

**CIENCIA DE LOS MATERIALES  
MT – 1113**

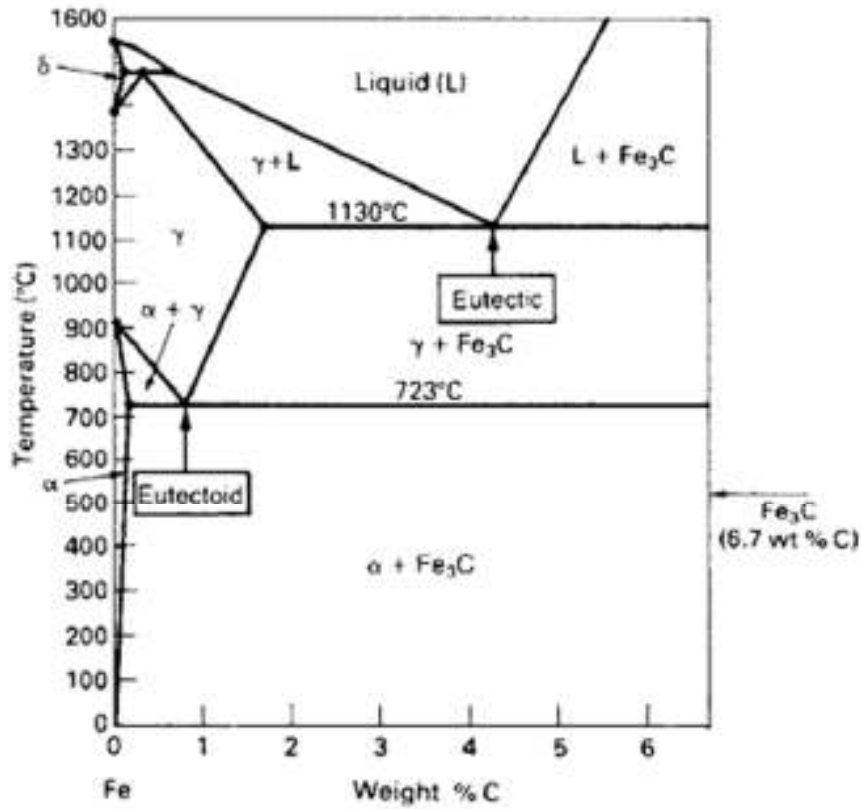
**TEMA 4  
ALEACIONES METÁLICAS**

**Prof. Yliana Barón  
ylianabaron@usb.ve**

**Departamento de Ciencia de los Materiales  
MEM 2do piso**

# ACEROS AL CARBONO

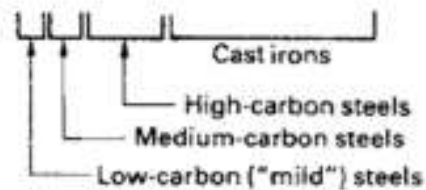
## Diagrama Fe-C



Microestructuras obtenidas durante enfriamiento lento



RECOCIDO



# ACEROS AL CARBONO

## Diagrama Fe-C

Fase	Estructura atómica	Descripción
Líquido		Solución líquida de C en Fe
$\delta$	bcc	Solución sólida intersticial de C en hierro bcc. Solubilidad máxima 0,08%wt C a 1492°C. El Fe- $\delta$ es la fase polimórfica estable entre 1391-1536°C
$\gamma$ (austenita)	fcc	Solución sólida intersticial de C en Fe fcc. Solubilidad máxima 1,7%wt C a 1130°C. Fe- $\gamma$ es la fase polimórfica estable entre 914-1391°C
$\alpha$ (ferrita)	bcc	Solución sólida de C en Fe bcc. Solubilidad máxima 0,035%wt C a 723°C. El Fe- $\alpha$ es la fase polimórfica estable a temperaturas menores a 723°C
Fe <sub>3</sub> C (carburo de hierro o cementita)	compleja	Compuesto intermedio duro y frágil que contiene 6,7%wt C

# ACEROS AL CARBONO

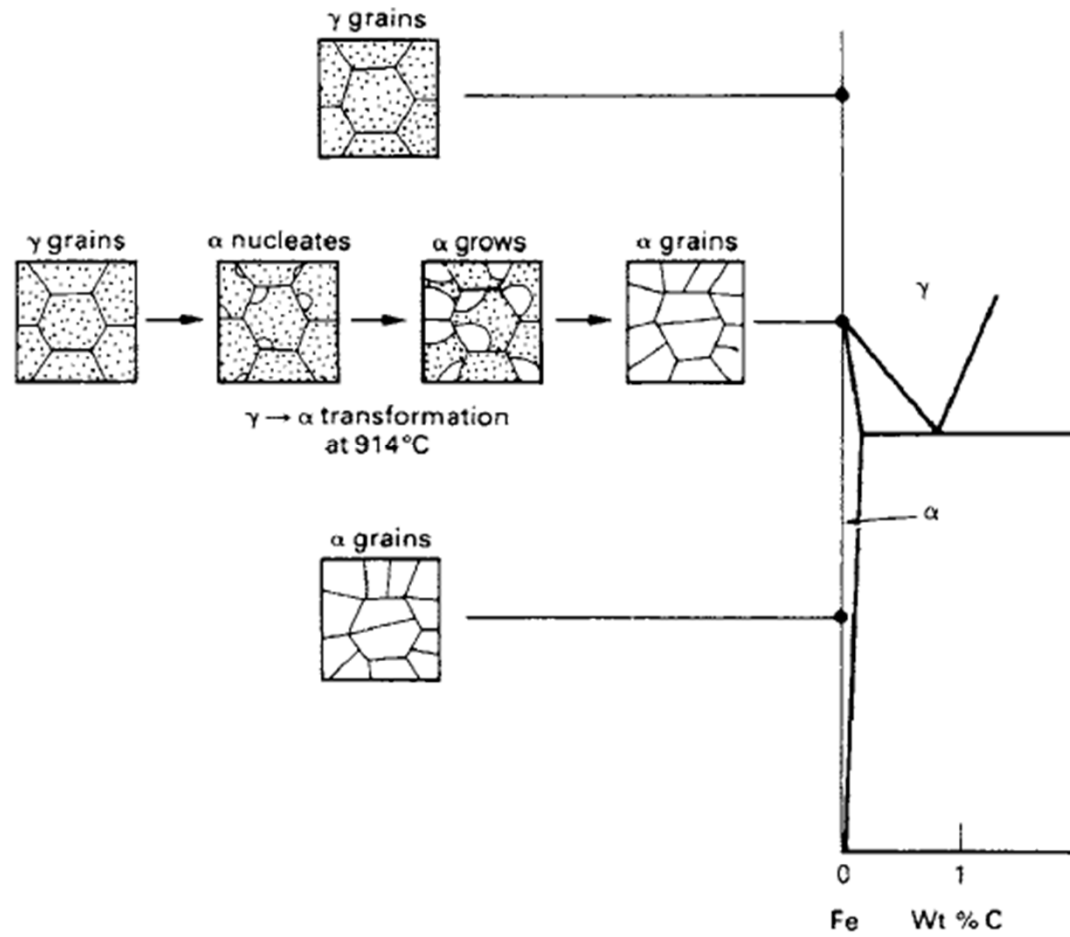
Nombre de la estructura	Descripción
Perlita	Estructura del eutectoide que contiene láminas alternadas de $\alpha$ y $\text{Fe}_3\text{C}$ producida cuando $\gamma$ con 0,80%wt C es enfriada a temperaturas menores a 723°C. Los bordes de grano de $\gamma$ son sitios de nucleación de la perlita. Su formación ocurre en aceros de bajo, medio o alto C. No es una fase, es una mezcla de dos fases: 88,5%wt $\alpha$ mas 11,5%wt $\text{Fe}_3\text{C}$ . No tiene granos, está formada por nódulos o colonias
Ledeburita	Estructura del eutéctico que consiste en láminas alternadas de $\gamma$ y $\text{Fe}_3\text{C}$ producidas cuando el líquido con 4,3%wt C es enfriado a temperaturas menores a 1130°C. La ledeburita no es una fase, es una mezcla que ocurre en las fundiciones; aunque luego se transforma a $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ a 723°C



# ACEROS AL CARBONO

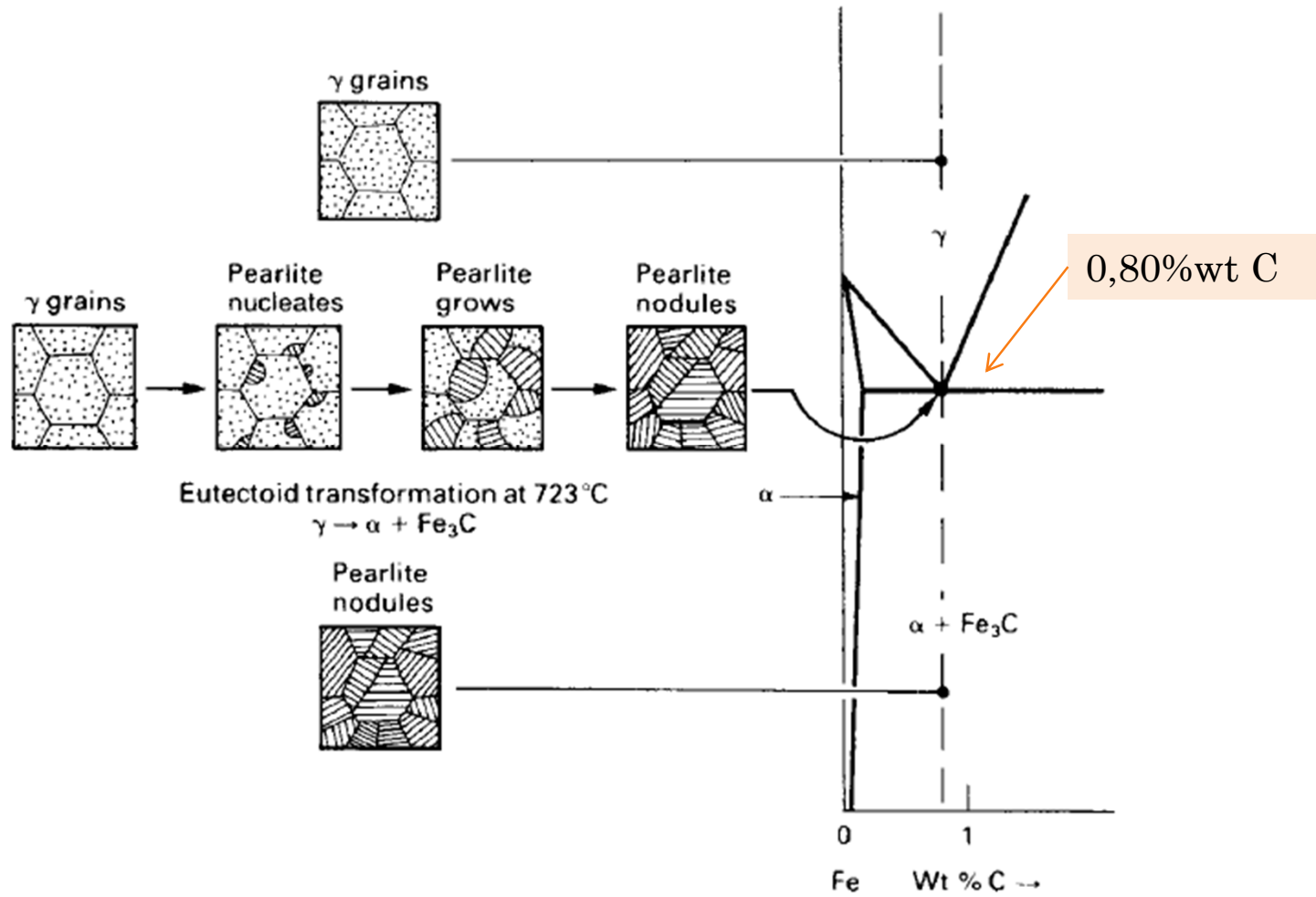
## Acero Recocido

Fe puro



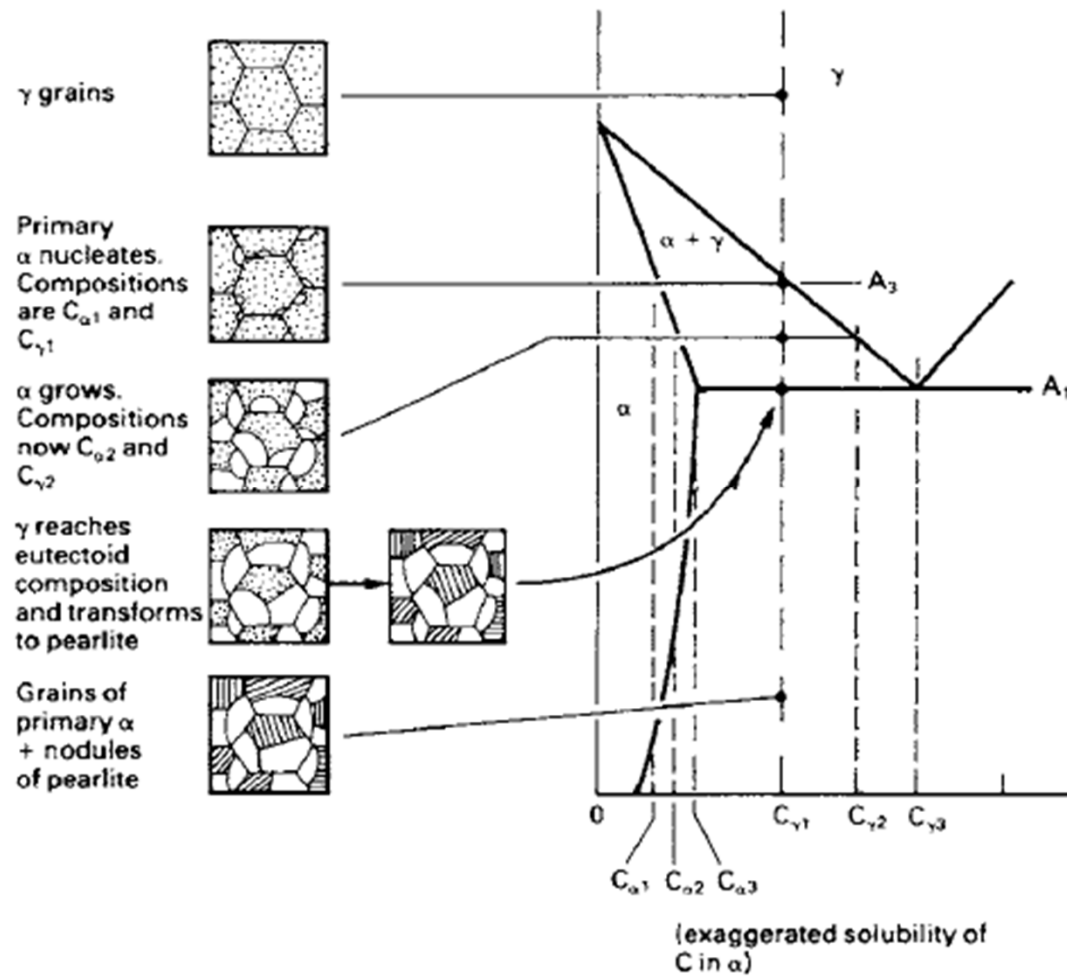
# ACEROS AL CARBONO

## Acero Recocido



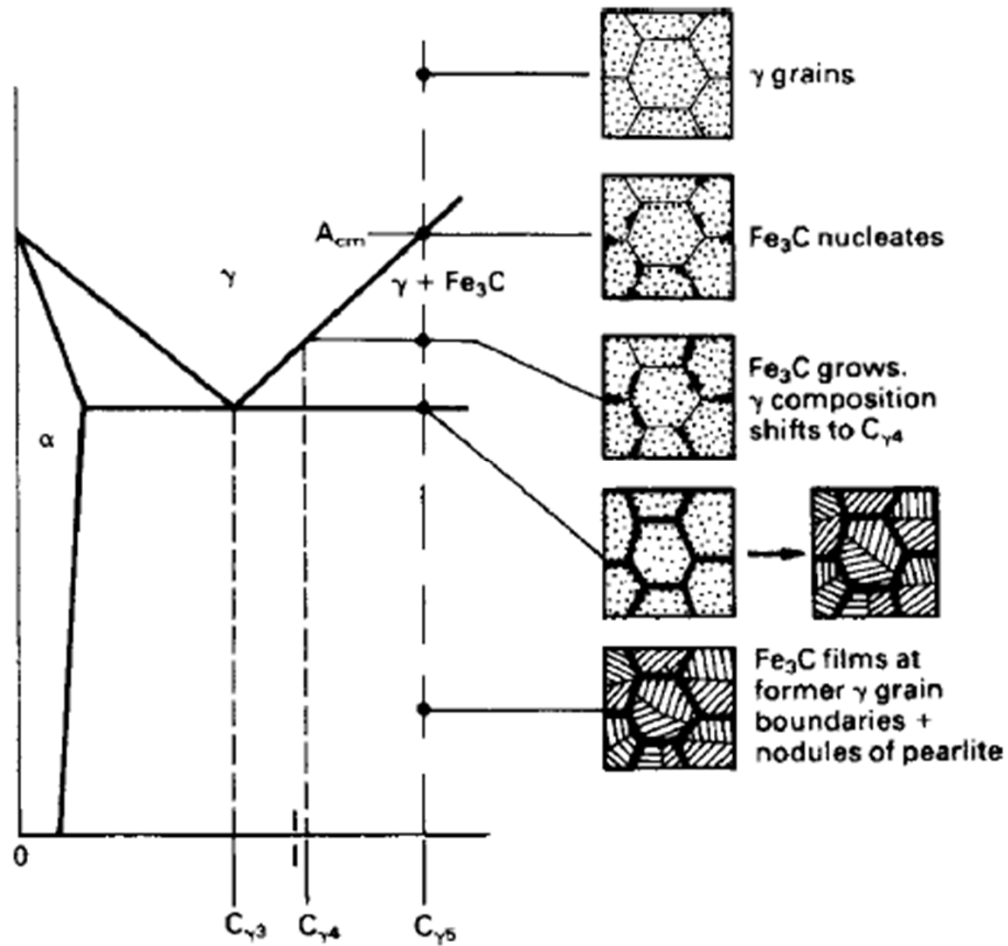
# ACEROS AL CARBONO

## Acero Recocido

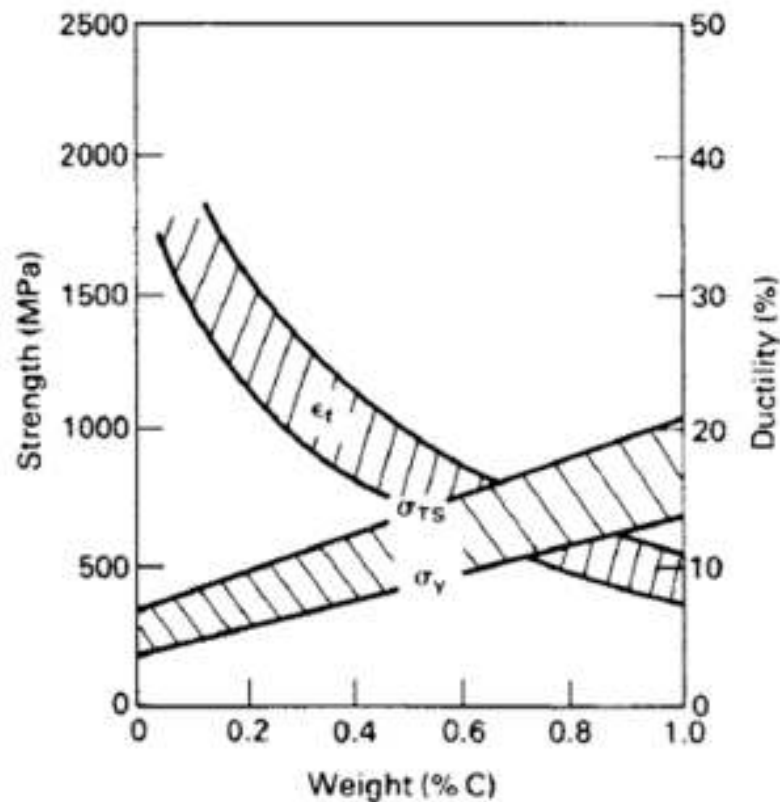


# ACEROS AL CARBONO

## Acero Recocido



## Acero Recocido



Tanto el esfuerzo de fluencia como el esfuerzo máximo aumentan linealmente con el incremento del contenido de C:

1. El  $\text{Fe}_3\text{C}$  actúa como un refuerzo, incrementando la resistencia del material
2. La proporción de  $\text{Fe}_3\text{C}$  es lineal con la concentración de C del acero

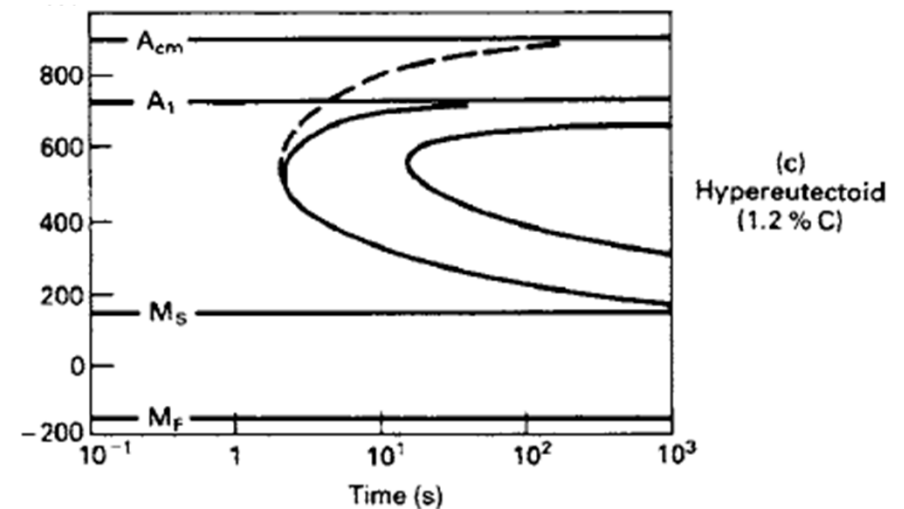
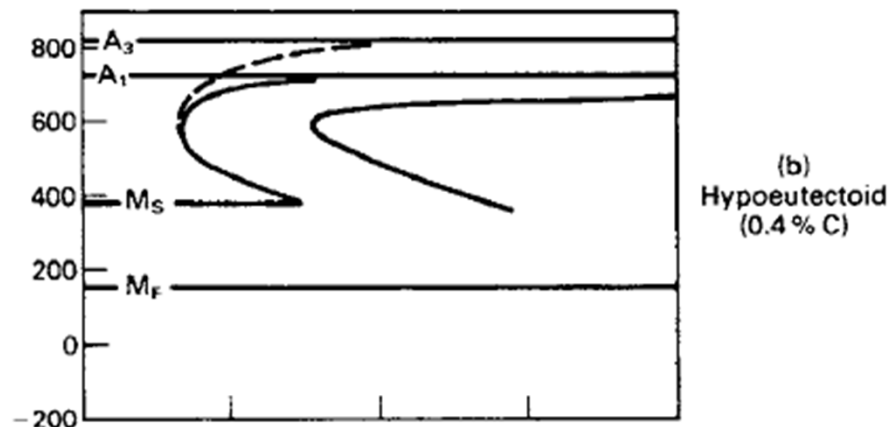
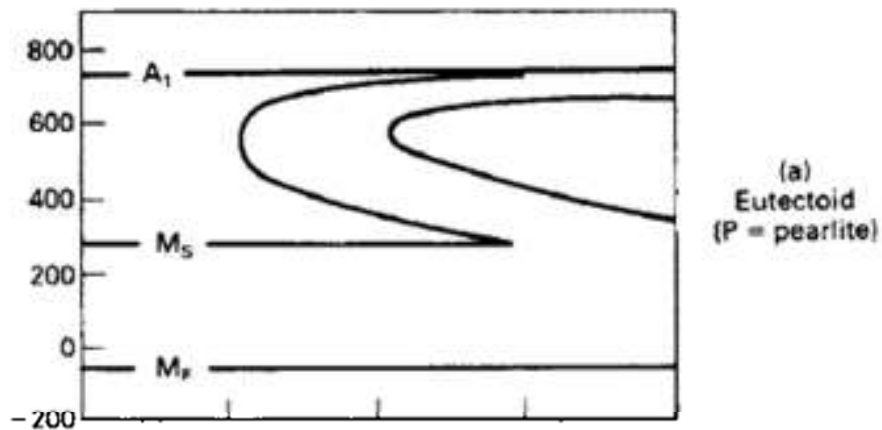
La ductilidad disminuye debido a que la interfase  $\alpha/\text{Fe}_3\text{C}$  de la perlita es un sitio «atractivo» para la nucleación de grietas

# ACEROS AL CARBONO

## Aceros templados y revenidos

Si se enfría la austenita desde 500°C a 200°C/s se evitará la nariz del diagrama TTT. Si se continua el enfriamiento hasta temperaturas inferiores a 280°C,  $\gamma$  inestable se comenzará a transformar a martensita (a 50°C se obtendrá 100% de martensita).

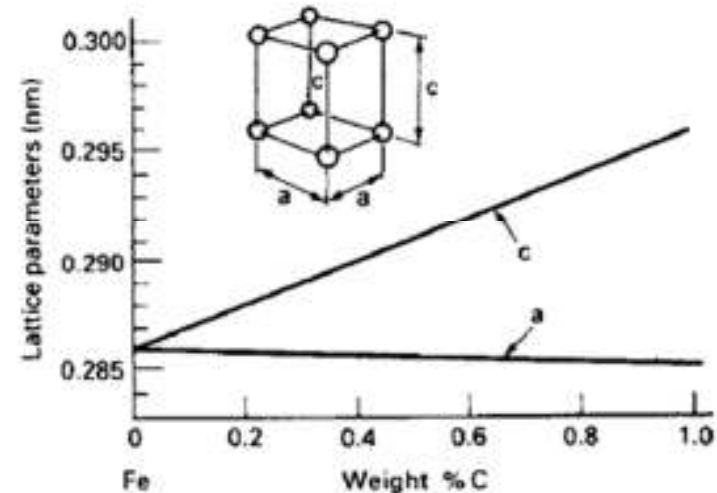
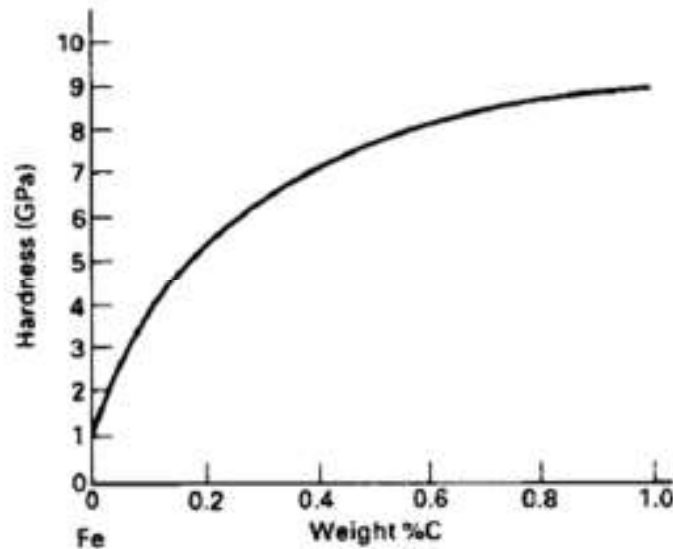
Los aceros hipoeutectoides e hipereutectoides pueden ser templados utilizando el mismo procedimiento, a pesar de que las curvas TTT difieren entre si.





# ACEROS AL CARBONO

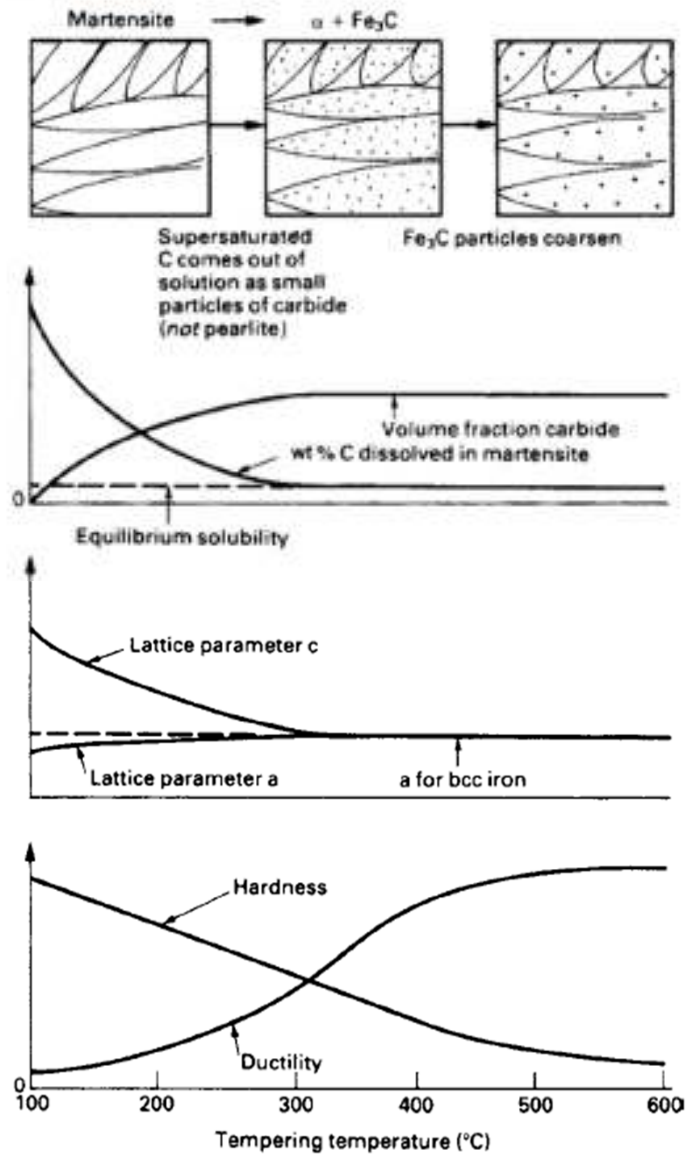
## Aceros templados y revenidos



- ✓ La dureza de la martensita aumenta rápidamente con el contenido de carbono: La martensita es una solución sólida sobresaturada de C en Fe. El hierro puro a temperatura ambiente es bcc, pero el exceso de C distorsiona la red, haciéndola tetragonal. Esta distorsión es lo que le confiere la dureza a la martensita su dureza.
- ✓ Aunque un acero martensítico con 0,80%wt C es muy duro, es también muy frágil. Es posible templar una barra de acero de 3mm de diámetro en agua y luego partirla a la mitad como si se tratase de una zanahoria



## Aceros templados y revenidos



- ✓ Si al acero martensítico se le realiza un revenido ( $300\text{-}600^{\circ}\text{C}$ ) se puede recuperar la tenacidad del acero con poca disminución de su dureza
- ✓ El revenido permite que los átomos de carbono difundan fuera de la solución sobresaturada y reaccionen con el hierro para formar pequeños precipitados de  $\text{Fe}_3\text{C}$ . La red se relaja y vuelve a su estado bcc de equilibrio. La ductilidad aumenta. Las partículas de  $\text{Fe}_3\text{C}$  mantienen la dureza del material
- ✓ Si el acero es sobre-revenido, entonces las partículas crecen y la dureza decae

# FUNDICIONES

Cuando las aleaciones ferrosas contienen mas de 1,7%wt C dejan de ser considerados aceros, y son llamados fundiciones. El carbono disminuye el punto de fusión del acero, y permite obtener piezas (de alto contenido de C) mediante el fundido de la aleación (en hornos primitivos o sencillos) y el vaciado de ese líquido en moldes de arena (de geometrías sencillas o complejas).

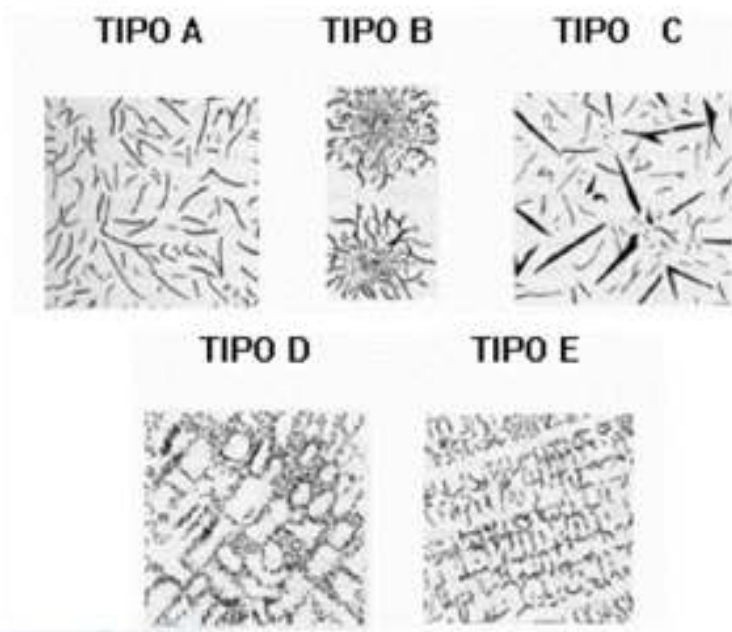
Debido al alto contenido de carbono, las fundiciones son frágiles, por lo que no deben ser utilizadas cuando van a estar sometidas a altos esfuerzos o a impactos

Fundiciones

- ✓ **Grises:** carbono separado en forma de grafito o carbono elemental. Contienen  $\approx 2\%$ wt Si. Superficie de fractura negruzca, debido al grafito. El grafito actúa como un lubricante cuando se utiliza en condiciones abrasivas
- ✓ **Blancas:**  $\alpha$  y  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Superficie de fractura blanca o plata brillante

## Fundición gris

Si cortan una fundición gris con una segueta, sus manos se tornarán negras y la superficie del material lucirá oscura y opaca. Esto es debido a la presencia de grafito o carbono elemental, distribuido en toda la fundición. Las propiedades de la fundición gris dependen de la forma y distribución del grafito:



- ✓ Si está en forma de hojuelas, la tenacidad será baja, debido a que las hojuelas actúan como planos débiles
- ✓ Si está en forma de esferas, la tenacidad es alta y el material es dúctil.

Por lo general el grafito en las fundiciones grises está en forma de hojuelas, pero mediante la adición de cerio o magnesio es posible lograr fundiciones con grafito esferoidal

# ACEROS ALEADOS

Los aceros aleados, aunque constituyen un pequeño sector del mercado, tiene gran importancia debido a sus propiedades especiales:

- ✓ baja aleación
- ✓ alta aleación o inoxidable
- ✓ aceros de herramientas

Los elementos aleantes se le agregan a los aceros en búsqueda de mejorar la templabilidad del acero, favorecer mecanismos de endurecimiento por solución o por precipitación, aumentar la resistencia a la corrosión, estabilizar la austenita (lograr la obtención de austenita fcc a temperatura ambiente)

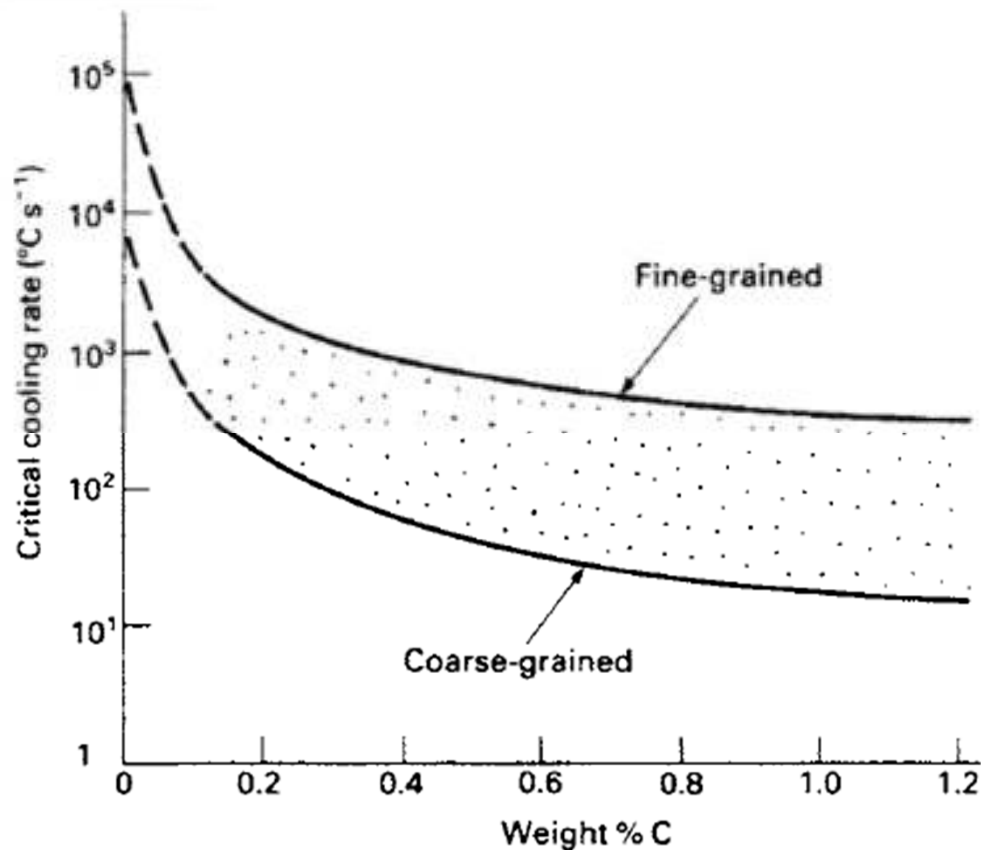
# ACEROS ALEADOS

## Templabilidad

- ✓ Como hemos visto, los aceros se pueden endurecer mediante el uso de tratamientos térmicos, como el temple y revenido. Para obtener las mejores propiedades es necesario templar antes de tocar la nariz de la curva TTT.
- ✓ La velocidad de enfriamiento mínima que evita la nariz de la curva es la velocidad de enfriamiento crítica (CCR, critical cooling rate). Si el acero es enfriado a esa velocidad crítica (o mas rápido) el acero se transformará a 100% martensita.
- ✓ La velocidad crítica depende del contenido de carbono del acero y del tamaño de grano.

## Templabilidad

El temple y revenido, por lo general, se utiliza para tratar aceros que contengan mas de 0.1%C. Estos aceros deben ser enfriados a velocidades 100-2000°C/s si se quiere producir 100% de martensita.



Debido a que los bordes de grano son sitios favorables para la nucleación, un acero de grano fino producirá mas núcleos y se transformará más rápidamente (mayor CCR)

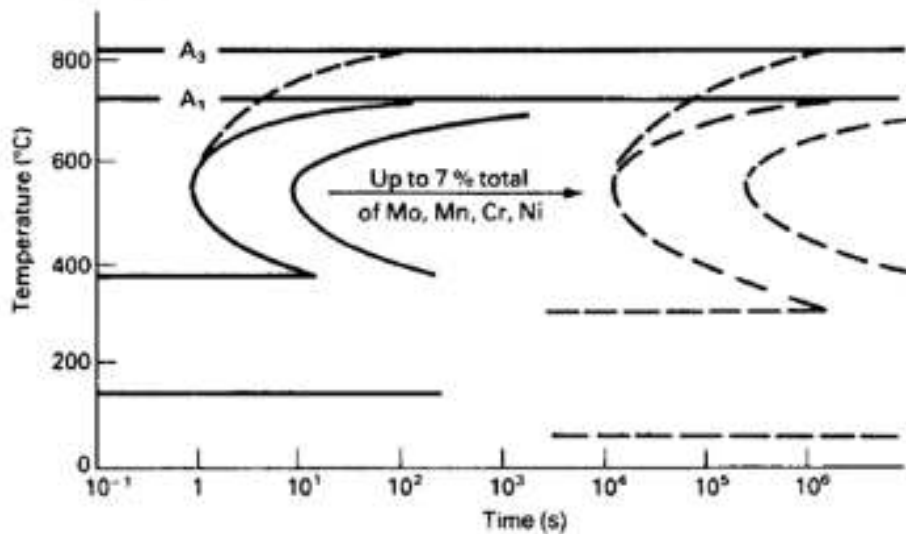


## Templabilidad

Templar la superficie de un material no es difícil: calentando hasta llegar al rojo vivo y enfriando en agua es suficiente para producir martensita en la superficie del acero.

Pero, si el componente a temprar es grande:

1. Las capas superficiales tienden a aislar la parte interna del material del medio de temple (agua, salmuera, aceites, etc)
2. El centro de la pieza se enfría a una temperatura menor a la crítica y no se endurece apropiadamente
3. Un enfriamiento muy rápido puede generar contracción y la generación de grietas en un material frágil (martensita no revenida)



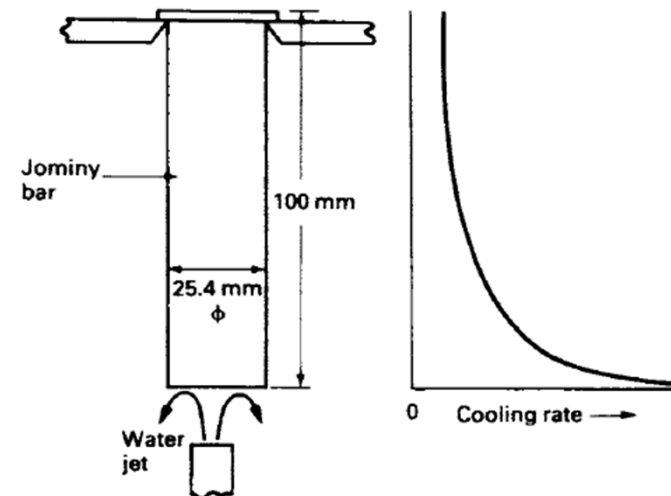
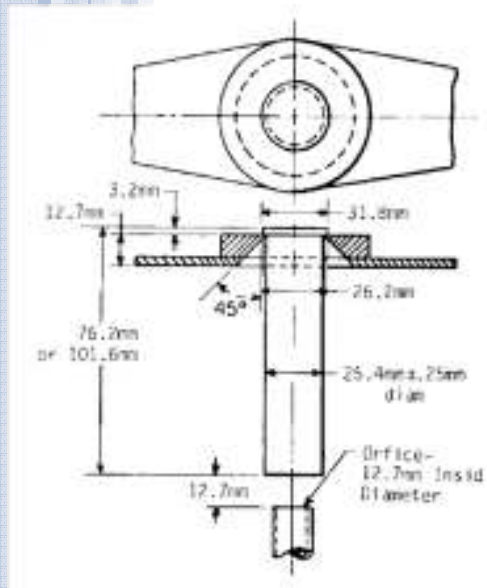
**Templabilidad:** habilidad para formar martensita en secciones gruesas mediante temple



## Templabilidad

**ENSAYO DE TEMPLABILIDAD JOMINY**

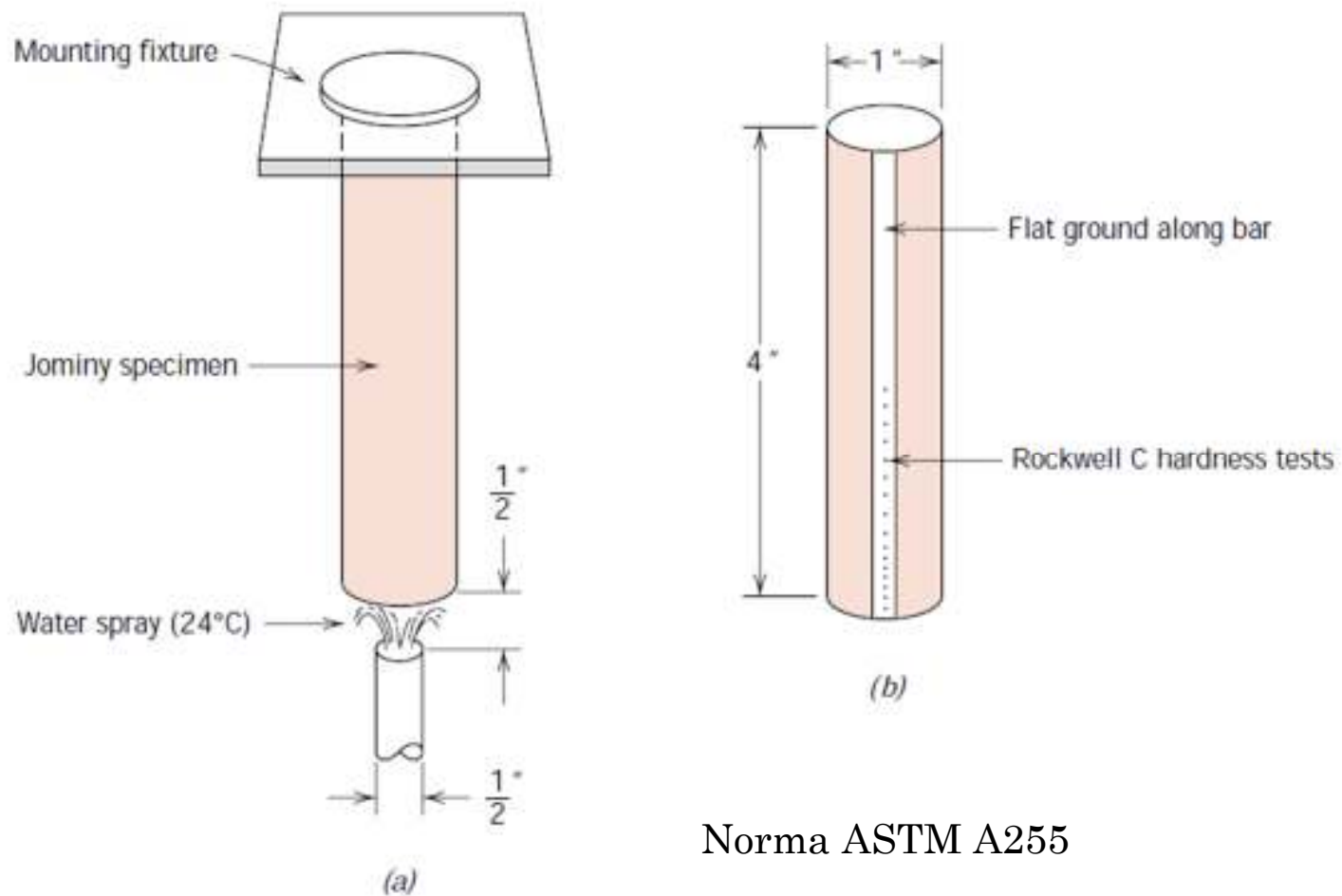
Una barra de 100mm de longitud y 25.4mm de diámetro es calentada hasta el campo austenítico. Luego de 1 hora, un extremo de la barra de acero es expuesta a un chorro de agua. La superficie expuesta directamente al agua se enfría rápidamente, pero se genera un gradiente de velocidades de enfriamiento a lo largo de dicha barra. Cuando la barra se enfría totalmente, se mide la dureza a lo largo de su longitud (luego de 30 minutos).



Norma ASTM A255

# TEMPLABILIDAD

## Templabilidad



Norma ASTM A255

## Templabilidad

Norma ASTM A255

**TABLE 1 Normalizing and Austenitizing Temperatures<sup>A</sup>**

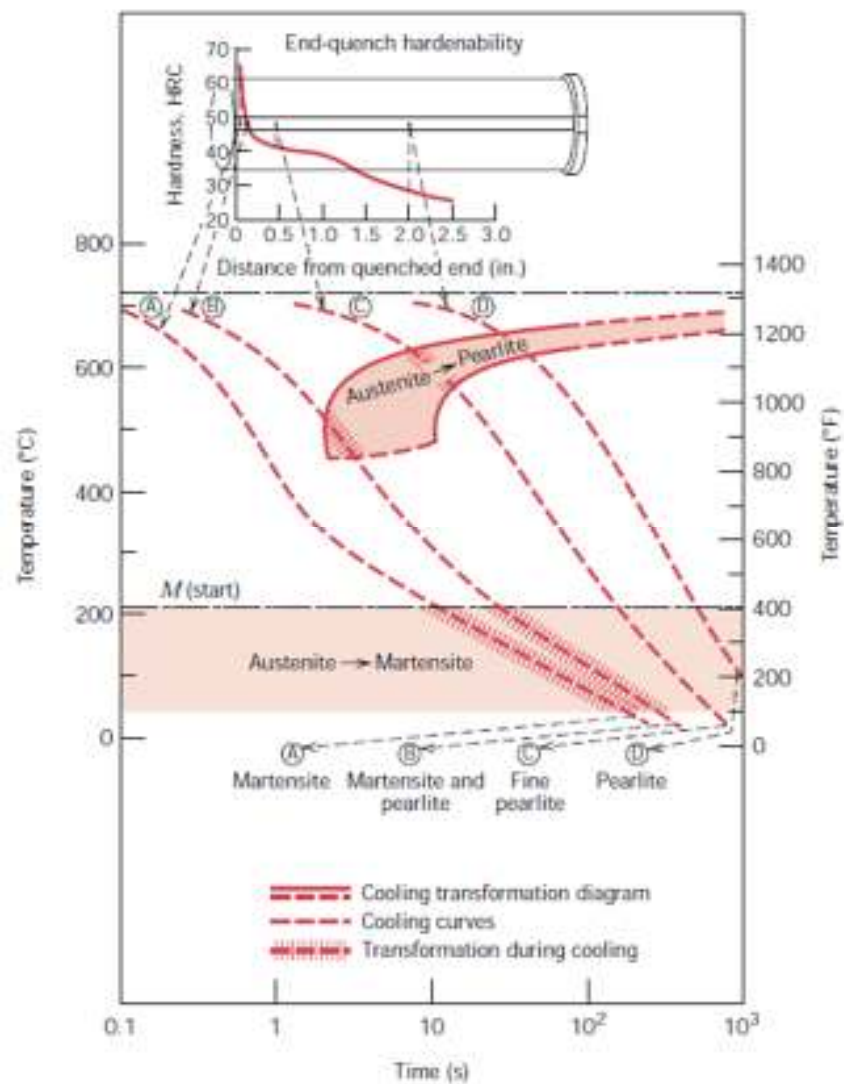
Steel Series	Ordered Carbon Content, max, %	Normalizing Temperature, °F (°C)	Austenitizing Temperature, °F (°C)
1000, 1300, 1500, 3100, 4000, 4100	0.25 and under	1700 (925)	1700 (925)
4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, <sup>B</sup> 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 9800	0.26 to 0.36, incl	1650 (900)	1600 (870)
	0.37 and over	1600 (870)	1550 (845)
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	0.25 and under	1700 (925)	1550 (845)
	0.26 to 0.36, incl	1650 (900)	1500 (815)
	0.37 and over	1600 (870)	1475 (800)
9200	0.50 and over	1650 (900)	1600 (870)

<sup>A</sup> A variation of  $\pm 10^{\circ}\text{F}$  ( $6^{\circ}\text{C}$ ) from the temperatures in this table is permissible.

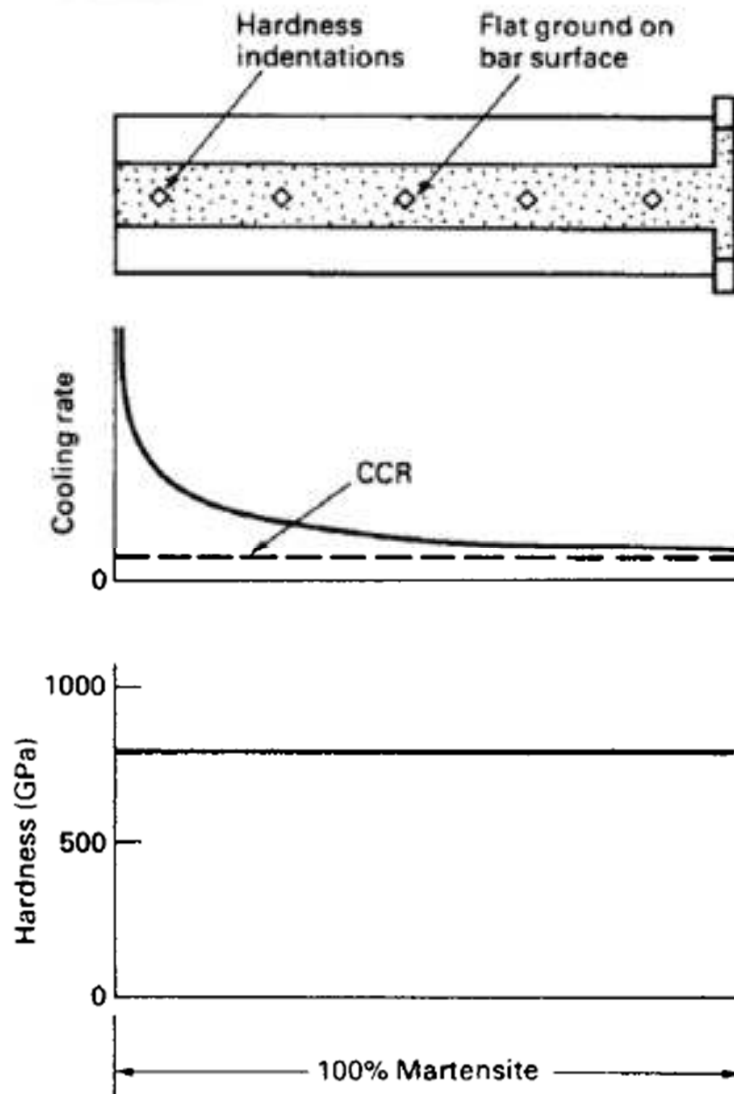
<sup>B</sup> Normalizing and austenitizing temperatures are  $50^{\circ}\text{F}$  ( $30^{\circ}\text{C}$ ) higher for the 6100 series.

# TEMPLABILIDAD

## Templabilidad



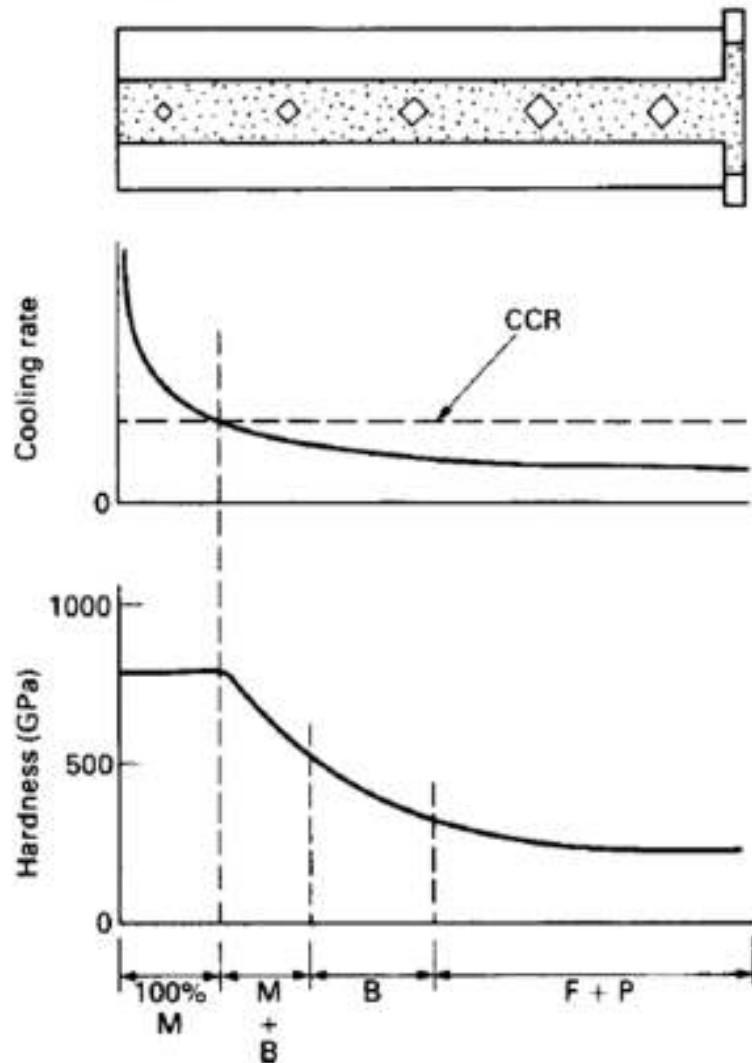
## Templabilidad



Un acero con **alta templabilidad** mostrará una dureza uniforme a lo largo de toda la barra, debido a que la velocidad de enfriamiento (incluso en el extremo no templado) será mayor que la velocidad crítica (CCR)



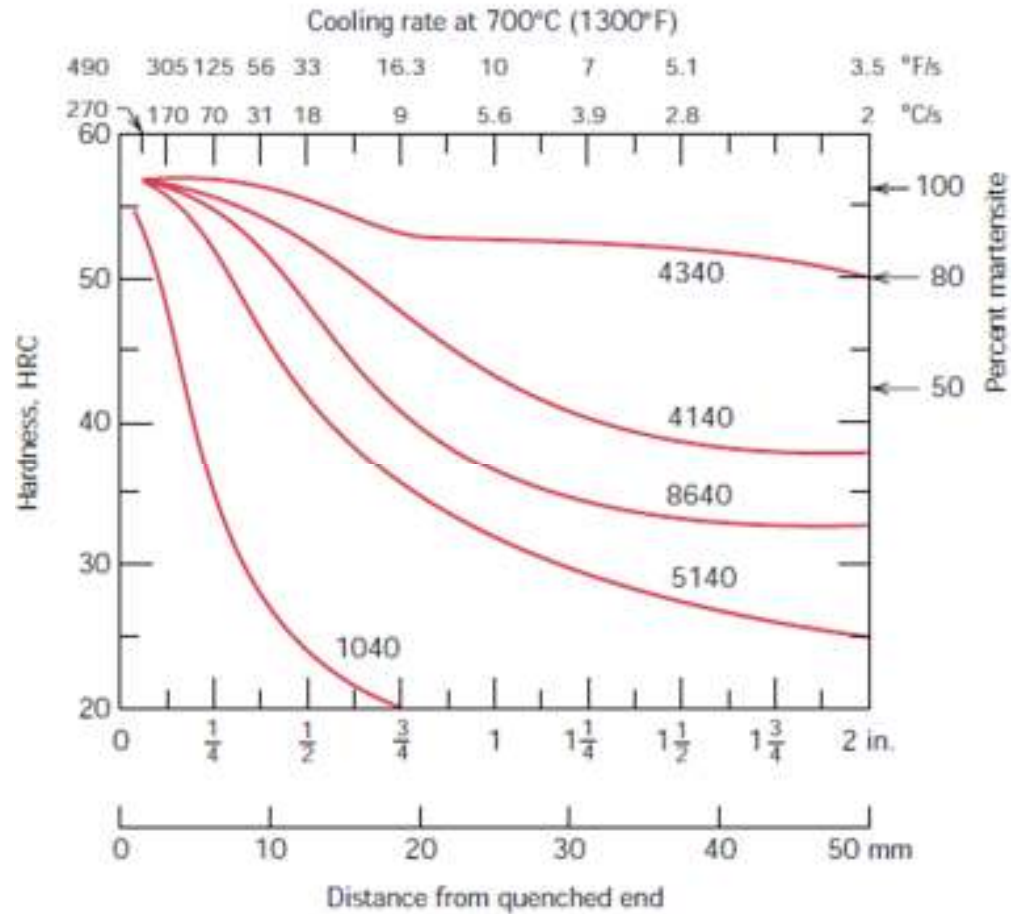
## Templabilidad



Un acero con templabilidad media presentará diferentes valores de dureza a lo largo de la barra. La velocidad de enfriamiento sólo es mayor a la crítica en la zona cercana al extremo templado, entonces, sólo en esta zona habrá formación de martensita. Una vez que la velocidad de enfriamiento cae por debajo de la crítica, la austenita se transformará en bainita (en vez de martensita) y la dureza disminuirá

# TEMPLABILIDAD

## Templabilidad





# ACEROS ALEADOS

## Endurecimiento por Solución

- ✓ Los elementos aleantes (en los aceros de baja aleación) se disuelven en la ferrita para formar una solución sólida sustitucional. Esta solución endurece el acero.
- ✓ Los aceros de herramienta contienen grandes cantidades de tungsteno y cobalto para alcanzar el máximo endurecimiento por solución.
- ✓ Como los elementos aleantes tiene alta solubilidad tanto en la austenita como en la ferrita, no es necesario aplicar tratamientos posteriores para endurecer el material.
- ✓ En estos materiales, el elemento agregado para endurecer no difunde con la temperatura; de modo que estos materiales se pueden soldar o pueden ser utilizados en herramientas de corte (alcanzando altas temperaturas debido al roce) sin afectar sus propiedades

# ACEROS ALEADOS

## Endurecimiento por Precipitación

- ✓ Los aceros de herramienta tradicionales son fabricados con 1%wt C y alrededor de 03%wt Si y Mn. A estos materiales se les aplica temple y revenido para que sean lo suficientemente duros, como para cortar aceros al carbono, y tenaces, como para soportar los choques durante un corte intermitente.
- ✓ Cuando los aceros de herramienta se ponen en uso, éstos se calientan a temperaturas suficientes para «correr» el templado y disminuir la dureza del material.
- ✓ Este problema se puede evitar mediante el uso de bajas velocidades de corte y lubricantes (como agua) para disminuir el roce. Pero esta es una solución que puede resultar costosa (bajas velocidades, baja producción, productos mas costosos).
- ✓ Otra forma de mejorar el problema es hacer «aceros de corte de alta velocidad». Estas aleaciones contienen típicamente 1%C, 0.4%Si, 0.4%Mn, 4%Cr, 5%Mo, 6%W, 2%V y 5%Co. Estos se utilizan templados y revenidos (e contenido de Mo, Mn y Cr le da alta templabilidad) y mantienen sus propiedades debido a una fina dispersión de  $Fe_3C$  que se forma durante el revenido y al endurecimiento por la solución sólida formada por los elementos aleantes disueltos.

# ACEROS ALEADOS

## Endurecimiento por Precipitación

- ✓ Cuando estos aceros de alta velocidad se calientan entre 500-600°C, los finos precipitados de  $\text{Fe}_3\text{C}$  se disuelven y el carbono que ellos liberan se combina con parte del Mo, W y V disueltos para formar una fina dispersión de  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$  y VC.
- ✓ Esto ocurre porque el Mo, W y V son elementos formadores de carburo.
- ✓ Ahora cuando el acero se enfría hasta temperatura ambiente, este endurecimiento secundario ha aumentado su dureza. Ahora su dureza es mayor que la del acero luego de temple y revenido. De modo que estos aceros pueden ser utilizados para fabricar aceros de herramienta para cortes a altas velocidades.

# ACEROS ALEADOS

## Resistencia a la corrosión

Los aceros al carbono forman óxidos en su superficie cuando son expuestos al medio ambiente:

- ✓ Ambientes húmedos → productos de corrosión → CORROSIÓN
- ✓ Ambientes secos y altas temperaturas → óxidos → OXIDACIÓN

Si se agrega r a la aleación, se formará una capa compacta y dura de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) que actuará como un recubrimiento, aislando al metal del medio ambiente. La cantidad mínima de Cr necesaria par formar esta capa es 13%, pero en ambientes agresivos se usa hasta 26%Cr. El sistema Fe-C-Cr es la base de los **aceros inoxidables**

# ACEROS INOXIDABLES



Aceros inoxidables

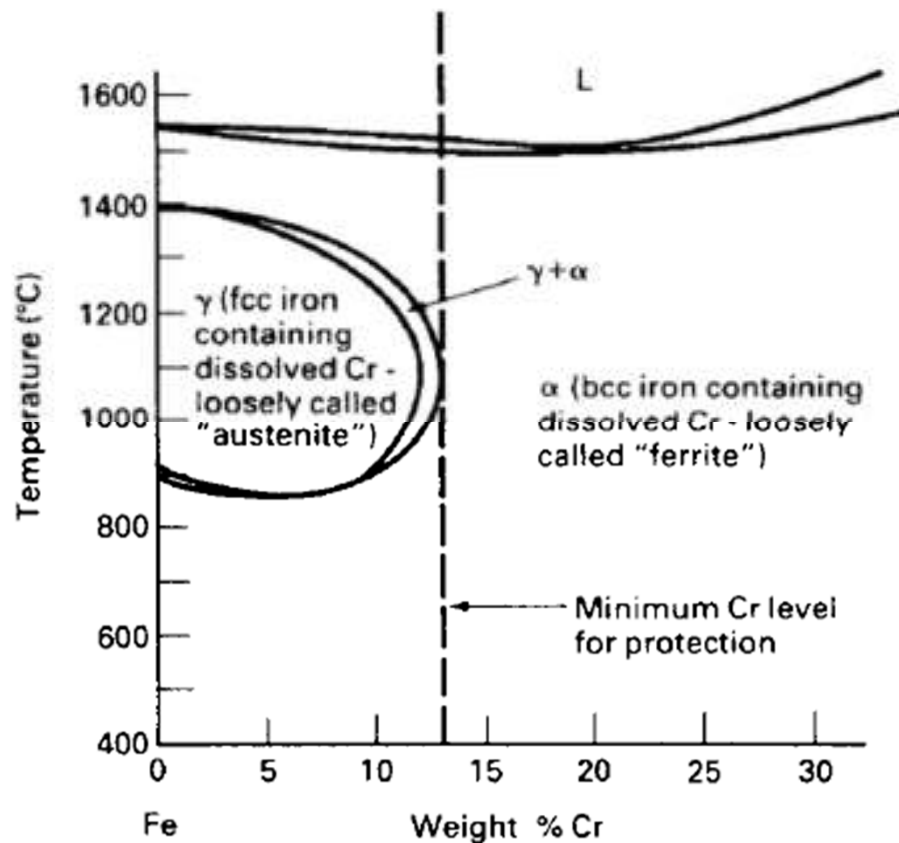
- ✓ Ferríticos
- ✓ Austeníticos
- ✓ Martensíticos
- ✓ Duplex





# ACEROS INOXIDABLES

## Aceros inoxidables ferríticos

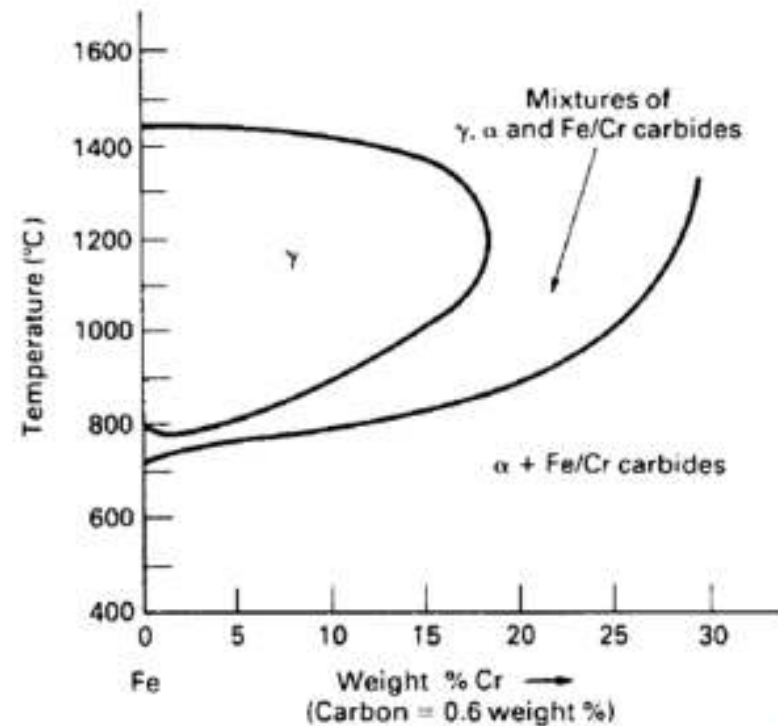
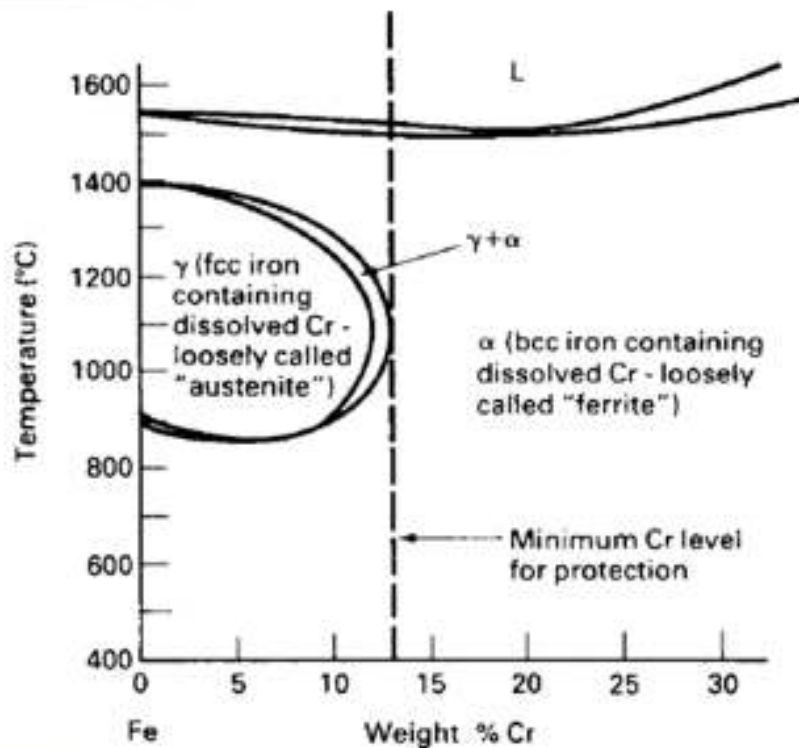


Los aceros inoxidables más simples contienen solo Fe y Cr, y son llamados hierros inoxidables. En la figura se muestra el diagrama de fases del sistema Fe-Cr. Los hierros inoxidables con contenido  $\geq 13\%Cr$  tienen una estructura bcc desde 0K hasta la temperatura de fusión. Esos no entran en el campo fcc y no pueden ser endurecidos para formar martensita; de modo que son siempre ferríticos. Los aceros inoxidables endurecibles usualmente contienen 0.6%C, el cual es añadido para cambiar el diagrama de fases del Fe-Cr.

# ACEROS INOXIDABLES

## Aceros inoxidable austeníticos

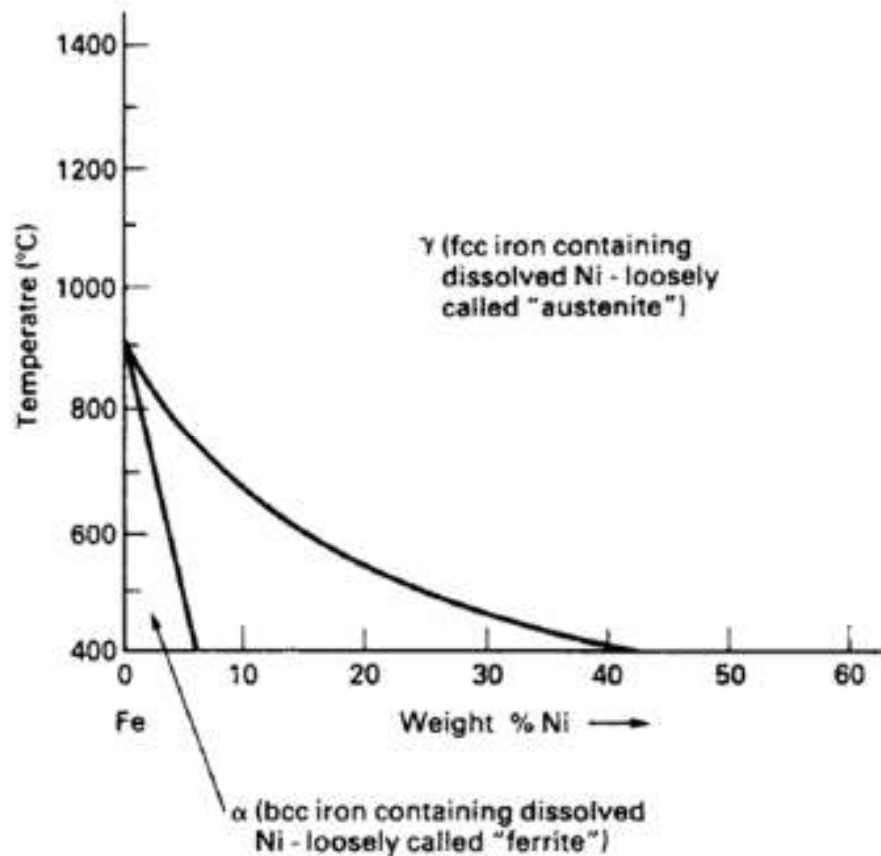
En los aceros endurecibles, el C expande el campo de la austenita. De modo que una aleación Fe-15%Cr y 0.6%C entra en el campo de la austenita a 1000°C. Estos aceros pueden ser templados para formar martensita, y la martensita puede ser revenida para formar una fina dispersión de carburos en la aleación





### Aceros inoxidables austeníticos

Algunos aceros inoxidables son austeníticos a temperatura ambiente. Los «aceros inoxidables 18/8», tienen Fe-0.1%C, 1%Mn, 18%Cr, 8%Ni. El cromo es añadido para aumentar la resistencia a la corrosión, y el níquel para estabilizar la austenita. El níquel disminuye la temperatura de transición de fcc a bcc de 914°C a 720°C cuando el acero tiene 8%Ni. En adición, el Mn, Cr y Ni disminuyen la velocidad de transformación fcc-bcc. Un acero 18/8 puede ser enfriado en aire desde 800°C hasta  $T_{amb}$  sin transformarse a bcc



# ACEROS INOXIDABLES

## Aceros inoxidables

Los aceros austeníticos presentan ciertas ventajas en comparación con los ferríticos:

- ✓ Son más dúctiles y tenaces
- ✓ Tienen mejor resistencia a la termofluencia
- ✓ Son no-magnéticos

Además de los aceros inoxidables ferríticos y austeníticos, también es posible encontrar los martensíticos y los duplex

Hasta ahora hemos visto como los tratamientos térmicos modifican las propiedades mecánicas de los materiales y los distintos métodos para endurecer los aceros:

- 1.- Temple y revenido
- 2.- Endurecimiento por dispersión
- 3.- Endurecimiento por solución
- 4.- **Endurecimiento por difusión  $\Rightarrow$  carburización, nitruración, nitro-carburización**

Desde el punto de vista atómico, la difusión no es más que el paso o migración de átomos de un sitio de la red a otro distinto. Para que un átomo pueda realizar este tipo de movimientos es necesario:

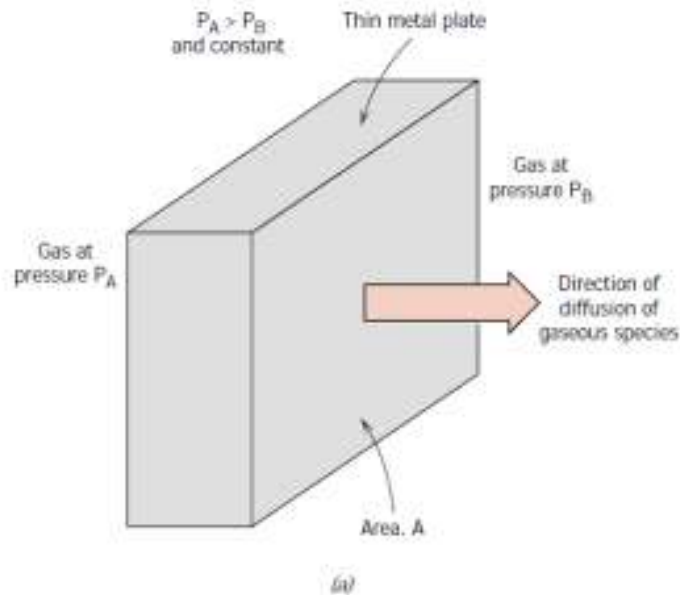
1. Que haya un espacio vacío hacia donde pueda moverse el átomo
  2. El átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con sus vecinos y para causar distorsión en la red durante su movimiento → temperatura
- ✓ **Difusión vía vacancias:** involucra el movimiento de un átomo desde una posición de la red hacia un espacio vacío o vacancia. A su vez, la vacancia se mueve para ocupar el espacio dejado por el átomo.
  - ✓ **Difusión intersticial:** involucra el movimiento de átomos en posición intersticial, a otra posición intersticial vacía (H, C, N, O)

## Estado Estacionario

La difusión es un proceso que es dependiente del tiempo. En muchos casos es necesario conocer la velocidad con la que se mueven o difunden los átomos. El flujo de difusión ( $J$ ) es la masa (o número de átomos)  $M$  que difunde a través de una superficie sólida con área unitaria por unidad de tiempo:

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

$$\longrightarrow J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Kg/m}^2\text{s} \\ \text{átomos/m}^2\text{s} \end{array}$$



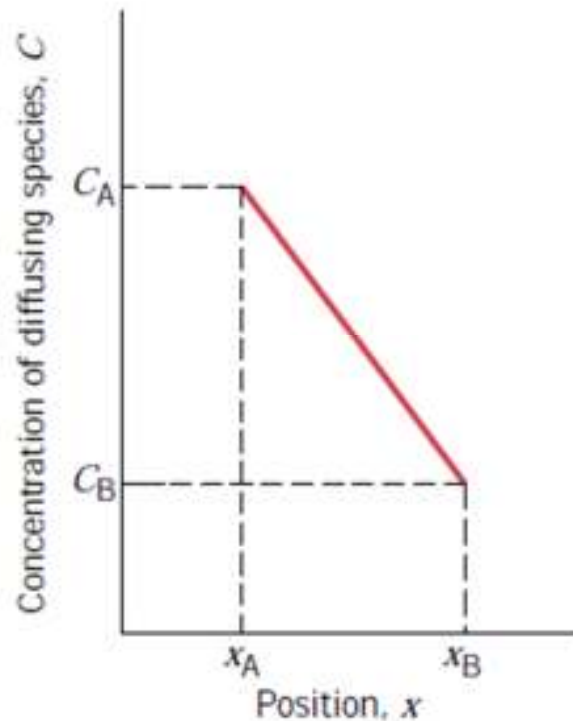
Si el flujo no cambia con el tiempo  
 $\Rightarrow$  **estado estacionario**

Difusión de átomos de gas a través de una placa de metal cuando la concentración de la especie que difunde es constante

## Estado Estacionario

Cuando la concentración  $C$  es graficada en función de la distancia de difusión dentro de un sólido, la curva resultante es el **perfil de concentración**. La pendiente en un punto específico es el **gradiente de concentración**.

$$\text{concentration gradient} = \frac{dC}{dx} \rightarrow \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$



Difusión en estado estacionario en una sola dirección ( $x$ )  
 $\Rightarrow$  el flujo es proporcional al gradiente de concentración

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

### Primera Ley de Fick

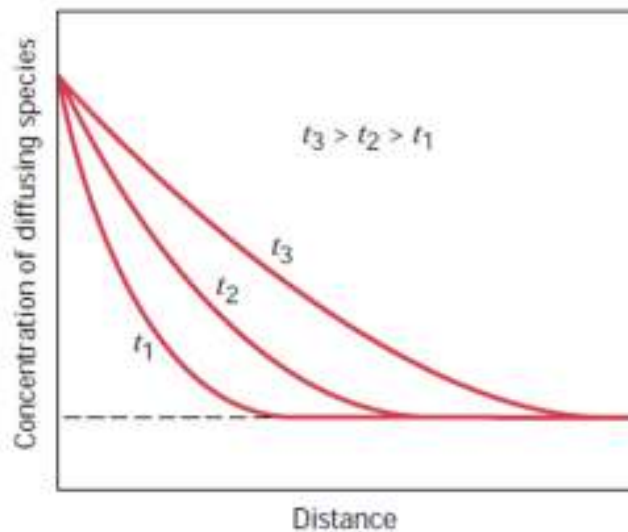
$D$  es el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). El signo negativo indica que la difusión ocurre desde el sitio de mayor concentración al de menor concentración de la especie que difunde



# DIFUSIÓN

## Estado No-Estacionario

La mayoría de las situaciones donde hay procesos difusivos involucrado son no-estacionarios. Debido a que en algún punto del sólido el flujo o el gradiente varían con el tiempo; de modo que puede haber acumulación o pérdida de la especie que difunde



$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$



Segunda Ley de Fick

Varias soluciones, dependiendo de las condiciones del proceso difusivo!!!

**Estado no-estacionario: sólido semi-infinito**

Una solución importante es para sólidos semi-infinitos, cuando la concentración en la superficie es constante.

Una barra es considerada un sólido semi-infinito si ninguna de las especies que difunde, alcanza el final de la barra durante el tiempo de la difusión. Una barra de longitud  $l$  es considerada semi-infinita cuando  $l > 10\sqrt{Dt}$

1. Antes de la difusión, los átomos del soluto (especie que difunde) en el sólido están distribuidos uniformemente y tiene concentración  $C_0$
2. El valor de  $x$  en la superficie de la superficie es cero y aumenta con la distancia dentro del sólido
3. El tiempo es tomado como cero en el instante antes de que comience la difusión (el tiempo empieza al empezar la difusión)

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

**Table 6.1** Tabulation of Error Function Values

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

# DIFUSIÓN

## Factores que afectan la difusión

1. Tanto la especie que difunde, como el sólido a través del cual lo hace, son factores importantes para la difusión. Los átomos más pequeños difunden con mayor facilidad a través de espacios grandes.
2. La temperatura ejerce influencia sobre el coeficiente de difusión y sobre la velocidad de difusión

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)$$

$D_0$  es el factor pre-exponencial independiente de la temperatura ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $Q_d$  es la energía de activación para la difusión ( $\text{J/mol}$ ,  $\text{cal/mol}$ ,  $\text{eV/átomo}$ )

## Ejercicio

La resistencia al desgaste de una rolinera de hacer debe ser mejorada mediante el endurecimiento de su superficie. Esto se puede lograr mediante el incremento del contenido de carbono en la superficie externa mediante difusión (de carbono hacia el interior del acero o CARBURIZACIÓN). El carbono será tomado de una atmósfera rica en carbono a una temperatura elevada y constante. El acero a endurecer es un AISI 1020, la concentración de carbono en la superficie se mantendrá constante (1%C). Para que el tratamiento sea efectivo, el contenido de carbono debe aumentar a 0.6% a una distancia de 0.75mm por debajo de la superficie. Especifique un tratamiento adecuado en términos de temperatura (entre 900-1050°C) y tiempo. Utilice los datos correspondientes a  $\gamma$ -Fe

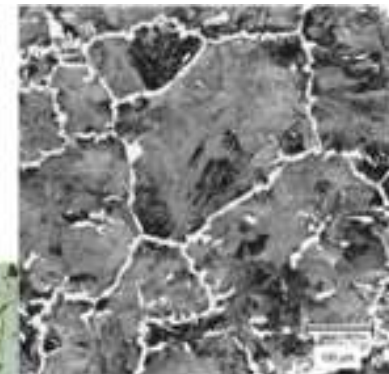
<i>Diffusing Species</i>	<i>Host Metal</i>	$D_0(m^2/s)$	<i>Activation Energy <math>Q_d</math></i>	
			<i>kJ/mol</i>	<i>eV/atom</i>
Fe	$\alpha$ -Fe (BCC)	$2.8 \times 10^{-4}$	251	2.60
Fe	$\gamma$ -Fe (FCC)	$5.0 \times 10^{-5}$	284	2.94



Estructura ↔ Propiedades ↔ Procesamiento



Preparación metalográfica y  
evaluación de microestructuras





**Contenido**

✓ Etapas de la preparación  
metalográfica

- ✓ Selección
- ✓ Corte
- ✓ Embutido o montaje
- ✓ Desbaste
- ✓ Pulido
- ✓ Ataque químico

✓ Uso y partes del microscopio  
óptico

- ✓ Porcentaje de fase
- ✓ Tamaño de grano
- ✓ Medición de dureza Vickers

✓ Microscopio electrónico de  
barrido

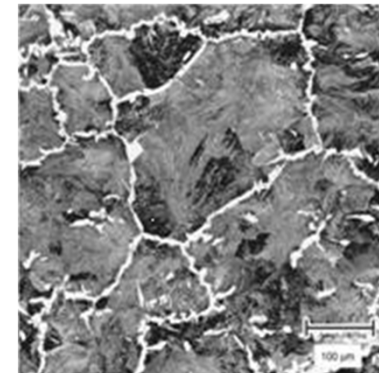
✓ Análisis de microestructuras

MT-1113

# METALOGRAFÍA Y MICROESTRUCTURAS

## Preparación Metalográfica

Muestra con superficie plana y  
especular



Microestructura (Microscopio  
óptico)

## Preparación Metalográfica

Que se quiere estudiar?  
El material ha estado en servicio?  
El material ha presentado fallas?

### 1.- Selección de la muestra o superficie a estudiar:



### Muestra representativa de las propiedades del material

**Por ejemplo:** si se trata de un material que ha fallado durante servicio, se debe escoger al menos una muestra de la zona cercana a la falla y una muestra de una zona no fallada (control)

MT-1113

## 2.- Corte de la muestra:

Sistema de  
enfriamiento  
(refrigerante)

Disco de corte

Mordazas para  
sujetar la  
muestra





MT-1113

## 2.- Corte de la muestra:

Seleccionar superficie a estudiar



Cortar hasta obtener muestra de tamaño manejable



MT-1113

## 2.- Corte de la muestra:

Material	Disco
Ferroso (uso normal)	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Ferroso (muy duros)	BN
No-ferroso	SiC
Cerámicas-compuestos	Adiamantado
Aplicaciones especiales	Adiamantado





MT-1113

### 3.- Embutido o montaje de la muestra:

- Muestras pequeñas o difíciles de manipular
- Muestras con bordes a proteger (recubrimientos, óxidos en superficie, entre otros)



EN FRIO

Resina  
epóxica/acrílicas  
Largo tiempo de  
curado (12-24 horas)  
Temperatura ambiente

MT-1113

### 3.- Embutido o montaje de la muestra:

- Muestras pequeñas o difíciles de manipular
- Muestras con bordes a proteger (recubrimientos, óxidos en superficie, entre otros)

EN  
CALIENTE

**Resinas**  
**termoendurecibles/termoplásticas**

**Corto tiempo**

**Necesita alta P y T**



MT-1113

#### 4.- Desbaste:

GRUESO

Lija de 60-80 grit



FINO

Lijas 240/320/400/600 grit

Número de lija



Tamaño del  
grano

MT-1113

## 5.- Pulido:

SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>,  
Diamante

**Paño de pulido impregnado con abrasivo en  
suspensión para obtener superficie especular**



## 5.- Pulido:



Luego de la etapa de pulido la superficie refleja uniformemente la luz

Sólo algunos aspectos de la superficie se pueden observar sin ataque químico. Aquellos que tengan una diferencia en reflectividad (con respecto a la superficie) mayor al 10%

### SIN ATAQUE QUÍMICO

- ✓ Grietas y poros
- ✓ Inclusiones no-metálicas
- ✓ Algunos carburos

### CON ATAQUE QUÍMICO

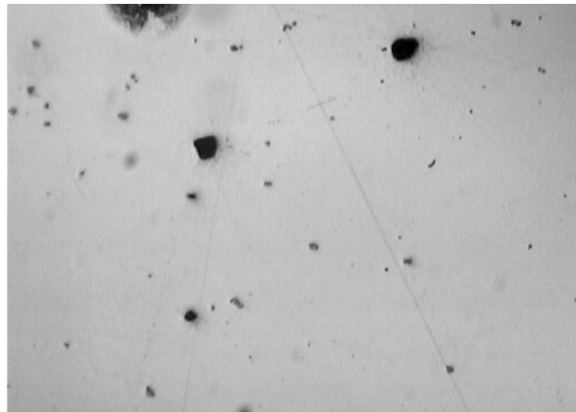
- ✓ Bordes de grano
- ✓ Fases



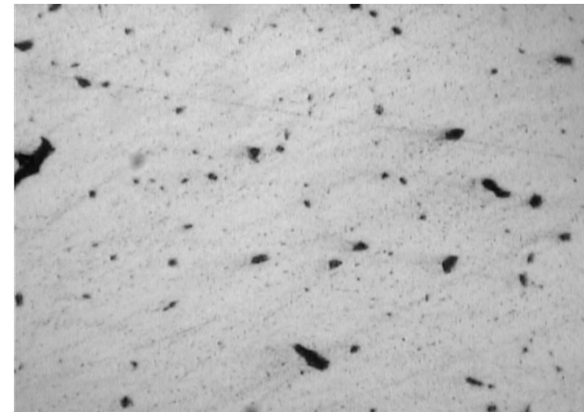
MT-1113

## 5.- Pulido:

### SIN ATAQUE QUÍMICO



**ACERO AISI-1045 (400X)**



**LATÓN – ALEACIÓN Cu-Zn  
(400X)**



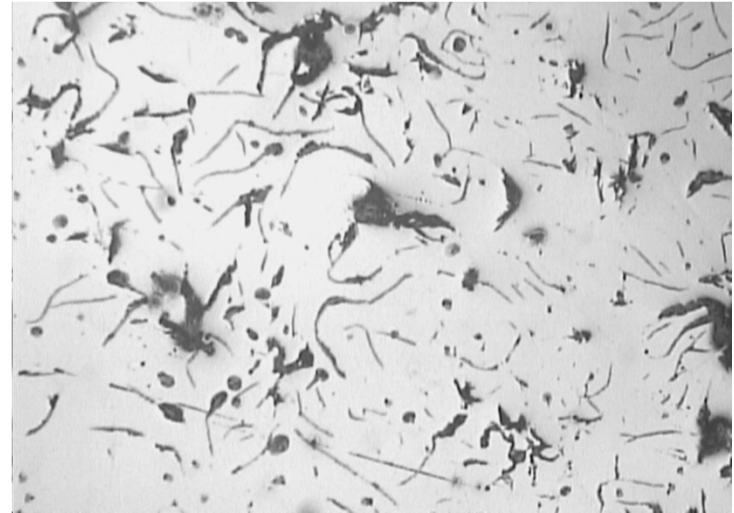
MT-1113

## 5.- Pulido:

### SIN ATAQUE QUÍMICO



**FUNDICIÓN GRIS 1  
(100X)**

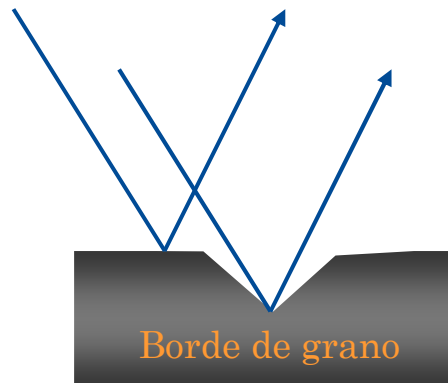
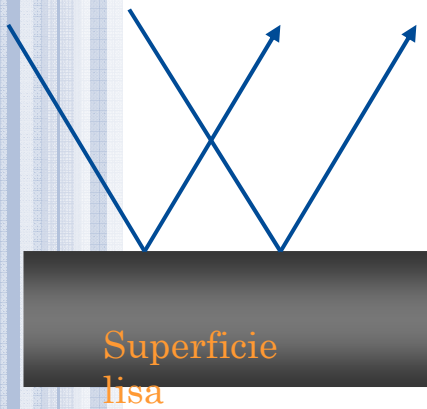


**FUNDICIÓN GRIS 2 (100X)**

## 6.- Ataque químico:

Reactivo específico para  
cada metal o aleación

**ASTM E-407**



Disuelve preferencialmente una fase o el borde de grano



- ✓ Diferencia de camino óptico
- ✓ Diferencia de contrastes
- ✓ Se puede ver borde de grano



No es visible a "simple vista"



Microscopio óptico



## 6.- Ataque químico:

	Reactivo	Usos
Fe + C and Fe + <1C + <4 % additions	76, 74a, 77, 78, 79 74a, 77, 31a, 223 80, 81, 82  78, 222a 31b, 78  83  84 85 86 210, 211 213, 214 216 222b	general structure ferrite grain boundaries prior austenitic grain boundaries in martensitic and bainitic steels untempered martensite carbides and phosphides (matrix darkened, carbides and phosphides remain bright) cementite attacked rapidly, sustenite less, ferrite and iron phosphide least overheating and burning stains carbides chemical polish-etch colors ferrite colors carbides colors lath martensite in low-carbon high-alloy grades for dual phase steels; reveals pearlite, darkens martensite and outlines austenite
Fe + 4–12 Cr	80, 87, 88, 89, 90, 91, 79, 210 86	general structure chemical polish-etch
Fe + 12–30 Cr + <6 Ni (400 Series)	80, 87, 88, 89, 34, 40, 92, 93, 94, 95, 91, 226 96, 97, 98 31c 86 219 220	general structure signs phase carbides chemical polish-etch grain boundary etch darkens delta ferrite

## 6.- Ataque químico:

76	4 g picric acid 100 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Composition given will saturate with picric acid. Immerse few seconds to a minute or more. Adding a wetting agent such as zepherin chloride will increase response.
77	10 g picric acid 5 drops HCl 100 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Composition given will saturate the solution with picric acid. Immerse few seconds to a minute or more.
78	10 g potassium metabisulfite  100 mL water	Immerse 1–15 s. Better results are sometimes obtained by first etching lightly with No. 76 or 74.
79	40 mL HCl 5 g CuCl <sub>2</sub> 30 mL water 25 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Swab few seconds to a minute.
80	5 mL HCl 1 g picric acid 100 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)	Immerse or swab few seconds to 15 min. Reaction may be accelerated by adding a few drops of 3 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Optional (for prior austenite grain boundaries)—temper specimen at 600–900°F prior to preparation.
81	2 g picric acid 1 g sodium tridecylbenzene sulfonate. 100 mL water	Composition given will saturate the solution with picric acid. (a) Immerse few seconds to a minute. (b) Immerse to 15 min with occasional swabbing for heavy grain boundary attack.
82	5 g FeCl <sub>3</sub> 5 drops HCl 100 mL water	Immerse 5–10 s.
83	10 g CrO <sub>3</sub> 100 mL water	Use a certified and tested hood—(a) Electrolytic at 6 V for 5–60 s. Attacks carbides. (b) Electrolytic at 6 V for 3–5 s.



MT-1113

# Microscopio Óptico

El microscopio óptico para metalografía utiliza la luz reflejada sobre la muestra

Portamuestras





MT-1113

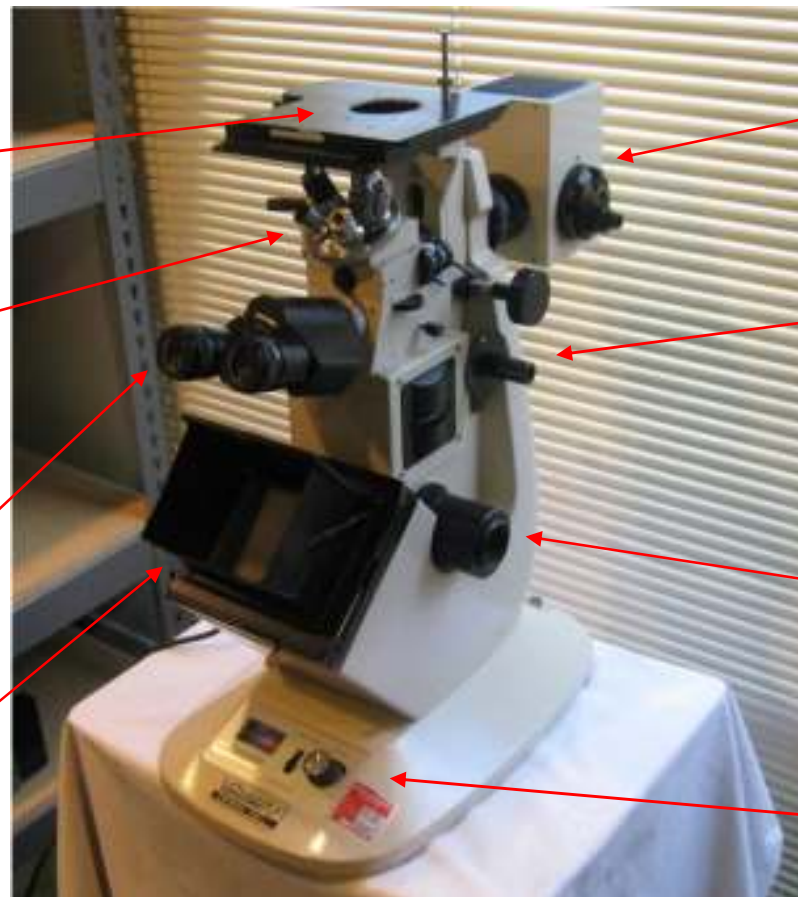
# Microscopio Óptico

Portamuestras

Objetivos  
(10X/20X/40X/100X)

Ocular (10X)

Cámara para  
observación



Sistema de  
iluminación

Tornillo  
micrométrico  
(enfoco fino)

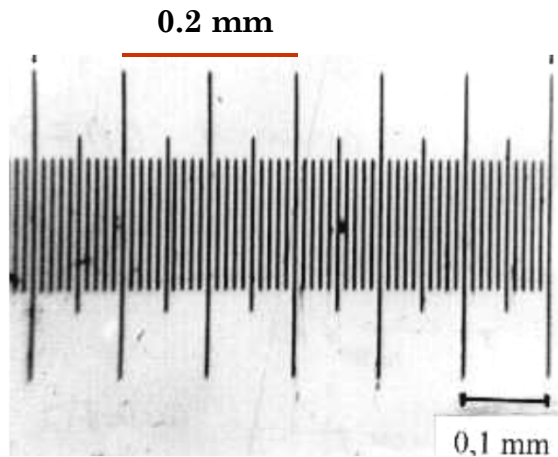
Tornillo  
macrométrico  
(enfoco grueso)

Control de la  
intensidad de  
luz

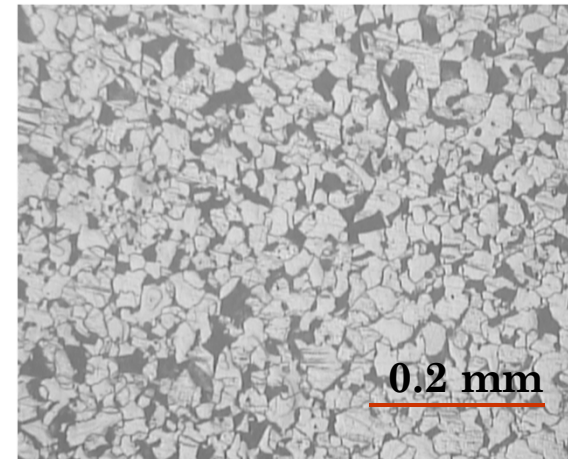
MT-1113

# Microscopio Óptico

Micromarca  Sistema de referencia



**Foto de una  
reglilla calibrada  
(100X)**



**Fotomicrografía al  
mismo aumento que  
reglilla (100X)**

# Microscopio Electrónico de Barrido

$$\delta = \frac{\lambda}{2 * A_N}$$

La resolución (capacidad de un instrumento para producir imágenes distintas de puntos situados muy cerca uno de otro en el objeto, separados a una distancia  $\delta$ ) del microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz utilizada

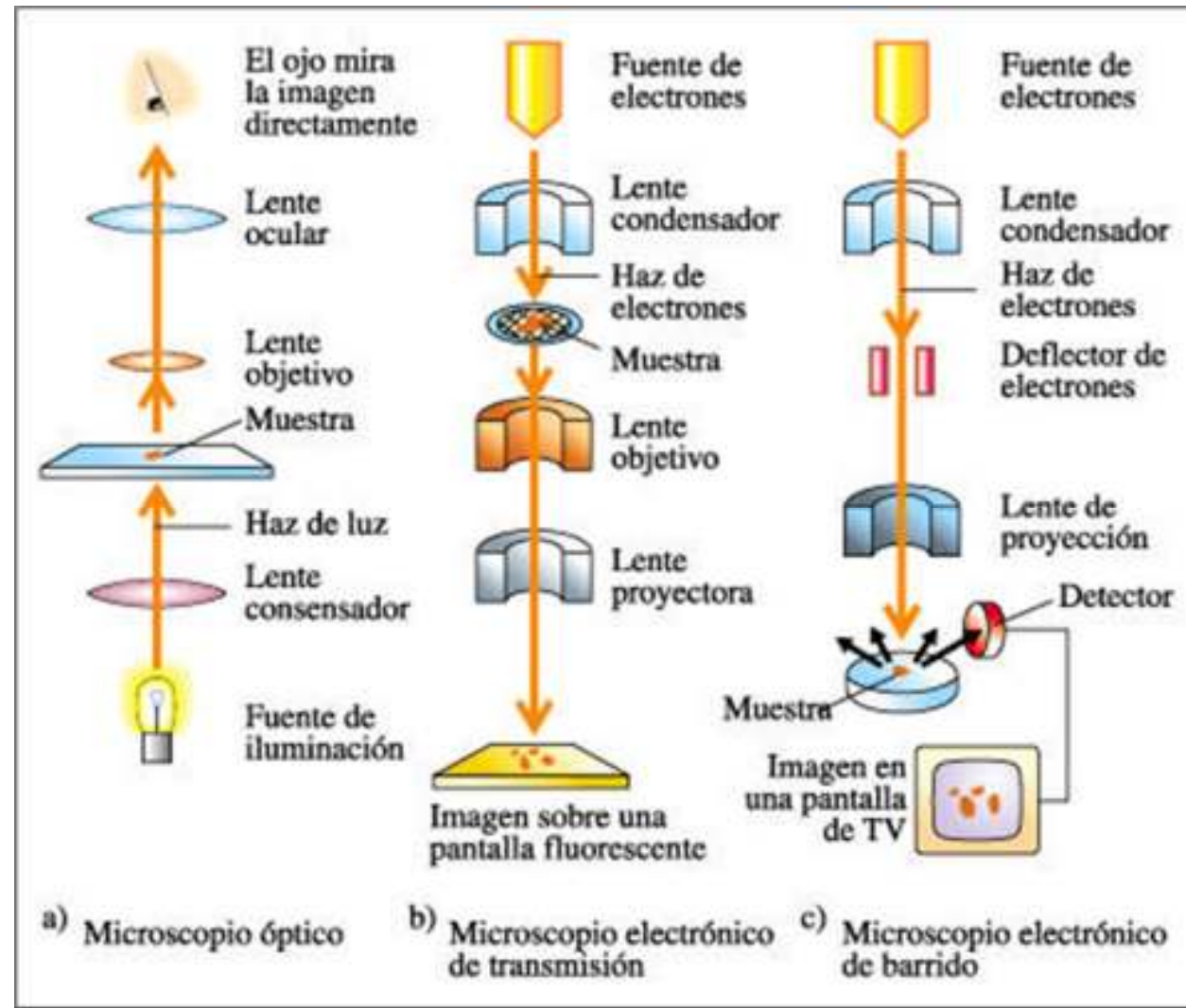
## Microscopio óptico

- ✓ Luz visible
- ✓  $\lambda = 380-790 \text{ nm}$
- ✓  $M = 50 - 1000X$

## Microscopio electrónico de barrido (MEB)

- ✓ Haz de electrones
- ✓ Longitud de onda depende de la aceleración de los electrones (10kV  $\rightarrow$  12pm)
- ✓  $M = 15 - 300.000X$

# Microscopio Electrónico de Barrido





MT-1113

# Microscopio Electrónico de Barrido



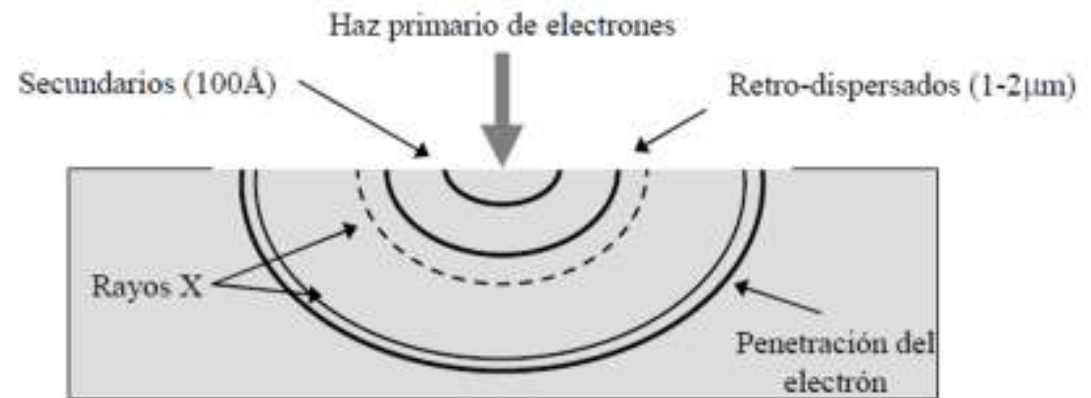


# Microscopio Electrónico de Barrido



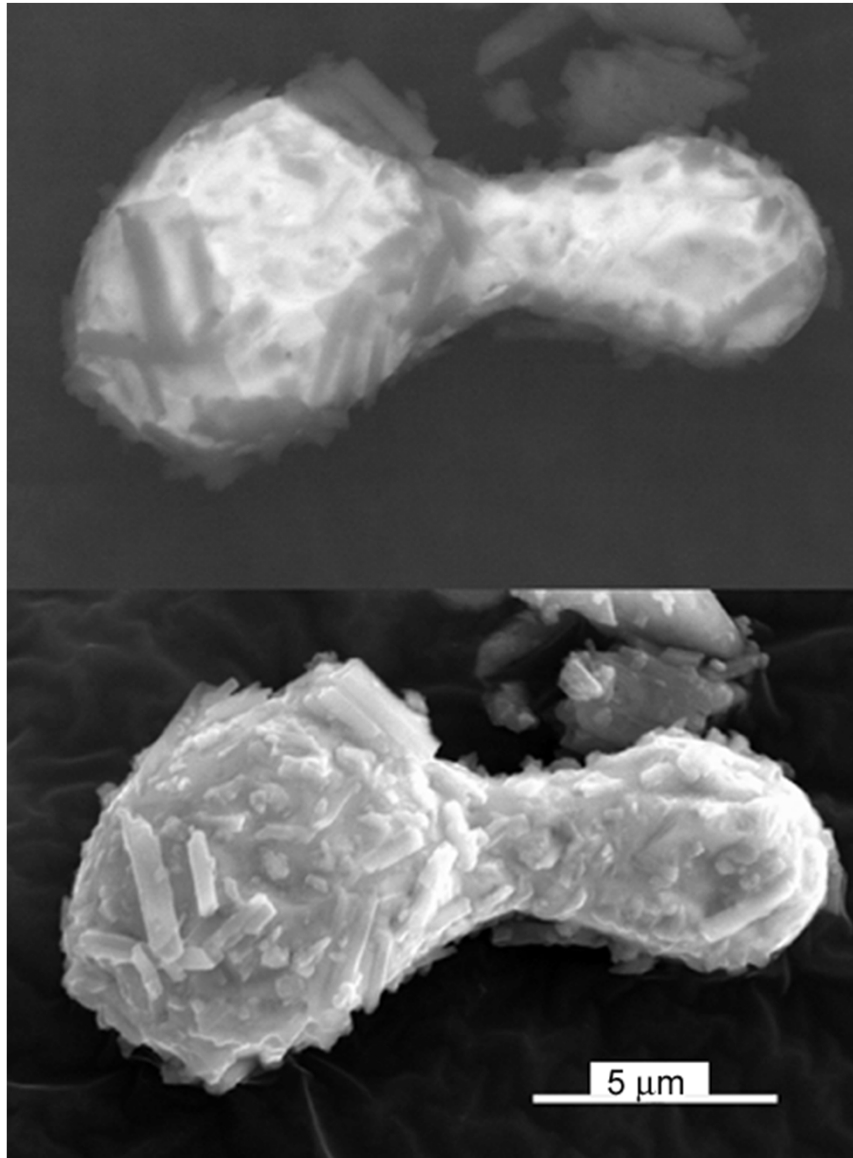
Los rayos X producidos por la interacción entre el haz de electrones y la muestra permiten obtener información de su composición elemental cuando el MEB está acoplado a un espectrometro para medir longitudes de onda (WDS o *wavelength dispersive spectrometer*) o niveles de energía (EDS o *energy dispersive spectrometer*).

Los electrones retro-dispersados o *backscattered*, son útiles para identificar áreas con diferencias en densidades atómicas en la superficie de la muestra; los electrones secundarios permiten obtener información de la topografía de la muestra



MT-1113

# Microscopio Electrónico de Barrido



Electrones  
retrodispersados

Electrones  
secundarios

MT-1113

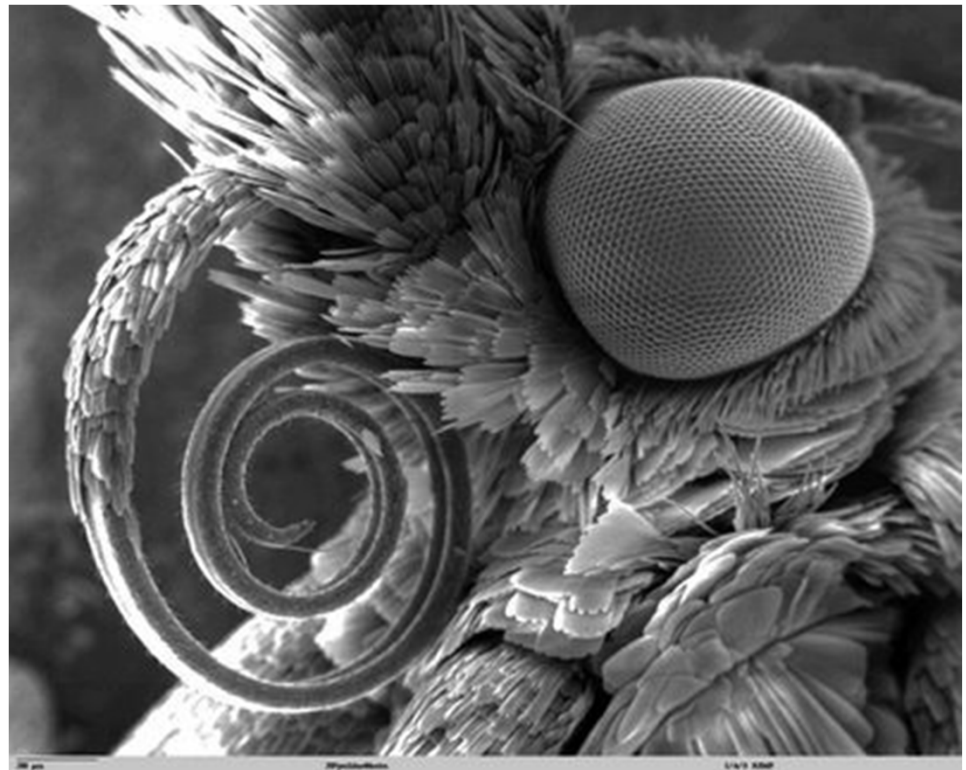
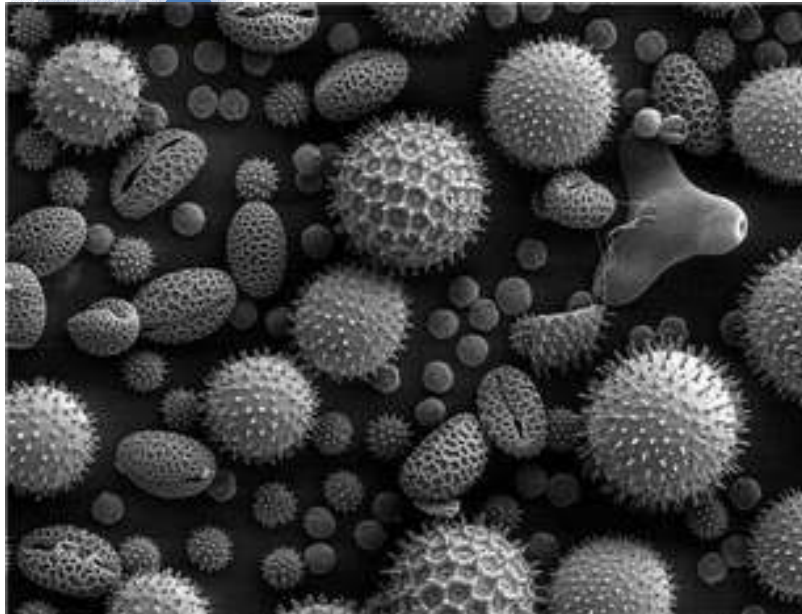
# Microscopio Electrónico de Barrido





MT-1113

# Microscopio Electrónico de Barrido



# Análisis de Microestructuras

Análisis de  
muestras  
metálicas y  
aleaciones

Sin ataque

Inclusiones

Grietas o poros

Grafito (forma y distribución)

Con ataque químico  
(selección del  
reactivo)

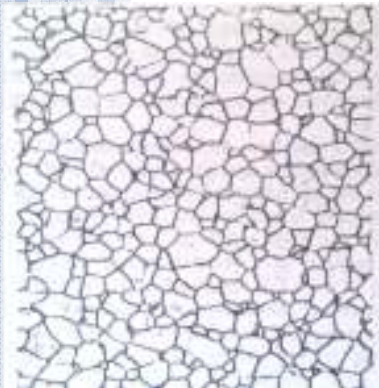
Materiales ferrosos { Nital/Picral

Materiales no ferrosos { HCl  
HNO<sub>3</sub>  
HF



# Análisis de Microestructuras

MATERIALES FERROSOS → ACEROS AL CARBONO



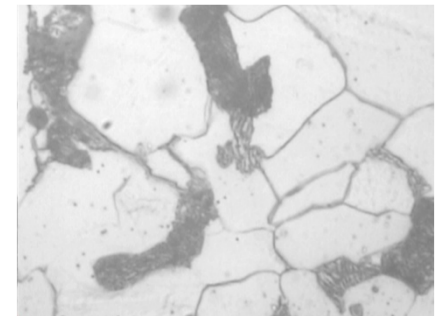
Ferrita (100X)



Perlita gruesa  
(1000X)



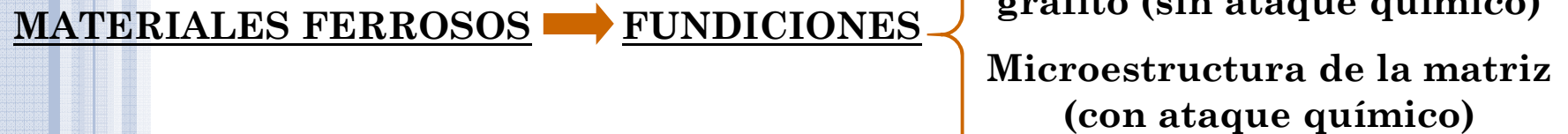
Martensita (1000X)



Ferrita + perlita  
(1000X)

Microestructuras comunes en los aceros al carbono  
(con ataque químico)

# Análisis de Microestructuras

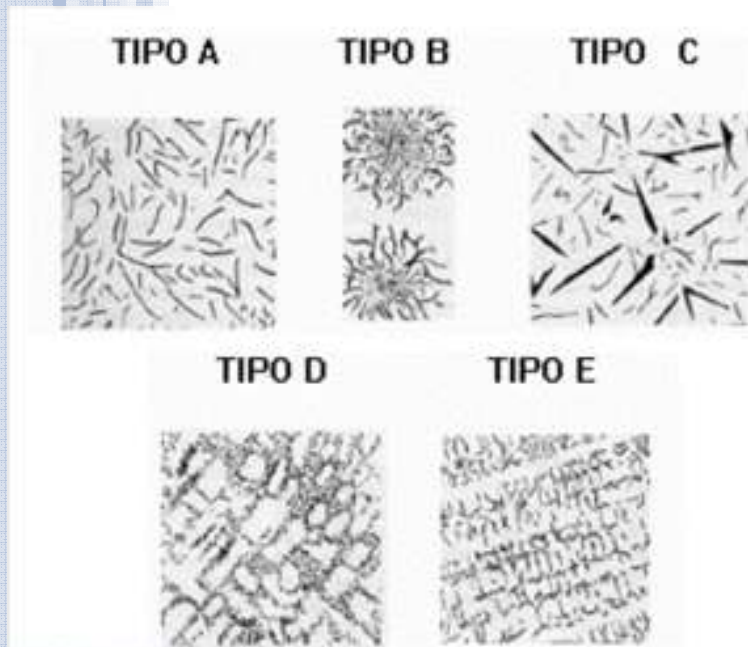
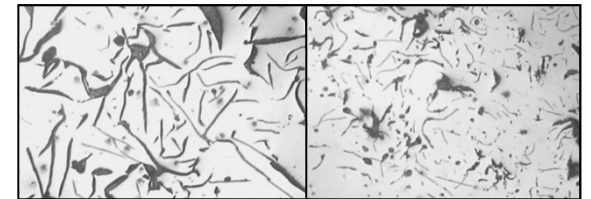


- ✓ GRIS. Grafito de forma laminar y tamaño variado, distribuido no uniformemente
- ✓ MALEABLE. Grafito en agrupaciones nodulares, uniformemente distribuido
- ✓ FUNDICIÓN DÚCTIL. Grafito se encuentra en forma de esferas en toda la superficie
- ✓ FUNDICIÓN BLANCA. El carbono permanece combinado como  $\text{Fe}_3\text{C}$

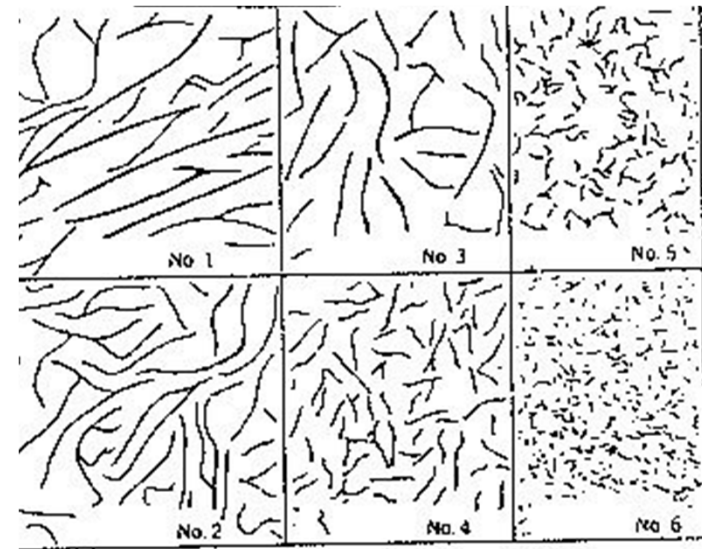
MT-1113

# Análisis de Microestructuras

MATERIALES FERROSOS → FUNDICIÓN GRIS  
ASTM A-247



Distribución del grafito

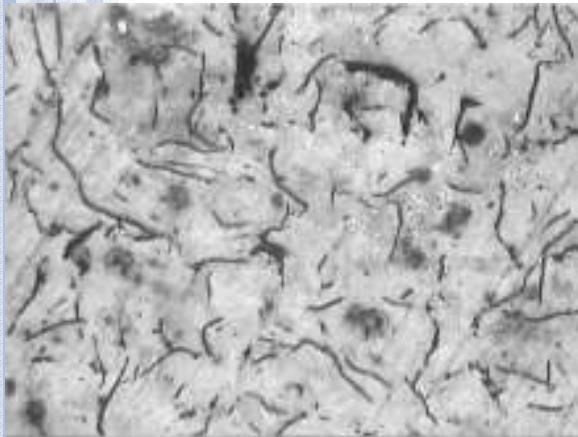


Tamaño de las “hojuelas” o lámina de grafito

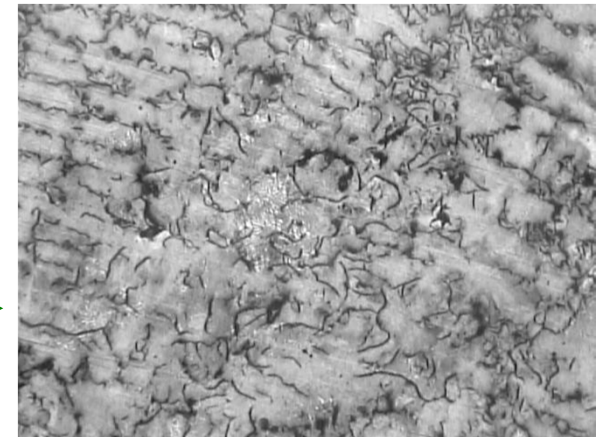


# Análisis de Microestructuras

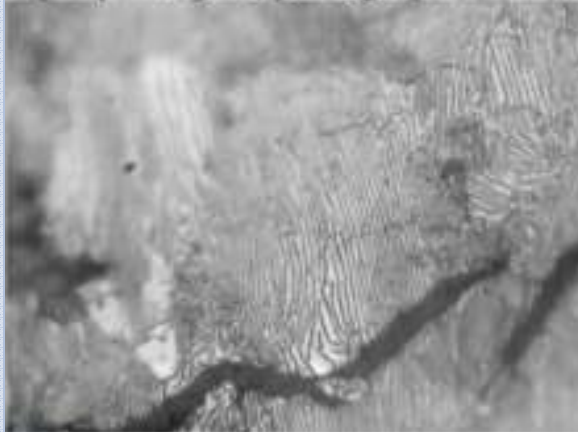
MATERIALES FERROSOS → FUNDICIÓN GRIS



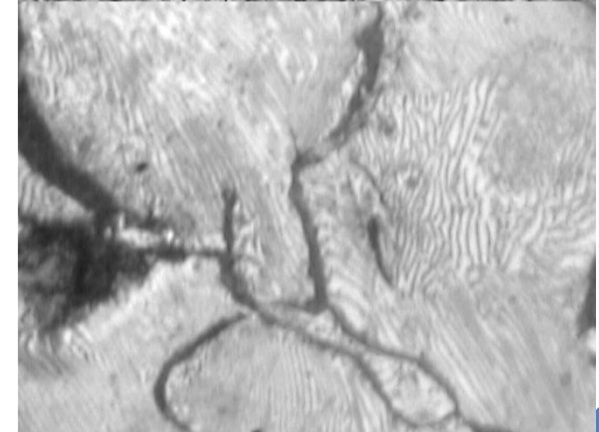
Tipo A



Tipo E

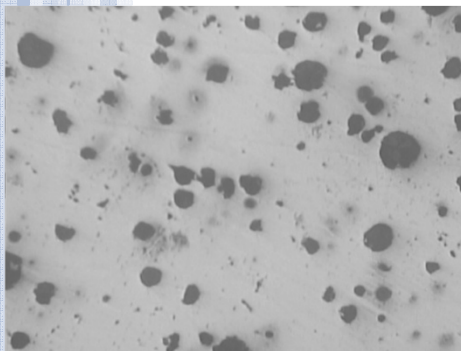


Matriz perlítica

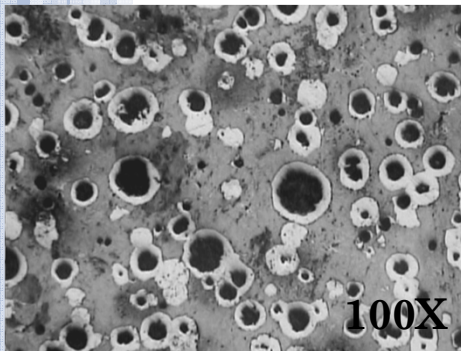


# Análisis de Microestructuras

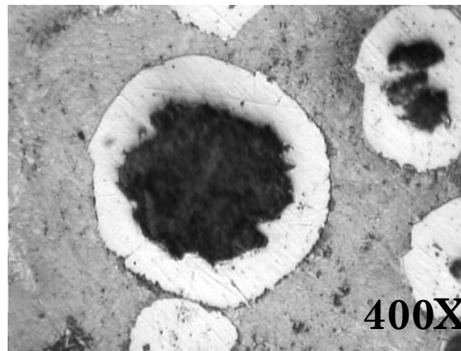
MATERIALES FERROSOS → FUNDICIÓN DÚCTIL



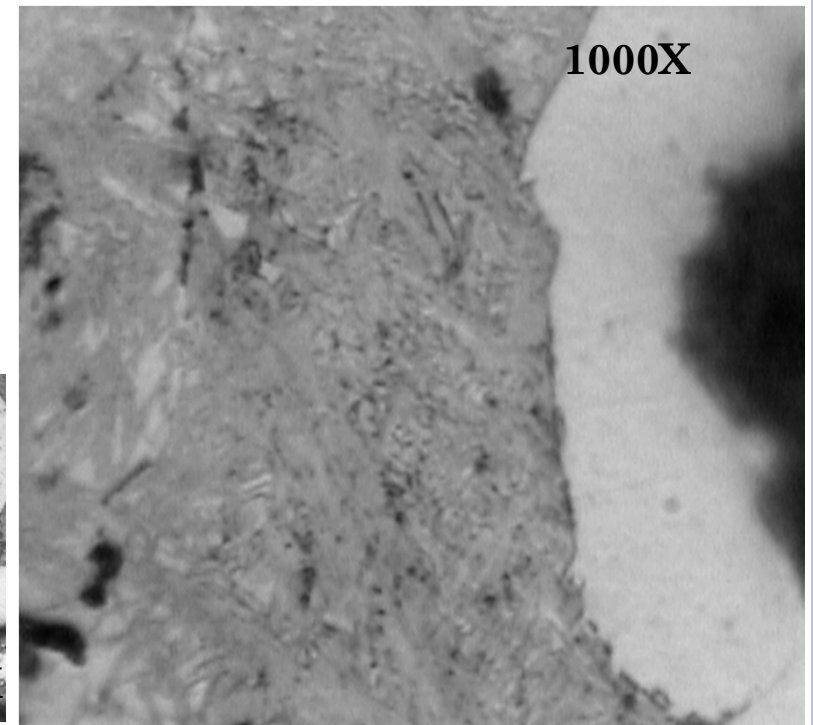
Nódulos de  
grafito en  
matriz  
martensítica



100X



400X



1000X



# Estimación de Propiedades

La descripción de la microestructura no es suficiente para predecir el comportamiento mecánico de la aleación ferrosa

Microfotografía  $\neq$   
Fotomicrografía

Fotomicrografía

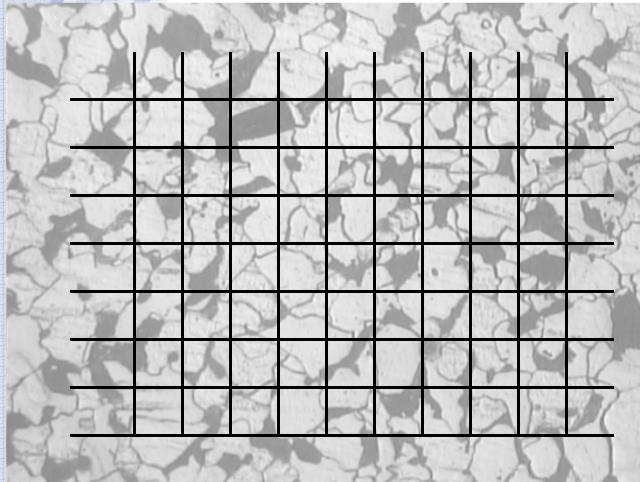
- ✓ Cálculo del porcentaje de fases
- ✓ Estimación del %C (aceros recocidos)
- ✓ Cálculo del tamaño de grano

Mediciones de dureza

**Por ejemplo:** La relación de Hall-Petch relaciona una propiedad mecánica con una característica morfológica del material

# Cálculo del porcentaje de fase

**Método de las áreas:**



$$\%A = \frac{\sum A_A}{A_T} * 100$$

$$\%A = \frac{\# \text{ de cuadros ocupados por A}}{\# \text{ de cuadros totales}} * 100$$

# de cuadros totales

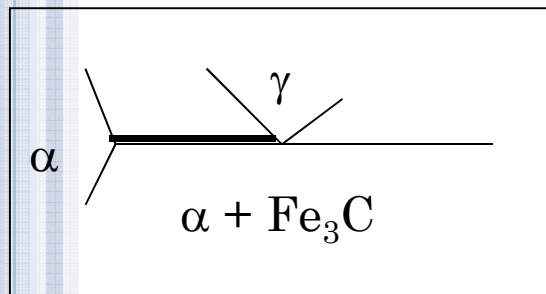
$$\%B = 100 - \%A$$

MT-1113

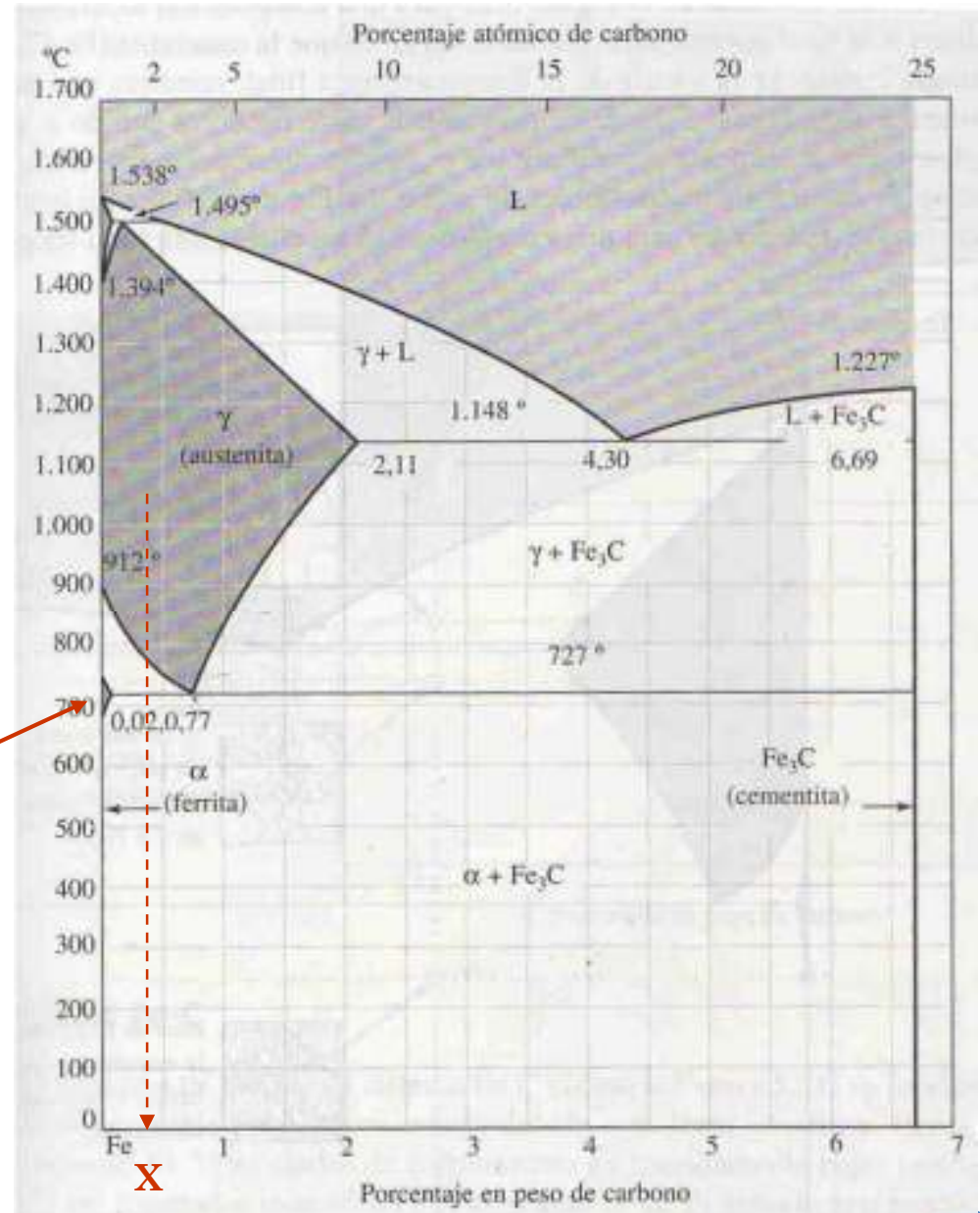
## Estimación del %C de aceros



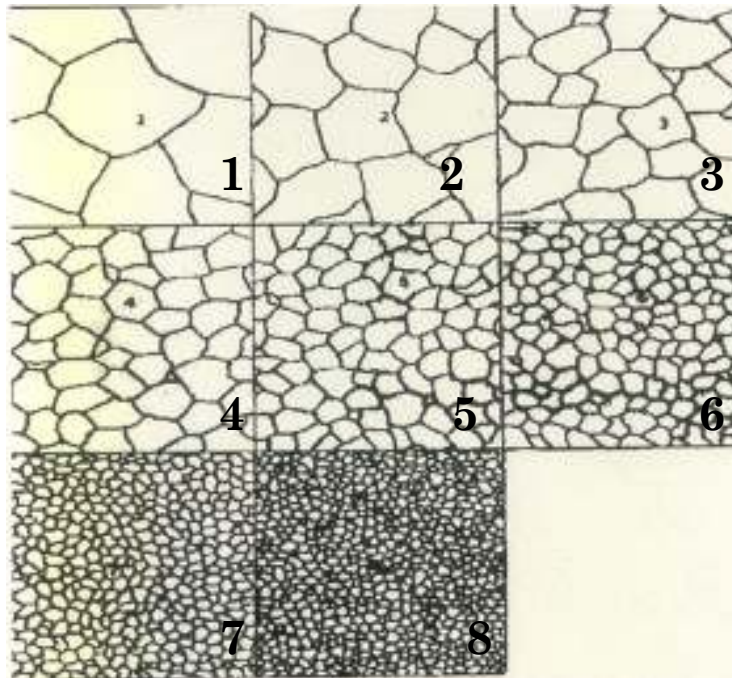
Fotomicrografía de  
aceros  
hipoeutectoides  
recocidos



$$\% \alpha = \frac{0.77 - X}{0.77 - 0.02} * 100$$



# Medición del tamaño de grano



Imágenes tomadas sobre una superficie de  $0.01\text{mm}^2$

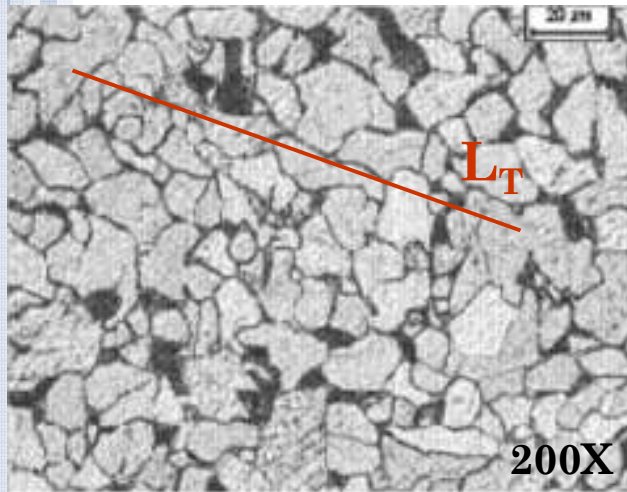
Grano grueso:  $G < 5$

Grano fino:  $G > 7$



# Medición del tamaño de grano

Cálculo del tamaño de grano → Método del intercepto de Heyn



$$G = [-6,6457 * \log(L_3)] - 3,298$$

Número de interceptos (N)

Intercepciones con BG = 1  
 Intercepciones con punto triple de grano = 1.5  
 Tangencia con BG = 0.5

Número de interceptos por milímetro ( $N_L$ )

$$N_L = \frac{N}{\left(\frac{L_T}{M}\right)}$$

Longitud promedio (mm) → análogo al  $d_{prom}$

$$L_3 = 1 / N_L$$



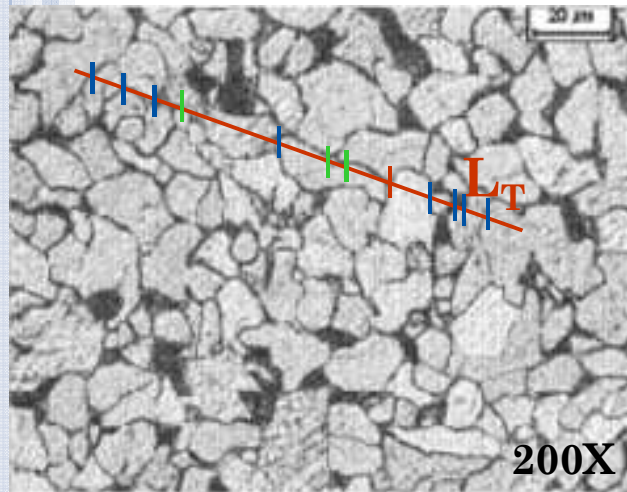
Intercepciones con BG = 1

Intercepciones con punto triple de grano = 1.5

Tangencia con BG = 0.5

# Medición del tamaño de grano

Cálculo del tamaño de grano → Método del intercepto de Heyn



Número de interceptos (N)

BG → 8 ⇒ 8 ptos.

Triple BG → 1 ⇒ 1.5 ptos.

Tangente a BG → 3 ⇒ 1.5 ptos.

N = 11

Número de interceptos por milímetro (N<sub>L</sub>)

$$N_L = \frac{N}{(L_T/M)} = \frac{11}{(60/200)} = 36.67 \text{ mm}^{-1}$$

$$G = [-6,6457 * \log(L_3)] - 3,298$$

$$G = 7.12 = 7$$

Longitud promedio (mm) → análogo al d<sub>prom</sub>

$$L_3 = 1 / N_L = 0.027 \text{ mm}$$

# Medición del tamaño de grano

Cálculo del tamaño de grano

Número ASTM de  
tamaño de grano

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

Número de granos por pulgada  
cuadrada en una fotomicrografía de  
100X

# Medición de dureza

**Dureza** → resistencia del material a una deformación plástica localizada,

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number*
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>{ Diamond cone</li> <li>{ <math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in. diameter steel spheres</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg } Rockwell</li> <li>100 kg }</li> <li>150 kg }</li> <li>15 kg } Superficial Rockwell</li> <li>30 kg }</li> <li>45 kg }</li> </ul>	

\* For the hardness formulas given,  $P$  (the applied load) is in kg, while  $D$ ,  $d$ ,  $d_1$ , and  $l$  are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

# Medición de dureza

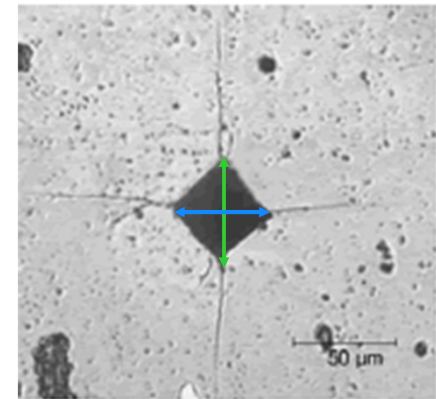
Dureza Vickers

$$\text{HV} = 1.854 P / d^2$$

$$d = (d_1 + d_2) / 2 = 46.5 \mu\text{m} = 0.0465 \text{ mm}$$

$$\text{HV} = 1.854 (1\text{kg}) / (46.5)^2$$

$$\text{HV} = 857$$



Indentación realizada sobre una cerámica BaTiO<sub>3</sub> con 1 kg de carga

**Taller de microestructuras:**

- ✓ Se realizará el día jueves 07/03/2013(semána 9) en horas de clase
- ✓ Deben traer regla, calculadora
- ✓ Traer formulario (1/2 página), sólo con fórmulas.
- ✓ Actividad grupal, 5 personas por grupo

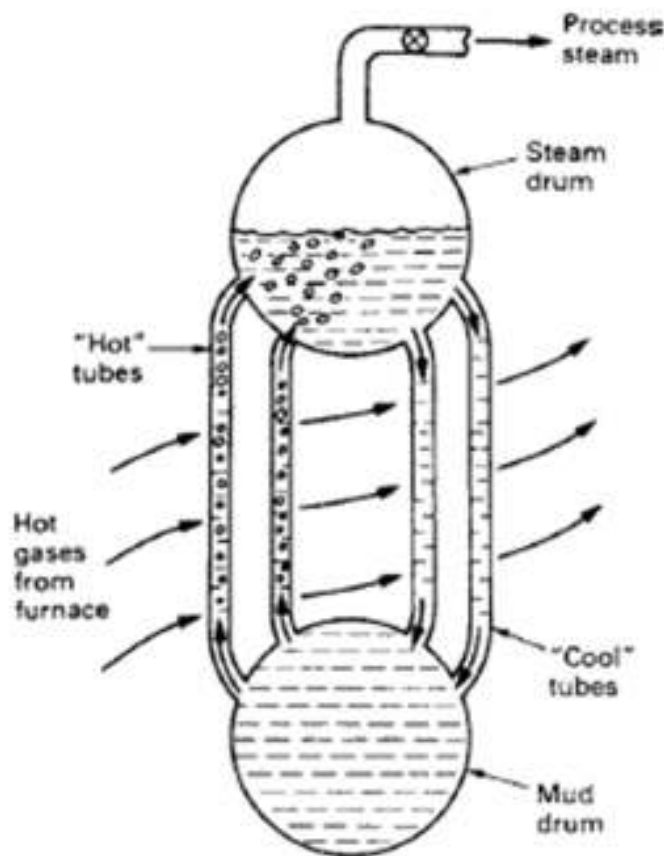


Casos prácticos: fallas y su relación  
con la microestructura

# EXPLOSIÓN DE UNA CALDERA

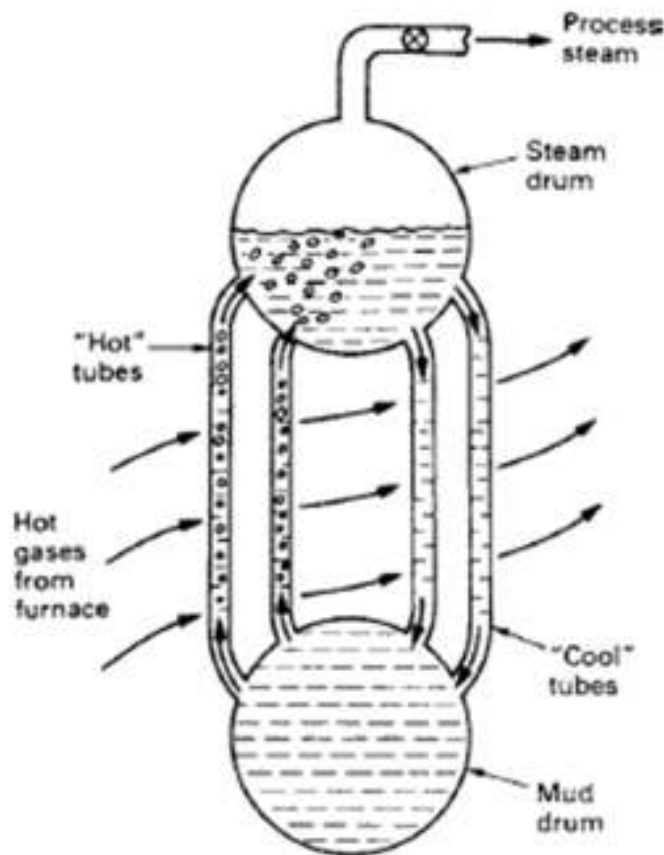
## Descripción de la situación

Cómo, mediante el conocimiento de la microestructura del acero, es posible hacerle seguimiento a una cadena de eventos que desencadenaron una falla de un material en servicio?



- ✓ La falla tuvo lugar en una caldera utilizada para la generación de vapor en una planta química:
- ✓ En el fondo de la caldera hay un contenedor cilíndrico que está a presión (*mud drum*), el cual contiene agua y sedimentos.
- ✓ En el tope de la caldera hay otro contenedor (*steam drum*) que contiene agua y vapor de agua.
- ✓ Los dos contenedores están conectados a través de 200 tubos a través de los cuales circula agua.
- ✓ Los tubos son calentados desde el exterior por los gases producto de la quema de combustible en el horno.
- ✓ El agua en los tubos calientes se mueve hacia arriba, mientras que el agua fría se mueve hacia abajo a través de los tubos.

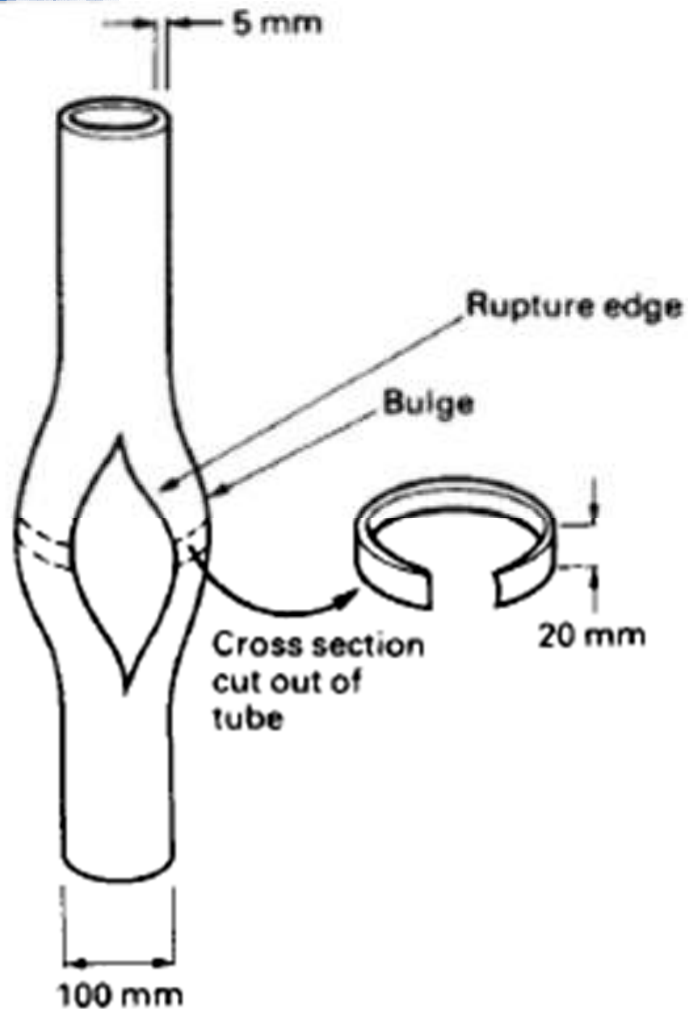
# EXPLOSIÓN DE UNA CALDERA



- ✓ Los tubos miden 10 m de longitud, tienen un diámetro exterior de 100mm y un espesor de pared de 5mm.
- ✓ Los tubos están fabricados de un acero Fe-0.18%C-0.45%Mn-0.20%Si
- ✓ La caldera opera a 50bar de presión y el agua alcanza los 264°C.
- ✓ Durante el incidente, algunos de los tubos calientes se sobrecalentaron y abombaron. Eventualmente, uno de los tubos se abrió un agujero que permitió la liberación del contenido de la caldera hacia el medio ambiente. Nadie resultó herido durante el incidente, pero tomó varios meses reparar la caldera y pérdidas de dinero.
- ✓ Para evitar que el incidente se repita, la empresa contrató a un especialista para realizar la inspección del tubo que falló y realizar el análisis de la falla.

# EXPLOSIÓN DE UNA CALDERA

## Procedimiento



1. Se cortó una sección del tubo que falló, de 20mm de longitud, en una zona que incluía la falla. Una de las superficies cortadas fue preparada metalográficamente (desbaste, pulido) y se le realizaron mediciones de dureza

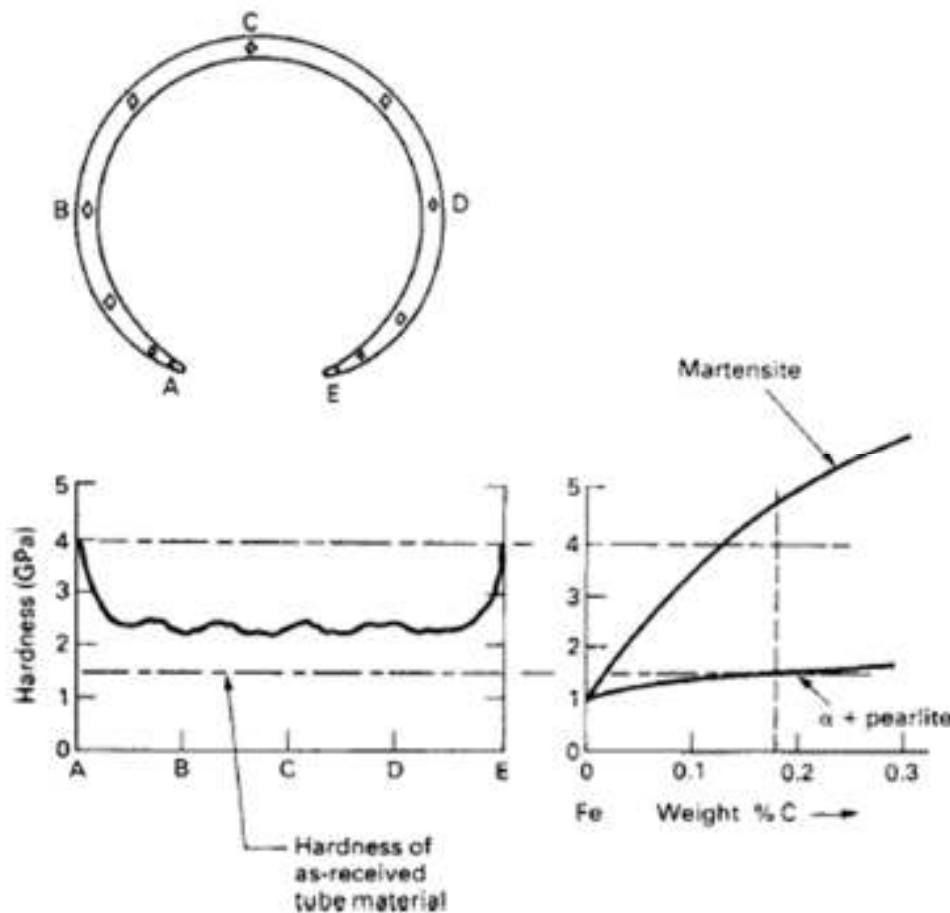
# EXPLOSIÓN DE UNA CALDERA

## Procedimiento

La dureza de la mayor parte de la sección estuvo alrededor de 2.2GPa, pero en los bordes de la falla alcanzó 4GPa. Esto es un indicativo de que la estructura en los bordes es distinta al resto de la tubería, la cual ha cambiado debido a la falla.

Otra medición de dureza, realizada a un tubo que no falló, reportó valores de dureza de 1.5GPa.

En función de los valores de dureza, es posible predecir que la microestructura en la zona cercana a la falla es martensítica, en la zona alejada es bainítica y en la tubería no fallada es ferrítica-perlítica



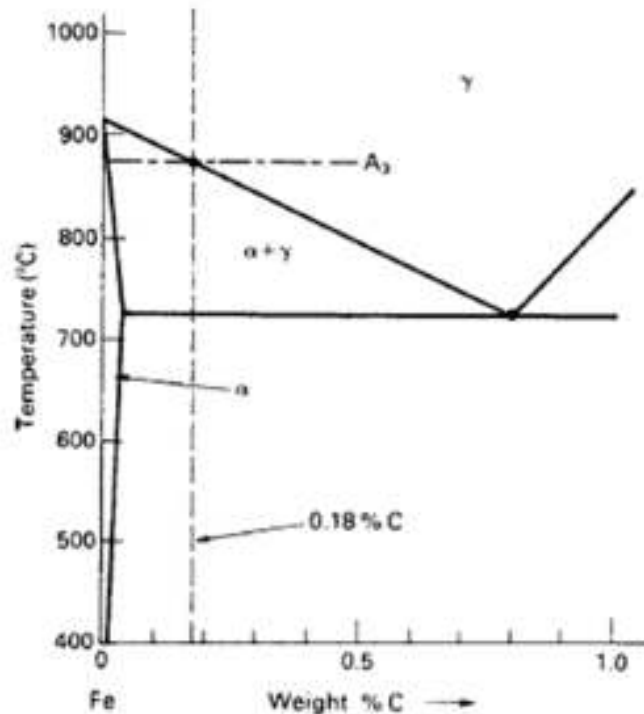


## Procedimiento

Para que en el acero (en la zona fallada) se haya formado martensita, es necesario que éste haya estado expuesto al menos a una temperatura cercana a  $A_3$  ( $870^{\circ}\text{C}$ ). Al ocurrir la ruptura del acero, el líquido contenido (agua y vapor) pudieron haber causado el temple del acero debido a un enfriamiento rápido hasta temperaturas cercanas a los  $264^{\circ}\text{C}$ .

La velocidad de enfriamiento es mayor en la zona de ruptura, debido a que es la zona expuesta al líquido y la zona más delgada (debido al hinchamiento o abombamiento del tubo). En el resto del tubo, la velocidad de enfriamiento fue menor, permitiendo la formación de bainita.

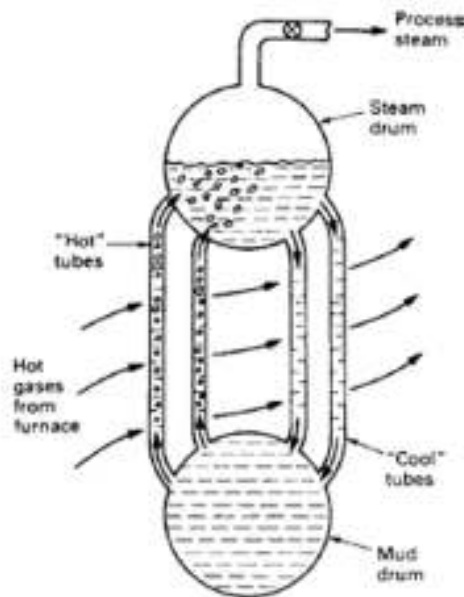
Debido al abombamiento de la tubería, hubo una reducción de espesor. Esta tubería debía soportar una presión de 50bar; sin embargo, al haber una reducción del espesor y a altas temperaturas, el material pudo fallar por termofluencia.



# EXPLOSIÓN DE UNA CALDERA

## Causa raíz

El material falló debido a termofluencia, debido a que el acero estuvo expuesto a altas temperaturas y debía soportar presión.....pero...cual fue la causa raíz de la falla? Que originó el aumento de la temperatura en primer lugar? La falla del material es la consecuencia, pero cual fue la causa?



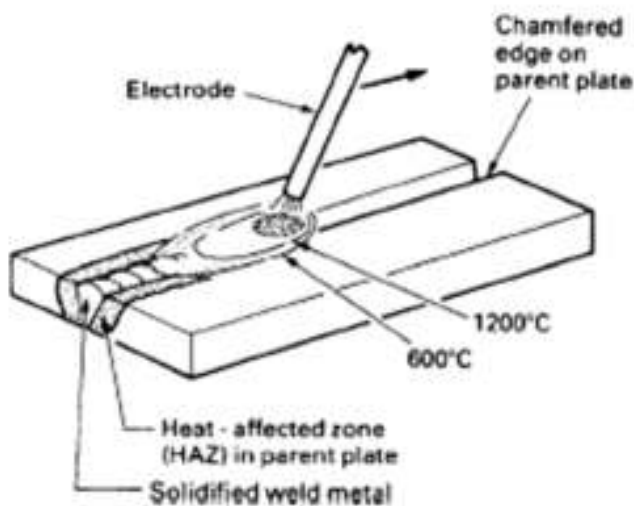
1. Es posible que el agua que alimenta a la caldera sea un agua dura y que no haya estado bien tratada, por lo que se pudo haber formado una capa de carbonatos sobre la pared interna del tubo. Esta capa de carbonatos es aislante y pudo haber contribuido a que el calor dentro de la tubería no se disipara. Al no disiparse el calor, la temperatura dentro del tubo aumenta, alcanzando temperaturas en las que el material puede fallar por termofluencia.
2. La circulación de agua en un sistema de convección natural (donde el líquido caliente fluye hacia arriba y el frío hacia abajo) puede no ser constante o el flujo puede ser bajo. Bajo estas condiciones es posible que se forme una capa muy delgada de vapor seco en la zona cercana a la superficie del tubo, la cual actúa como una capa aislante y permite el sobrecalentamiento de la tubería.

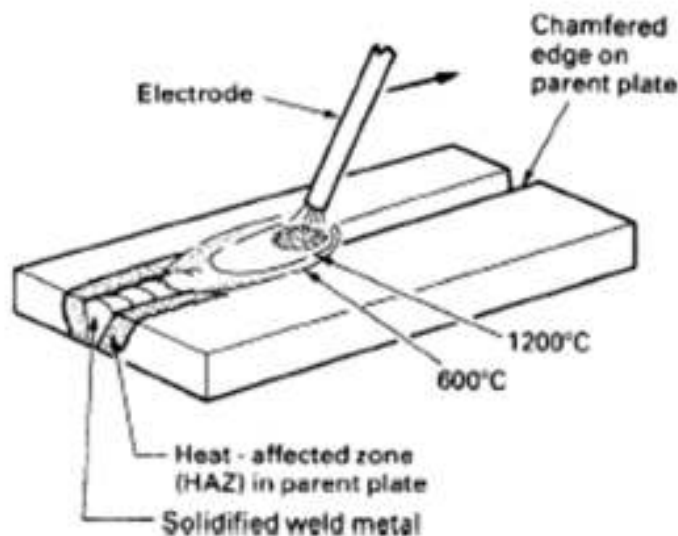
# SOLDADURA SEGURA

Muchas estructuras metálicas (puentes, tanques de almacenamiento, barcos) son unidas mediante la soldadura; y en la mayoría de los casos las fallas de estas estructuras puede estar asociada a una soldadura débil

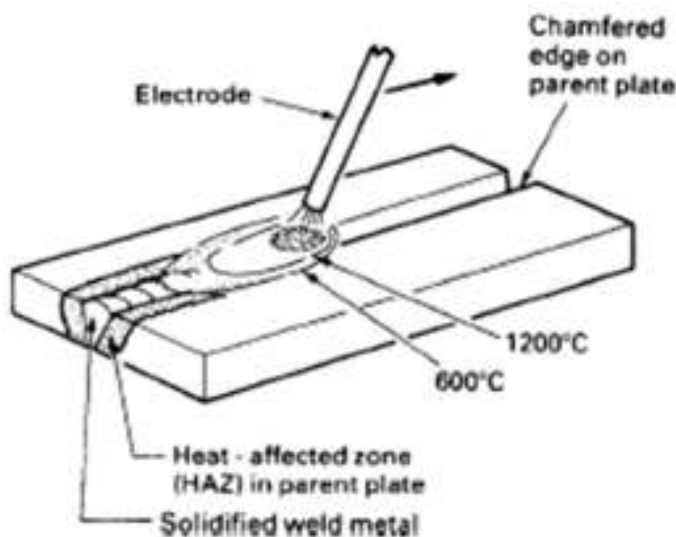
Aunque hay varios tipos de soldadura, una operación puede ser la siguiente:

1. Un arco eléctrico es formado entre la punta de un electrodo (el cual contiene un fundente y material de aporte) y las piezas metálicas a unir.
2. El calor del arco eléctrico funde el metal del material de aporte, el cual fluye hacia la zona de unión, formando una piscina de metal líquido.
3. Aunque ese líquido fundido pierde calor al entrar en contacto con el metal a soldar, el arco eléctrico le imprime suficiente energía para mantenerse en estado líquido. Incluso, esa energía es suficiente para fundir parte de los dos metales que se están uniendo mediante la soldadura.
4. A medida que el arco se mueve hacia adelante, la piscina de líquido dejada atrás se solidifica rápidamente, uniendo las dos piezas metálicas





Debido al proceso de soldadura, la temperatura en el metal varía. Debido a que el electrodo se mueve a lo largo de la soldadura, el calor generado se conduce a través del metal en forma de olas. El paso de estas ondas térmicas a lo largo de la soldadura favorece el calentamiento repentino del metal cercano a la piscina de metal líquido, y el calentamiento mas lento en la zona mas alejada. La sección del metal que se calienta a temperaturas cercanas a 650°C modifica sus propiedades debido a que ha estado expuesto a esa temperatura y a un posterior enfriamiento. Esta zona es llamada zona afectada por el calor (HAZ). En algunas zonas de la soldadura y del metal cercano, es posible alcanzar la temperatura crítica del diagrama TTT, y dependiendo del tamaño de grano del material es posible formar martensita en esta zona. Si ocurre la formación de martensita, entonces la soldadura será frágil y será un punto de falla de la estructura metálica.



Otro problema de las soldaduras, es que es posible la penetración de hidrógeno durante el procedimiento. Este hidrógeno (en forma atómica) puede difundir dentro del metal, y al encontrar un sitio favorable se puede recombinar para formar  $H_2$ . este hidrógeno molecular tiene mayor volumen, y si el material es frágil puede favorecer el agrietamiento bajo un mecanismo de agrietamiento por hidrógeno.



# SOLDADURA SEGURA

## Estructura metálica soldada de acero BS 4360 grado 43A

El acero BS 4360 es un acero estructural utilizado ampliamente en la construcción. El grado 43<sup>a</sup> tiene las siguientes especificaciones:  $C \leq 0.25\%$ ,  $Mn \leq 1.60\%$ ,  $Si \leq 0.5\%$ ,  $\sigma_{TS}$  430 a 510 MPa,  $\sigma_f \geq 240$  MPa

El porcentaje de carbono máximo es 0.25%, y con un porcentaje menor a 0.5% se minimiza la formación de la zona afectada por el calor. Sin embargo, los aceros tienen otros elementos aleantes que pueden contribuir a la formación de martensita:

Los aceros 4360 contiene manganeso. Este elemento es añadido para que reacciones con las impurezas de azufre; pero cualquier remanente de manganeso que no haya reaccionado se disuelve en la ferrita contribuyendo a un endurecimiento por solución y al aumento de la templabilidad del acero. Pero para saber cual es la contribución de cada uno de los elementos aleantes (distintos al carbono) es necesario calcular un carbono equivalente:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CE = 0.25 + \frac{1.6}{6} = 5.2$$

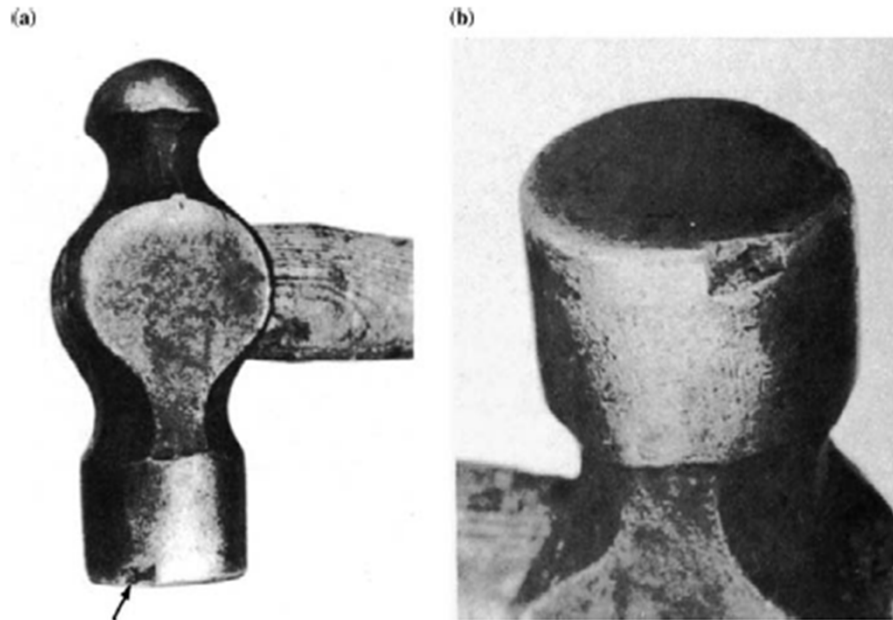
Suficiente para formar martensita en la zona cercana a la soldadura

# MARTILLO ROTO

## Descripción de la situación

Un señor que estaba martillando concreto con un martillo metálico, logró fracturarlo de forma tal que un fragmento de metal se desprendió y salió a gran velocidad. El señor pudo evitar el fragmento y debido a que usaba protección, no perdió el ojo.

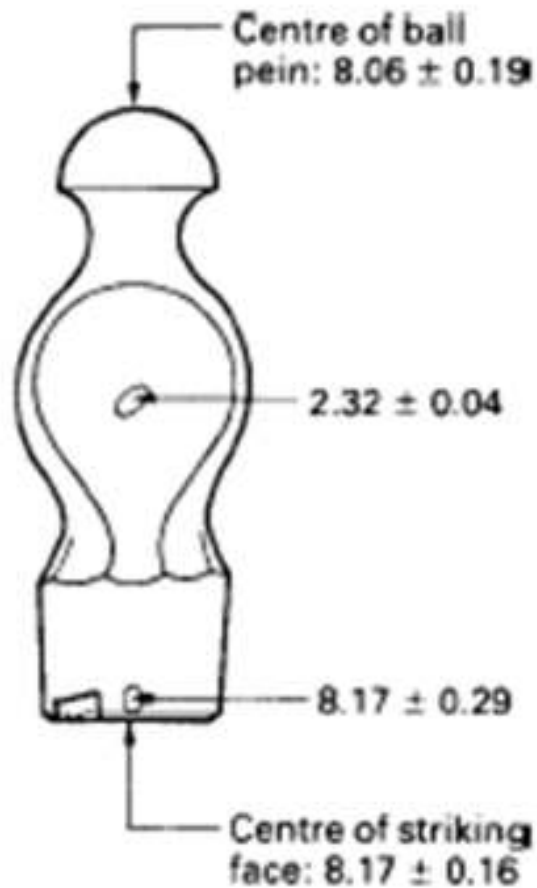
El martillo fue examinado para analizar si la fractura había sido causada por una falla en el tratamiento térmico del material.



# MARTILLO ROTO

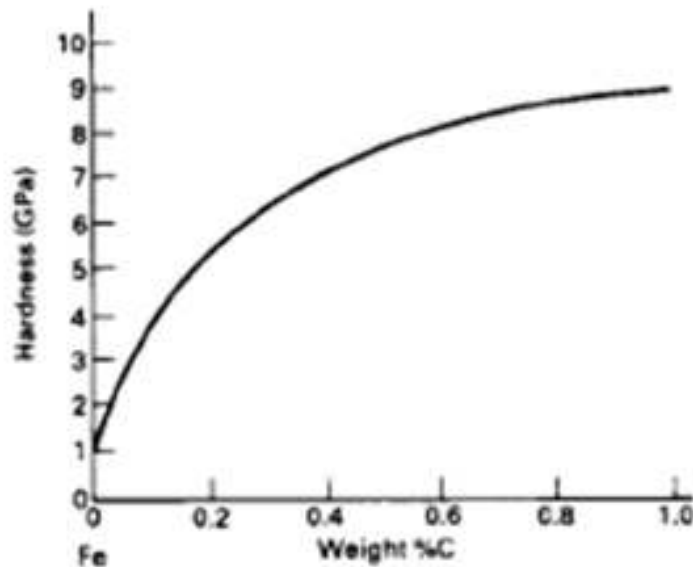
## Procedimiento

Lo primero que se hizo fue medir la dureza en varias secciones del martillo. La dureza del martillo era alta en los extremos, pero baja en el centro de la pieza metálica. El estándar británico (BS 876) establece que los martillos deben estar fabricados de un acero de medio carbono con los siguientes límites de composición: 0.5-0.6%C, 0.5-0.9%Mn y 0.1-0.4%Si. La dureza de este acero debería estar entre 1.8 y 2.2 GPa en estado de entrega. Este es un valor cercano al que se encontró en el centro del martillo, pero mucho menor al encontrado en los extremos. De este modo, los extremos del martillo ya no se encuentran en estado de entrega, sino que han sido tratados térmicamente (endurecimiento por temple)



# MARTILLO ROTO

## Procedimiento



La dureza de la martensita no revenida, de un acero 0.55%C está alrededor de 8GPa; lo cual corresponde con la dureza medida en los extremos del martillo, lo que indica que el martillo no fue revenido. El estándar británico establece que el acero debe ser templado y luego revenido para llevar la dureza a 5.1-6.6GPa. Pero como fue posible fabricar el martillo con los extremos endurecidos sin endurecer el centro?

## Fabricación de los martillos

El martillo se realiza de la siguiente manera:  
La cabeza del martillo es formada por deformación en caliente y luego se deja enfriar lentamente hasta temperatura ambiente.  
La superficie de golpeteo y la punta se forman mediante desbaste de la cabeza del martillo hasta dar la forma deseada. La superficie de golpeteo es austenizada de acuerdo al procedimiento de la figura y luego templada en agua fría. Luego se voltea y se repite el procedimiento. De modo que las únicas partes endurecidas son la punta y la superficie. Luego el material es revenido haciendo la inmersión de la cabeza en un baño de sales fundidas a 450°C. Finalmente la cabeza es removida de la sal fundida, lavada en agua fría.  
Este procedimiento complicado, debe ser cuidadosamente realizado para asegurar que todos los martillos (fabricados en serie) tengan las propiedades finales requeridas por la norma

