



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA**

**Tecnología de Materiales**

*Profesor Enrique Cortés González*

# 1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS METALES

## Esfuerzo

Se define como la fuerza por unidad de superficie que soporta o se aplica sobre un cuerpo, es decir es la relación entre la fuerza aplicada y la superficie en la cual se aplica.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde

F = fuerza aplicada

A = área original

## Deformación

Se define como cualquier cambio en la posición o en las relaciones geométricas internas sufridas por un cuerpo siendo consecuencia de la aplicación de esfuerzos, por lo que se manifiesta como un cambio de forma, de posición, de volumen o de orientación.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Donde

$\Delta L$  = variación de la longitud

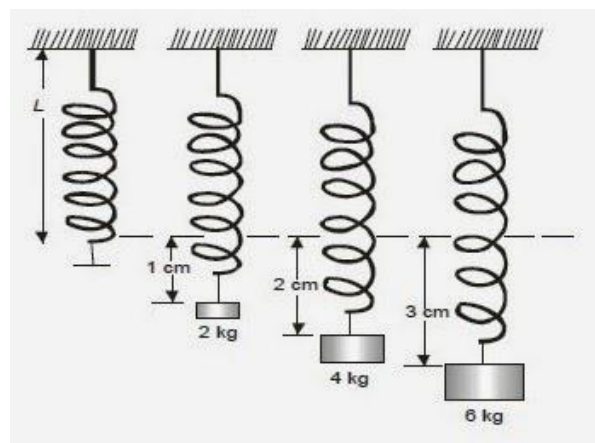
L = longitud original

## Deformación elástica

Ocurre en un objeto cuando una fuerza lo deforma, pero desaparece al quitar esa fuerza. El objeto recupera su forma inicial.

## Deformación plástica

Tipo de deformación en que el objeto no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.



**Ley de Hooke**

La deformación producida en un objeto es directamente proporcional al esfuerzo que la produce.

$$\sigma = E \varepsilon$$

Donde

$\sigma$  = esfuerzo

E = módulo de elasticidad

$\varepsilon$  = deformación unitaria

La relación entre esfuerzo y deformación es el módulo de elasticidad (módulo de Young) y es característica del tipo de metal. Entre mayores sean las fuerzas de atracción entre los átomos de un metal, mayor es su módulo de elasticidad.

Ejemplo:

Materiales ferrosos:  $E = 30 \times 10^6 \text{ lb/plg}^2$

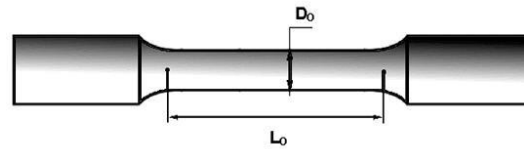
Aleaciones de aluminio:  $E = 10 \times 10^6 \text{ lb/plg}^2$

**Ensayo de tensión**

Ensayo en el cual una probeta preparada es sometida a una carga axial gradualmente creciente, hasta que ocurre la fractura. La operación se realiza sujetando los extremos opuestos de la probeta y separándolos. Se registra continuamente la carga en la probeta y el incremento de la longitud de la misma.



La probeta se fabrica de acuerdo a normas. En el sistema inglés bajo la norma ASTM, el diámetro original es de 0.5 plg y la longitud original es de 2 plg.

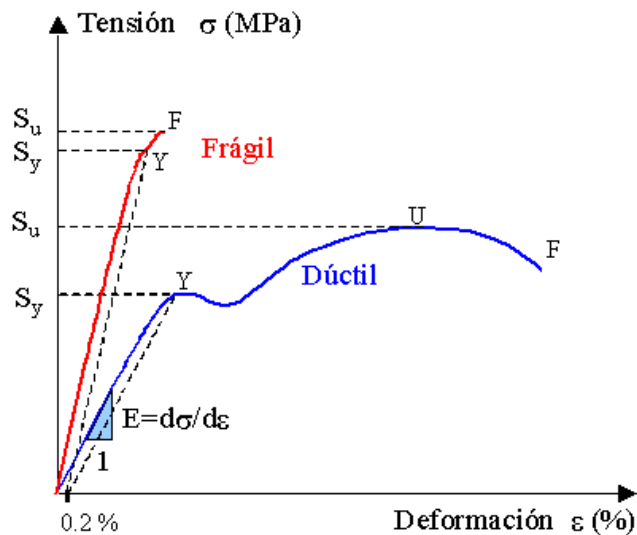


Durante el ensayo se mide la fuerza o carga  $P$  y el incremento de longitud  $\Delta L$ . después se obtienen el esfuerzo unitario y la deformación unitaria.

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Con estos datos se construye el diagrama esfuerzo deformación.



El ensayo de tensión se realiza para la evaluación de las propiedades mecánicas fundamentales con el diseño como finalidad.

Propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo:

**Límite de proporcionalidad.** Es donde termina la recta del diagrama. En este intervalo  $\sigma$  y  $\varepsilon$  son proporcionales entre sí.

**Esfuerzo de fluencia o cedencia (Y).** Más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento en la carga. Ocurre sólo en materiales dúctiles.

**Esfuerzo de fluencia de 0.2%.** Determinado para una deformación permanente del 0.2%.

**Resistencia máxima a la tensión (U).** Es el esfuerzo correspondiente a la carga máxima alcanzada en el ensayo de tensión. Se considera como la resistencia del material.

**Módulo de elasticidad.** Es la relación de esfuerzo deformación en el rango elástico. Es la pendiente de la parte recta del diagrama  $\sigma \varepsilon$ .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \left[ \frac{N}{m^2}, \frac{lb}{plg^2}, \frac{kg}{cm^2} \right]$$

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del material, esto es, su resistencia a la deformación axial en tensión o compresión.

**Elongación.** Se determina juntando, después de la fractura, las partes de la probeta y midiendo la distancia entre las marcas puestas antes de la prueba.

$$\text{Elongación [\%]} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

donde

$L_f$  = longitud final

$L_o$  = longitud original

**Reducción de área.** Esta también se determina a partir de las mitades rotas de la probeta, midiendo el área transversal mínima.

$$\text{Reducción de área [\%]} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

donde

$A_o$  = área original

$A_f$  = área final

**Relación de esfuerzo real – deformación real**

$$\sigma_r = \frac{\text{Carga}}{\text{Área instantánea}}$$

$$\varepsilon_r = \ln \frac{L}{L_o}$$

## Dureza

Algunos de los conceptos de dureza son los siguientes:

- Resistencia a la penetración
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia al rayado
- Resistencia a la cortadura, a la perforación

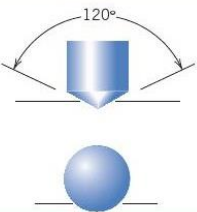

Ensayos de dureza por penetración

## Rockwell



Se mide forzando con un penetrador su superficie. Se usan varias cargas y penetradores, dependiendo de las condiciones del ensayo. Una letra de subíndice se emplea para designar las condiciones del ensayo.



Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga
		Vista lateral	Vista superior	
Rockwell y Rockwell superficial	{ Cono de diamante Esferas de acero de $\frac{1}{16}$ , $\frac{1}{8}$ , $\frac{1}{4}$ , $\frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro			60 kg } 100 kg } Rockwell 150 kg }
				15 kg } 30 kg } Rockwell superficial 45 kg }



$$R=0.2/120^\circ$$

El valor de la dureza es un número arbitrario que está inversamente relacionado con la profundidad de la huella.

Este ensayo consta de escalas, que miden la dureza de los materiales por grupos de durezas similares.

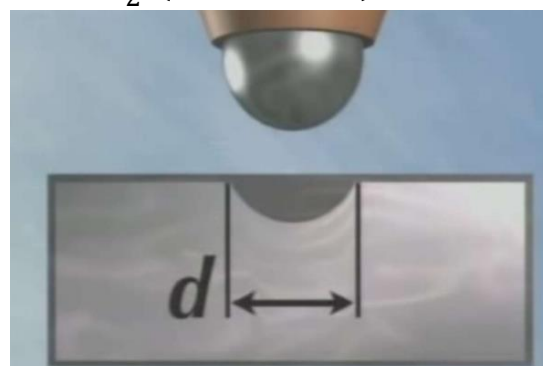
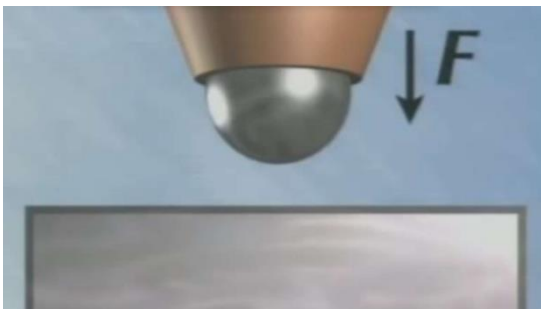
Por ejemplo, la escala B se usa para medir aleaciones de cobre, de níquel y de aluminio. La escala C se utiliza para medir aceros.

En la escala B, se utiliza una carga de 100 kg y el penetrador de esfera 1/16" y la escala C utiliza una carga de 150 kg y el penetrador cónico.

### Brinell

Utiliza un penetrador esférico de 10 mm de diámetro. Se mide la dureza con la siguiente relación:

$$NDB = \frac{\text{Carga sobre el penetrador}}{\text{Área de la huella}} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



$D$  es el diámetro del penetrador y es de 10 mm,  $d$  es el diámetro en la huella. En la práctica, se mide  $d$  y se obtiene el número de dureza Brinell de tablas.

El ensayo se realiza con las condiciones siguientes:

- Diámetro de la esfera ( $D$ ): 10 mm
- Carga aplicada sobre el penetrador ( $P$ ): 3 000 kg
- Duración de aplicación de la carga: 15 seg

### Prueba de impacto

El ensayo de Impacto sirve determinar la Tenacidad de los materiales. La tenacidad se define como la propiedad que tiene un material de absorber energía hasta el punto de ruptura, cuando es sometido a esfuerzos de choque o golpes.

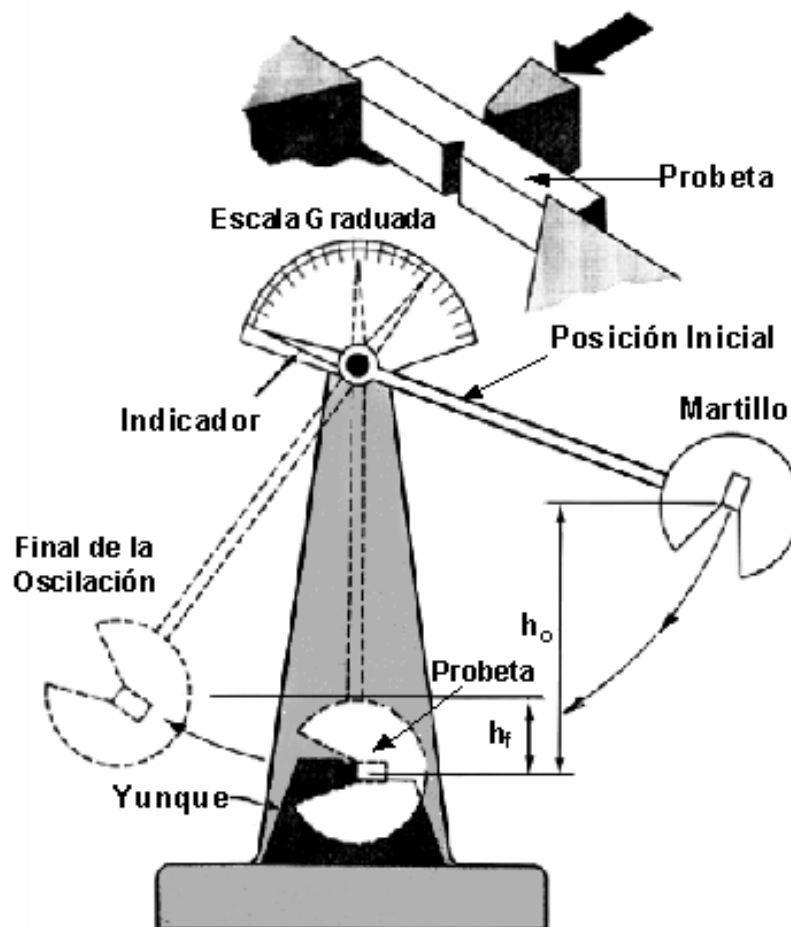
Existen dos métodos para realizar los ensayos de impacto

1. Charpy → Viga simplemente apoyada
2. Izod Viga → empotrada o en voladizo

Aspectos principales

1. Una masa móvil cuya energía cinética es suficiente para causar la ruptura de la probeta
2. Un yunque y un apoyo sobre el cual se coloca la probeta para recibir el impacto
3. Un medio para medir la energía utilizada para fracturar la probeta

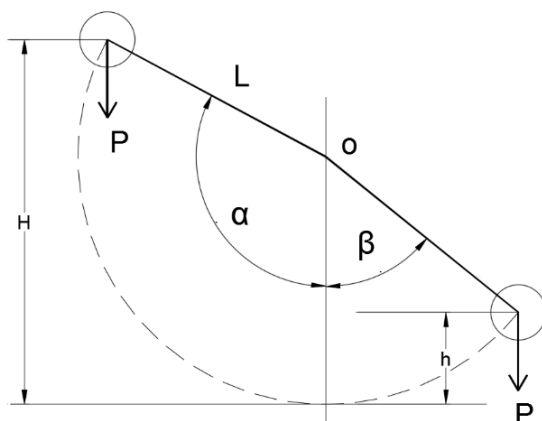
Ensayo Charpy





### Cálculo de relaciones energéticas

La resistencia al impacto o energía absorbida al romper la probeta es igual a la diferencia entre la energía del péndulo antes y después del impacto. Sin considerar las pérdidas, la energía usada al fracturar una probeta puede calcularse como sigue:



$$\text{Energía inicial} = PH = PL(1 - \cos\alpha)$$

$$\text{Energía después de la ruptura} = Ph = PL(1 - \cos\beta)$$

$$\text{Energía para fracturar la probeta} = P(H - h) = PL(\cos\beta - \cos\alpha)$$

Donde

P = Peso del péndulo

H = Altura de caída del péndulo

h = Altura de elevación del péndulo

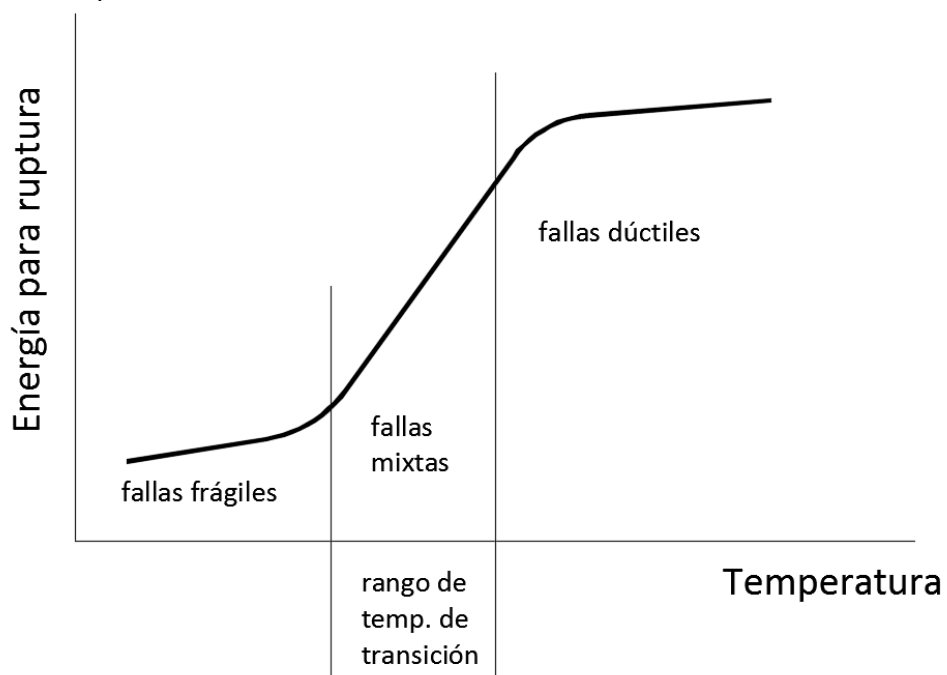
$\alpha$  = Ángulo de caída

$\beta$  = Ángulo de elevación

L = Distancia del centro de gravedad del péndulo al eje de rotación O.

La tenacidad es una propiedad muy importante para el diseño y fabricación de piezas con materiales que trabajarán bajo esfuerzos de impacto o en un ambiente de bajas temperaturas.

### Efecto de la temperatura



### Torsión

Es la deformación de un cuerpo al ser cargado por momentos que tienden a producir una rotación en su eje longitudinal.

El momento de torsión  $T$  es un giro o vuelta que tiende a producir rotación. Las aplicaciones se encuentran en muchas herramientas donde es necesario apretar o aflojar dispositivos.

$$T = Fd$$

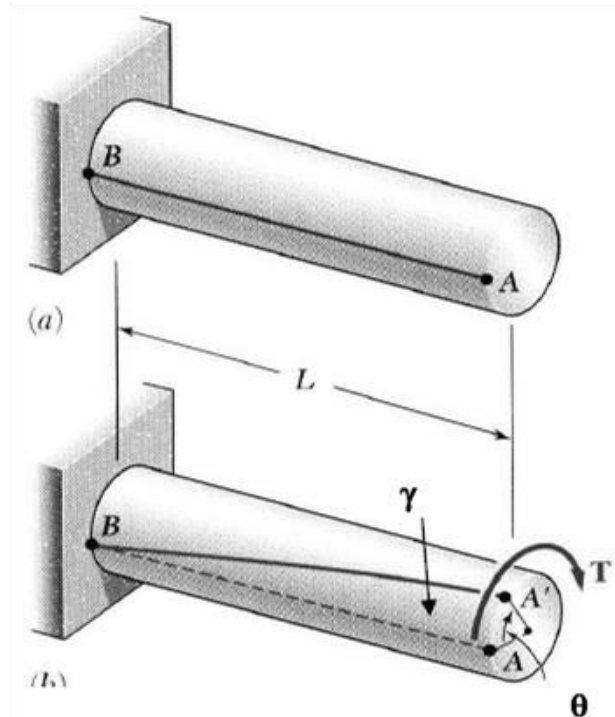
Donde

$F$  = Fuerza

$d$  = Distancia

### Ángulo de torsión

Considérese una barra con un extremo fijo y el otro extremo libre sometido a un momento de torsión  $T$ . Se observa que sufre una deformación por la cual el punto  $A$  se desplaza a la posición  $A'$  formando un ángulo  $\theta$  que representa la deformación de la sección transversal.



$$\theta = \frac{TL}{JG}$$

Donde

$\theta$  = Ángulo de torsión

$T$  = Momento de torsión

$L$  = Longitud de la barra

$J$  = Momento polar de inercia

$G$  = Módulo de elasticidad

J es un parámetro utilizado para predecir la resistencia a la torsión del objeto en función de su geometría.

Para una sección circular:

$$J = \frac{\pi d^4}{32}$$

Donde

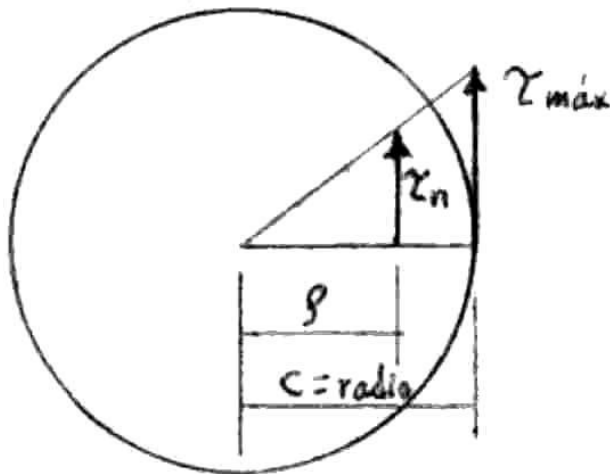
$d$  = diámetro de la barra

Relación esfuerzo cortante ( $\tau$ ) - deformación angular ( $\gamma$ )

$$\tau = G\gamma$$

### Esfuerzo cortante

Cuando una fuerza externa actúa tangencialmente a una sección de un cuerpo, se dice que actúa una fuerza cortante, originando un esfuerzo cortante.



$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Tc}{J}$$

## 2 ESTRUCTURA CRISTALINA

### Conceptos generales

#### Estructura y cristalización de los metales

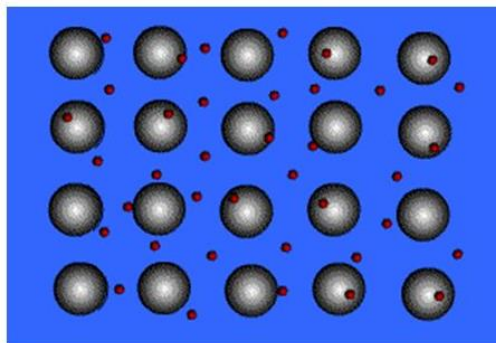
Fuerzas interatómicas e intermoleculares

Los átomos se hallan unidos por enlaces químicos, que se dividen en tres tipos generales:

1. Enlace metálico
2. Enlace iónico
3. Enlace covalente

#### Enlace metálico

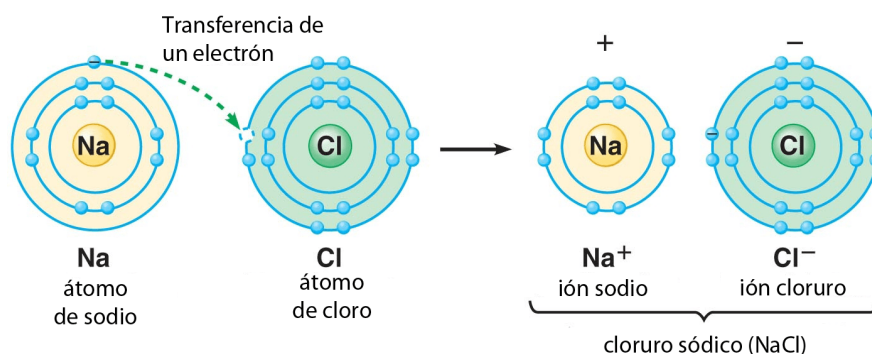
Una característica de los metales es que tienen de uno a tres electrones en su última órbita. El enlace metálico se forma al abandonar los electrones exteriores a sus átomos y formar una "nube o gas" de electrones.



#### Enlace iónico

Ocurre entre elementos metálicos y no metálicos, es característico de los cerámicos.

Ejemplo: enlace entre el sodio y el cloro



Al ceder un electrón el *Na* al *Cl*, se producen iones positivos de sodio ( $Na^+$ ) y iones negativos de cloro ( $Cl^-$ ), los cuales se atraen entre sí.

### Enlace covalente

Se encuentra en materiales cerámicos y polímeros. Los electrones están firmemente sostenidos y son compartidos en forma equitativa por los átomos participantes.

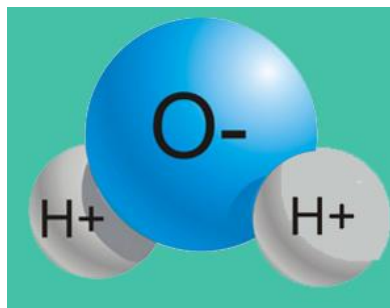


### Fuerzas de Van der Waals

Las fuerzas intermoleculares o de Van der Waals son fuerzas débiles que producen la atracción mutua de moléculas. Ocurren en todos los materiales, pero son importantes en los polímeros mayores.

Aun cuando se halle presente un enlace iónico o covalente, hay un desequilibrio en la carga eléctrica de la molécula.

Ejemplo: En una molécula de agua existe una polaridad positiva en el extremo rico en hidrógeno y una polaridad negativa en el otro extremo. Por lo que las moléculas se atraen.

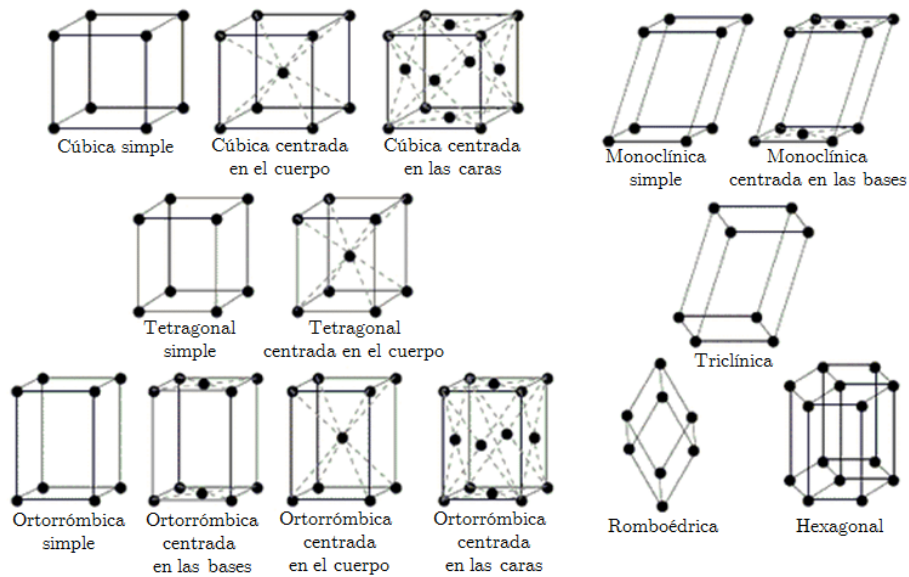


### Sistemas cristalinos

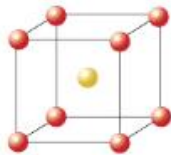
En el estado sólido los átomos adoptan posiciones relativamente fijas, esto da lugar a la formación de cristales.

- La red tridimensional de líneas imaginarias que conecta los átomos se llama red espacial
- La unidad más pequeña que tiene la simetría total del cristal se llama celda unitaria
- Hay 14 tipos de celdas unitarias
- La mayoría de los metales importantes cristalizan en tres tipos: BCC, FCC y HCP

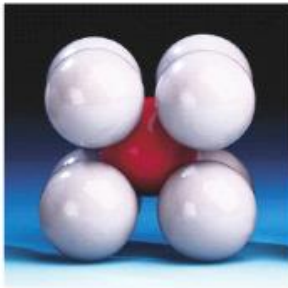
## Principales estructuras cristalinas en los materiales



## Tipos de celdas unitarias presentes en la mayoría de los metales



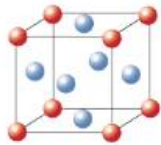
### BCC.- celda cúbica de cuerpo centrado



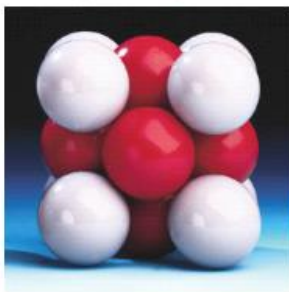
Vértices =  $8 \times 1/8 = 1$  átomo

Cuerpo = 1 átomo

Masa = 2 átomos



### FCC.- celda cúbica de caras centradas

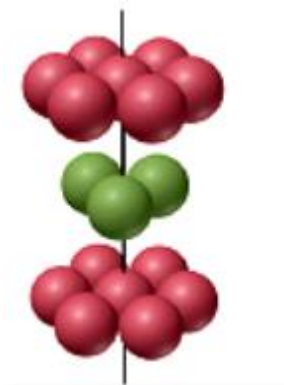
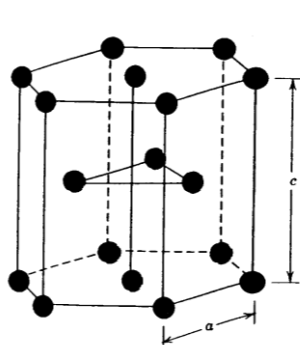


Vértices =  $8 \times 1/8 = 1$  átomo

Caras =  $6 \times 1/2 = 3$  átomos

Masa = 4 átomos

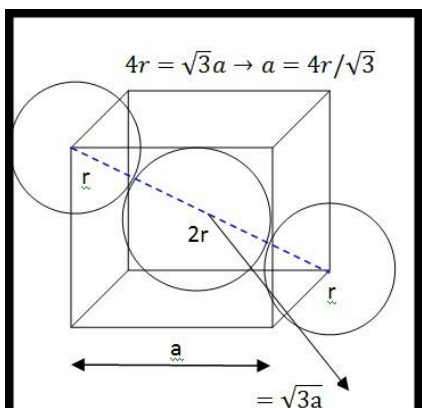
HCP.- celda hexagonal compacta



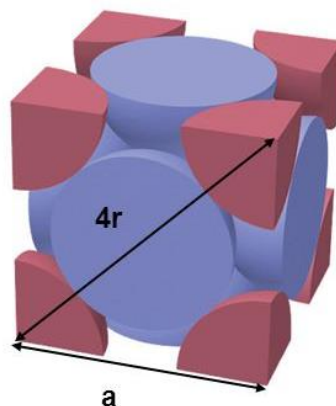
Vértices =  $12 \times 1/6 = 2$  átomo  
 Cuerpo = 3 átomos  
 Caras =  $2 \times 1/2 = 1$  átomo  
 Masa = 6 átomos

Radio atómico

BCC

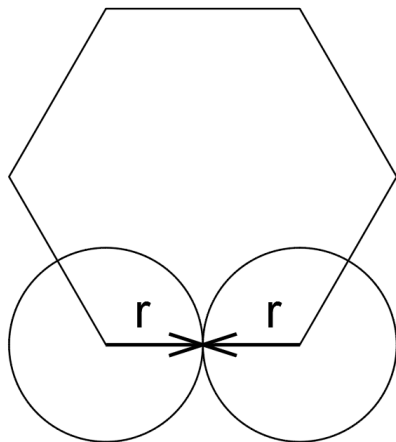


FCC



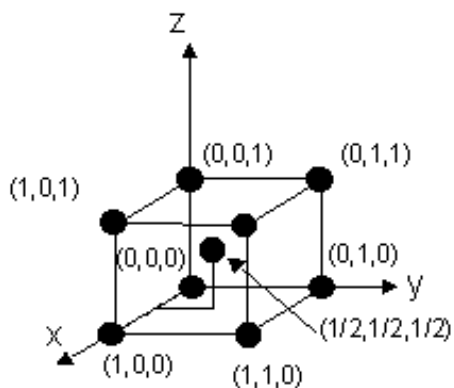
$$4r = a\sqrt{2}$$

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$$



HCP  
 $a = 2r$

**Posiciones de los átomos dentro de la celda unitaria**



Posición o coordenada

- A = 0, 0, 0
- B = 1, 0, 0
- C = 1, 1, 0
- D = 0, 1, 0
- E = 0, 0, 1
- F = 1, 0, 1
- G = 0, 1, 1
- H = 1/2, 1/2, 1/2

**Direcciones en las celdas unitarias**

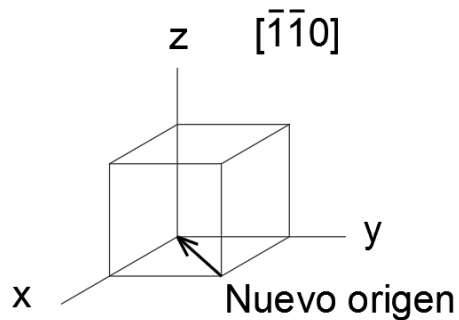
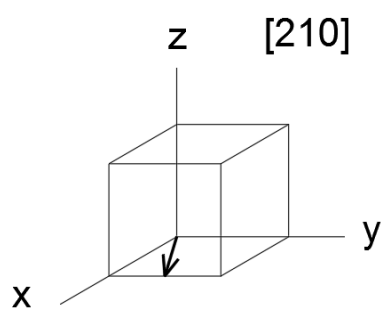
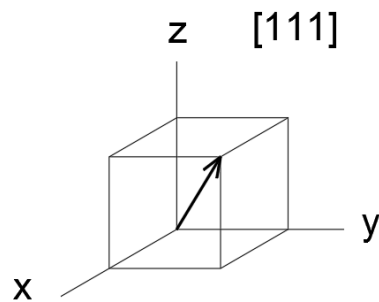
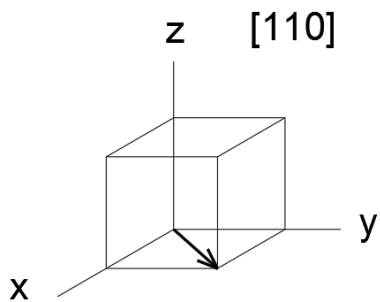
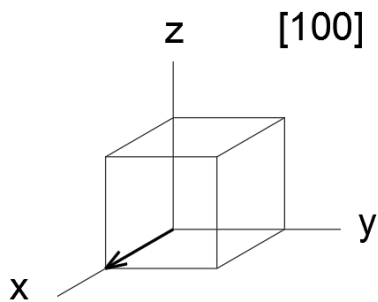
[100]

[110]

[111]

1, 1/2, 0 ⇨ Eliminación de fracciones ⇨ [210]

[1̄1̄0]



En una celda cúbica  $a = b = c$ . Entonces, se tiene un conjunto de direcciones

$\langle 110 \rangle = [110], [101], [011]$



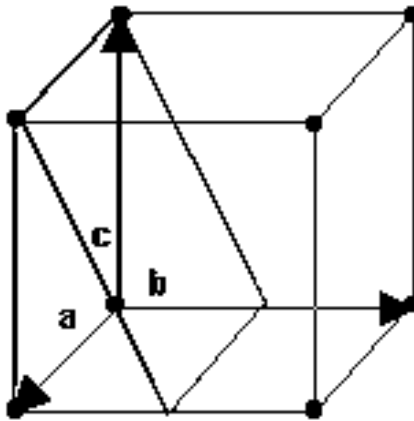
## Índices de Miller

### Planos cristalográficos

Los planos sobre los cuales están ordenados los átomos se conocen como planos cristalográficos. La relación que guarda un conjunto de planos con los ejes de la celda unitaria se designa por los índices de Miller.

Se debe seguir la siguiente secuencia

1. Se elige un plano en la celda unitaria que no pase por el origen
2. Se anotan las intersecciones del plano como múltiplos de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$
3. Se toman recíprocos y se eliminan fracciones

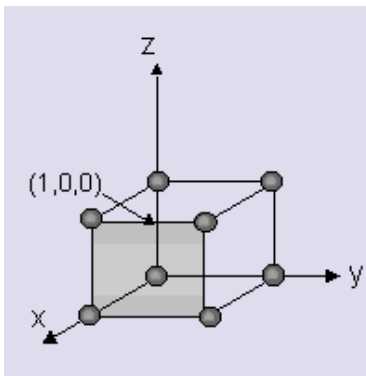


Índices para el plano A:

Intersecciones:  $\infty$ ,  $1/2$ ,  $1$

Recíprocos:  $0$ ,  $2$ ,  $1$

Eliminación de fracciones: no hay fracciones  $\Rightarrow (0\ 2\ 1)$

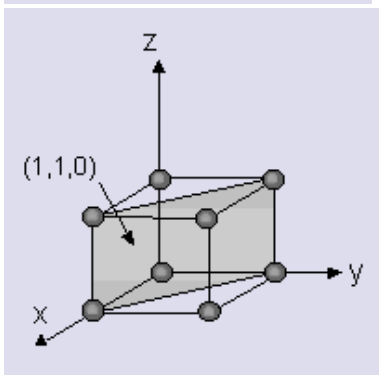


Índices para el plano B:

Intersecciones:  $1$ ,  $\infty$ ,  $\infty$

Recíprocos:  $1$ ,  $0$ ,  $0$

Eliminación de fracciones: no hay fracciones  $\Rightarrow (1\ 0\ 0)$

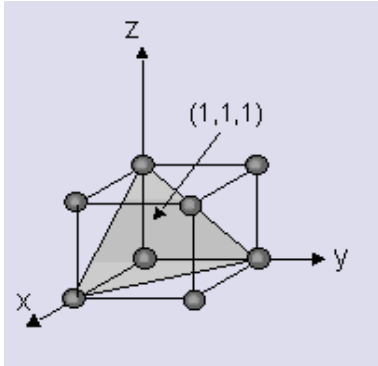


Índices para el plano C:

Intersecciones:  $1$ ,  $1$ ,  $\infty$

Recíprocos:  $1$ ,  $1$ ,  $0$

Eliminación de fracciones: no hay fracciones  $\Rightarrow (1\ 1\ 0)$

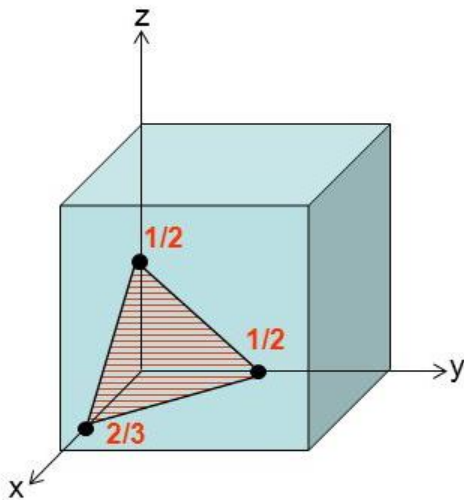


Índices para el plano D:

Intersecciones: 1, 1, 1

Recíprocos: 1, 1, 1

Eliminación de fracciones: no hay fracciones  $\Rightarrow$  (1 1 1)



Índices para el plano E:

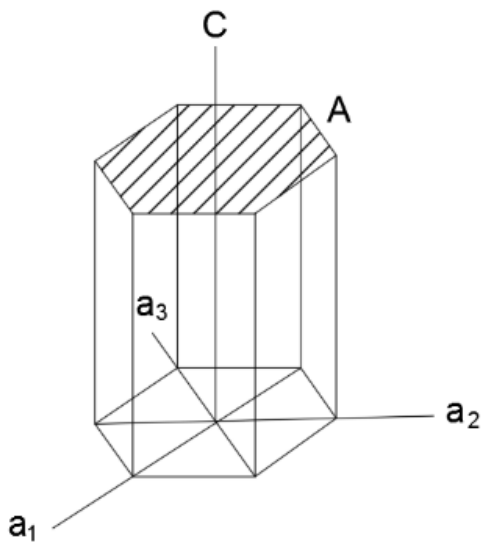
Intersecciones:  $2/3$ ,  $1/2$ ,  $1/2$

Recíprocos:  $3/2$ , 2, 2

Eliminación de fracciones: 3, 4, 4  $\Rightarrow$  (3 4 4)

### Celdas hexagonales

Determinación de los índices de Miller para planos y direcciones

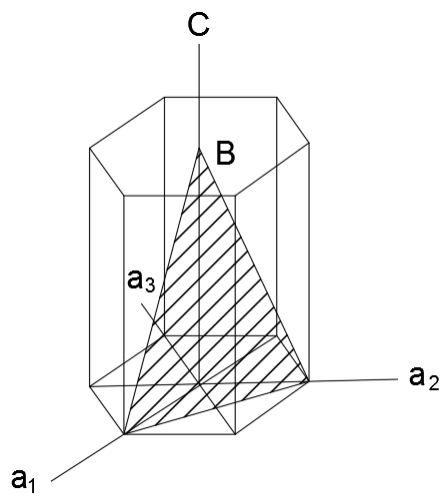


Índices para el plano A:

Intersecciones:  $\infty$ ,  $\infty$ ,  $\infty$ , 1

Recíprocos: 0, 0, 0, 1

Eliminación de fracciones: no hay fracciones  $\Rightarrow$  (0 0 0 1)



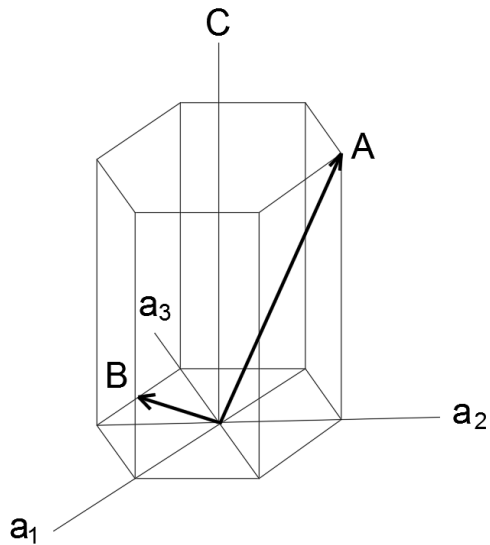
Índices para el plano B:

Intersecciones: 1, 1,  $-\frac{1}{2}$ , 1

Recíprocos: 1, 1, -2, 1

Eliminación de fracciones: no hay fracciones  $\Rightarrow$  (1 1 -2 1)

Las direcciones quedan definidas con 3 coordenadas: [  $a_1 a_2 c$  ]



Índices para la dirección A: [ 0 1 1 ]

Índices para la dirección B:  $-\frac{1}{2}$ , -1, 0

Eliminación de fracciones: -1, -2, 0

Índices: [  $\bar{1} \bar{2} 0$  ]

## Densidad volumétrica, plana y lineal

### Densidad volumétrica

$$\rho = \frac{\text{masa de la celda unitaria}}{\text{volumen de la celda unitaria}}$$

### Densidad plana

$$\rho_{\text{plana}} = \frac{\text{número de átomos en el plano}}{\text{área del plano}}$$

### Densidad lineal

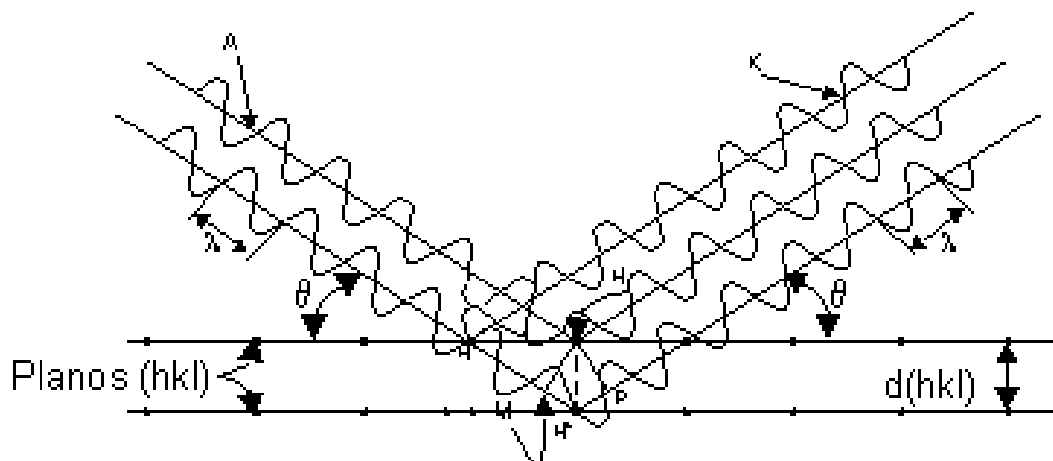
$$\rho_{\text{lineal}} = \frac{\text{número de átomos en la dirección}}{\text{longitud de la dirección}}$$

### Polimorfismo o alotropía

Este fenómeno se da cuando en un elemento existe más de una forma cristalina bajo diferentes condiciones de temperatura y presión.

### Difracción de rayos x

Se utilizan para medir las dimensiones de la celda unitaria. Mediante este método se miden las distancias entre planos de átomos.



Cuando un haz de rayos  $x$  llega a los átomos, éstos reemiten la radiación con la misma longitud de onda. Para que exista la difracción, las radiaciones emitidas deben estar en fase. Entonces, se debe tener una relación entre el ángulo de incidencia ( $\theta$ ), la longitud de onda de la radiación ( $\lambda$ ) y la distancia entre planos ( $d$ ).

Para que los rayos 1 y 2 estén en fase,  $2d\sin\theta$  debe ser igual a una o más longitudes de onda enteras. Esto se resume en la ecuación de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Donde  $n$  (orden de difracción) puede tener valores de 1,2,3 etc.

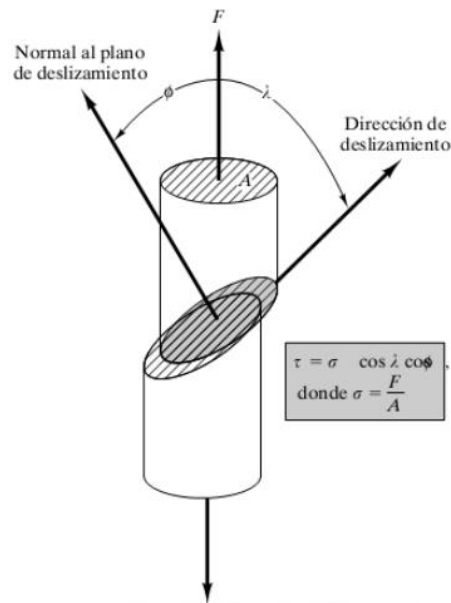
En el sistema cúbico, la distancia interplanar está dada por la ecuación

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

Donde  $(h k l)$  son los índices de Miller y  $a$  es la constante o parámetro de red.

### Deformación plástica de monocristales

Los metales se deforman predominantemente por corte plástico o deslizamiento. El deslizamiento se produce principalmente a lo largo de ciertas direcciones y planos cristalinos.



- La dirección de deslizamiento de cada cristal metálico es la dirección con mayor densidad lineal
- Los planos de deslizamiento son planos que están muy separados

### Ley de Schmid

El esfuerzo cortante requerido para iniciar el deslizamiento se llama esfuerzo crítico de corte  $\tau_c$ .

La fuerza requerida para producir deslizamiento no es solo función del esfuerzo crítico de corte, sino que también depende del ángulo entre el plano de deslizamiento y la dirección de la fuerza aplicada  $F$  y el ángulo entre la dirección de deslizamiento y la dirección de la fuerza.

$A$  = área transversal

$A_d$  = área del plano de deslizamiento

$$\tau = \frac{F\cos\lambda}{A_d}, \quad A_d = \frac{A}{\cos\phi}$$

$$\tau = \frac{F\cos\lambda}{\frac{A}{\cos\phi}} \Rightarrow \tau = \frac{F}{A}\cos\lambda\cos\phi$$

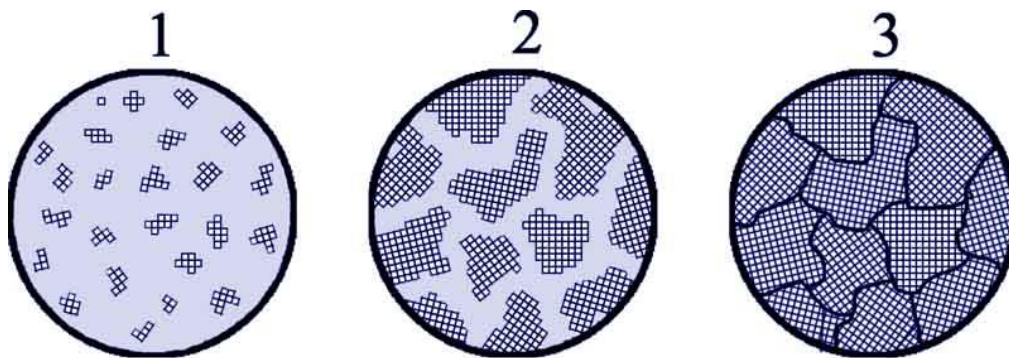
$$\tau = \sigma\cos\lambda\cos\phi$$

## 3 IMPERFECCIONES EN LOS SÓLIDOS

### Mecanismo de cristalización

La cristalización es la transición del estado líquido al sólido y ocurre en dos etapas:

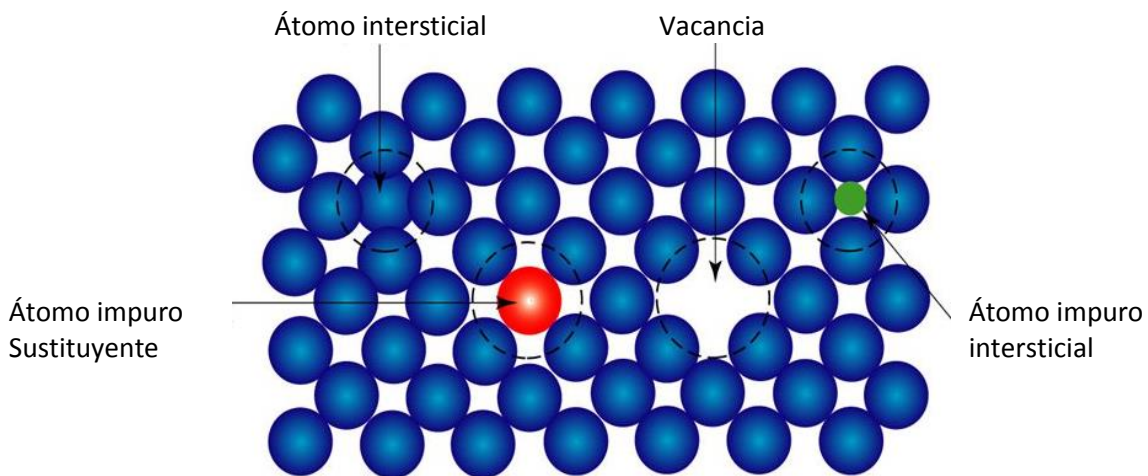
1. Formación de núcleos
2. Crecimiento del cristal



En la imagen 1 se tiene líquido y aparición de núcleos. En la imagen 2 se ve el crecimiento del cristal y en la imagen 3 se observan los granos y los límites o fronteras de grano al terminar la solidificación.

### Defectos cristalinos de punto

Son vacíos o átomos faltantes en la red cristalina.

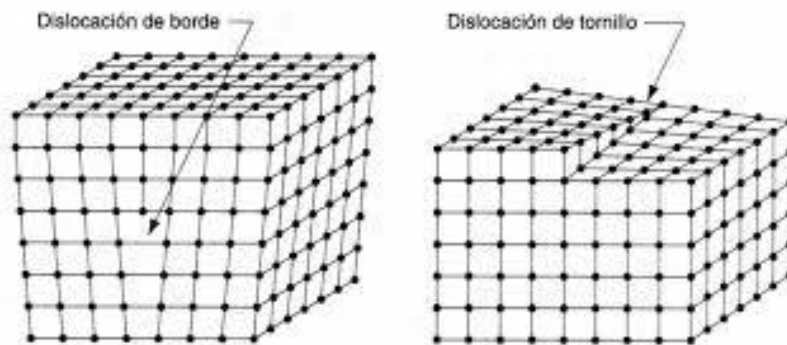


### Defectos lineales

Los defectos lineales, o dislocaciones (hileras faltantes de átomos), en los sólidos cristalinos son defectos que causan una distorsión de la red centrada alrededor de una línea. Se crean en la solidificación. También se pueden formar por una deformación plástica o permanente del cristal.

**Dislocación de borde.** Consiste en la introducción o eliminación de una hilera (plano) de átomos adicional en la red cristalina.

**Dislocación de tornillo.** El desplazamiento de los átomos es paralelo a la línea de dislocación.



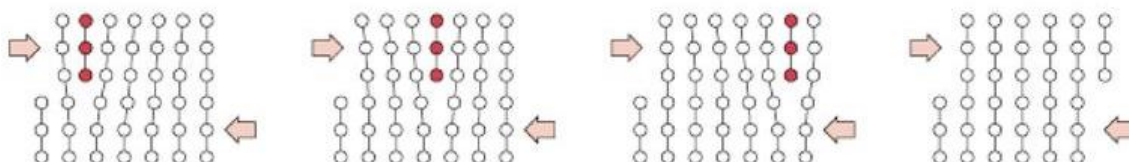
### Significado de las dislocaciones

La cantidad de dislocaciones en un material de ingeniería es muy grande. Esto afecta las propiedades y el comportamiento de los materiales.

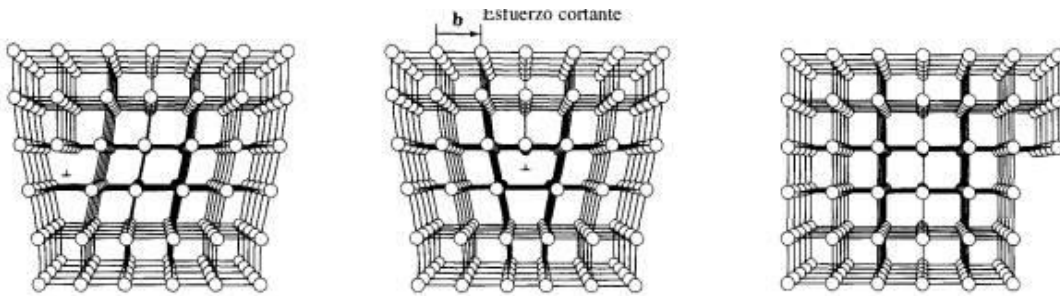
Se define a la cantidad de dislocaciones en un volumen unitario, como la cantidad de dislocaciones ( $l$ ) por unidad de volumen. También se conoce a esta cantidad como la densidad de dislocaciones  $N$  y es igual a  $l/V$ .

La densidad de dislocación de un cristal se expresa como dislocaciones/cm<sup>2</sup>. Por ejemplo, un metal recocido tiene de  $10^6$  a  $10^8$  líneas de dislocación/cm<sup>2</sup> y los metales trabajados en frío pueden tener hasta  $10^{12}$  líneas de dislocación/cm<sup>2</sup>.

Las dislocaciones tienen un efecto muy importante en la deformación de los cristales por sus enormes cantidades y su propiedad única de moverse con relativa facilidad.



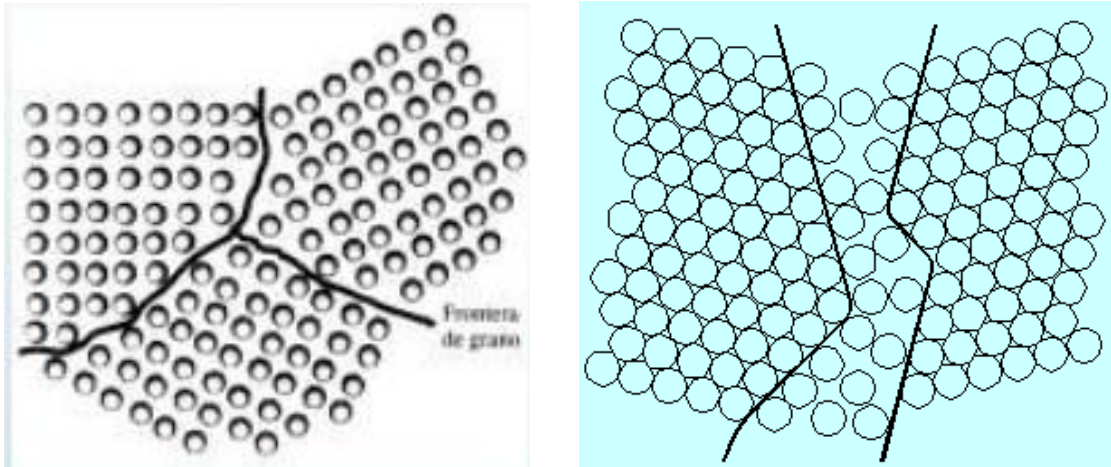
Las direcciones con alta densidad lineal indican direcciones preferentes de deformación. Se mueven las dislocaciones.



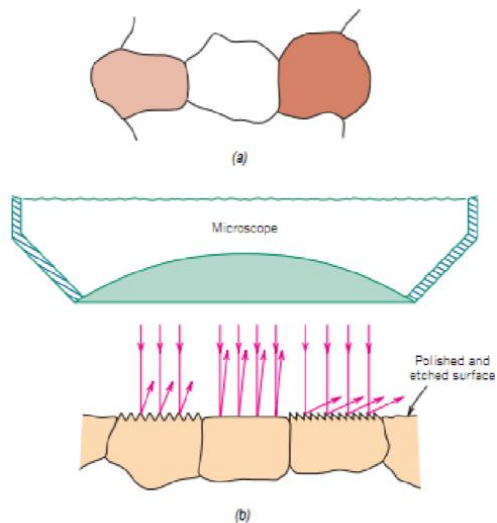
*Mecanismo de deformación: deslizamiento de dislocaciones.*

### Defectos de superficie

**Frontera de grano.** Las fronteras de grano son imperfecciones en la superficie de materiales policristalinos que separan granos (cristales) de diferentes orientaciones. En los metales los límites de grano se crean durante la solidificación cuando los cristales formados a partir de diferentes núcleos crecen simultáneamente y se encuentran unos con otros.



### Observación microscópica



La figura siguiente muestra el funcionamiento de un microscopio óptico reflexivo.

Este funciona por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. Como se puede ver en la parte (a) de la figura, se muestran tres granos, todos de diferente color, esto significa que tienen microestructura diferente. En la parte (b) de la figura se muestran los mismos tres granos que como se nota, poseen superficies dirigidas en diferentes ángulos; la diferencia entre la dirección que toman los haces de luz proyectados sobre dichas superficies, refleja contrastes sobre la lente creando la imagen que podemos observar en el microscopio. Los átomos en los límites de grano durante el ataque químico se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad.



## 4 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN METALES

### Endurecimiento por trabajo en frío

El trabajo en frío es la cantidad de deformación plástica obtenida en el procesado de un metal. Se expresa por la reducción de área de la sección transversal.

$$TF = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

Donde  $A_o$  y  $A_f$  son el área original y el área final.

La deformación plástica cambia la estructura interna de un metal, así que también cambia sus propiedades.

El movimiento de las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento y la distorsión de los planos, producida por la constricción de los granos adyacentes, modifican la regularidad de la red cristalina. Por eso con más dificultad ocurre un mayor deslizamiento y la dureza del metal aumenta.

### Efectos de la temperatura sobre estructuras trabajadas en frío

Trabajo en frío

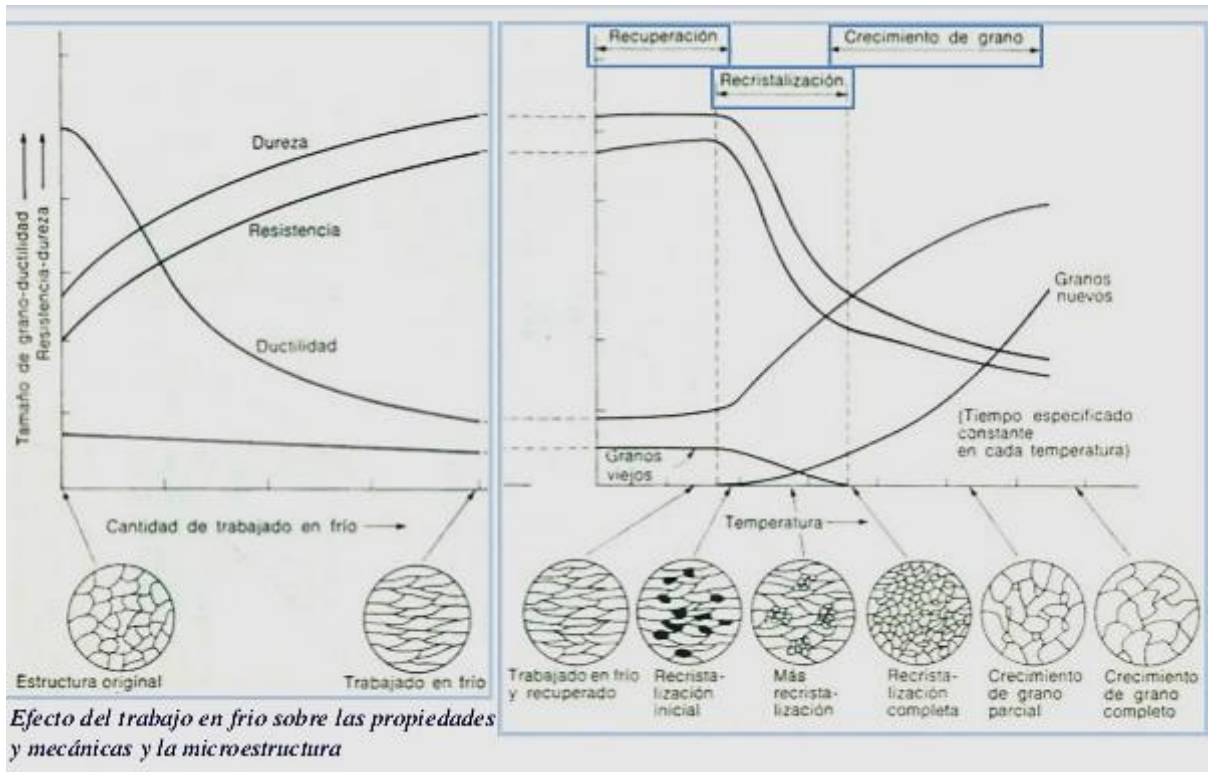
- aumenta la dureza, la resistencia a la tensión
- disminuye la ductilidad
- aumento en el número de dislocaciones
- ciertos planos de la estructura cristalina se distorsionan severamente

Se almacena energía en la estructura cristalina como energía interna asociada a los defectos de la red creados por la deformación.

El recocido es el tratamiento térmico mediante el cual la estructura distorsionada de la red trabajada en frío cambia a un estado libre de esfuerzos (se forma un arreglo más perfecto) por medio de la aplicación de calor.

El recocido puede dividirse en tres etapas:

1. Recuperación
2. Recristalización
3. Crecimiento de grano



### Recuperación

- La dureza y la resistencia no cambian
- Aumenta la resistencia a la corrosión

### Recristalización

- Se forman nuevos cristales libres de esfuerzo
- Menor resistencia y dureza, mayor ductilidad
- Si el TF previo es menor, el tamaño de grano será mayor

### Crecimiento de grano

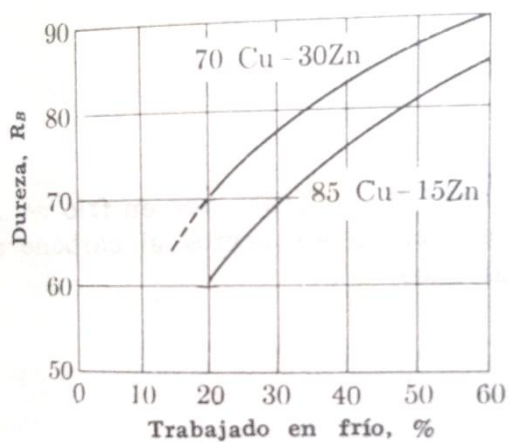
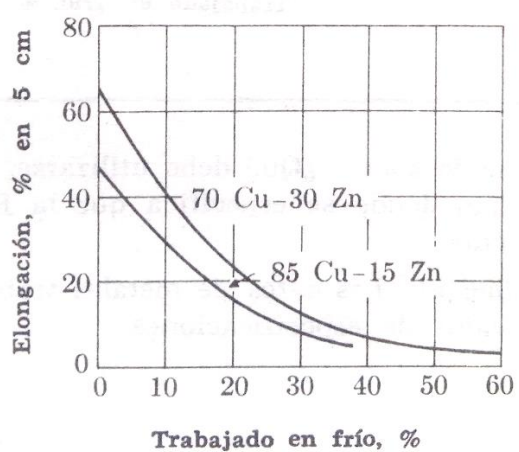
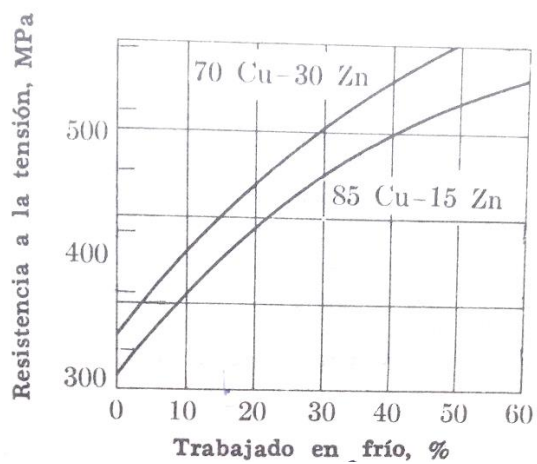
- Al aumentar la temperatura, aumenta el tamaño de grano
  - Baja resistencia y dureza, alta ductilidad
  - Hay un alivio de esfuerzos internos
- Estos tres efectos también dependen del tiempo
  - La temperatura de recristalización es de  $1/3$  a  $1/2$  de la temperatura de fusión del metal puro
  - Cuando la cantidad de TF es mayor, la temperatura de recristalización es menor

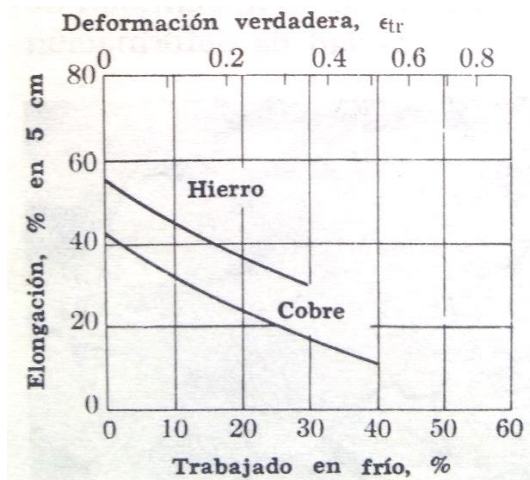
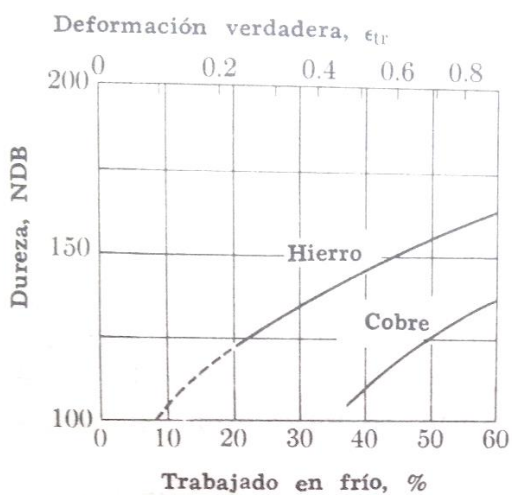
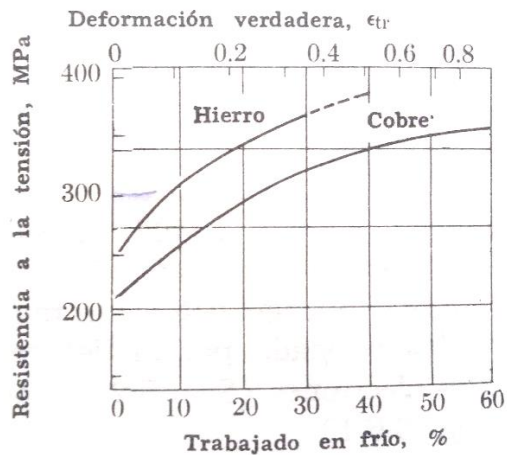
### Aplicación del trabajo en frío y después en caliente y recocido

Si se trabaja un metal por encima de su temperatura de recristalización se conoce como trabajo en caliente. Por debajo de esa temperatura se conoce como trabajo en frío

1. Aplicando trabajo en frío y después aplicando recocido se tiene un material dúctil
2. Aplicando trabajo en caliente y posteriormente TF se tiene un metal duro y resistente

## Gráficas para trabajo en frío





## 5 DIAGRAMAS DE FASE

### Aleaciones

Una aleación es una combinación de dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es metal.

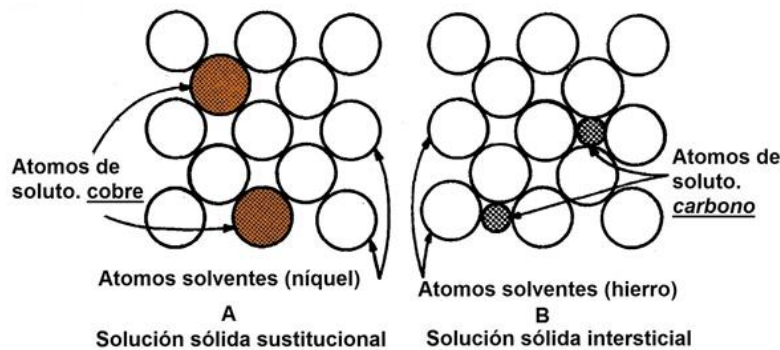
- Homogéneas (uniformes) → una fase
- Mezclas → varias fases

Fase es aquella parte de un material que es distinta de las otras en estructura y/o composición.

- Gaseosa
- Líquida
- Sólida → metal puro, aleación compuesta, solución sólida

### Soluciones sólidas

Una solución sólida se forma cuando la combinación de dos o más elementos da como resultado una estructura de una sola fase.



Para formar soluciones sólidas se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

1. Que la diferencia de radios atómicos sea menor del 15%
2. La cercanía en la tabla periódica, que tengan electronegatividad similar
3. Que los metales concurrentes tengan la misma estructura cristalina

Los diagramas de fase o de equilibrio son gráficas de curvas de límites de solubilidad.

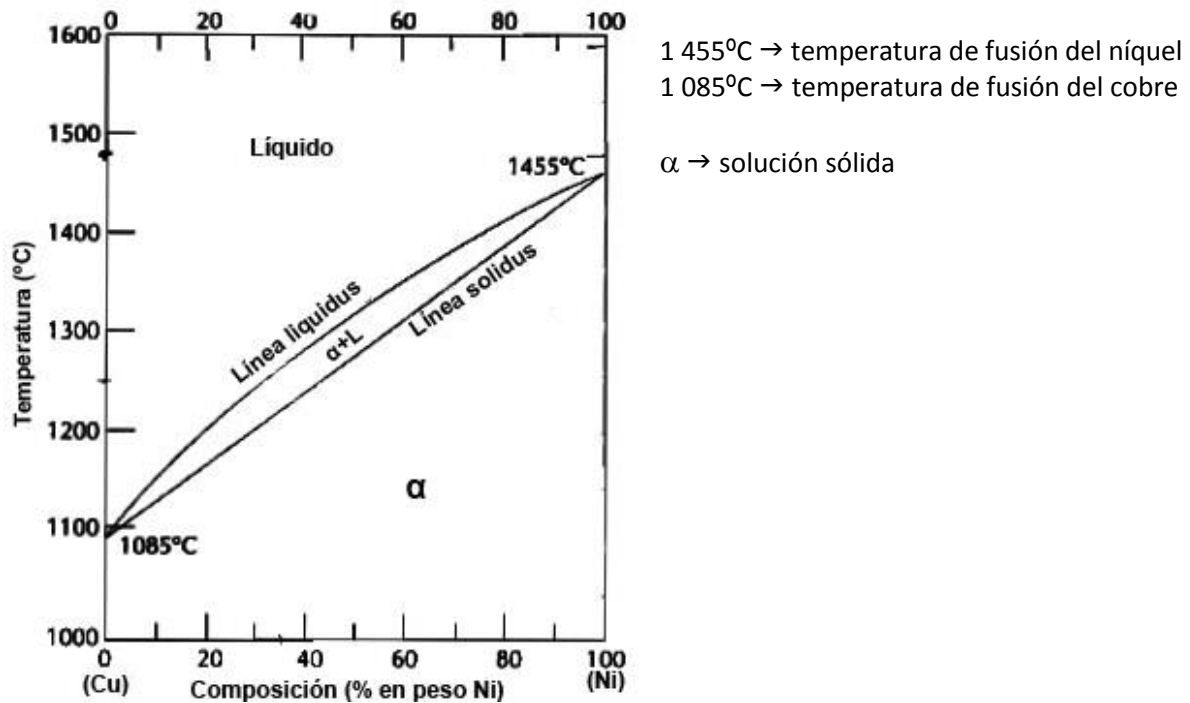
Se obtienen tres tipos de datos:

1. Fases presentes bajo condiciones de equilibrio a diversas temperaturas y composiciones
2. Composiciones químicas para todas las fases que se encuentran en equilibrio
3. Cantidades relativas de las fases en una zona bifásica por medio de la regla de la palanca

Condiciones de equilibrio implica calentamiento y enfriamiento extremadamente lentos, de manera que, para cada variación diferencial de la temperatura se invierte el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio permitiendo con ello la homogenización los sólidos formados mediante la difusión en fase sólida.

## Diagramas de equilibrio o de fases

### Tipo I. Dos metales son solubles en estado líquido y sólido



Determinación de la composición química y cantidades relativas de cada fase

Regla I. Para obtener la composición química

- En una zona monofásica, la composición es simplemente la de la aleación
- En una zona bifásica, las composiciones estén donde la línea de enlace corta las curvas de límite de solubilidad

Ejemplo, aleación 53 Ni – 47 Cu a 1 300°C

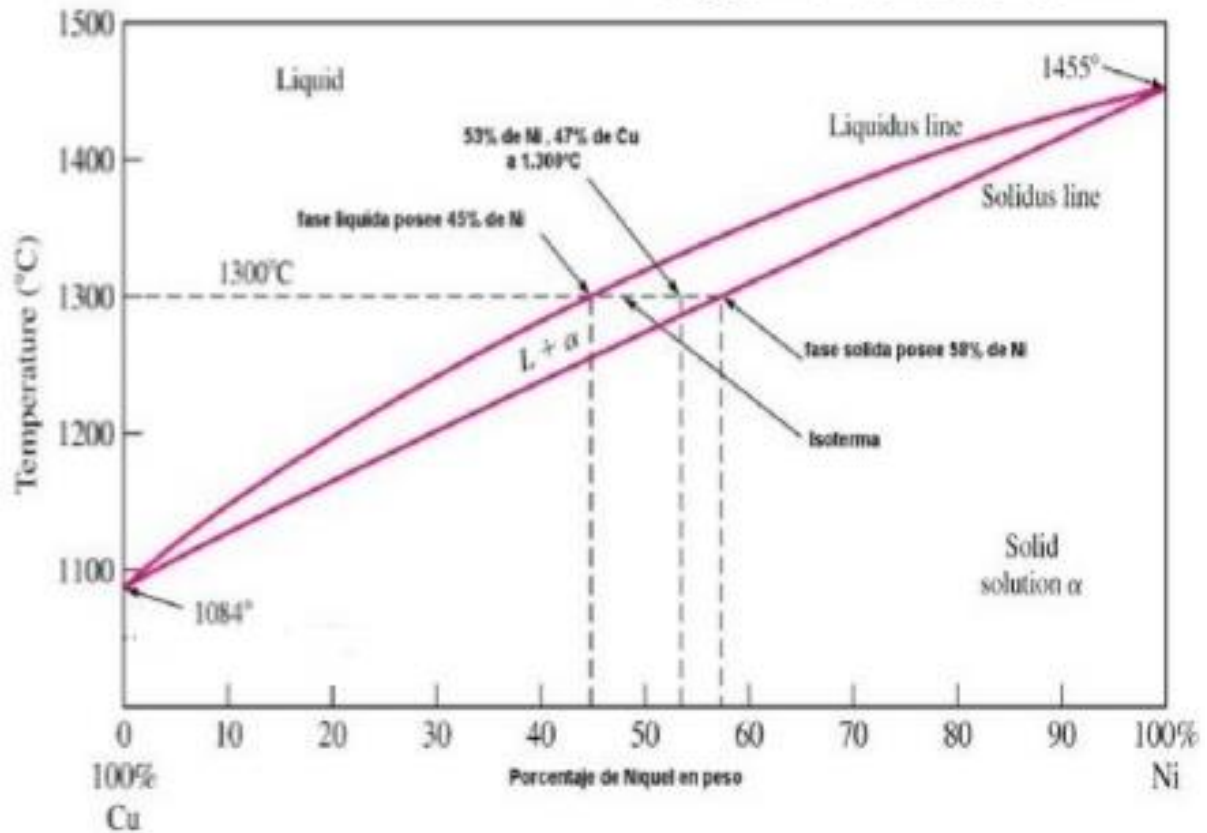
En 1 300°C se traza la línea de enlace

Entonces, composiciones químicas:

Sólido α → 58% Ni, 42% Cu

Líquido → 45% Ni, 55% Cu

### diagrama de fases Cu Ni



Regla II. Para obtener las cantidades relativas

Regla de la palanca. La longitud de cada segmento es inversamente proporcional a la cantidad de fase presente.

Ejemplo, aleación 53 Ni – 47 Cu a 1300°C

Cantidades relativas:

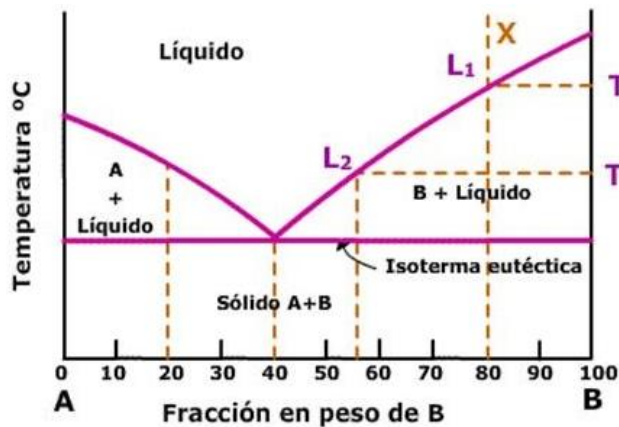
Con el segmento que toca la línea de liquidus, vamos a calcular la fase sólida

$$\alpha = \frac{53 - 45}{58 - 45} \times 100 = \frac{8}{13} \times 100 = 61.5\%$$

Con el segmento que toca la línea de solidus, vamos a calcular la fase líquida

$$L = \frac{58 - 53}{58 - 45} \times 100 = \frac{5}{13} \times 100 = 38.5\%$$

## Tipo II. Dos metales son solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido



Zonas:

Solución líquida homogénea monofásica

Bifásica, líquido + sólido A

Bifásica, líquido + sólido B

Bifásica, sólido A + sólido B

Puntos:

Puntos de fusión de los metales puros A y B

Eutéctico. Unión de las líneas de liquidus a una temperatura mínima

Líneas:

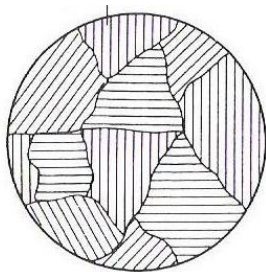
Líneas de liquidus

Línea isoterma eutéctica. A esta temperatura se da la solidificación completa

Enfriamiento de la aleación 1 de composición eutéctica 60 A – 40 B

- Arriba de la línea isoterma eutéctica se tiene una zona monofásica líquida
- A temperatura eutéctica, el líquido solidifica alternativamente en A y B puros, resultando una mezcla muy fina, llamada mezcla eutéctica, este cambio se conoce como reacción eutéctica.

Líquido  $\rightarrow$  sólido A + sólido B



Microestructura de la mezcla eutéctica (A + B)

Enfriamiento de la aleación 2, una aleación hipereutéctica 20A – 80B

- Arriba de la línea de liquidus se tiene una zona monofásica líquida
- $T_1$ : aparición de los primeros cristales del metal puro B. se tienen dos fases, sólida y líquida
- $T_2$ : dos fases, sólida y líquida

Regla I: Composición química

B = 100%

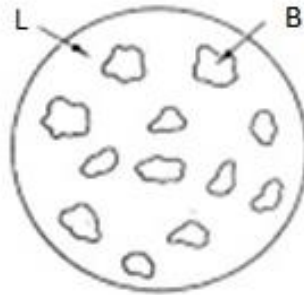
Líquido = 44%A – 56%B



Regla II: Cantidades relativas

$$B = \frac{xL_2}{L_2T_2} \times 100 = \frac{24}{44} \times 100 = 54.55\%$$

$$L = \frac{xT_2}{L_2T_2} \times 100 = \frac{20}{44} \times 100 = 45.45\%$$



A una temperatura apenas superior a la eutéctica:

Regla I: Composición química

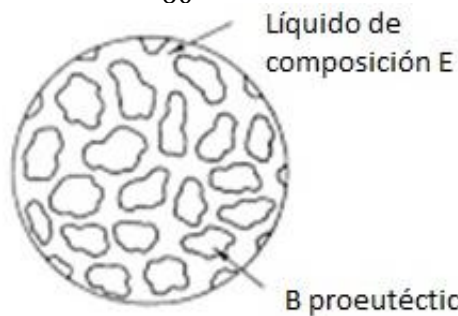
B = 100%

Líquido = 60% A – 40% B

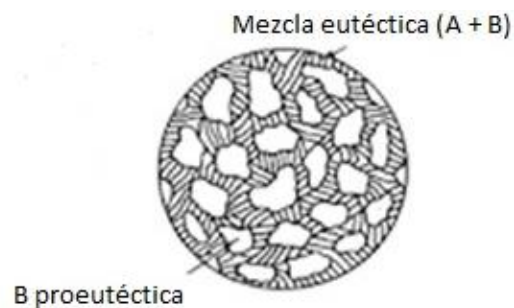
Regla II: Cantidades relativas

$$B = \frac{40}{60} \times 100 = 66.67\%$$

$$\text{Líquido} = \frac{20}{60} \times 100 = 33.33\%$$

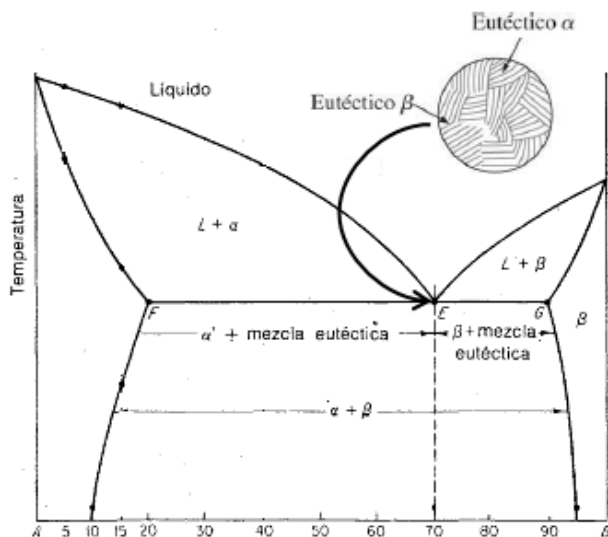


En la línea isoterma eutéctica termina la solidificación. Debajo de esta línea se tienen dos fases: B + mezcla eutéctica (A + B)



La aleación 3 hipoeutéctica de composición 80A – 20B, tiene el mismo proceso de enfriamiento que la aleación 2, excepto que después de la solidificación, la aleación constará de A proeutéctica y de mezcla eutéctica (A + B).

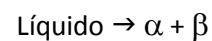
### Tipo III. Dos metales son solubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido



Aleación 30A – 70B (composición eutéctica)

Arriba de la temperatura eutéctica se tiene una solución líquida

A temperatura eutéctica se da la reacción eutéctica



R II. Cantidades relativas

$$\alpha = \frac{EG}{FG} \times 100 = \frac{20}{70} \times 100 = 28.6\%$$

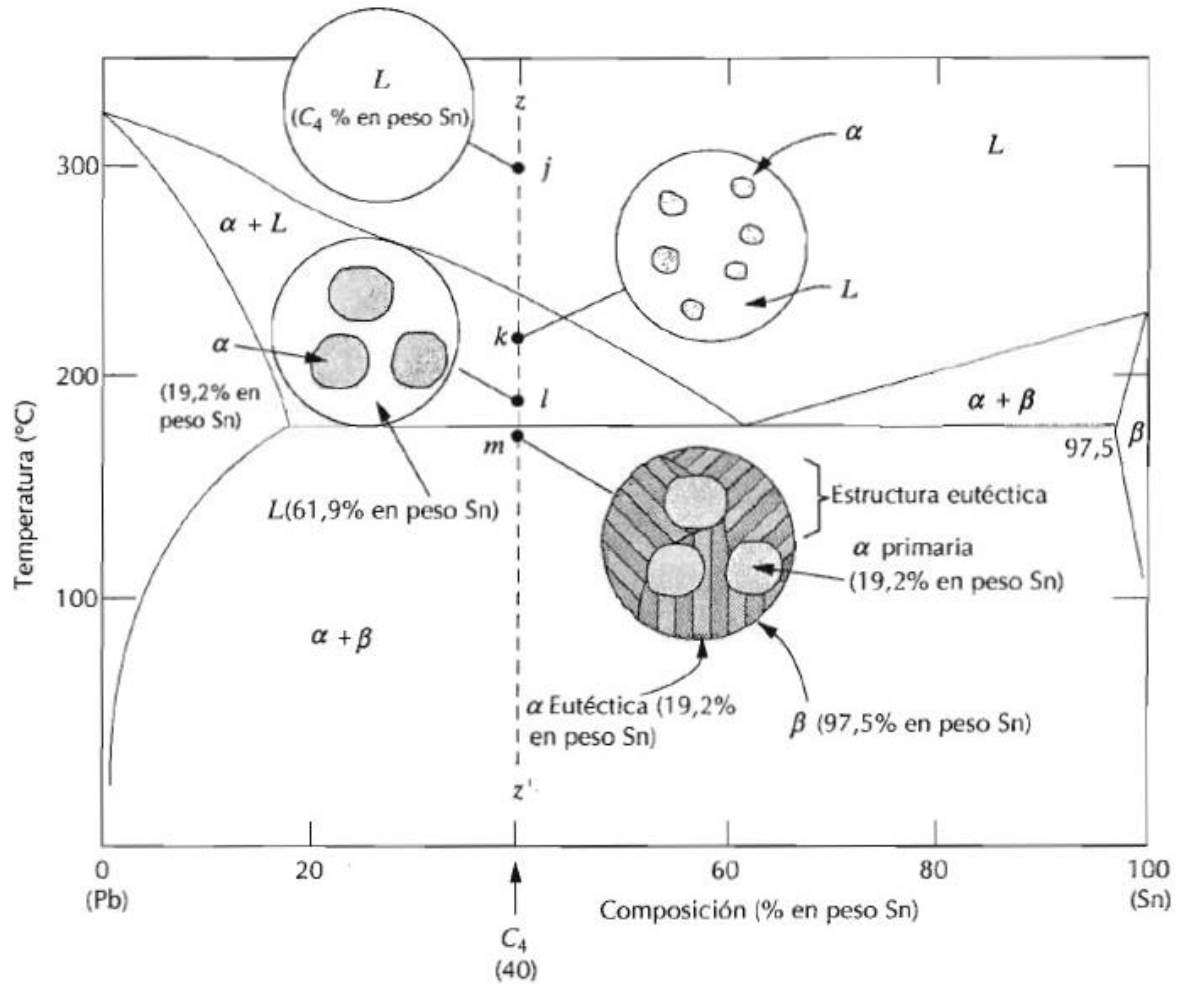
$$\beta = \frac{FE}{FG} \times 100 = \frac{50}{70} \times 100 = 71.4\%$$

R II a temperatura ambiente

$$\alpha = \frac{25}{85} \times 100 = 29.4\%$$

$$\beta = \frac{60}{85} \times 100 = 70.6\%$$

$\alpha + \beta =$  mezcla eutéctica



Aleación 40 Sn – 60 Pb

En *f*: solución líquida de composición 40% Sn – 60% Pb

En *k*: zona bifásica α + L

En *l*: α (19,2% Sn – 80,8% Pb) y L (61,9 Sn – 38,1% Pb)

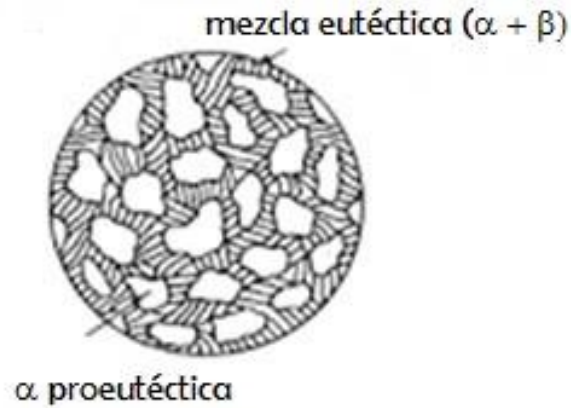
R II: regla de la palanca

$$\alpha = \frac{61,9 - 40}{61,9 - 19,2} \times 100 = 51,3\%$$

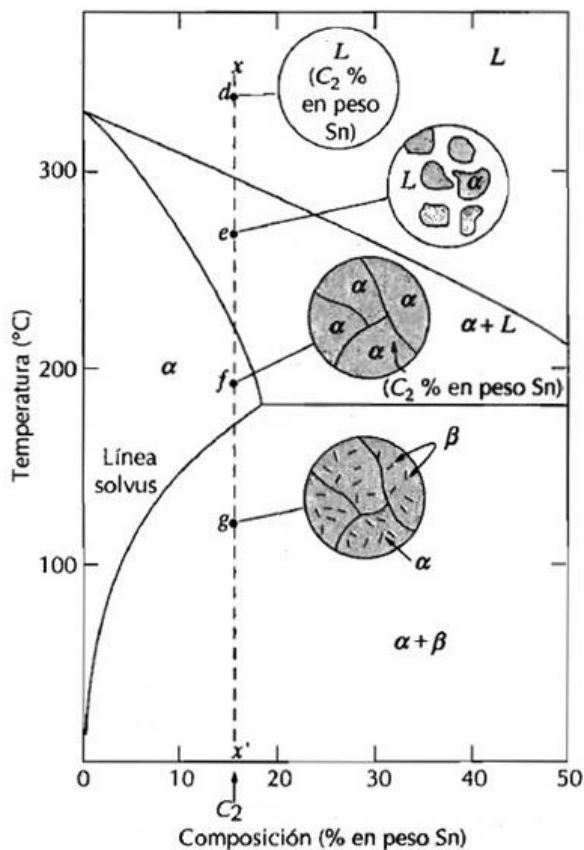
$$L = \frac{40 - 19,2}{61,9 - 19,2} \times 100 = 48,7\%$$

En *m*: terminó la solidificación

Se tienen granos de la mezcla eutéctica α + β (40%) y granos de la solución sólida α (60%) primaria o proeutéctica



Aleación 16 Sn – 84 Pb



En  $d$ : solución líquida

En  $e$ :  $\alpha + L$

En  $f$ : zona monofásica  $\alpha$

En  $g$ : solución sobresaturada de Sn. Como Pb es soluble en Sn, el precipitado sale como una solución sólida  $\beta$ . Entonces, a temperatura ambiente, la aleación consistirá en  $\alpha$  con una pequeña cantidad en exceso de  $\beta$ , principalmente en las fronteras de grano.

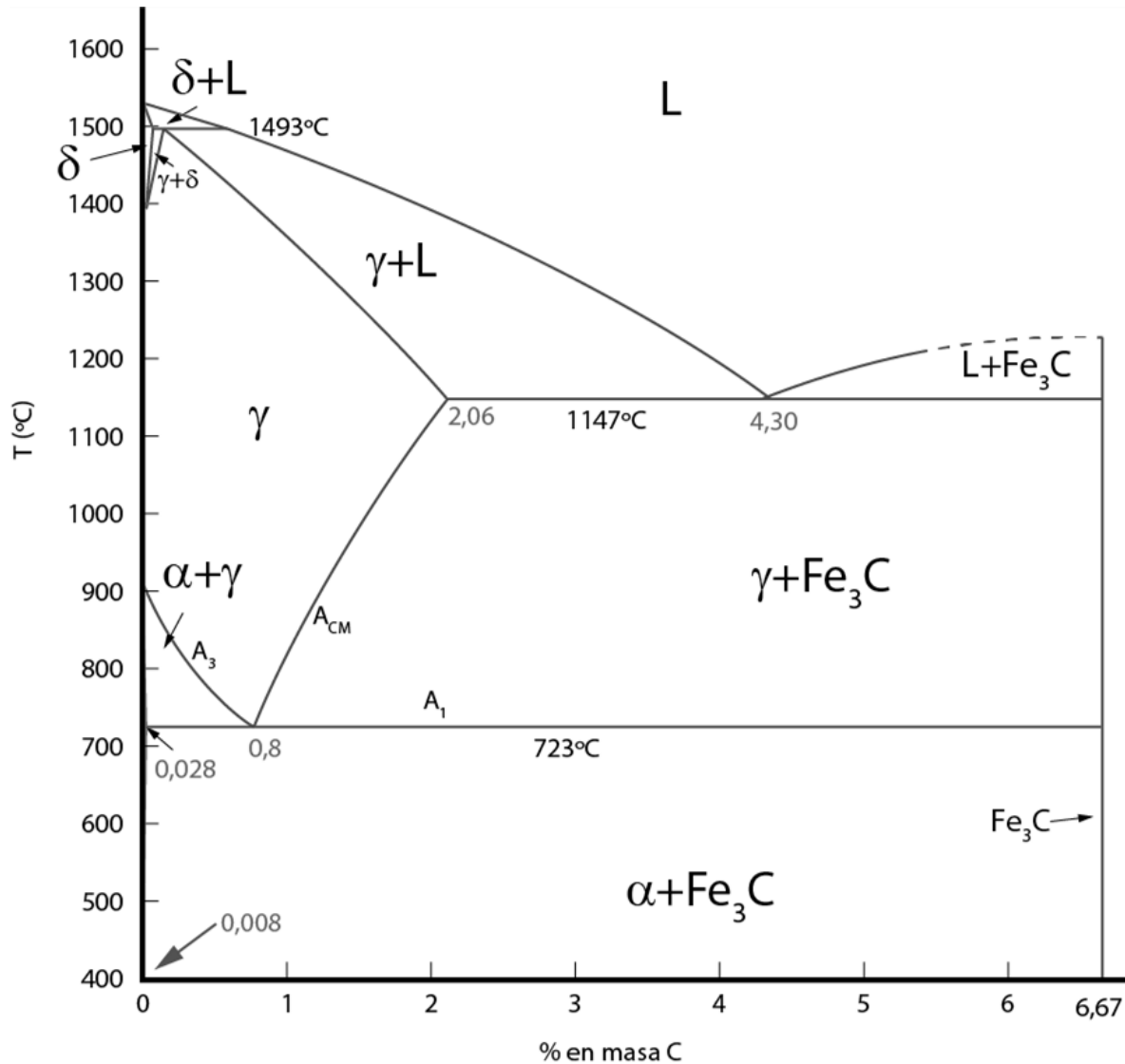
A temperatura ambiente:

$$\alpha = \frac{84}{100} \times 100 = 84\%$$

$$\beta = \frac{16}{100} \times 100 = 16\%$$

## El diagrama Fe - Fe<sub>3</sub>C y sus fases

Ampliamente utilizado en la aplicación de las aleaciones hierro carbono. El diagrama se usa comúnmente con una escala del carbono que sólo va hasta el 6.67%.



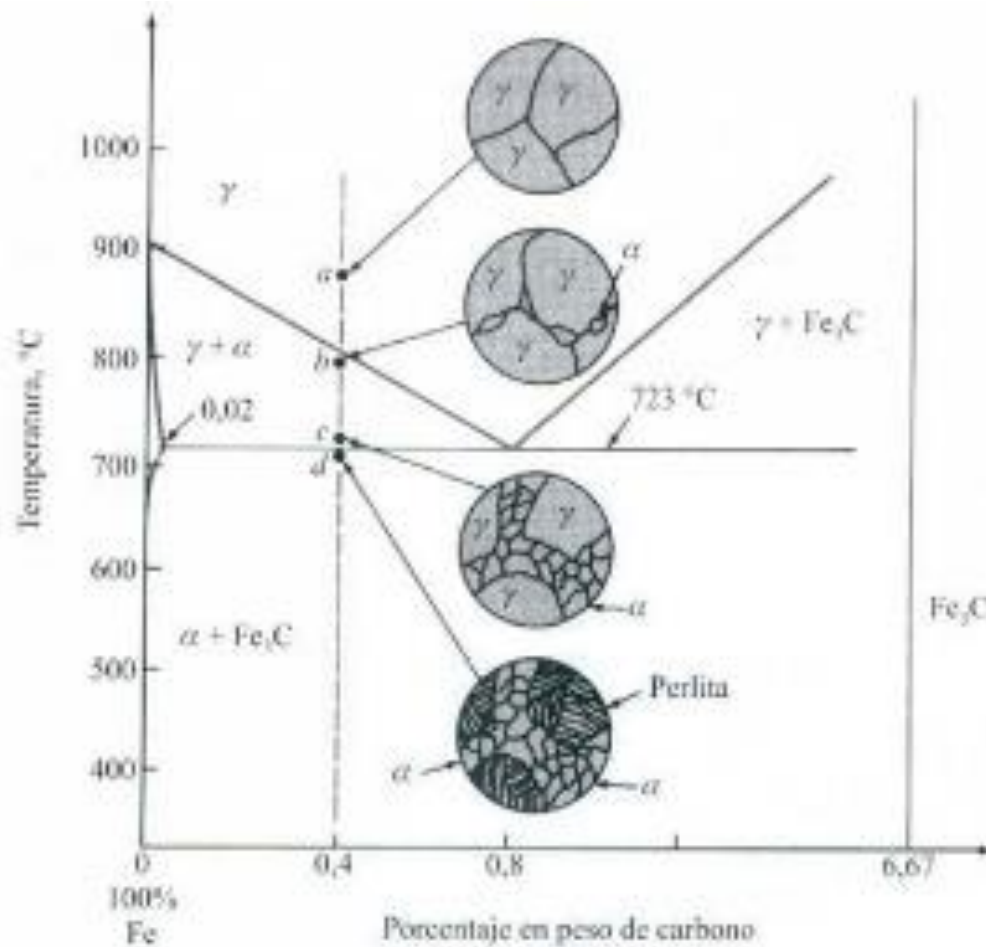
Las aleaciones con un contenido de carbono hasta 2.06 % se llaman aceros. Arriba de este contenido la aleación se llama fundición o hierro colado.

Los aceros al carbono se dividen en:

Aceros hipoeutectoides: 0.028 a 0.79%C

Aceros hipereutectoides: 0.81 a 2%C

### Aceros hipoeutectoides



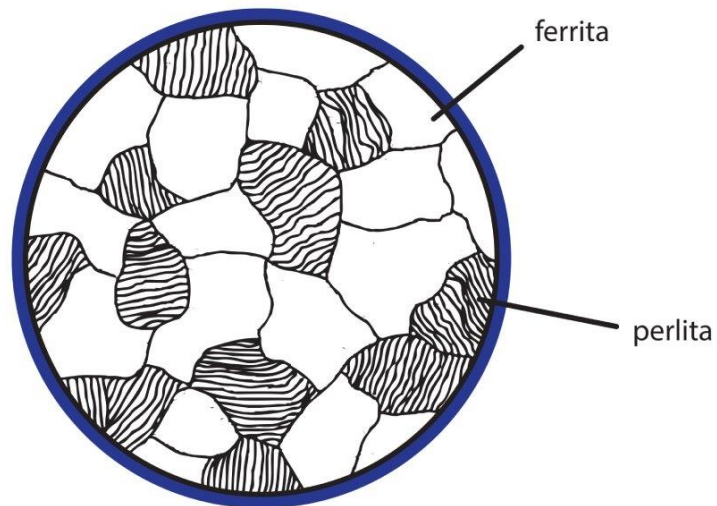
Enfriamiento de un acero hipoeutectoide en condiciones de equilibrio

- 100% de  $\gamma$
- Empezan a formarse los granos de  $\alpha$
- Mayor cantidad de  $\alpha$
- Terminó la transformación. Se tiene  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

En este diagrama las fases reciben los siguientes nombres:

- $\alpha$  = ferrita
- $\gamma$  = austenita
- $\delta$  = ferrita delta
- $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$  = perlita

Entonces, los constituyentes de un acero hipoeutectoide son: FERRITA + PERLITA

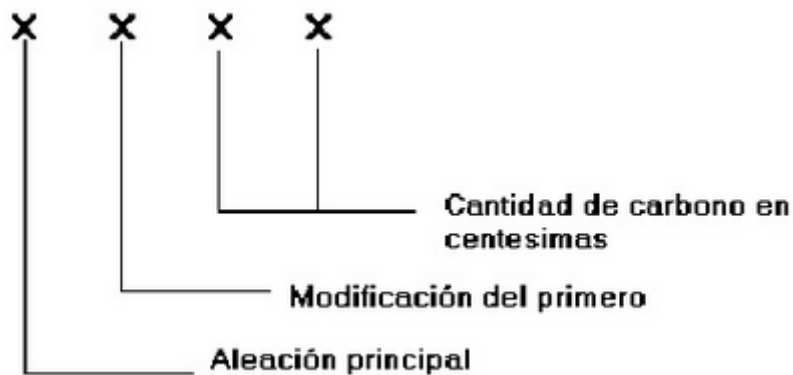


#### Identificación de aceros bajo la norma SAE AISI

Algunas instituciones han desarrollado especificaciones en función de las propiedades y composición química de los aceros. En seguida se muestra la designación SAE AISI.

SAE: Society of Automotive Engineers

AISI: American Iron and Steel Institute



10XX – Aceros al carbono  
11XX – Aceros al carbono - resulturizados  
12XX – Aceros al carbono - resulturizados y refosforados  
13XX – Manganeso 1.75  
23XX – Níquel 3.5  
25XX – Níquel 5.0  
31XX – Níquel 1.25 y cromo 0.6  
33XX – Níquel 3.5 y cromo 1.5  
40XX – Molibdeno 0.2 eo 0.25  
41XX – Cromo 0.5, 0.8, 0.95 y molibdeno 0.12, 0.20, 0.30  
43XX – Níquel 1.83, cromo 0.50, 0.80 y molibdeno 0.25  
44XX – Molibdeno 0.53  
46XX – Níquel 0.85, 1.83 y molibdeno 0.20, 0.25  
47XX – Níquel 1.05, cromo 0.45, molibdeno 0.20, 0.35  
48XX – Níquel 3.5 y molibdeno 0.25  
50XX – Cromo 0.4  
51XX – Cromo 0.8, 0.88, 0.93, 0.95, 1.0  
61XX – Cromo 0.6, 0.95 y vanadio 0.13, 0.15  
86XX – Níquel 0.55, cromo 0.5, molibdeno 0.20  
87XX – Níquel 0.55, cromo 0.5, molibdeno 0.25  
88XX – Níquel 0.55, cromo 0.5, molibdeno 0.35  
92XX – Silicio 2.0  
93XX – Níquel 3.25, cromo 1.2, molibdeno 0.12  
98XX – Níquel 1.0, cromo 0.8, molibdeno 0.25

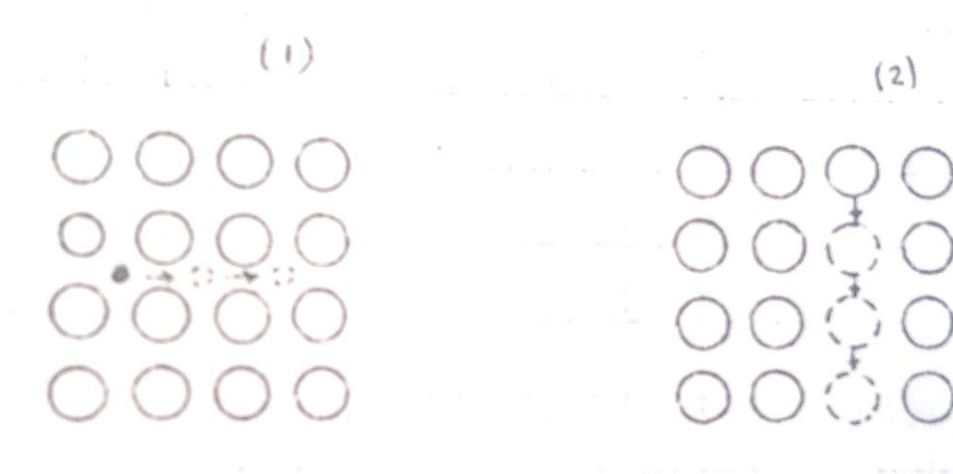


## 6 DIFUSIÓN EN METALES

La difusión es la migración de átomos y depende del tiempo y de la temperatura. Ocurre generalmente de una concentración mayor a una menor.

### *Difusión en sólidos*

1. Difusión intersticial
2. Difusión por vacancia o sustitucional



Relaciones que rigen la difusión

### **Primera ley de Fick**

Describe la difusión de un elemento bajo condiciones de estado estable, esto es, sin cambio en la composición o la temperatura.

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

Donde

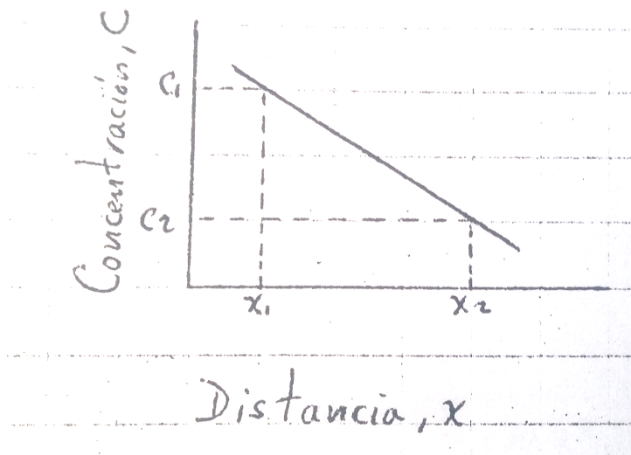
$J$  = flujo de la corriente de difusión, es la cantidad de material (número de átomos) que se difunde por unidad de tiempo y de área

$D$  = coeficiente de difusión

$C$  = concentración de los átomos

$x$  = distancia en la dirección en la que ocurre la difusión

El signo negativo significa que la corriente de difusión  $J$  fluye en dirección opuesta a la del gradiente de concentración.



$$J = -D \frac{C_2 - C_1}{\Delta x}$$

$C_1$  y  $C_2 \rightarrow$  concentraciones en los extremos de la longitud de difusión

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$J = \frac{m}{At}$$

Donde

$m$  = masa o número de átomos que se difunden

$A$  = área de la difusión

$t$  = tiempo de difusión

### Segunda ley de Fick

Es la relación que gobierna la difusión de un estado inestable, en el cual la temperatura o la composición varía a medida que transcurre el tiempo.

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{fer} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = y$$

Donde

$C_s$  = concentración superficial

$C_x$  = concentración a una distancia  $x$  por debajo de la superficie

$C_o$  = concentración original

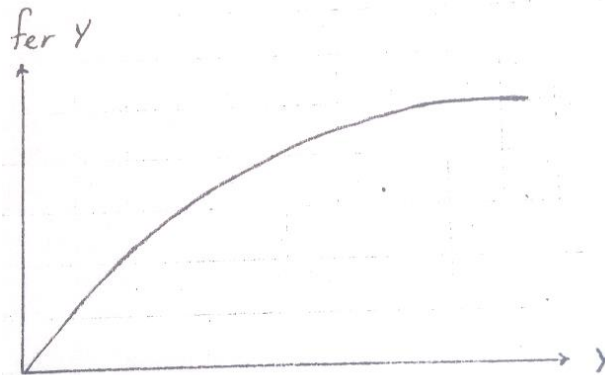
$\text{fer}$  = factor de error

$x$  = distancia por debajo de la superficie

$D$  = constante de difusión

$t$  = tiempo

$y$	$f_{er} y$
0.0	0.0
0.1	0.113
0.2	0.223
0.4	0.428
0.5	0.521
0.6	0.604
0.8	0.742
1.0	0.843
1.25	0.923
1.50	0.966
2.0	0.995
$\infty$	1.000



### Efecto de la temperatura en la difusión

La constante de difusión  $D$  varía con la temperatura, debido al aumento del movimiento atómico y al crecimiento de vacantes. Esto se resume en la siguiente ecuación:

$$D = Ae^{-\frac{Q}{RT}}$$

Donde

A = constante ( $\text{cm}^2/\text{seg}$ )

Q = energía de activación necesaria para que se produzca la difusión ( $\text{cal/mol}$ )

R = constante de los gases ( $1.987 \text{ cal/mol-K}$ ,  $8.314 \text{ J/mol-K}$ )

T = temperatura absoluta (K)

## BIBLIOGRAFÍA

Ciencia e Ingeniería de Materiales  
DONALD R. ASKELAND  
Ed. Cengage Learning, 7ª edición

Ciencia de Materiales. Aplicaciones en Ingeniería  
JAMES NEWELL  
Ed. Alfaomega, 1ª edición

Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales  
WILLIAM F. SMITH  
Ed. Mc Graw Hill, 5ª Edición

Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros  
JAMES F. SHACKELFORD  
Ed. Pearson, 7ª edición

Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales  
WILLIAM D. CALLISTER  
LIMUSA

**UNAM/FESC**