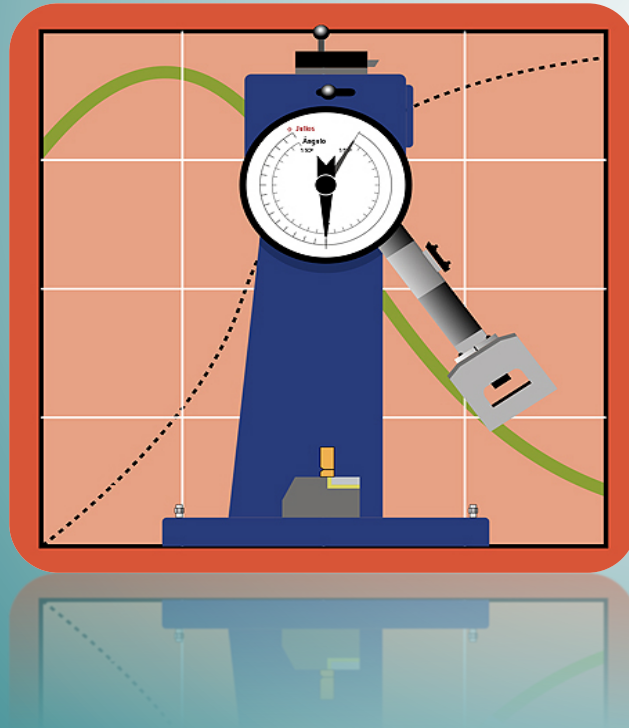


# Materiales-G704/G742

## Lección 11. Aleaciones férreas



**Jesús Setién Marquínez**  
**Jose Antonio Casado del Prado**  
**Soraya Diego Cavia**  
**Carlos Thomas García**

Departamento de Ciencia e Ingeniería del  
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## 11.1 INTRODUCCIÓN

Las aleaciones férricas son las de mayor empleo en ingeniería:

- En la corteza terrestre abundan los compuestos de hierro.
- Se fabrican en procesos relativamente económicos.
- Son extremadamente versátiles.

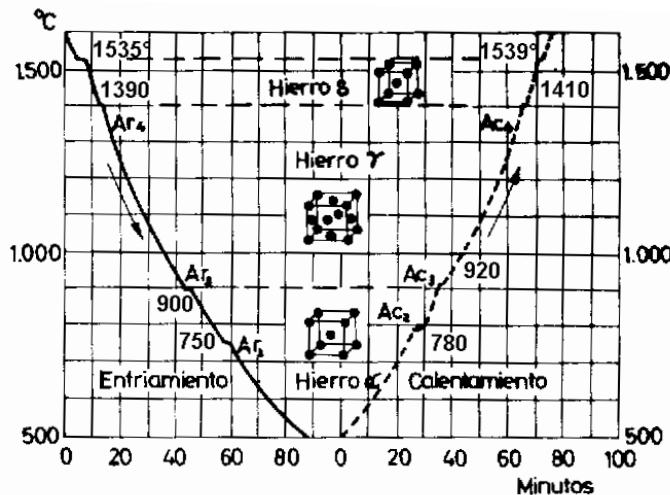
Inconveniente: elevada susceptibilidad a la corrosión:

- Dos categorías:
  - **Aceros** ( $0,05\% < C < 2\%$ ).
  - **Fundiciones** ( $2\% < C < 4,5\%$ ).

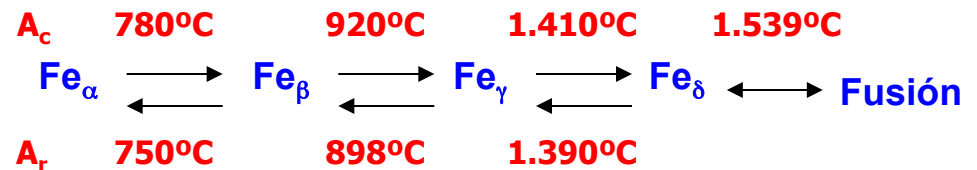
Su estudio ha contribuido al de los materiales metálicos y al desarrollo de la Ciencia de Materiales, dando lugar a una rama separada de la Metalurgia que se conoce con el nombre de **Siderurgia**.

## 11.2 PROPIEDADES Y ESTRUCTURA DEL HIERRO PURO

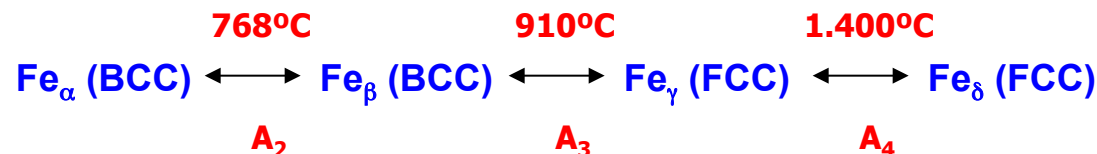
Fe: metal blanco azulado, dúctil y maleable. Densidad 7,87 g/cm<sup>3</sup>. Funde de 1.536 a 1.539°C.



• 4 variedades alotrópicas:



Si las velocidades de calentamiento o enfriamiento fueran infinitamente lentas:



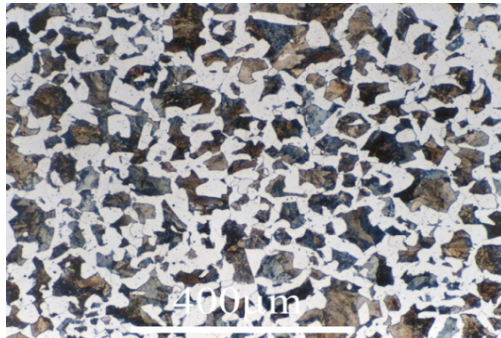
VARIEDADES ALOTRÓPICAS DEL HIERRO PURO

| Temperaturas    | Formas alotrópicas | Sistema cristalino | Parámetros | Propiedades magnéticas |
|-----------------|--------------------|--------------------|------------|------------------------|
| Hasta 768°      | $\alpha$           |                    | 2.86 Å     | MUY MAGNÉTICA          |
| 768° a 910°     | $\beta$            |                    | 2.90 Å     | DÉBILMENTE MAGNÉTICA   |
| 910° a 1.400°   | $\gamma$           |                    | 3.60 Å     | NO MAGNÉTICA           |
| 1.400° a 1.539° | $\delta$           |                    | 2.93 Å     | DÉBILMENTE MAGNÉTICA   |

## 11.3 CONSTITUYENTES DE LAS ALEACIONES HIERRO - CARBONO

Las aleaciones están formadas por constituyentes cuya naturaleza varía según las proporciones de los componentes de la aleación y la temperatura.

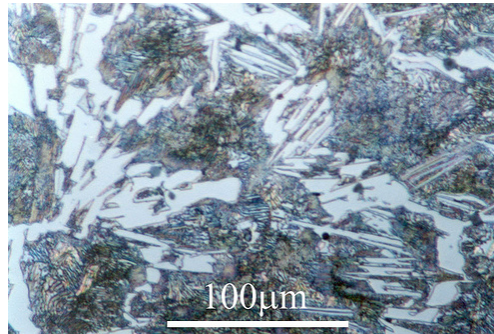
### FERRITA



Solución sólida de carbono en  $Fe_{\alpha}$  con una solubilidad máxima de 0.02% (a 723°C).

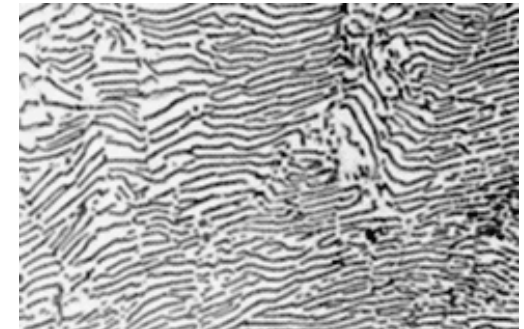
Es el constituyente más blando y dúctil.

### CEMENTITA



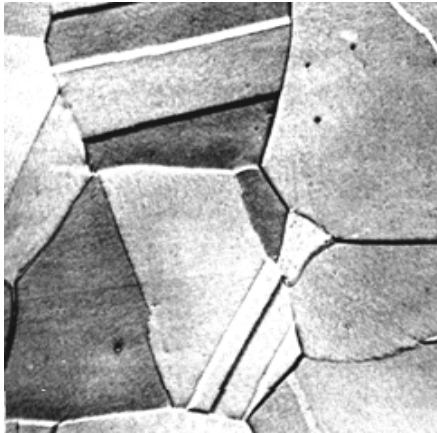
Es el carburo de hierro ( $Fe_3C$ ) y es el constituyente más duro y frágil de los aceros.

### PERLITA

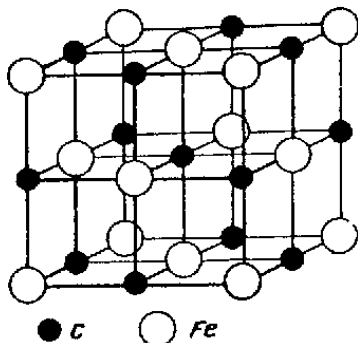


Constituyente eutectoide compuesto por 86.5% de ferrita y 13.5% de cementita.

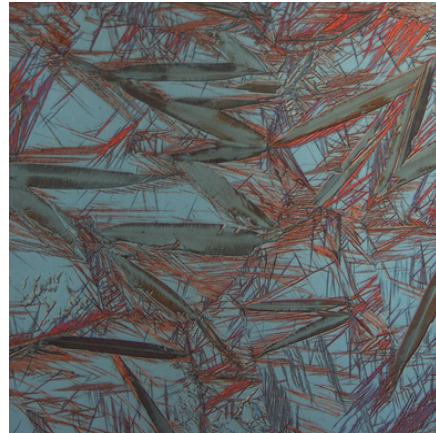
## AUSTENITA



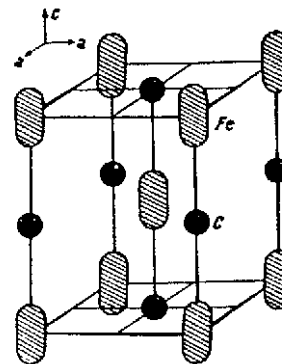
Solución sólida por inserción de C en  $Fe_\gamma$ .  
Es muy dúctil, tenaz y resistente al desgaste.



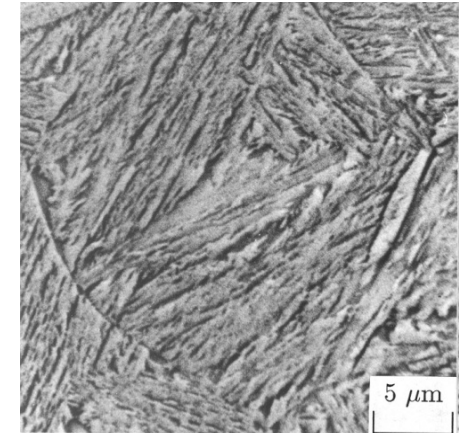
## MARTENSITA



Solución sólida sobresaturada de C en  $Fe_\alpha$  obtenida por enfriamiento muy rápido.



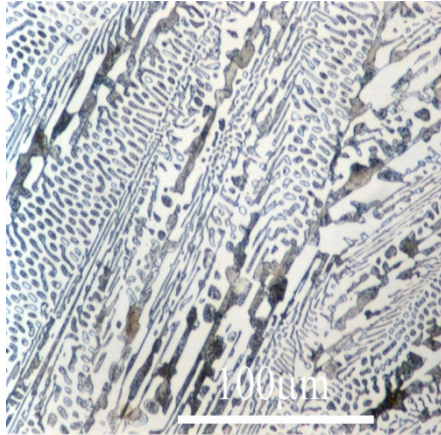
## BAINITA



Procede de la transformación isotérmica de la austenita [250 - 550] °C:

- Bainita superior: 400 - 550°C.
- Bainita inferior: 250 - 400°C.

### LEDEBURITA



Constituyente eutéctico de las fundiciones formado por austenita y cementita.

### STEADITA



Constituyente de las fundiciones de más de 0,15% de fósforo. Es muy dura y frágil.

### GRAFITO



Variedad alotrópica de carbono libre que se presenta en determinadas fundiciones.

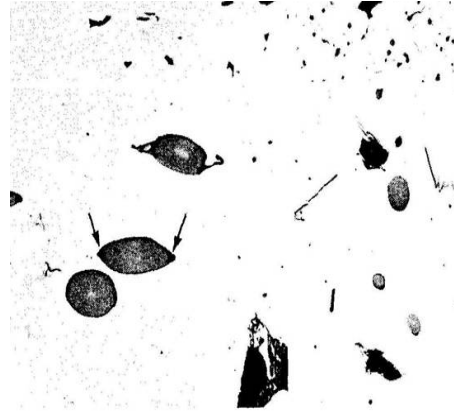
- Hay otros elementos que pueden encontrarse en diferentes formas:

### CARBUROS



Pueden ser de Cr, Mo, W, Mn y V. Son más duros aún que la martensita.

### EMULSIONADOS



El Cu y el Pb pueden formar bolsas muy pequeñas en la masa del acero

### INCLUSIONES



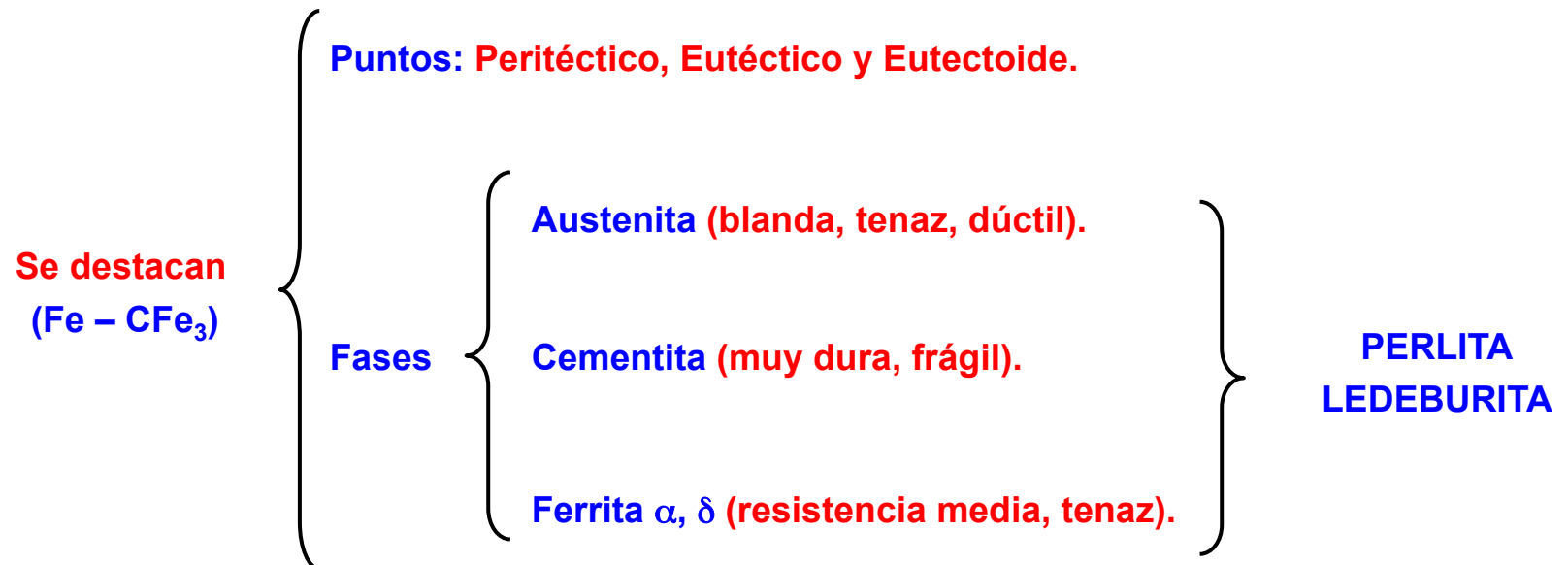
(SMn,  $Al_2O_3$ , silicatos...) procedentes de refractarios de los hornos y las escorias.

### Disueltos en la ferrita

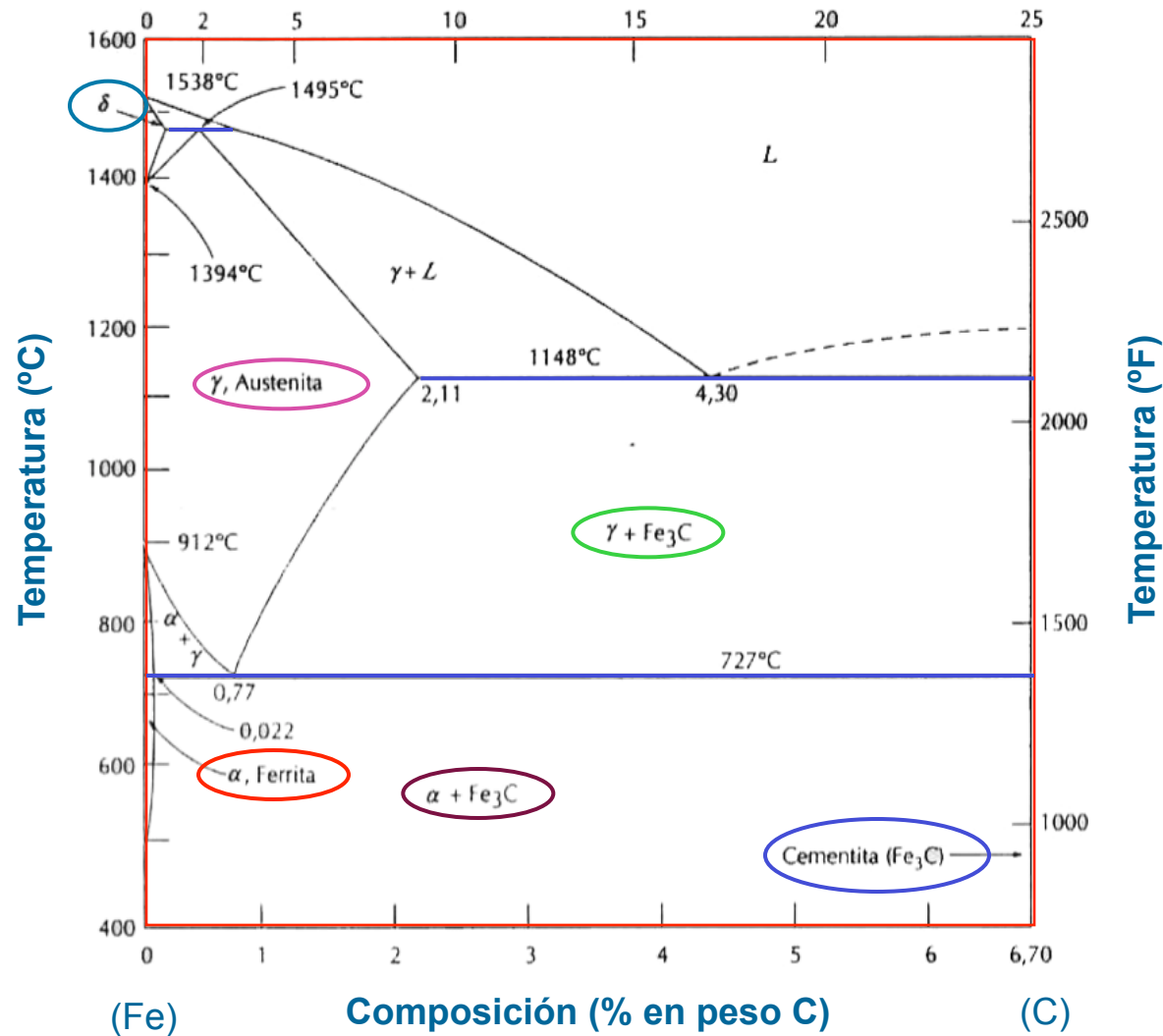
Ni, Cr, Si, Mn, Cu y P formando soluciones sólidas.

## 11.4 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO

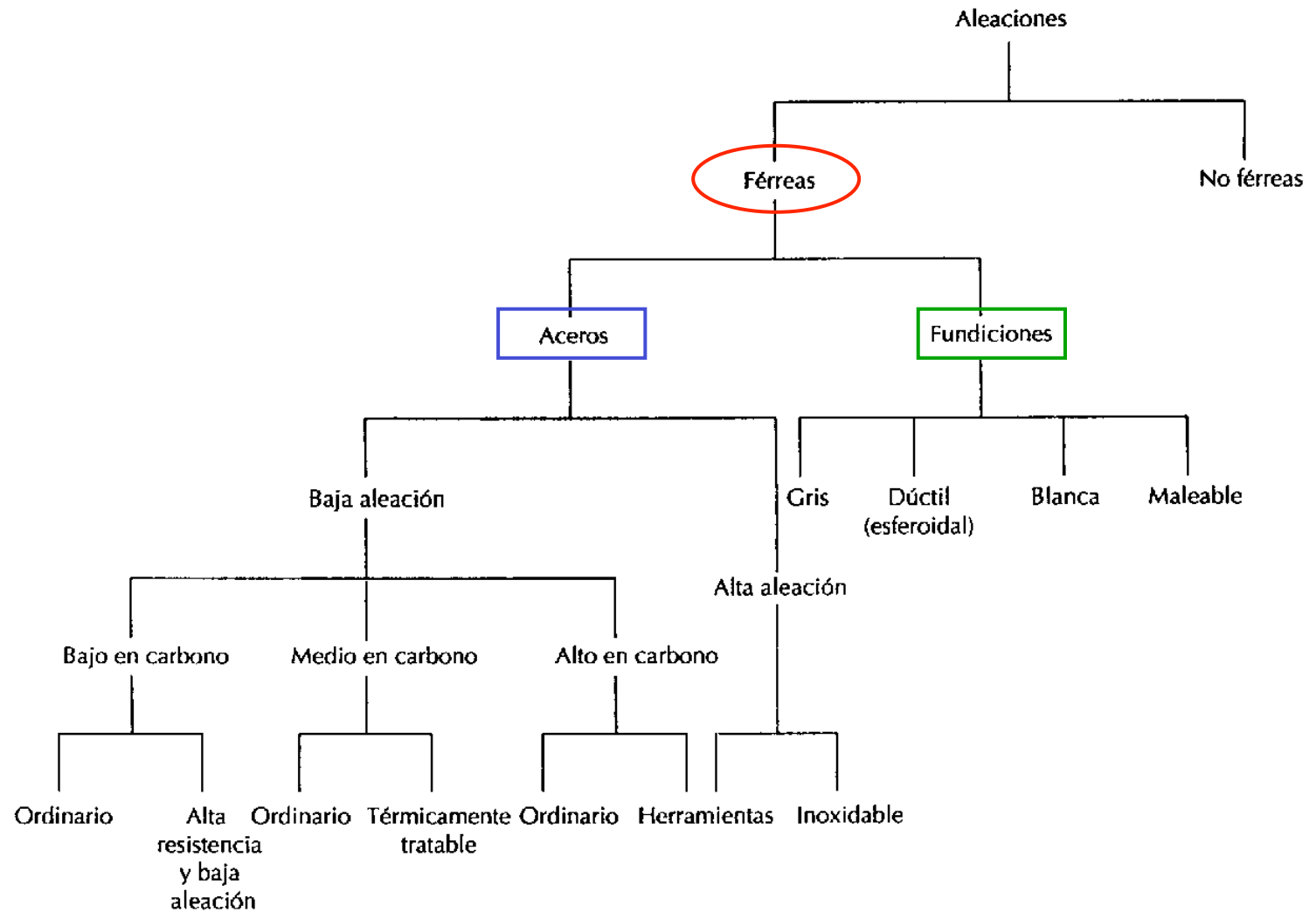
Muestra los constituyentes de las aleaciones Fe – C según el contenido de carbono y la temperatura a que se encuentran, en condiciones de equilibrio.



Composición (% atómico C)



## 11.5 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES FÉRREAS



## 11.6 ACEROS: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

### 1. Aceros bajos en Carbono (%C < 0,25):

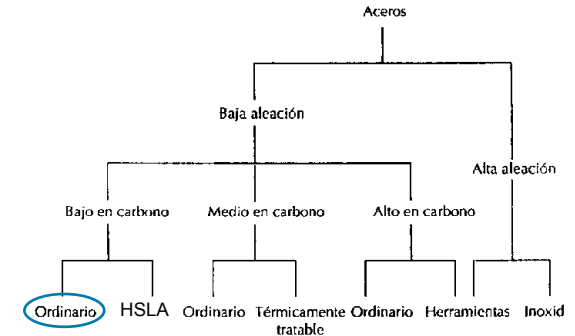
#### 1.1 Ordinarios:

##### Características:

- Constituyen el mayor porcentaje del volumen de la producción de aceros.
- No son templeables.
- Son endurecibles por deformación (acritud).
- Microestructura ferrita + perlita.
- Son blandos y poco resistentes ( $\sigma_Y = 275$  MPa,  $\sigma_R = 415 - 550$  MPa), pero muy dúctiles ( $\epsilon_R = 25\%$ ) y tenaces.
- Son de fácil mecanización, soldables y baratos.

##### Aplicaciones:

- Carrocerías de automóviles.
- Vigas.
- Láminas para tuberías, edificios y puentes.
- Latas estañadas.



## 11.6 ACEROS: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

### 1. Aceros bajos en Carbono (%C < 0,25):

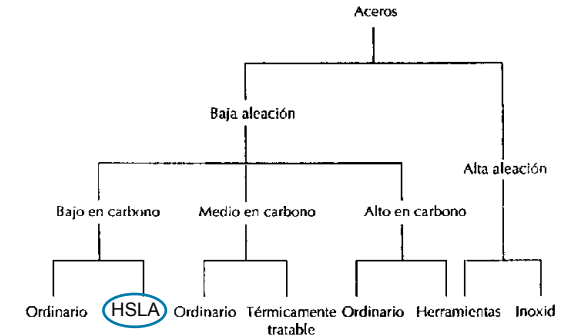
#### 1.2 Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA):

##### Características

- Suma de elementos de aleación (Cu, V, Ni, Mo...) en torno al 10% peso.
- Alta resistencia ( $\sigma_y > 480$  MPa).
- Son dúctiles, hechurables y mecanizables.
- En ambiente atmosférico son más resistentes a la corrosión.

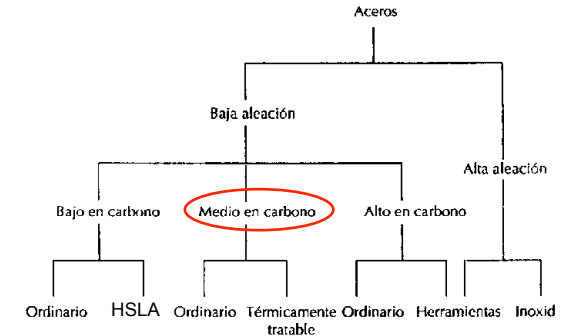
##### Aplicaciones:

- Puentes.
- Torres.
- Recipientes a presión.
- Columnas de soporte para altos edificios.



## 11.6 ACEROS: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

### 2. Aceros medios en Carbono ( $0,25 < \%C < 0,60$ ):

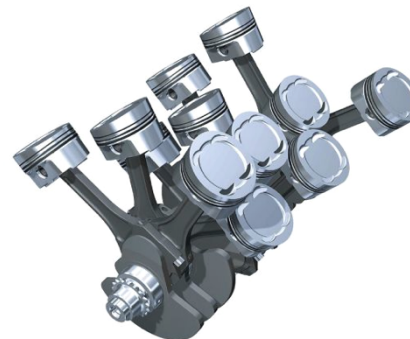


#### Características:

- Admiten tratamientos térmicos (temple y revenido) en piezas de delgada sección.
- Microestructura de martensita revenida.
- Las adiciones de Cu, Mo y Ni mejoran la templabilidad.
- Son más resistentes ( $\sigma_Y = 430 - 830 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_R = 600 - 1.300 \text{ MPa}$ ), pero menos dúctiles ( $\epsilon_R = 10 - 25\%$ ) y menos tenaces.

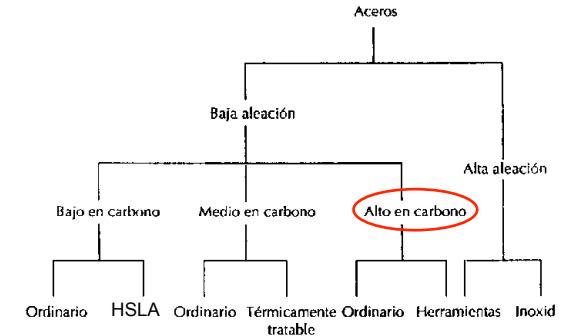
#### Aplicaciones:

- Ruedas y carriles para trenes.
- Engranajes.
- Cigüeñales.
- Pernos.
- Ejes.
- Pistones.



## 11.6 ACEROS: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

### 3. Aceros altos en Carbono ( $0,60 < \%C < 1,40$ ):



#### Características:

- Son aún más duros y resistentes pero de baja ductilidad.
- Se usan en la condición de templado y revenido, mostrando alta resistencia al desgaste.
- Microestructura de martensita revenida.
- Los elementos de aleación (Cr, V, W y Mo) se combinan con el C para formar carburos muy duros y resistentes a la abrasión ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{V}_4\text{C}_3$ ,  $\text{WC}$ ...).

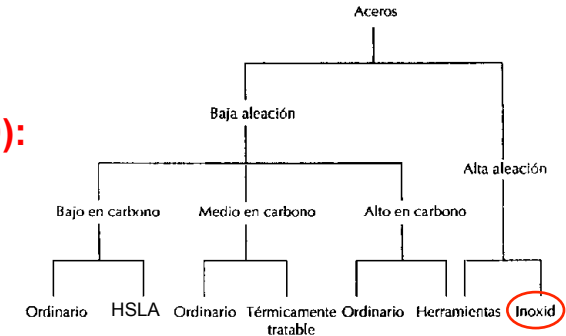
#### Aplicaciones:

- Herramientas de corte.
- Matrices y troqueles.
- Brocas.
- Cuchillos, navajas, hojas de sierra.



## 11.6 ACEROS: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

### 4. Aceros Inoxidables (usualmente $\%C < 0,20$ ; $11 < \%Cr < 20$ ):



#### Características:

- Resisten la corrosión, especialmente en ambiente atmosférico.
- La resistencia a la corrosión se mejora con Ni ( $< 12\%$ ) y Mo.
- Microestructura martensítica. Son magnéticos.

#### Propiedades mecánicas:

$$\sigma_Y = 275 - 1.650 \text{ MPa}, \sigma_R = 500 - 1.800 \text{ MPa}, \varepsilon_R = 5 - 25\%$$

- Microestructura ferrítica. Endurecen por acritud ya que no son templables. Son magnéticos.

#### Propiedades mecánicas:

$$\sigma_Y = 250 - 350 \text{ MPa}, \sigma_R = 450 - 550 \text{ MPa}, \varepsilon_R = 20 - 25\%$$

- Microestructura austenítica. Endurecen por acritud (no son templables). No son magnéticos.

#### Propiedades mecánicas:

$$\sigma_Y = 240 \text{ MPa}, \sigma_R = 550 - 600 \text{ MPa}, \varepsilon_R = 50 - 55\%$$

- Microestructura dúplex (austeno-ferríticos). Propiedades intermedias.

#### Aplicaciones:

- Tubos de escape, válvulas, turbinas de gas.
- Instrumental quirúrgico, cubertería, aviones...



## 11.7 FUNDICIONES: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

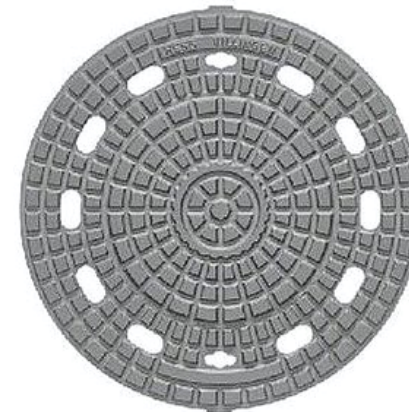
### Características:

- Aleaciones Fe – C con un contenido en carbono superior al 2% (típicamente  $3 < \%C < 4,5$ ).
- Funden a temperaturas más bajas que los aceros ( $1.150 - 1.300^{\circ}\text{C}$ ) → moldeo.
- No trabajables por deformación en caliente.
- Baja ductilidad y poco tenaces.
- Resistentes a la vibración y al desgaste.
- En general no son soldables.



### Tipos:

- Fundición **gris**.
- Fundición **dúctil**.
- Fundición **blanca**.
- Fundición **maleable**.



## Fundición gris:

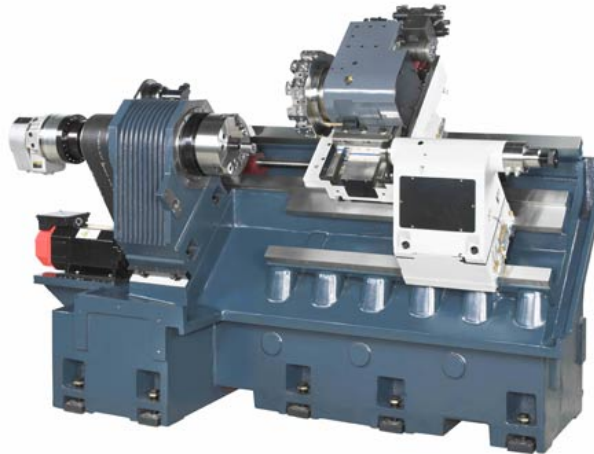
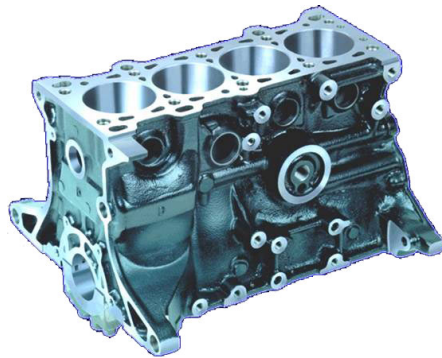
$2.5 < \%C < 4$  ;  $1 < \%Si < 3$

El Carbono libre aparece en forma de láminas de grafito en matriz de ferrita o perlita.

Son frágiles y poco resistentes a la tracción ( $\sigma_R = 175 - 275$  MPa).

Amortiguación, alta resistencia al desgaste, elevada fluidez en la colada y bajo coste.

Aplicaciones: Bloques de motores, tambores de freno, bancadas para máquinas y equipos.



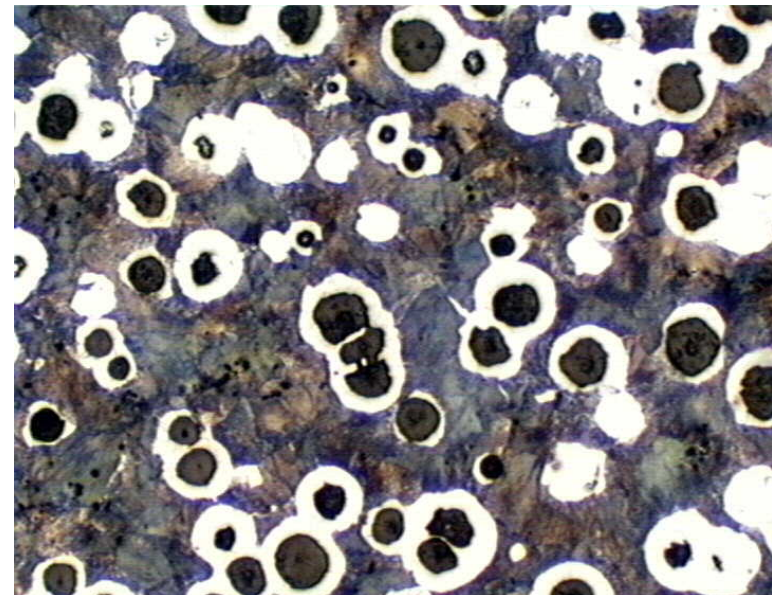
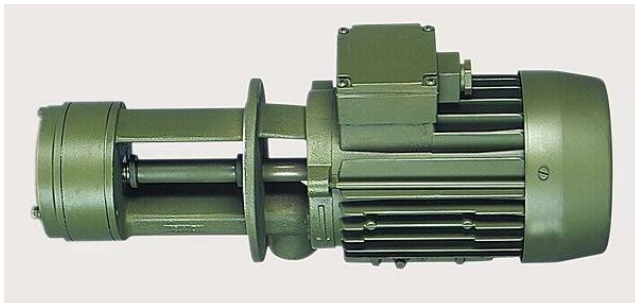
## Fundición dúctil (nodular o eferoidal):

Se añaden pequeñas cantidades de elementos nodulizadores (Magnesio y/o Cerio) a la fundición gris.

El grafito forma esferoides en una matriz de ferrita o perlita.

Es más resistente ( $\sigma_R = 150 - 825 \text{ MPa}$ ) y más dúctil ( $\epsilon_R = 18 - 2\%$ ) que la fundición gris.

Aplicaciones: Válvulas, cuerpos de bombas, cigüeñales y otros componentes de automóvil y maquinaria.



## Fundición Blanca:

Bajo contenido en carbono:  $2,3 < \%C < 3$ .

$\%Si < 1\%$ .

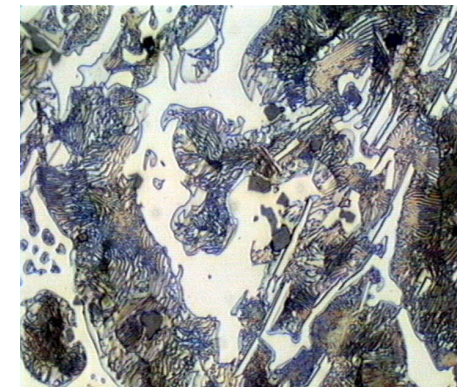
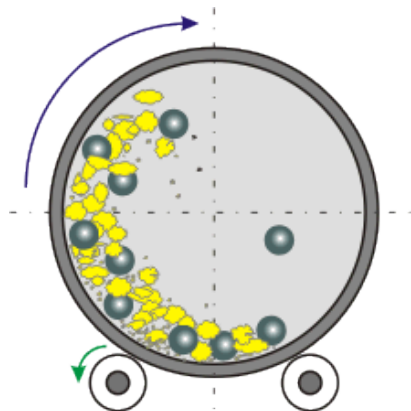
Velocidad de enfriamiento rápida.

C aparece como cementita ( $Fe_3C$ ) en lugar de grafito.

Es extremadamente dura y muy frágil, hasta llegar a ser inmecanizable.

Es el producto de partida para fabricar fundición maleable.

Aplicaciones: cilindros de trenes de laminación, bolas de molinos, mandíbulas para trituradoras de mineral.



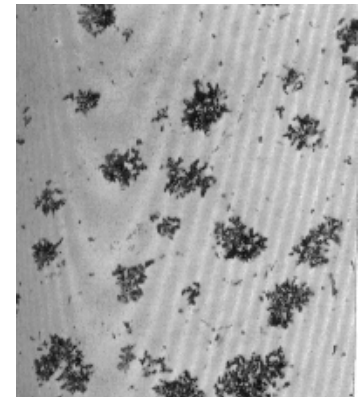
## Fundición Maleable:

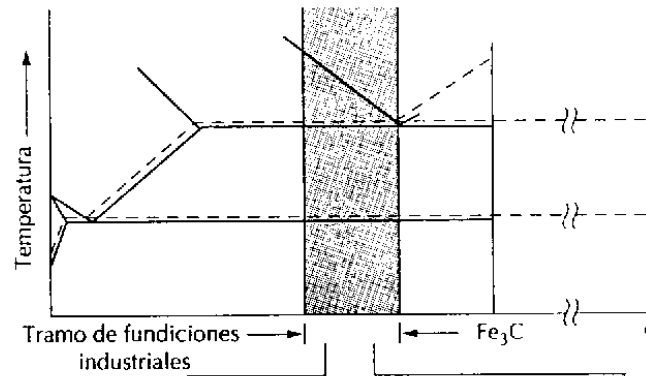
Calentando la fundición blanca entre 800 y 900°C durante largo tiempo (recocido) se obtiene la fundición maleable.

La cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) se descompone y forma grafito en forma de racimos o rosetas dentro de una matriz ferrítica o perlítica.

Presenta propiedades mecánicas comparables a las de la fundición dúctil.

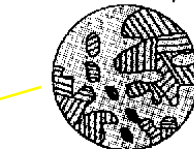
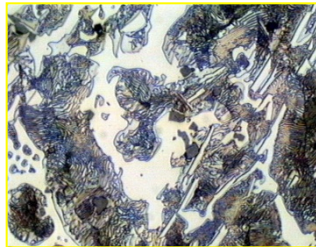
Aplicaciones: tubos de dirección, engranajes de transmisión, cajas de diferencial...





| Enfriamiento rápido | Moderado  | Enfriamiento lento |
|---------------------|-----------|--------------------|
| $P + Fe_3C$         | $P + G_f$ | $\alpha + G_f$     |

| Moderado  | Enfriamiento lento |
|-----------|--------------------|
| $P + G_n$ | $\alpha + G_n$     |



Fundición blanca



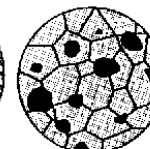
Fundición gris perlítica



Fundición gris ferrítica



Fundición dúctil perlítica



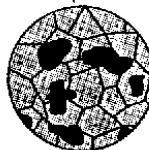
Fundición dúctil ferrítica

Vuelta a calentar a 700°C durante + de 30 h

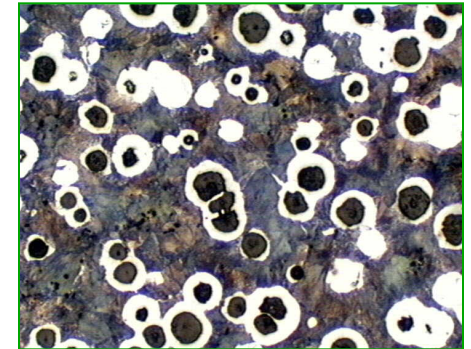
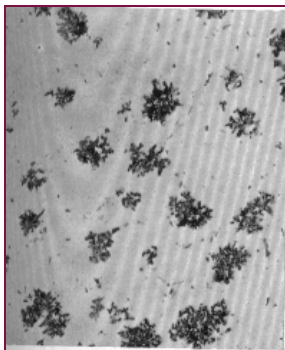
| Enfriamiento rápido | Enfriamiento lento |
|---------------------|--------------------|
| $P + G_r$           | $\alpha + G_r$     |



Maleable perlítica



Maleable ferrítica

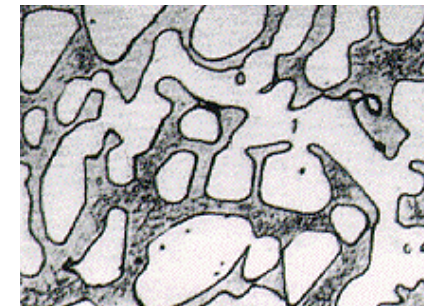
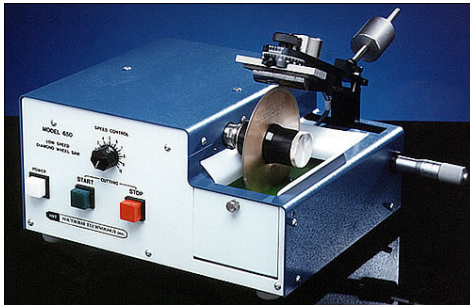


## 11.8 METALOGRAFÍA

Las distintas regiones de la microestructura de los metales y aleaciones originan diferencias en la reflexión de la luz y permiten obtener imágenes contrastadas.

Preparación de las superficies: corte, encapsulado, desbaste, pulido y ataque para revelar los detalles de la microestructura (fases, granos...).

Observación: técnicas de microscopía óptica.



## 11.9 TAMAÑO DE GRANO

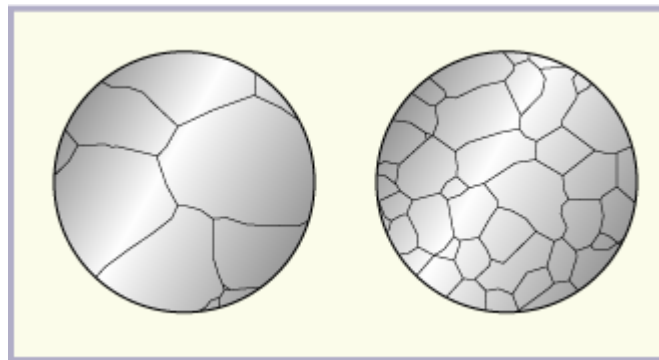
La mayoría de los sólidos cristalinos están constituidos por un conjunto de muchos cristales pequeños o **granos** (materiales policristalinos).

El **tamaño de grano** condiciona las propiedades de los metales y aleaciones.

Existen distintos métodos de determinación de este parámetro:

### Método ASTM

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



### Método UNE

$$m = 8 \times 2^G$$

- **N = índice de tamaño de grano ASTM.**
- **G = índice de tamaño de grano UNE.**
- **n = número de granos en una pulgada cuadrada a 100x.**
- **m = número de granos en 1 mm<sup>2</sup>.**

Ambos índices son prácticamente equivalentes:

$$N - G = 0.0458$$