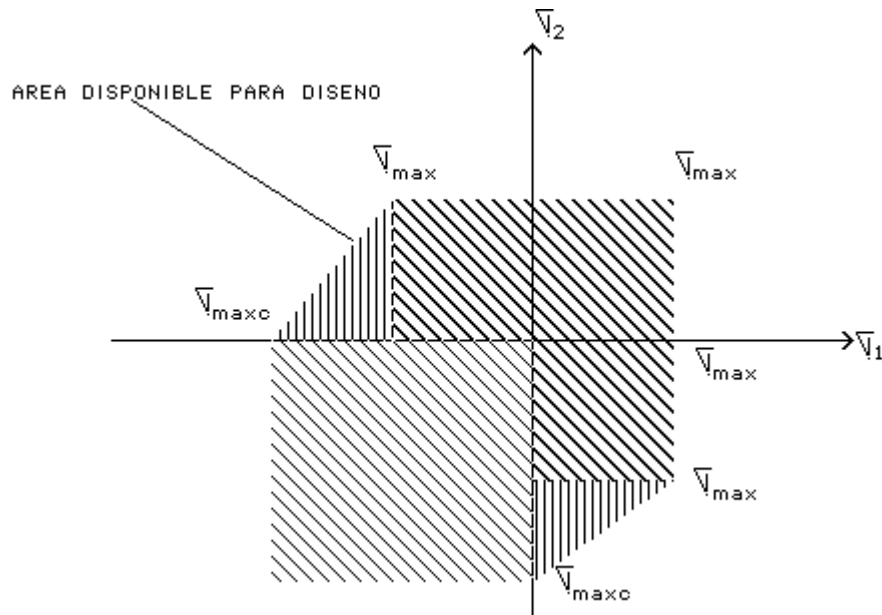
*Esta teoría fue sugerida por el ingeniero alemán Otto Mohr y puede utilizarse para predecir el efecto de un estado biaxial de esfuerzos en un material frágil cuando se encuentran disponibles los resultados de varios tipos de ensayos. Supóngase que a un material frágil se le somete a una prueba de tensión y a una prueba de compresión y a partir de ellos se obtienen la resistencia máxima a tensión ( $\sigma_{max}$ ) y la resistencia máxima a compresión ( $\sigma_{maxc}$ ) para dicho material el estado de esfuerzos producido en el punto de esfuerzo máximo se presenta en la figura 6.6. Para poder analizar el caso cuando  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen signos opuestos, se realiza una prueba de torsión y a partir de dicho ensayo se determina la resistencia máxima al corte del material ( $\tau_{max}$ ). Dibujando al círculo con centro en el origen del sistema de coordenadas nos representa al estado de esfuerzos correspondiente a la falla en una prueba de torsión .*



**Figura 6.6.- Círculos de Mohr correspondientes a las pruebas de tensión, compresión y torsión**

*El criterio de Mohr es lógica extensión de este hecho y de acuerdo con él, un estado de esfuerzos dado es seguro si su representación mediante un círculo éste queda dentro completamente del área limitada por la envolvente de los círculos correspondientes a los datos obtenidos en las distintas pruebas realizadas.*

*A la teoría de Mohr todavía se le puede hacer un pequeño cambio para ponerla de acuerdo con los resultados experimentales, consiste en extender las líneas del primer y tercer cuadrante dentro del segundo y cuarto como se puede apreciar en la figura 6.7. Esta teoría se aplica mejor al diseño en forma gráfica.*



**Figura 6.7.- Representación gráfica de la teoría de Mohr Modificada.**



**6.4.- MECÁNICA DE FRACTURA**

En años recientes se ha realizado un esfuerzo sustancial para cuantificar la naturaleza de las fallas del material como el hundimiento de los barcos de la clase Liberty durante la Segunda Guerra Mundial. El término mecánica de fractura significa el análisis general de la falla de materiales estructurales con defectos preexistentes, esto es, permite determinar si una grieta de una longitud dada en un material del cual se conoce su tenacidad a la fractura puede ser peligrosa y propiciar la falla a un nivel de esfuerzo dado, también, permite la selección de materiales para la resistencia a la fractura y tomarlos en cuenta para un diseño más confiable. Así, nos concentraremos en una propiedad del material que es la información que más se usa a partir de la mecánica de fractura y que se conoce como tenacidad a la fractura. Se puede establecer que la fractura de un material comienza en el sitio donde la concentración de esfuerzos es mayor, por ejemplo, en la raíz de una grieta aguda, considérese entonces una placa bajo esfuerzo axial que contiene una grieta en el borde como se muestra en la figura 6.8a) o una grieta que atraviese su centro como en la figura 6.8b). Podemos darnos cuenta que el esfuerzo es más grande en la raíz de la grieta como se aprecia en la figura 6.8c).

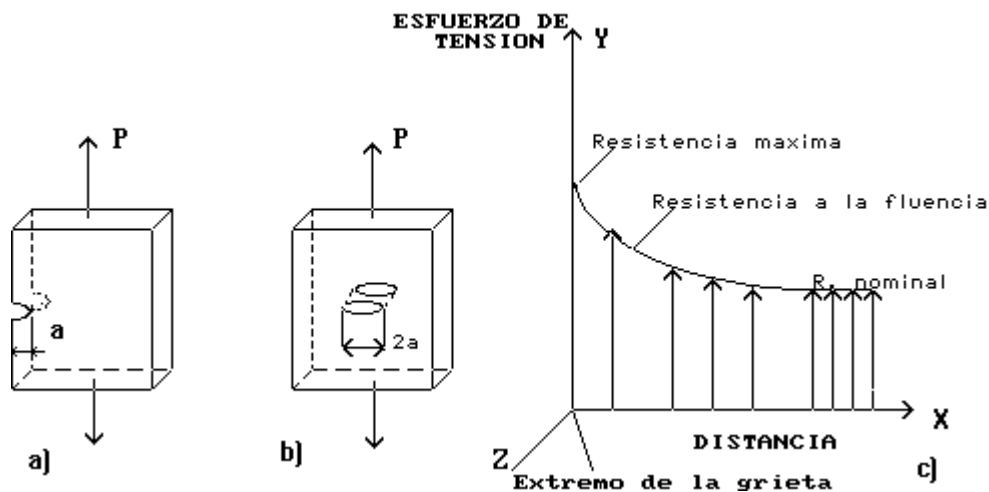


Figura 6.8.- Placa metálica bajo esfuerzos uniaxiales

La intensidad del esfuerzo en el extremo de la grieta depende tanto de las fuerzas aplicadas como de la extensión de la grieta. Se usa el factor de intensidad de los esfuerzos  $K_I$  para expresar la combinación de los efectos del esfuerzo en extremo de la grieta y de la longitud de la grieta. El subíndice I (pronunciése “uno”) indica el ensayo modo I (esfuerzo uniaxial) en el que un esfuerzo de tensión determina que la grieta se abra. Experimentalmente, para el

*caso de un esfuerzo uniaxial en una placa metálica que contenga una grieta en la orilla ó en su interior , se encuentra que :*

$$K_I = Y * \sigma * (\pi * a)^{1/2}$$

*donde:*

*K<sub>I</sub> = factor de intensidad del esfuerzo*

*σ = Esfuerzo nominal aplicado*

*a = longitud de la grieta*

*Y = Constante geométrica dimensional del orden de 1*

*El valor crítico del factor de intensidad del esfuerzo que ocasiona el fallo en la chapa se conoce como tenacidad a la fractura K<sub>IC</sub> del material. En términos del esfuerzo a la fallas σ<sub>falla</sub> y de la longitud de la grieta de borde ( ó para la mitad de la longitud en un grieta central) , dicha tenacidad a la fractura se puede calcular así:*

$$K_{IC} = Y * \sigma_{falla} * (\pi * a)^{1/2}$$

*Los valores de tenacidad a la factura (K<sub>IC</sub>) tienen como unidades en el SI MPa(m)<sup>1/2</sup> y en el sistema inglés tradicional ksi(plg)<sup>1/2</sup> Debe mencionarse que para obtener valores correctos de K<sub>IC</sub> la dimensión de la base B del modelo debe ser relativamente grande comparada con la profundidad de la muesca con el objeto de que prevalezcan las condiciones llamadas de deformación plana. Desde el punto de vista práctico, el uso de las tablas de valores de K<sub>IC</sub> puede prevenir la falla, es decir, que teniendo el valor del esfuerzo de cedencia y el valor de K<sub>IC</sub> tomado de las tablas de puede el tamaño de la grieta y con ello determinar el modo de falla, siendo este un aspecto muy importante en la selección de materiales contra la falla. En la tabla 6.1 se proporcionan los valores de K<sub>IC</sub> y de la resistencia de la fluencia para algunos materiales de uso corriente en ingeniería.*

**Tabla 6.1.- Propiedades de resistencia en placas con espesor de 25 mm a temperatura ambiente.**

<b>MATERIAL</b>	<b>RESISTENCIA ALA FLUENCIA (MPa)</b>	<b>TENACIDAD A LA FRACTURA (MPa m<sup>1/2</sup>)</b>
<b>Acero 4340</b>	<b>1470</b>	<b>46</b>
<b>Acero D6 AC</b>	<b>1730</b>	<b>90</b>
<b>Titanio 6Al-4V</b>	<b>900</b>	<b>57</b>
<b>Aluminio 2024-T4</b>	<b>385</b>	<b>26</b>
<b>Aluminio 7075-76</b>	<b>500</b>	<b>24</b>

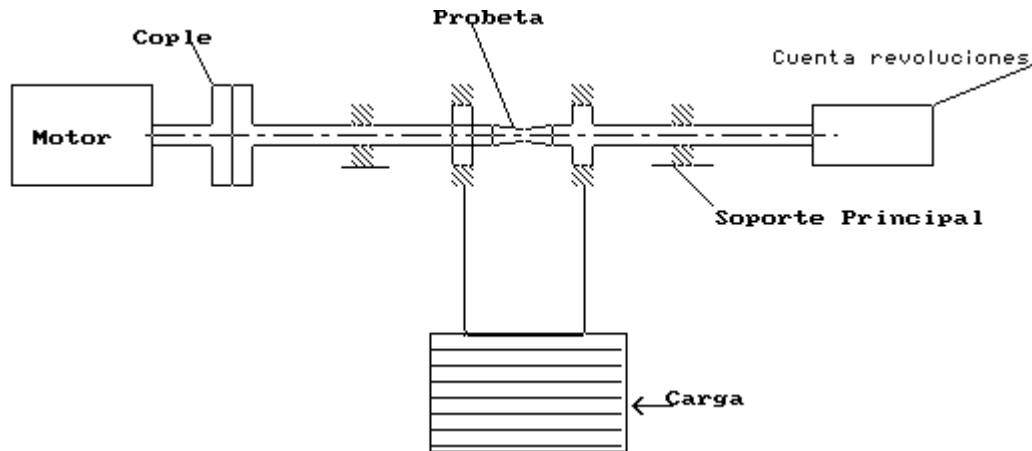
**6.5.- FATIGA**

*Cuando un metal se somete a ciclos de esfuerzo o deformación repetidos, se produce un daño progresivo en el metal ocasionando que la estructura se colapse y finalmente se fracture. Este comportamiento se llama fatiga y por lo general es la causa de un gran cantidad de fallas que se presentan en elementos tales como flechas, resortes, alabes de turbinas de gas ó vapor, ruedas y ejes de ferrocarril y muchos otros elementos sometidos a cargas cíclicas. En todos los casos anteriores la falla ocurrirá bajo condiciones de esfuerzo muchos menores que la resistencia a la fluencia del material.*

*La naturaleza de ésta falla resulta del hecho que existen regiones microscópicas , generalmente en la superficie del metal ( concentradores de esfuerzos) donde el esfuerzo local es mucho mayor que el esfuerzo promedio que actúa en la sección transversal. Cuando este esfuerzo más grande se aplica en forma cíclica, conduce a la formación de grietas diminutas. La presencia de dichas grietas provoca un aumento posterior del esfuerzo en sus puntas o fronteras, lo cual ocasiona un crecimiento de las mismas. Con el paso del tiempo el área de la sección transversal se reduce tanto que es incapaz de soportar las cargas aplicadas y como resultado se tiene una fractura súbita, esto es, aunque el material sea dúctil se comporta como si fuera frágil.*

*Actualmente se utilizan muchos tipos de ensayos para determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas variables y el más común de ellos es la prueba de viga rotatoria en la cual una muestra se encuentra sometida a esfuerzos alternantes de tensión y compresión. Un*

*croquis de dicha máquina conocida como máquina de R.R Moore se presenta en la figura 6.9. Se debe subrayar el hecho de que la probeta se encuentra perfectamente pulida y que se le da una forma afilada hacia el centro con la finalidad de reducir al mínimo la presencia de concentradores de esfuerzos.*



**Figura 6.9 .- Diagrama de una máquina para prueba de flexión invertida de R.R. Moore**

*La figura 6.10 muestra dos curvas típicas de esfuerzo contra número de ciclos (diagrama  $\sigma - N$ ) para un acero y una aleación de aluminio. Para esta última, el esfuerzo necesario para causar la falla de la probeta disminuye conforme aumenta el número de ciclos. Para el acero primero se observa un comportamiento similar al del aluminio, sin embargo, posteriormente la curva muestra un comportamiento asintótico, esto es, que hay un nivel de esfuerzo en el cual la fractura de la probeta nunca se presenta. Ese nivel de esfuerzo se conoce como límite a la fatiga de un material ( $\sigma_e$ ) y ocurre entre los  $10^6$  y  $10^8$  ciclos. Prácticamente todas las aleaciones de hierro muestran dicho comportamiento, pero las aleaciones no ferrosas, excepto el titanio no lo muestran, por lo tanto para dichos materiales no existe un límite a la fatiga bien definido.*

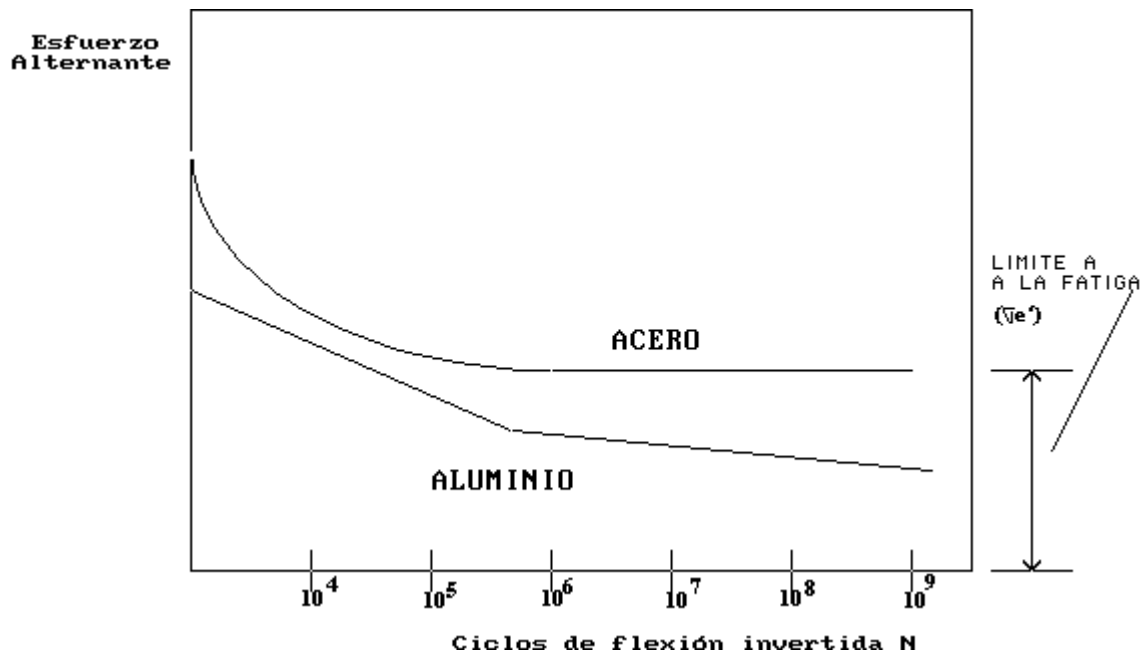


Figura 6.10 .- Curvas de esfuerzo -número de ciclos para un acero y una aleación de aluminio

*Algunos factores importantes que afectan la resistencia a la fatiga de un material son los siguientes:*

- 1.- Concentración de esfuerzos.- La resistencia a la fatiga se ve seriamente afectada por la presencia de concentradores de esfuerzos como pueden ser: ranuras, cambios de sección, cuñeros, agujeros etc. Así, es importante ser cuidadosos durante el proceso de diseño con el fin de reducir dichos efectos.*
- 2.- Rugosidades superficiales. En general, cuanto más lisa sea la superficie final de la pieza, mayor será la resistencia a la fatiga, ya que la rugosidad de la superficie también produce concentraciones de esfuerzos en el material.*
- 3.- Estado de la superficie . Puesto que los fallos por fatiga se originan en la superficie del metal, cualquier cambio en las condiciones de la superficie afectarán la resistencia a la fatiga del metal. Por ejemplo, tratamientos de endurecimiento de superficies de aceros, tales como la carburización y la nitruración que endurecen la superficie incrementando la vida útil de la pieza. Por otro lado, el proceso de descarburización de un acero afectará de manera negativa la resistencia a la fatiga del material.*

*4.- El medio ambiente.- Si un ambiente corrosivo está presente durante el uso de la pieza sometida a esfuerzos cíclicos , el ataque químico acelera enormemente la velocidad a la cual se propaga la fatiga. La combinación del un ataque corrosivo y de esfuerzos cíclicos se conoce como fatiga por corrosión.*

### **6.6.- TERMOFLUENCIA**

*En muchas aplicaciones las altas temperaturas de operación imponen severos problemas de selección de materiales, como por ejemplo en calderas, alabes para turbinas, componentes para hornos, toberas para reactores, etc. Así, la influencia de las altas temperaturas en el comportamiento de los metales se pueden dividir en tres categorías, a saber:*

- a) Pérdida de resistencia mecánica*
- b) Deterioro del metal, esto es, la oxidación de éste a altas temperaturas*
- c) Escurrimiento plástico, que también se conoce como termofluencia (creep)*

*Todo material empieza a perder resistencia rápidamente cuando la temperatura aumenta, entonces la deformación deja de ser elástica para ser del tipo plástica. Cuando intervienen las deformaciones plásticas, el criterio a seguir para un proyecto en particular para una temperatura específica es la resistencia a la fluencia plástica o termofluencia en un intervalo determinado de tiempo. La termofluencia origina una deformación permanente y para un material y esfuerzo dados, dicha deformación es más grande a una temperatura mayor que a una menor, naturalmente, cuando tengan que ser mantenidas las dimensiones no se puede tolerar la fluencia plástica, pero hay muchos casos que un pequeño cambio permanente tiene un efecto despreciable.*

*La termofluencia se atribuye a los siguientes mecanismos de deformación que se presentan a temperaturas elevadas:*

- Deslizamiento entre planos*
- Formación de subgranos*
- Deslizamiento entre granos.*

*La termofluencia se evalúa comúnmente por una medición de la extensión de una probeta sujeta a esfuerzo constante a una temperatura elevada, obteniéndose una curva semejante a*

presentada en la figura 6.11. En la cual la pendiente  $d\epsilon/dt$  se conoce como velocidad de la fluencia plástica.

Se puede observar que después de una rápida elongación inicial de la probeta, en la segunda etapa, la velocidad de fluencia plástica tiene esencialmente un valor constante y por último en la tercera etapa la velocidad se incrementa rápidamente y termina en la fractura de la probeta. Actualmente, los métodos teóricos no están lo suficientemente avanzados para poder predecir exactamente el comportamiento de la termofluencia para propósitos de diseño. Sin embargo, hay disponibles en la literatura técnica un número considerable de tablas con datos de pruebas de deformación plástica que pueden emplearse con ventaja.

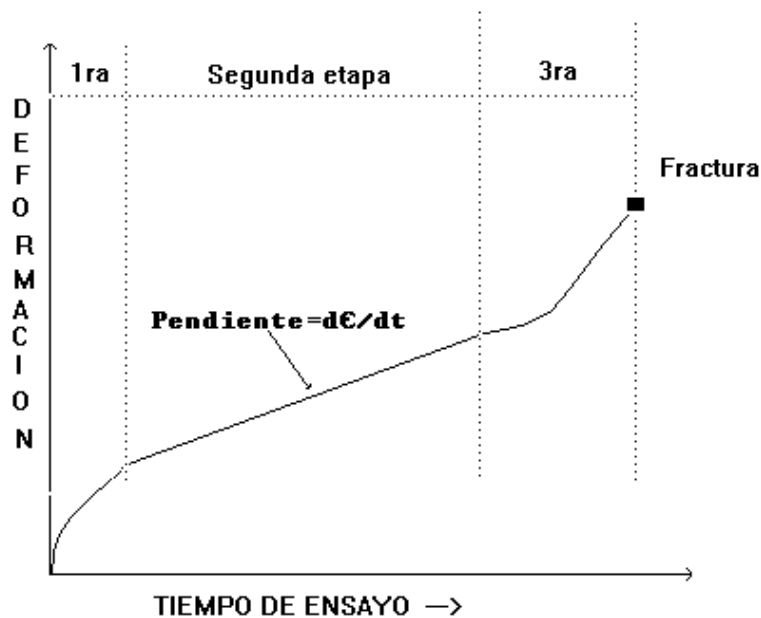


Figura 6.11.- Curva idealizada de termofluencia a temperatura y esfuerzo constantes

### 6.7.- FRACTOGRAFIA.

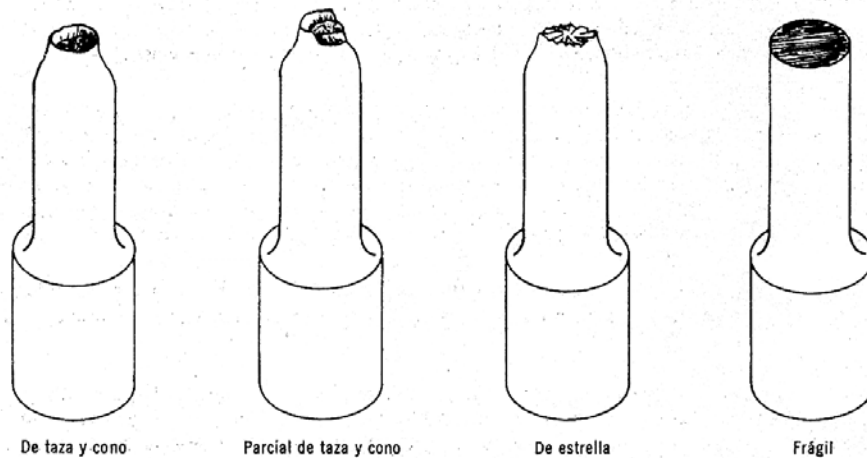
La apariencia macroscópica de la superficie de una fractura superficial se describe en función de la reflexión de la luz (brillosa u opaca) y, de la textura (suave ó áspera, cristalina o sedosa, granular o fibrosa). El uso de los términos frágil y dúctil describe la deformación macroscópica de la fractura.

**Fractura dúctil.-** La fractografía de fracturas dúctiles de superficies planas comúnmente revela hoyuelos equiaxiales, que por lo general presentan evidencias de las partículas que iniciaron la fractura. Las fracturas inclinadas o dúctiles envuelven componentes de los esfuerzos cortantes, como la torsión, dando lugar o hoyuelos alargados.

*La elongación de los hoyuelos producida por el esfuerzo cortante apunta en dirección opuesta a las superficies de fracturas al hacerlas coincidir. Los hoyuelos alargados son también producidos por desgarre. Otra característica que podría ser observada incluye la presencia de clivaje en planos conjugados, planos de clivaje unidos a desgarre dúctiles en diferentes niveles y "lenguas" que resultan de fracturas en planos simétricos formados durante el avance de la grieta.*

*Fractura frágil.- En muestras policristalinas se presentan numerosas placas de clivaje, comúnmente, mostrando un alto grado de perfección geométrica. La característica principal de ésta superficie es la presencia de marcas de río, el cual consiste de etapas de clivaje que indican la dirección en que crece la grieta.*

*En la figura 6.12 se puede apreciar el aspecto general de las fracturas dúctil y frágil bajo cargas de tensión.*

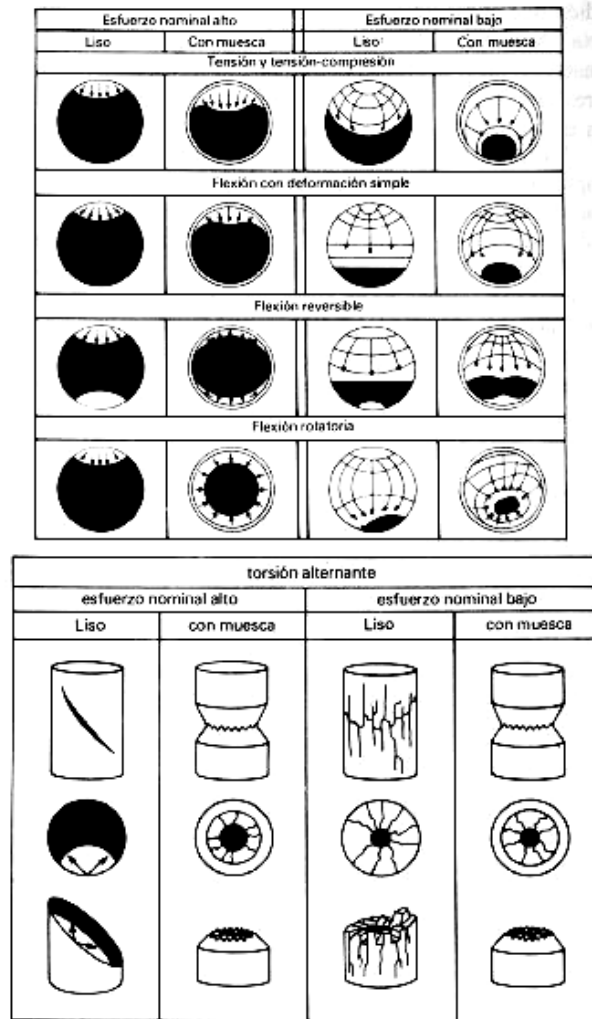


**Figura 6.12.- Macrografía de las fracturas dúctil y frágil bajo cargas de tensión.**

*Fracturas por fatiga.- El examen de fracturas por fatiga empiezan generalmente por inspecciones visuales ó a bajos aumentos, requiriendo poca o nula preparación de la muestra, además que no se debe destruir la muestra o alterar la estructura de la superficie de fractura. El examen macroscópico es particularmente útil para correlacionar las características de las superficies de fractura con el tamaño y forma de la pieza, así como de las condiciones de carga.*



*En la figura 6.13 se muestra una representación esquemática de la apariencia de las superficies de fractura bajo diferentes tipos de cargas y concentradores de esfuerzos.*



**Figura 6.13.- Representación esquématica de la superficie de fractura bajo condiciones de carga variable (fatiga)**

*En la fractura de una pieza que ha fallado por fatiga se pueden distinguir tres zonas principales, a saber:*

- *Inicio de la grieta mediante un proceso de extrusión e intrusión, aprovechando cualquier concentrador de esfuerzos.*
- *Crecimiento ó propagación de la grieta en cada ciclo de esfuerzos dando como resultado una superficie un tanto lisa que se conoce como “zona de playa”*

- *Fractura final que se da cuando el material remanente ya no es capaz de soportar las cargas aplicadas.*

### 6.8.- DESGASTE

*El desgaste es un fenómeno superficial que ocurre por desplazamiento y separación del material. Debido a que el desgaste usualmente implica una pérdida progresiva de peso y la alteración de dimensiones en un periodo de tiempo, el problema generalmente difiere de los demás e implica, sin duda, posibles daños por fractura. Aunque es posible que la parte se cambie por no por poder continuar desarrollando su función satisfactoriamente o que la calidad de su función es parcial.*

*Por lo general el desgaste se define como el daño sufrido por una superficie sólida por la remoción ó desplazamiento del material debido a la acción mecánica que se produce al ponerse en contacto con un sólido, líquido o gas. El desgaste es comúnmente dañino, pero en forma suave puede ser benéfico.*

*Clasificación del desgaste.-*

*Se pueden clasificar los mecanismos físicos de desgaste tal y como se muestra a continuación:*

- *Desgaste adhesivo*
- *Desgaste abrasivo*
- *Desgaste erosivo*
- *Desgaste corrosivo*
- *Desgaste por fatiga superficial.*

*A continuación se explica brevemente cada uno de ellos:*

*a) Desgaste adhesivo.- Esta forma de desgaste ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión. Los puntos de contacto (ver figura 6.14 ), proyecciones microscópicas o la aspereza de la unión en la interfase donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño.*

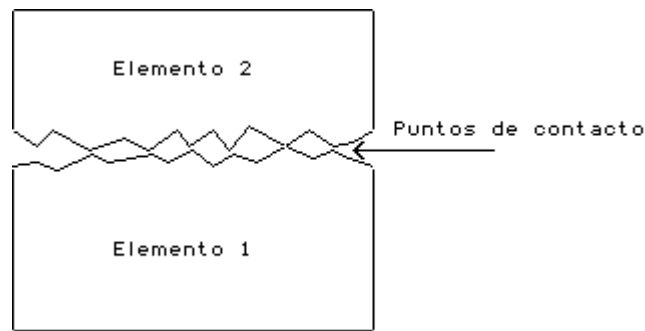


Figura 6.14 .- Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento

*b) Desgaste abrasivo.- Es la remoción de material de la superficie en contacto por superficies duras en superficies de coincidencia, o con superficies duras que presentan un movimiento relativo en la superficie desgastada. Cuando es el caso de partículas duras, ellas pueden encontrarse entre las dos superficies que se deslizan entre sí como se muestra en la figura 6.15 o se podrían incrustar en cualquiera de las superficies. es conveniente aclarar que este tipo de desgaste se puede presentar en estado seco o bajo la presencia de un fluido.*

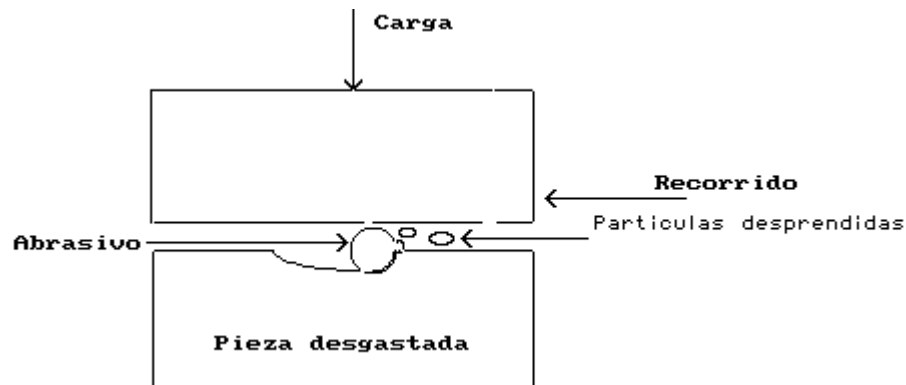
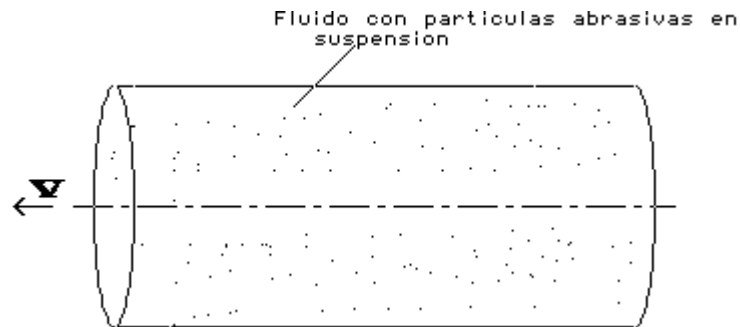


Figura 6.15 .- Desgaste abrasivo debido a la presencia de partículas duras

*c) Desgaste erosivo.- Este tipo de desgaste ocasiona pérdidas de material en la superficie por el contacto con un líquido que contiene en suspensión cierta cantidad de partículas abrasivas como se muestra en la figura 6.16, siendo esencial el movimiento relativo entre el fluido y la superficie, ya que la fuerza de las partículas, que de hecho son responsables del daño, se aplica cinécticamente. En el desgaste erosivo es donde el movimiento relativo de las partículas sólidas es casi paralelo con las superficies erosionadas se denomina erosión abrasiva, por otro lado, la erosión en la que el movimiento relativo de las partículas es casi normal (perpendicular) a la superficie erosionada se conoce como erosión bajo impacto.*



**Figura 6.16 .- Desgaste erosivo debido a la acción de un fluido con partículas abrasivas en suspensión**

*d) Desgaste corrosivo.- En esta forma de desgaste las reacciones químicas o electroquímicas con el medio ambiente contribuyen significativamente en la velocidad del desgaste. En algunas ocasiones, las reacciones químicas ocurren primero y son seguidas por una remoción de los productos de la corrosión mediante una acción mecánica (abrasión), de otra manera, la acción mecánica podría preceder a la acción química dando como resultado la creación de pequeñas partículas de desperdicio.*

*e) Desgaste por fatiga superficial.- Se trata de un daño especial de desgaste superficial, mediante el cual se desprenden las partículas de metal debido a la presencia de ciclos de esfuerzos de contacto muy grandes en la superficie del metal causando picadura o astillamiento. Es diferente al desgaste abrasivo o adhesivo, que explican la pérdida o desplazamiento de material como consecuencia de una interacción sencilla. La fatiga requiere de múltiples interacciones, esto es una superficie debe experimentar esfuerzos cíclicos repetidos que le producen ruptura. Las rupturas se unen y dan como resultado la formación y pérdida de una partícula de metal como se muestra en la figura 6.17 . La fatiga es fuertemente dependiente del esfuerzo; muchos estudios indique que la velocidad del desgaste es proporcional al esfuerzo, sin embargo generalmente la desgaste por fatiga superficial da como resultado velocidades menores de desgaste comparada con el desgaste adhesivo o abrasivo.*

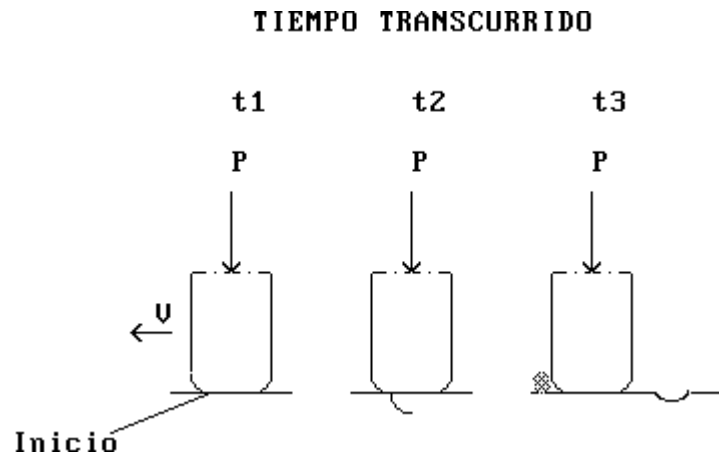


Figura 6.17 .- Desgaste por fatiga superficial

### 6.9.- MÉTODOS DE PREVENCIÓN CONTRA EL DESGASTE

*En el diseño de la mayor parte de máquinas y equipos, existe una serie de factores que el proyectista puede controlar para minimizar el desgaste y hacerlo más tolerable. Las siguientes técnicas de diseño ayudan a controlar y disminuir al desgaste en sus distintas variantes:*

*a) Desgaste adhesivo.*

- *Mantener bien lubricadas las superficies en contacto.*
- *Si dos metales distintos tienen que trabajar juntos, procurar que ambos posean una alta dureza. Si uno de ellos tiene que desgastarse antes, utilizar un material de baja dureza por ejemplo, usar un plástico, latón rojo o hierro fundido gris y el otro material tiene que ser un acero endurecido (dureza mínima de 60 Rc)*
- *Evitar pares formados por metales de baja dureza, los cuales sólo deberán usarse para cargas ligeras o para un uso no frecuente o intermitente.*
- *Evite usar aleaciones con alto contenido de cobre, aceros inoxidables austeníticos o ferríticos, aleaciones de aluminio (sin recubrimiento), aleaciones de níquel y metales puros ya que todos ellos producen polvos que propician el desgaste metal a metal.*

*b) Desgaste abrasivo*

- *Eliminar las sustancias contaminantes abrasivas, utilizando cualquier técnica posible*
- *Proteger las superficies críticas utilizando rodamientos sellados, sellos, etc.*

- Si la abrasión la causa partículas de materiales de alta dureza, aplicar recubrimientos sobre las superficies de contacto de materiales tales como carburos sinterizados, cerámicas y emplear también aceros para herramientas.

- Reducir las esfuerzos de contacto, disminuyendo las cargas aplicadas.

*c) Desgaste por erosión.-*

- Evite ángulos de choque no adecuados; los metales de baja dureza se desgastan fácilmente ángulos pequeños ( 20°) mientras que los materiales frágiles se erosionan más rápido cuando el choque es perpendicular a la superficie.

- Utilice elástomeros cuando sea posible . Los hules (natural y sintético) poseen una alta resiliencia y tienden a deformarse plásticamente más que a fracturarse cuando es golpeado por partículas a alta velocidad. Se recomiendan ángulos de impacto pequeños.

- En sistemas de erosión mediante partículas de arena, los carburos sinterizados C2 y C4 han demostrado mayor resistencia al desgaste por erosión que muchos otros materiales (elástomeros, aceros endurecidos y plásticos)

*d) Desgaste por corrosión*

- Realizar un examen exhaustivo del medio ambiente

- Seleccionar un material con la relación óptima costo/rendimiento

- Evitar unir metales distintos bajo la presencia de ambientes corrosivos

- En cualquier diseño, evitar la presencia de grietas o hendiduras donde pueda almacenarse pequeñas cantidades de sustancias corrosivas

- En sistemas con recirculación emplear agentes inhibidores que ayudan a reducir de manera sustantiva la velocidad de ataque.

- Cuando se utilicen recubrimientos metálicos para protección se recomienda usar un metal que sea anódico con respecto al metal base, de tal modo que no haya corrosión en los agujeros o fisuras que puedan producirse en el recubrimiento. Los recubrimientos muy delgados (menores a 125 micras) nunca proporcionarán protección contra la corrosión a largo plazo.

***e) Desgaste por fatiga superficial***

***- Usar materiales con alta dureza y resistencia a la compresión, por ejemplo la mayor parte de rodamientos (pistas y elementos rodantes ) están hechos con aceros 52100 que proporcionan una dureza de 62 R<sub>C</sub>.***

***- Los recubrimientos superficiales y el endurecimiento superficial tienden a despostillarse bajo esfuerzos de contacto (hertzianos) muy altos, por lo tanto, úsese recubrimientos bien documentados sobre su habilidad para soportar dichos esfuerzos.***

***- Seleccionar cuidadosamente los lubricantes. Las grasas y aceites que contienen grafito o MoS<sub>2</sub> promueven la fatiga superficial, las partículas finas de tales sustancias se presionan contra las superficies produciendo grandes esfuerzos de contacto.***

***- Mantener limpias las superficies de trabajo de suciedad y sustancias abrasivas.***

## **CAPÍTULO 7**

### **PLÁSTICOS**

*Los plásticos son moléculas orgánicas gigantes, que tienen pesos moleculares de 10,000 a 1,000,000 g/g • mol. La polimerización es el proceso por el cual se unen pequeñas moléculas para crear esas moléculas gigantes. Conforme aumenta el tamaño del polímero, se incrementa el punto de fusión o de reblandecimiento y el polímero se hace más resistente y rígido.*

*Son ligeros, resistentes a la corrosión y aislantes eléctricos, pero tienen relativamente baja resistencia a la tensión y no son adecuados para uso a temperaturas altas. Los polímeros se emplean en innumerables aplicaciones, que incluyen juguetes, artículos para el hogar, artículos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, neumáticos, empaques y muchas otras*

#### **7.1.- ORIGEN E HISTORIA EVOLUTIVA DEL PLÁSTICO**

*El término Plástico, en su significación mas general, se aplica a las sustancias de distintas estructuras y naturalezas que carecen de un punto fijo de ebullición y poseen durante un intervalo de temperaturas propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones, figura 7.1.*



Figura 7.1.- Algunas aplicaciones de los plásticos.

*Sin embargo, en sentido restringido, denota ciertos tipos de materiales sintéticos obtenidos mediante fenómenos de polimerización o multiplicación artificial de los átomos de carbono en las largas cadenas moleculares de compuestos orgánicos derivados del petróleo y otras sustancias naturales.*



7.1.1.- Origen

*El primer plástico se origina como resultado de un concurso realizado en 1860, cuando el fabricante estadounidense de bolas de billar Phelan and Collander ofreció una recompensa de 10,000 dólares a quien consiguiera un sustituto aceptable del marfil natural, destinado a la fabricación de bolas de billar. Una de las personas que compitieron fue el inventor norteamericano Wesley Hyatt, quien desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente de alcohol. Si bien Hyatt no ganó el premio, su producto, patentado con el nombre de celuloide, se utilizó para fabricar diferentes objetos detallados a continuación. El celuloide tuvo un notable éxito comercial a pesar de ser inflamable y de su deterioro al exponerlo a la luz.*

7.1.2.- Evolución

*Los resultados alcanzados por los primeros plásticos incentivaron a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas que pudieran enlazarse para crear polímeros. En la década del 30, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico al que llamaron polietileno (PE). Hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP).*

*Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el cloruro de polivinilo (PVC), un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para cañerías de todo tipo. Al agregarles diversos aditivos se logra un material más blando, sustitutivo del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes. Un plástico parecido al PVC es el politetrafluoretileno (PTFE), conocido popularmente como teflón y usado para rodillos y sartenes antiadherentes.*

*Otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el poliestireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos, potes y hueveras. El poliestireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, se usa básicamente para embalaje y aislante térmico.*

*También en los años 30's del siglo pasado se crea la primera fibra artificial, el nylon. Su descubridor fue el químico Wallace Carothers, que trabajaba para la empresa Dupont. Descubrió que dos sustancias químicas como el hexa-metilendiamina y ácido adípico, formaban polímeros que bombeados a través de agujeros y estirados formaban hilos que podían tejerse. Su primer uso fue la fabricación de paracaídas para las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose rápidamente a la industria textil en la fabricación de medias y otros tejidos combinados con algodón o lana. Al nylon le siguieron otras fibras sintéticas como por ejemplo, el orlón y el acrilán.*

*En la presente década, principalmente en lo que tiene que ver con el envasado en botellas y frascos, se ha desarrollado vertiginosamente el uso del tereftalato de polietileno (PET), material que viene desplazando al vidrio y al PVC en el mercado de envases.*

## **7.2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PLÁSTICOS**

*Los plásticos se caracterizan por una relación alta de resistencia/densidad, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termoendurecibles (se endurecen con el calor).*

### **7.2.1.- Conceptos**

*¿Qué son los polímeros?*

*La materia esta formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros.*

*Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diferentes. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, otras, globos, etc. Algunas se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.*

*La mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.*

*Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una muy buena resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases. Las más comunes, denominadas Fuerzas de Van der Waals, se detallan a continuación:*

*-Fuerzas de Van der Waals*

*También llamadas fuerzas de dispersión, están en las moléculas de muy baja polaridad, generalmente en los hidrocarburos. Estas fuerzas provienen de dipolos transitorios: como resultado de los movimientos de electrones, en cierto instante una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa, mientras que en otra región aparece una carga positiva equivalente.*

*-Fuerzas de Atracción dipolo-dipolo.*

*Debidas a dipolos permanentes, como en el caso de los poliésteres. Estas atracciones son mucho más potentes y a ellas se debe la gran resistencia tensil de las fibras de los poliésteres.*

*-Enlaces de Hidrógeno*

*Como en las poliamidas (nylon), estas interacciones son tan fuertes, que una fibra obtenida con estas poliamidas tiene resistencia a la tensión mayor que la de una fibra de acero de igual masa.*

*-Otros polímeros*

*Hay atracciones de tipo iónico que son las más intensas.*

*Se llaman ionómeros y se usan, por ejemplo, para hacer películas transparentes de alta resistencia.*

### 7.3.- TIPOS DE POLÍMEROS

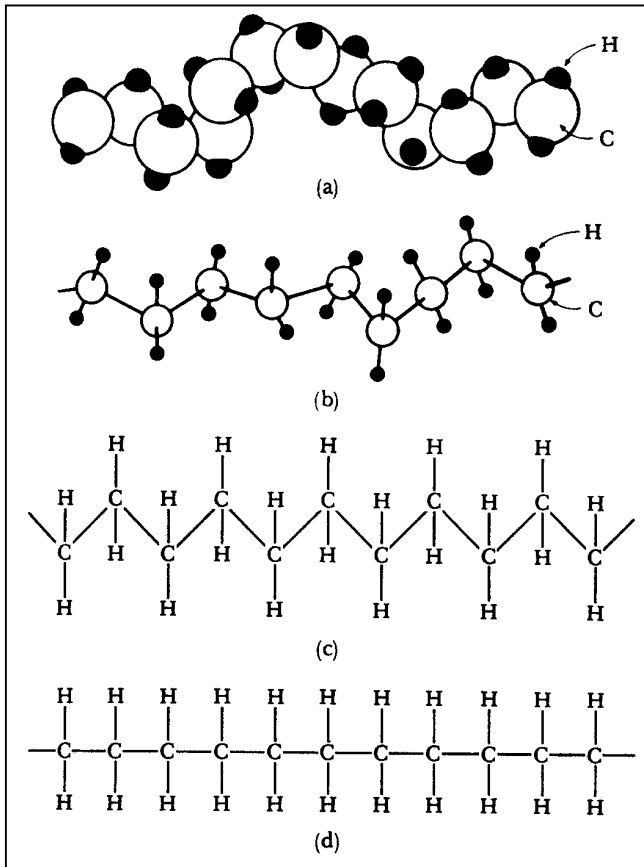
#### 7.3.1.- Concepto y clasificación

*Un polímero (del griego poly, muchos; meros, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos, aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero. Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización es indicado por un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetrámero, pentámero y sucesivos. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades. De este modo, el trióximetileno, es el trímero del formaldehído, por ejemplo.*

*Si el número de unidades es muy grande, se usa también la expresión gran polímero. Un polímero no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que tengan todas la misma composición química y la misma estructura molecular. Hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polícarbohidratos, cuyas moléculas individuales tienen todas el mismo peso molecular y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes poliméricos homólogos. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monómeras y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los copolímeros. Estas variedades en general no suelen afectar a las propiedades del producto final, sin embargo, se ha descubierto que en ciertos casos hubo variaciones en copolímeros y ciertos polímeros cristalinos.*

#### 7.3.2.- Representación de la estructura de los polímeros

*En la figura 7.2. se representan las cuatro diferentes formas de representar la estructura del polietileno*



*Cuatro formas de representar la estructura del polietileno.*

*a) modelo sólido tridimensional b) modelo “espacial” tridimensional*

*c) modelo bidimensional que muestra la forma de la cadena polimérica, y d)*

*modelo bidimensional simple*

**Figura 7.2.- Métodos utilizados para representar la estructura del polietileno**

### **7.4.- PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN**

*Existen diversos procesos para unir moléculas pequeñas con otras para formar moléculas grandes. Su clasificación se basa en el mecanismo por el cual se unen estructuras monómeras o en las condiciones experimentales de reacción.*

*La mayor parte de los polímeros orgánicos se obtiene por reacciones de condensación o de adición. En la reacción de condensación, los monómeros se combinan con la formación y pérdida de moléculas pequeñas, como agua, alcohol, etc. Por ejemplo, en la formación de una poliamida.*

*En las reacciones de adición, varias unidades monoméricas se unen, en presencia de un catalizador, como resultado de la reorganización de los enlaces C=C de cada una de ellas. Por ejemplo, en la formación del polietileno.*

*El caucho natural, constituido por cadenas de poli-cis-isopreno, es un ejemplo de polímero de adición formado por unidades de cis-isopreno o metil-1,3 butadieno. Otro polímero natural del isopreno es el poli-trans-isopreno o gutapercha, el cual se utiliza para recubrir cables submarinos, pelotas de golf, etcétera.*

*La polimerización puede efectuarse por distintos métodos o Mecanismos:*

**7.4.1.- Polimerización por adición**

- *Adición de moléculas pequeñas de un mismo tipo unas a otras por apertura del doble enlace sin eliminación de ninguna parte de la molécula (polimerización de tipo vinilo).*
- *Adición de pequeñas moléculas de un mismo tipo unas a otras por apertura de un anillo sin eliminación de ninguna parte de la molécula (polimerización tipo epóxido).*
- *Adición de pequeñas moléculas de un mismo tipo unas a otras por apertura de un doble enlace con eliminación de una parte de la molécula (polimerización alifática del tipo diazo).*
- *Adición de pequeñas moléculas unas a otras por ruptura del anillo con eliminación de una parte de la molécula (polimerización del tipo -aminocarboxianhidro).*
- *Adición de birradicales formados por deshidrogenación (polimerización tipo p-xileno).*

**7.4.2.- Polimerización por Condensación**

- *Formación de poliésteres, poliamidas, poliéteres, polianhidros, etc., por eliminación de agua o alcoholes, con moléculas bifuncionales, como ácidos o glicoles, diaminas, diésteres entre otros (polimerización del tipo poliésteres y poliamidas).*
- *Formación de polihidrocarburos, por eliminación de halógenos o haluros de hidrógeno, con ayuda de catalizadores metálicos o de haluros metálicos (poli tóxico del tipo de Friedel-Crafts y Ullmann).*
- *Formación de polisulfuros o poli-polisulfuros, por eliminación de cloruro de sodio, con haluros bifuncionales de alquilo o arilo y sulfuros alcalinos o polisulfuros alcalinos o por oxidación de dimercaptanos (policondensación del tipo Thiokol).*

**7.4.3.- Polimerización en Suspensión, Emulsión y Masa**

- a. *Polimerización en suspensión. En este caso el peróxido es soluble en el monómero. La polimerización se realiza en agua, y como el monómero y polímero que se obtiene de él son insolubles en agua, se obtiene una suspensión. Para evitar que el polímero se aglomere en el reactor, se disuelve en el agua una pequeña cantidad de alcohol polivinílico, el cual cubre la superficie de las gotitas del polímero y evita que se peguen.*
- b. *Polimerización en emulsión. La reacción se realiza también en agua, con peróxidos solubles en agua pero en lugar de agregarle un agente de suspensión como el alcohol polivinílico, se añade un emulsificante, que puede ser un detergente o un jabón.*
- c. *Polimerización en masa. En este tipo de reacción, los únicos ingredientes son el monómero y el peróxido.*

*El polímero que se obtiene es muy semejante al de suspensión, pero es más puro que éste y tiene algunas ventajas en la adsorción de aditivos porque no está contaminado con alcohol polivinílico. Sin embargo, debido al gran tamaño de sus partículas no se dispersa en los plastificantes y no se usa para plastisoles.*

**Tabla 7.1.- características generales de los plásticos obtenidos mediante polimerización en suspensión, masa y emulsión.**

RESINA	TAMAÑO DE PARTICULA (MICRAS)	PESO MOLECULAR	APLICACIONES
Suspensión	45 - 400	24.000 a 80.000	calandreo - extrusión - moldeo
Masa	70 - 170	28.000 a 80.000	calandreo - extrusión - moldeo
Emulsión	1 - 20	38.000 a 85.000	plastisoles

### 7.5.- TÉCNICAS DE MOLDEO DE LOS PLÁSTICOS

*El moldeo de los plásticos consiste en dar las formas y medidas deseadas a un plástico por medio de un molde. El molde es una pieza hueca en la que se vierte el plástico fundido para que adquiera su forma. Para ello los plásticos se introducen a presión en los moldes. En función del tipo de presión, tenemos estos dos tipos:*

#### 7.5.1.- Moldeo a Alta Presión

*Se realiza mediante máquinas hidráulicas que ejercen la presión suficiente para el moldeo de las piezas. Básicamente existen tres tipos: compresión, inyección y extrusión.*

##### -Compresión:

*En este proceso, el plástico en polvo es calentado y comprimido entre las dos partes de un molde mediante la acción de una prensa hidráulica, ya que la presión requerida en este proceso es muy grande. Este proceso se usa para obtener pequeñas piezas de baquelita, como los mangos aislantes del calor de los recipientes y utensilios de cocina.*

##### -Inyección:

*Consiste en introducir el plástico granulado dentro de un cilindro, donde se calienta. En el interior del cilindro hay un tornillo sinfín que actúa de igual manera que el émbolo de una jeringuilla. Cuando el plástico se reblandece lo suficiente, el tornillo sinfín lo inyecta a alta presión en el interior de un molde de acero para darle forma. El molde y el plástico inyectado se enfrían mediante unos canales interiores por los que circula agua. Por su economía y rapidez, el moldeo por inyección resulta muy indicado para la producción de grandes series de piezas. Por este procedimiento se fabrican palanganas, cubos, carcasas, componentes del automóvil, etc.*

##### -Extrusión:

*Consiste en moldear productos de manera continua, ya que el material es empujado por un tornillo sinfín a través de un cilindro que acaba en una boquilla, lo que produce una tira de longitud indefinida. Cambiando la forma de la boquilla se pueden obtener barras de distintos perfiles. También se emplea este procedimiento para la fabricación de tuberías, inyectando*



*aire a presión a través de un orificio en la punta del cabezal. Regulando la presión del aire se pueden conseguir tubos de distintos espesores.*

#### 7.5.2.- Moldeo a Baja Presión

*Se emplea para dar forma a láminas de plástico mediante la aplicación de calor y presión hasta adaptarlas a un molde. Se emplean, básicamente, dos procedimientos: El primero consiste en efectuar el vacío absorbiendo el aire que hay entre la lámina y el molde, de manera que ésta se adapte a la forma del molde. Este tipo de moldeo se emplea para la obtención de envases de productos alimenticios en moldes que reproducen la forma de los objetos que han de contener.*

*El segundo procedimiento consiste en aplicar aire a presión contra la lámina de plástico hasta adaptarla al molde. Este procedimiento se denomina moldeo por soplado, como el caso de la extrusión, aunque se trata de dos técnicas totalmente diferentes. Se emplea para la fabricación de cúpulas, piezas huecas, etc.*

#### -Colada

*La colada consiste en el vertido del material plástico en estado líquido dentro de un molde, donde fragua y se solidifica. La colada es útil para fabricar pocas piezas o cuando emplean moldes de materiales baratos de poca duración, como escayola o madera. Debido a su lentitud, este procedimiento no resulta útil para la fabricación de grandes series de piezas.*

#### -Espumado

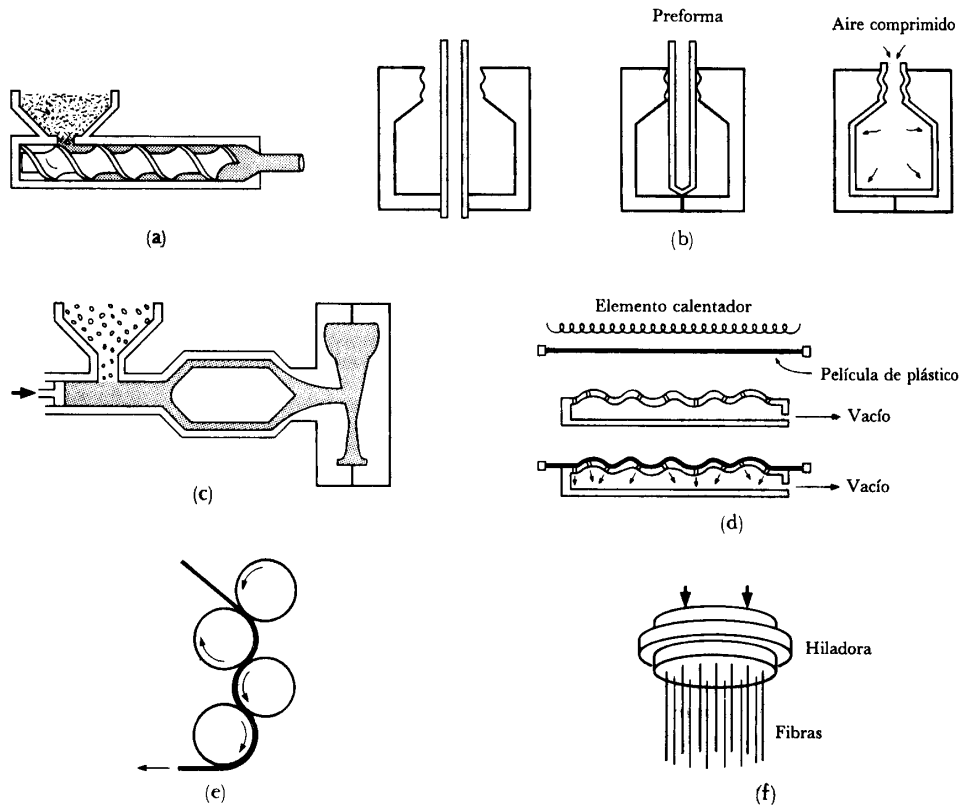
*Consiste en introducir aire u otro gas en el interior de la masa de plástico de manera que se formen burbujas permanentes. Por este procedimiento se obtiene la espuma de poliestireno, la espuma de poliuretano (PUR), etc. Con estos materiales se fabrican colchones, aislantes termo-acústicos, esponjas, embalajes, cascos de ciclismo y patinaje, plafones ligeros y otros.*

#### -Calandrado

*Consiste en hacer pasar el material plástico a través de unos rodillos que producen, mediante presión, láminas de plástico flexibles de diferente espesor. Estas láminas se utilizan para fabricar hules, impermeables o planchas de plástico de poco grosor.*

**7.6.- CONFORMADO DE LOS POLÍMEROS**

*Las técnicas usadas para conformar polímeros en formas útiles dependen en gran medida de la naturaleza del polímero. Los termoplásticos pueden ser conformados mediante distintas técnicas como son: el soplado, la inyección, la extrusión etc. Y que se muestran en la figura 7.3. Se utilizan pocas técnicas de conformado para los polímeros termoestables debido a que una vez que ha ocurrido la polimerización y se ha establecido la estructura reticular, dichos polímeros no se pueden conformar más. Después de la vulcanización, los elastómeros tampoco pueden ser conformados adicionalmente.*



**Figura 7.3.- Procesos típicos de conformado para los polímeros termoplásticos (a) Extrusión (b) Moldeo por soplado (c) Moldeo por inyección (d) Conformado por vacío (e) Calandrado y (f) Hilado**

### 7.7.- FABRICACIÓN

*La fabricación de los plásticos y sus manufacturas implica cuatro pasos básicos: obtención de las materias primas, síntesis del polímero básico, composición del polímero como un producto utilizable industrialmente y moldeo o deformación del plástico a su forma definitiva.*

#### *-Materias primas*

*En un principio, la mayoría de los plásticos se fabricaban con resinas de origen vegetal, como la celulosa (del algodón), el furfural (de la cáscara de la avena), aceites (de semillas), derivados del almidón o el carbón. La caseína de la leche era uno de los materiales no vegetales utilizados. A pesar de que la producción del nylon se basaba originalmente en el carbón, el aire y el agua, y de que el nylon 11 se fabrique todavía con semillas de ricino, la mayoría de los plásticos se elaboran hoy con derivados del petróleo. Las materias primas derivadas del petróleo son tan baratas como abundantes. No obstante, dado que las existencias mundiales de petróleo tienen un límite, se están investigando otras fuentes de materias primas, como la gasificación del carbón.*

### 7.8.- APLICACIONES

*Los plásticos tienen cada vez más aplicaciones en los sectores industriales y de consumo.*

*Otros sectores industriales, en especial la fabricación de motores, dependen también de estas sustancias. Algunos plásticos muy resistentes se utilizan para fabricar piezas de motores, como colectores de toma de aire, tubos de combustible, botes de emisión, bombas de combustible y aparatos electrónicos. Muchas carrocerías de automóviles están hechas con plástico reforzado con fibra de vidrio.*

*Los plásticos se emplean también para fabricar carcasas para equipos de oficina, dispositivos electrónicos, accesorios pequeños y herramientas. Entre las aplicaciones del plástico en productos de consumo se encuentran los juguetes, las maletas y artículos deportivos.*

#### *-Plásticos comunes*

*Si bien existen muchos tipos de plásticos, los más comunes son sólo seis, y se les identifica con un número dentro de un triángulo para facilitar su clasificación para el reciclado, ya que las características diferentes de los plásticos exigen generalmente un procedimiento de reciclaje distinto, tabla 7.2.*

**Tabla 7.2.- Características y aplicaciones de los plásticos más usados**

<b>TIPO / NOMBRE</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>USOS / APLICACIONES</b>
 <p><b>PET</b> <i>Polietilentereftalato</i></p>	<p><i>Se produce a partir del Ácido Tereftálico y Etilenglicol, por poli condensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella. Para el grado botella se le debe post-condensar, existiendo diversos colores para estos usos.</i></p>	<p><i>Envases para refrescos, aceites, agua, cosméticos, frascos varios, películas transparentes, fibras textiles, envases al vacío, bolsas para horno, cintas de video y audio, películas radiográficas.</i></p>
 <p><b>PEAD (HDPE)</b> <i>Polietileno de Alta Densidad</i></p>	<p><i>El polietileno de alta densidad es un termoplástico fabricado a partir del etileno (elaborado a partir del etano). Es muy versátil y se lo puede transformar de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión, o Rotomoldeo.</i></p>	<p><i>Envases para detergentes, aceites automotores, lácteos, bolsas para supermercados, bazar y menaje, cajones para pescados, refrescos y cervezas, cubetas para pintura, helados, aceites, tambores, tubería para gas, telefonía, agua potable, minería, drenaje y uso sanitario, macetas, bolsas tejidas.</i></p>
 <p><b>PVC</b> <i>Polivinil Cloruro</i></p>	<p><i>Se produce a partir de gas y cloruro de sodio.</i></p> <p><i>Para su procesado es necesario fabricar compuestos con aditivos especiales, que permiten obtener productos de variadas propiedades para un gran número de aplicaciones. Se obtienen productos rígidos o totalmente flexibles (Inyección - Extrusión - Soplado).</i></p>	<p><i>Envases para agua mineral, aceites, jugos, mayonesa. Perfiles para marcos de ventanas, puertas, cañería para desagües domiciliarios y de redes, mangueras, blister para medicamentos, pilas, juguetes, envolturas para golosinas, películas flexibles para envasado, rollos de fotos, cables, catéteres, bolsas para sangre.</i></p>

 <p><b>PEBD (LDPE)</b> <i>Polietileno de Baja Densidad</i></p>	<p><i>Se produce a partir del gas natural. Al igual que el PEAD es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión y Rotomoldeo.</i></p> <p><i>Su transparencia, flexibilidad, tenacidad y economía hacen que esté presente en una diversidad de envases, sólo o en conjunto con otros materiales y en variadas aplicaciones.</i></p>	<p><i>Bolsas para supermercados, boutiques, panificación, congelados, industriales, etc. Pañales, bolsas para suero, contenedores herméticos domésticos. Tubos y pomos (cosméticos, medicamentos y alimentos), tuberías para riego.</i></p>
 <p><b>PP</b> <u><i>Polipropileno</i></u></p>	<p><i>El PP es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando etileno durante el proceso.</i></p> <p><i>El PP es un plástico rígido de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, excelente resistencia química y de más baja densidad. Al adicionarle distintas sustancias se potencian sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería. (El PP es transformado en la industria por los procesos de inyección, soplado y extrusión/termoformado).</i></p>	<p><i>Película/Film para alimentos, cigarrillos, chicles, golosinas. Bolsas tejidas, envases industriales, hilos cabos, cordelería, tubería para agua caliente, jeringas, tapas en general, envases, cajones para bebidas, cubiertas para pintura, helados, telas no tejidas (pañales), alfombras, cajas de batería, defensas y autopartes.</i></p>
 <p><b>PS</b> <i>Poliestireno</i></p>	<p><i>PS Cristal: Es un polímero de estireno monómero (derivado del petróleo), transparente y de alto brillo.</i></p> <p><i>PS Alto Impacto: Es un polímero de estireno monómero con oclusiones de Polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto.</i></p> <p><i>Ambos PS son fácilmente moldeables a través de procesos de: Inyección y Extrusión/Termoformado.</i></p>	<p><i>Botes para lácteos, helados, dulces, envases varios, vasos, bandejas de supermercados, anaqueles, envases, rasuradoras, platos, cubiertos, bandejas, juguetes, casetes, blisters, aislantes.</i></p>

## **CAPÍTULO 8**

### **MATERIALES CERÁMICOS**

#### **8.1.- INTRODUCCIÓN**

*Los materiales cerámicos son inorgánicos y no metálicos. La mayoría de los cerámicos son compuestos formados por elementos metálicos y no metálicos cuyos enlaces interatómicos pueden ser de carácter totalmente iónico o bien de carácter predominantemente iónico con carácter covalente. El término "cerámica" proviene de la palabra griega "keramikos", que significa "cosa quemada", indicando de esta manera que las propiedades deseables de estos materiales generalmente se alcanzan después de un tratamiento térmico a alta temperatura que se denomina cocción. Comúnmente, los cerámicos son duros, frágiles, con alto punto de fusión y bajas conductividades eléctrica y térmica, adecuadas estabildades química y térmica, y alta resistencia a la compresión.*

*Hasta hace aproximadamente 40 años, los materiales más importantes de esta clase se denominaban "cerámicas tradicionales", que son aquellas para las cuales la materia prima de partida es la arcilla; los productos considerados dentro de esta familia son porcelana fina, porcelana eléctrica, ladrillos, baldosas y también vidrios y cerámicas refractarias. Más tarde, se han realizado progresos importantes en el conocimiento fundamental de estos materiales y de los fenómenos que ocurren en ellos que son los responsables de sus propiedades especiales. Por consiguiente, ha surgido una nueva generación de estos materiales, y el término "cerámica" ha sido utilizado en un sentido mucho más amplio. De una manera u otra, estos materiales tienen un profundo efecto sobre nuestras vidas; las industrias electrónica, informática, de comunicaciones, aeroespacial, así como muchas otras se basan en este tipo de materiales.*

*Los materiales cerámicos pueden existir, tanto en estado cristalino como en estado no cristalino. Puesto que estos materiales están compuestos de cationes y aniones cargados eléctricamente, la estructura cristalina está determinada por la magnitud de la carga y el radio de cada clase de iones. Algunas de las estructuras cristalinas más simples se describen en*

*términos de celdillas unidad; varias de éstas han sido analizadas (cloruro de sodio, cloruro de cesio, blenda, diamante cúbico, grafito, fluorita, perovskita y estructura de la espinela).*

*Las distintas formas de carbono - diamante, grafito y los fullerenos también han sido analizadas. El diamante es una piedra preciosa, y debido a su dureza es utilizado para cortar y desbastar materiales más blandos. Además, ahora también puede producirse en forma de películas delgadas. La estructura laminar del grafito da lugar a excelentes propiedades lubricantes y una alta conductividad eléctrica. El grafito también es conocido por su alta resistencia y estabilidad química a temperaturas elevadas y en atmósferas no oxidantes. Los recientemente descubiertos fullerenos existen como moléculas esféricas huecas compuestas por 60 átomos. En el estado cristalino, estas moléculas C<sub>60</sub> se empaquetan en una red cúbica FCC. El material puro es aislante eléctrico, mientras que mediante la adición de determinadas impurezas se puede inducir el comportamiento metálico, semiconductor y superconductor.*

## 8.2.- ORDENAMIENTO DE CORTO ALCANCE EN LOS MATERIALES CERÁMICOS CRISTALINOS

*Prácticamente todas las cerámicas, incluyendo los vidrios, tienen al menos un ordenamiento de corto alcance entre los átomos de la estructura. Varios factores afectan este tipo de ordenamiento y el número de coordinación para cada átomo.*

### *-Enlace atómico*

*El número de enlaces covalentes necesarios en un compuesto cerámico covalente, determina el número de vecinos más cercanos a un átomo dado. Cuando los materiales cerámicos contienen un enlace iónico, la distribución de la carga eléctrica alrededor de los iones debe ser balanceada y uniforme. Si las cargas en el anión (negativo) y en el catión (positivo) son idénticas, el compuesto cerámico tiene la fórmula AX y el número de coordinación para cada ion es idéntico para asegurar un apropiado balance de cargas. Sin embargo, si la valencia del catión es + 1 y la del anión es - 2, la estructura del compuesto AX<sub>2</sub> debe asegurar que el número de coordinación del anión sea el doble del número de coordinación del catión.*

**-Radios iónicos**

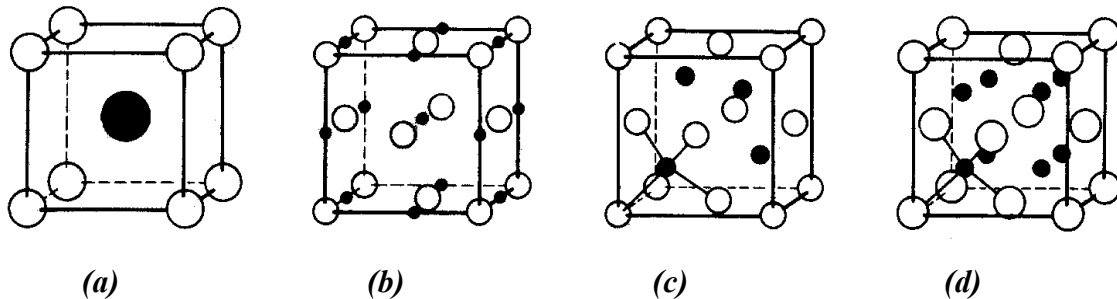
*La relación de radios iónicos del anión y del catión afecta también al número de coordinación. El ión central puede tener un radio ligeramente mayor que el radio del hueco en el que se acomoda separando así los iones circundantes significativamente. Sin embargo, el radio del ion central no puede ser menor que el del hueco.*

**-Intersticios**

*La estructura cristalina o red de Bravais debe permitir el logro del número de coordinación correcto. Si colocamos los cationes en los vértices normales de la celda unitaria, los aniones ocupan las posiciones intersticiales que satisfacen la coordinación apropiada. Sólo se ocupa el número de posiciones intersticiales que se requieren para satisfacer el enlace covalente o el balance de cargas iónicas.*

**-Ordenamiento de largo alcance en los materiales cerámicos cristalinos**

*Con base en las restricciones impuestas por este ordenamiento, es posible ahora justificar algunas de las estructuras cristalinas simples en los materiales cerámicos. El ordenamiento atómico o iónico exacto depende de cuáles sitios intersticiales son ocupados y la fracción de sitios que lo están.*



**Figura 8.1.- Estructuras cristalinas típicas para los compuestos cerámicos. (a) cloruro de cesio, (b) cloruro de sodio, (c) blenda de zinc, y (d) fluorita**

**-Estructuras de silicato**

*Las estructuras de silicato están basadas en el tetraedro de sílice. El citado tetraedro  $\text{SiO}_2$ , se comporta como un grupo iónico; los iones de oxígeno situados en las esquinas del tetraedro están ligados a otros iones o grupos iónicos para satisfacer el balance de cargas:*



- ◆ *Compuestos de silicato*
- ◆ *Estructuras de anillo y de cadena*
- ◆ *Estructuras laminares*
- ◆ *Sílice*

### 8.3.- IMPERFECCIONES EN LAS ESTRUCTURAS CERÁMICAS CRISTALINAS

*Como ocurre en los metales, la estructura de los materiales cerámicos contiene una diversidad de imperfecciones y que se describen a continuación:*

#### *-Defectos puntuales.*

*En los materiales cerámicos se forman soluciones sólidas sustitucionales e intersticiales.*

*En general, la solubilidad en sólido de una fase en otra es limitada e incluso nula. Las soluciones sólidas intersticiales son menos comunes en las cerámicas que en los metales debido a que los sitios intersticiales normales están casi llenos.*

*Mantener una distribución de cargas balanceadas es difícil cuando se introducen iones por solución sólida.*

*Sin embargo las deficiencias o los excesos de carga pueden compensarse de varias maneras en los materiales cerámicos. Para igualar la carga, un ion cargado positivamente, como puede ser el sodio o el calcio, se adsorbe en la superficie de la plaqueta de arcilla.*

#### *-Defectos superficiales.*

*Los límites de grano y la superficie de las partículas cerámicas son defectos superficiales importantes. Por lo común las cerámicas con un tamaño de grano fino tienen propiedades mecánicas mejoradas en comparación con las cerámicas de grano grueso. Los granos finos ayudan a reducir los esfuerzos en los bordes de grano debidos a la contracción y a la expansión anisotrópica. Normalmente, se produce un tamaño de grano fino cuando se parte de materias primas cerámicas formadas por partículas muy finas.*

#### 8.4.- MATERIALES CERÁMICOS NO CRISTALINOS

*Los más importantes de estos materiales son los vidrios. Los vidrios son materiales que durante el proceso de enfriamiento, se rigidizan sin cristalizarse. El vidrio, en cierta forma, se asemeja a un líquido subenfriado.*

*Sin embargo, por debajo de la temperatura fictiva se reduce la velocidad de contracción volumétrica por enfriamiento y el material puede ser considerado un vidrio y no un líquido subenfriado. Las estructuras vítreas se producen uniendo los tetraedros de sílice u otros grupos iónicos para formar una estructura reticular no cristalina.*

##### *-Vidrios de silicato.*

*Son los más usados. Contienen óxidos adicionales que actúan como formadores de vidrio.*

*Un óxido intermediario, como el óxido de plomo o el óxido de aluminio, no forman vidrios por sí mismos, sino que se incorporan a la estructura reticular de los formadores de vidrio. La adición de modificadores como el óxido de calcio o el óxido de sodio, provocan la desvitricación, o cristalización.*

##### *-Vidrios modificados de silicato.*

*Los modificadores rompen la red de sílice si la relación oxígeno-silicio se incrementa significativamente.*

##### *-Vidrios no silicáticos.*

*Los vidrios producidos a partir del  $\text{BeF}_2$ , el  $\text{GeO}_2$ , el fosfato de aluminio y el fosfato de boro tienen también una estructura tetraédrica de corto alcance.*

##### *-Flujo viscoso.*

*En un vidrio, la deformación ocurre como un flujo viscoso isotrópico. Grupos de átomos como las islas de silicato, los anillos o las cadenas, se mueven unos sobre otros como respuesta al esfuerzo, permitiendo la deformación.*

*Conforme aumenta la temperatura, disminuye la viscosidad, el flujo viscoso es más fácil y el vidrio se deforma más fácilmente.*

### **8.5.- DIAGRAMAS DE FASES EN LOS MATERIALES CERÁMICOS**

*Los diagramas de fase binarios en equilibrio para los materiales cerámicos incluyen soluciones sólidas, capas de miscibilidad y reacciones de tres fases. Las líneas de relación y los cálculos con la regla de la palanca determinan las composiciones de equilibrio y las cantidades de fase. Los diagramas de equilibrio más importantes para materiales cerámicos son los siguientes:*

- ◆ *SiO<sub>2</sub> - Na<sub>2</sub>O*
- ◆ *SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*
- ◆ *CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*
- ◆ *ZrO<sub>2</sub> - CaO*
- ◆ *CaO - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*
- ◆ *SiO<sub>2</sub> - CaO - Na<sub>2</sub>O*

### **8.6.- PROCESAMIENTO DE LAS CERÁMICAS**

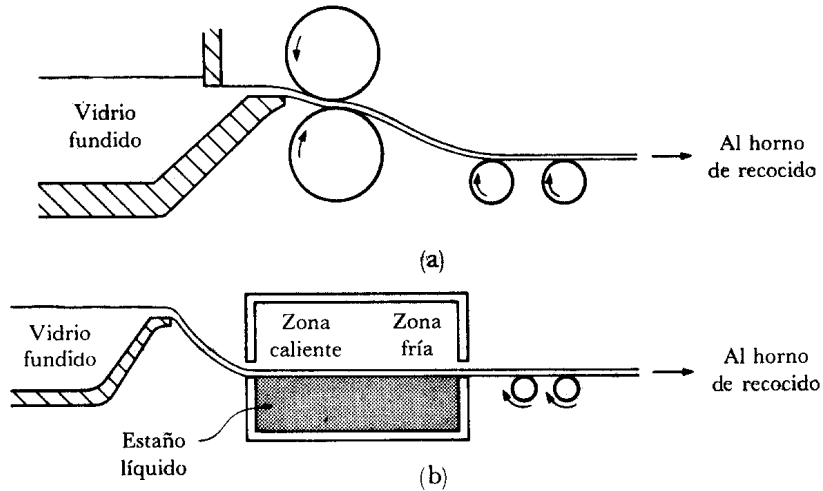
*Los vidrios se usan para manufacturar diversos artículos produciendo primeramente un líquido, y luego enfriando y configurando el líquido a una temperatura donde es posible el flujo viscoso.*

*Los materiales cerámicos cristalinos se manufacturan en artículos útiles preparando una forma, o compacto, compuesto por materias primas en forma de polvo fino. Los polvos se aglutinan después mediante diversos mecanismos, que incluyen la reacción química, la vitrificación (fusión), parcial o completa y el sinterizado.*

*Las técnicas más importantes para manufacturar vidrio en hoja y en placa son las siguientes:*

- a) *Laminado y*
- b) *Flotado del vidrio en estaño líquido*

*Dichas técnicas se pueden visualizar en la figura 8.2.*

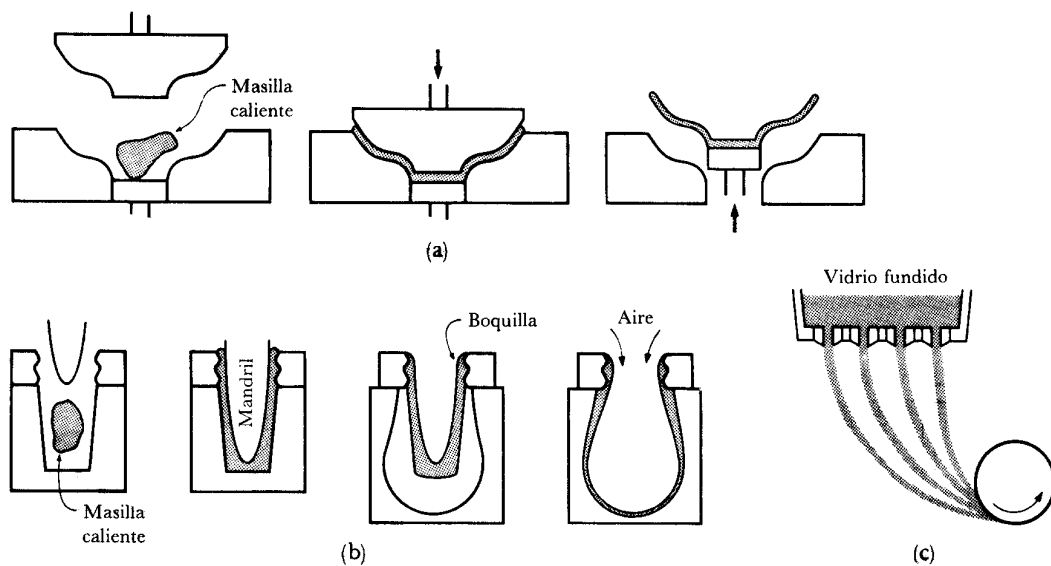


**Figura 8.2.- Técnicas para manufacturar vidrio en hoja y placa. (a)Laminado y (b) flotafo del vidrio en estaño líquido**

*Para el conformado de productos vítreos se utilizan los procesos siguientes:*

- a) Compresión,*
- b) Presionado y soplado y*
- c) trefilado de fibras*

*Dichos procesos se pueden apreciar en la figura 8.3.*



**Figura 8.3.- Técnicas para el conformado de productos vítreos. (a) Compresión (b) presionado y soplado y (c) trefilado de fibras**

### 8.7.- APLICACIONES Y PROPIEDADES DE LAS CERÁMICAS

*Hay una gran variedad de materiales cerámicos y de aplicaciones para estos materiales, los cuales se describen a continuación:*

- ◆ *Productos de arcilla. Muchas cerámicas están basadas fundamentalmente en la arcilla, a la cual se añade un material más grueso como el cuarzo, y un material fundente como el feldespato. Los altos contenidos de arcilla mejoran las características de conformabilidad, permitiendo la producción de cuerpos cerámicos más complicados.*
  
- ◆ *Refractarios. Estos materiales deben soportar elevados esfuerzos a altas temperaturas. La mayoría de los materiales cerámicos puros de alto punto de fusión se califican como materiales refractarios; sin embargo, los refractarios de óxido puro son caros y difíciles de conformar como productos útiles.*
  
- ◆ *Cerámicas eléctricas y magnéticas. Los materiales cerámicos presentan una gran variedad de propiedades eléctricas y magnéticas útiles. Algunas cerámicas pueden servir como resistores y elementos calefactores para hornos. Otros materiales cerámicos tienen un comportamiento semiconductor y se usan como termisores y rectificadores.*
  
- ◆ *Vidrios. La mayoría de los vidrios comerciales se basan en la sílice, con modificadores, tales como la soda o la sosa, para romper la estructura reticular y reducir el punto de fusión.*
  
- ◆ *Materiales pirocerámicos. Algunas características poco usuales se obtienen cuando la desvitrificación de un vidrio puede controlarse para hacer que nucleén y crezcan muchos pequeños cristales. La primera etapa del tratamiento es la de calentar el vidrio a una temperatura baja, de modo que se formen muchos núcleos dentro del vidrio. Después de que ha ocurrido la nucleación, la temperatura se eleva para promover el crecimiento de los núcleos en forma de cristales.*
  
- ◆ *Esmaltes y vidriados. Los esmaltes y los vidriados se añaden a la superficie para hacer impermeables las cerámicas, para darles protección, para decorarlas, o con propósitos especiales. Los esmaltes y los vidriados también pueden aplicarse a los metales. Una*

*composición común es  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . Pueden producirse colores especiales en los vidriados y esmaltes añadiendo otros minerales. Uno de los problemas que surgen en un vidriado o un esmalte es el agrietamiento superficial, que ocurre cuando el vidriado tiene un coeficiente de dilatación térmica diferente al del material cerámico subyacente.*

◆ *Escorias fundentes. Cuando los metales son fundidos o refinados, se producen óxidos que flotan en la superficie del metal fundido en forma de escoria. Estos materiales ayudan a purificar o refinar el metal una vez que la composición de aquellos se ajusta adecuadamente. En consecuencia, los fundentes cerámicos se añaden a la escoria por varias razones:*

- 1. Reducir la temperatura de fusión de modo que la escoria sea más fluida.*
- 2. Asegurarse de que se produce una buena acción de refinación; por ejemplo, el CaO y el CaF quitan el azufre del acero fundido y de los hierros fundidos.}*
- 3. Para asegurar que no sean atacados los refractarios que contienen metal fundido. Si se usan refractarios ácidos para contener metal, los óxidos ácidos como el  $\text{SiO}_2$  o el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pueden ser añadidos para asegurarse de que la escoria líquida es también ácida y compatible con el refractario.*

### **8.8.- MATERIALES Y APLICACIONES AVANZADAS**

*Los cerámicos avanzados incluyen los carburos, los boruros, los nitruros y los óxidos. Generalmente estos materiales se seleccionan tanto por sus propiedades mecánicas como físicas a altas temperaturas.*

*Un extenso grupo de cerámicos avanzados se usa en aplicaciones no estructurales, aprovechando sus propiedades únicas, magnéticas, electrónicas y ópticas, su buena resistencia a la corrosión a alta temperatura, su capacidad de servir como sensores en la detección de gases peligrosos y por ser adecuados para dispositivos de prótesis y otros “componentes de repuesto para el ser humano”. A continuación se describen los más importantes:*

*La Alúmina( $Al_2O_3$ ): Se utiliza para contener metal fundido o para operar a alta temperatura donde se requiere buena resistencia.*

*- El Nitruro de Aluminio ( $AlN$ ): Es un buen aislante eléctrico, pero tiene alta conductividad térmica. Dado que su coeficiente de expansión térmica es similar al del silicio, el  $AlN$  es un sustituto adecuado del  $Al_2O_3$  como material de sustrato para circuitos integrados.*

*- El Carburo de Boro ( $B_4C$ ): Es muy duro y aún así extraordinariamente ligero. Además de su utilización como blindaje nuclear, encuentra uso en aplicaciones que requieren excelente resistencia a la abrasión, como parte en placas blindadas.*

*- El Carburo de Silicio ( $SiC$ ): tiene una resistencia a la oxidación extraordinaria a temperatura incluso por encima del punto de fusión del acero. A menudo el  $SiC$  se utiliza como recubrimiento para metales, para compuestos de carbono y otros cerámicos a temperaturas extremas.*

*- El Nitruro de Silicio ( $Si_3N_4$ ): Son candidatos para componentes de motores automotrices y de turbina de gas, permitiendo temperaturas de operación más elevadas y mejores eficiencias de combustible, con menor peso que los metales y aleaciones tradicionales.*

*- El Sialón: Se forma cuando el aluminio y el oxígeno reemplazan parcialmente al silicio y al nitrógeno en el nitruro de silicio. Es relativamente ligero, con un coeficiente de expansión térmica bajo, buena tenacidad a la fractura, y una resistencia superior a la de muchos de los demás cerámicos avanzados comunes. El sialón puede encontrar aplicaciones en componentes para motor y otras aplicaciones, que a su vez involucran altas temperaturas y condiciones severas de desgaste.*

*- El Boruro de Titanio ( $TiB_2$ ): Es un buen conductor de la electricidad y del calor. Además tiene excelente tenacidad. El  $TiB_2$ , junto con el carburo de silicio y la alúmina, son aplicaciones en la producción de blindajes.*

**TECNOLOGÍA DE MATERIALES II**

*- La Urania ( $UO_2$ ): Utilizado como combustible de reactores nucleares.*



**BIBLIOGRAFÍA**

*1.- Tratamientos Térmicos de los Aceros.*

*José Apraiz Barreiro.*

*Editorial Dossat, S. A. 8ª Edición. 1981.*

*2.- Introducción a la Metalurgia Física.*

*Sydney H. Avner*

*McGraw-Hill. Segunda Edición. 1988.*

*3.- Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*

*American Society for Metals. 1977.*

*4.- The Making, Shaping and Treating of Steel. 10<sup>th</sup> Edition.*

*Edited by W. T. Lankford, Jr, N. L. Samways, R. F. Craven and H. E. McGannon.*

*United States Steel. Published by Association of Iron and Steel Engineers. 1985.*

*5.- Metals Handbook. 8<sup>th</sup> Edition*

*Vols: 1, 2, 7 y 8.*

*American Society for Metals.*

*6.- Handbook of Corrosion Engineering*

*Pierre R. Roberge*

*McGraw-Hill. E.U.A. 2000*

*7.- Corrosion Engineering*

*Mars G. Fontana, and Norbert D. Greene*

*McGraw-Hill. New York. 1967.*

*8.- Más allá de la herrumbre I*

*Javier Ávila Mendoza y Joan Genescá Llongueras*

*Fondo de Cultura Económica. México. 2002*

**TECNOLOGÍA DE MATERIALES II**

***9.- Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión***

***Javier Ávila Mendoza y Joan Genescá Llongueras***

***Fondo de Cultura Económica. México. 2003***

***10.- Non destructive Evaluation. Theory, Techniques, and Applications***

***Peter J. Shull (Editor)***

***Ed. Marcel Dekker. E.U.A. 2002***

***11.- Aceros. Estructuras y sus tratamientos térmicos.***

***Felipe Díaz del Castillo R. y Alberto Reyes Solís.***

***FES-Cuautitlán. 2004.***



