

# Unidad 4

# SOLIDIFICACIÓN

*Ciencia de los materiales*

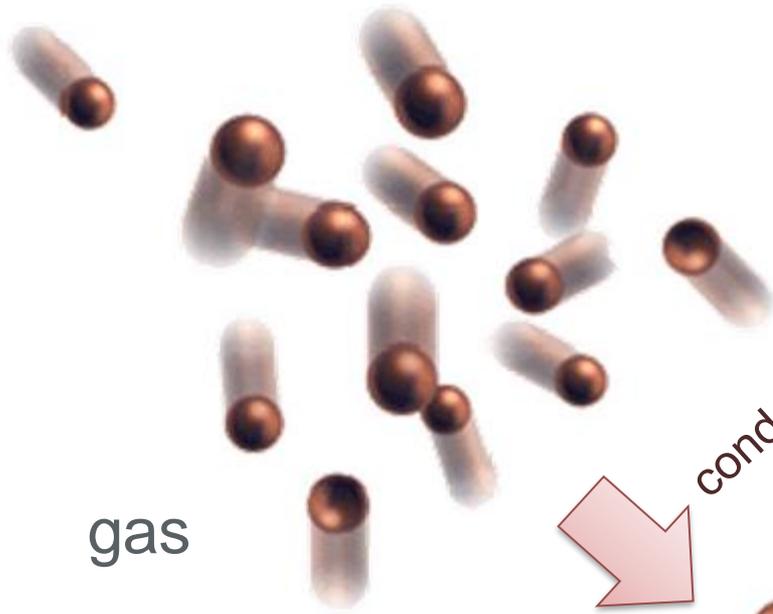
*2021*

# TEMARIO

- Solidificación de metales
- Mecánica de la solidificación
- Nucleación homogénea y heterogénea
- Defectos de las estructuras

# Importancia de su estudio

El proceso de solidificación de un metal o aleación metálica define gran parte de sus propiedades mecánicas.



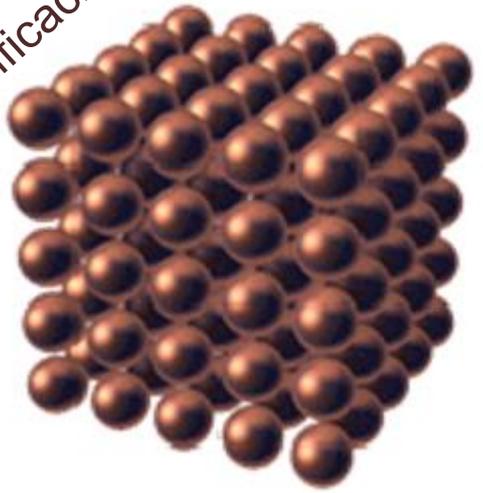
gas

condensación



líquido

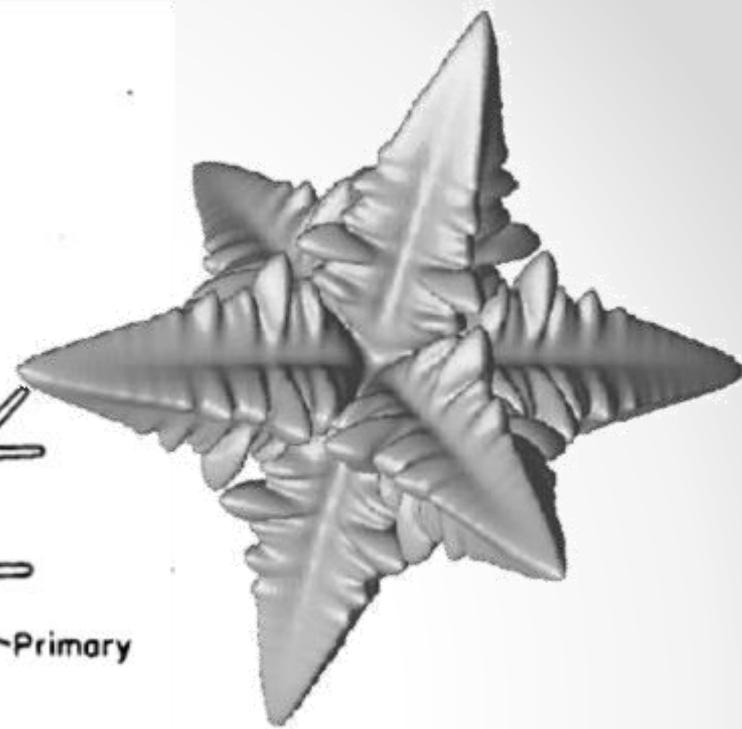
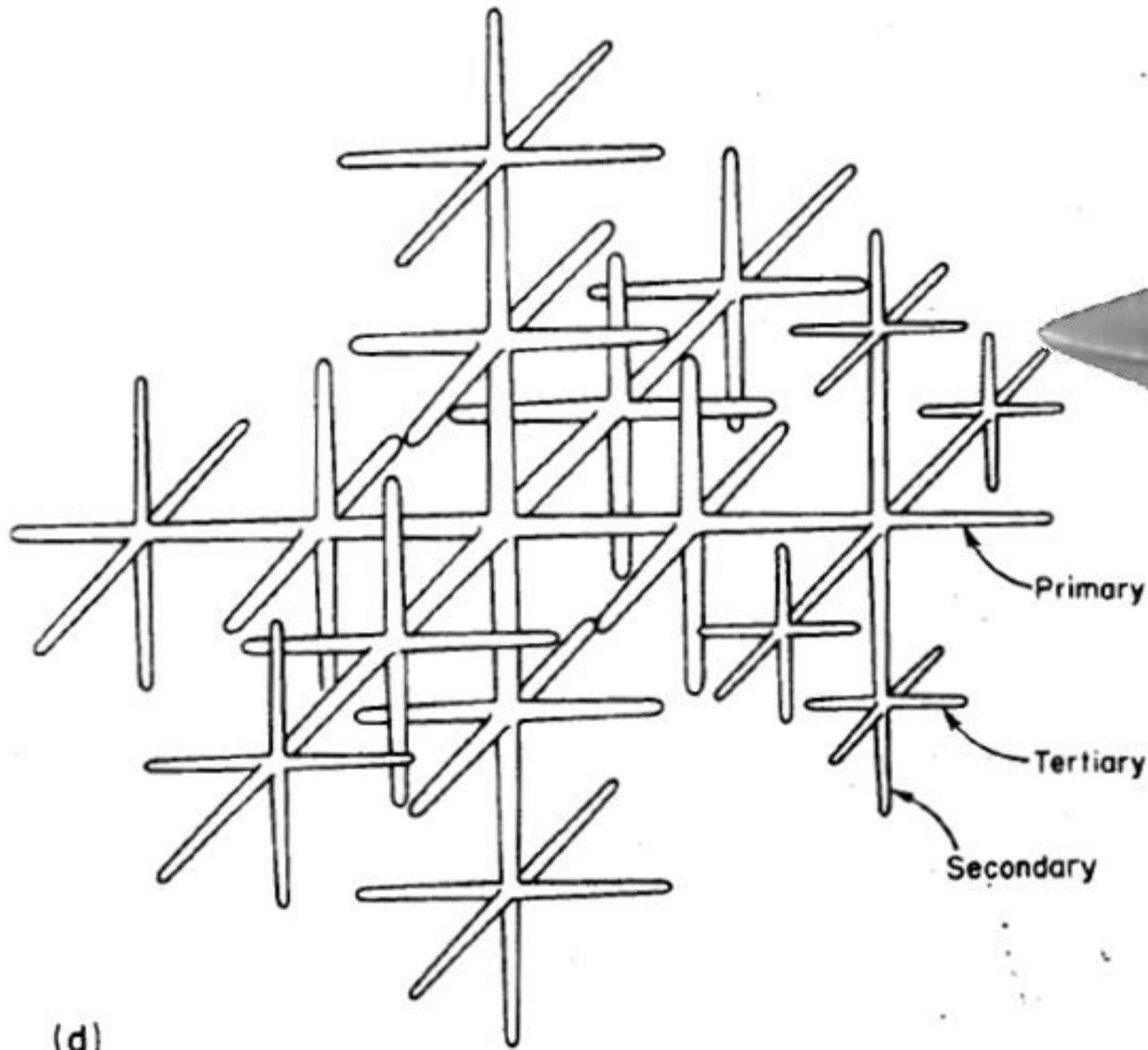
solidificación



sólido

# Mecanismo de solidificación

- 1 Nucleación: formación de núcleos estables en el metal fundido por agrupación de átomos.
- 2 Crecimiento: aumento de tamaño de los núcleos para formar cristales y la estructura granular.

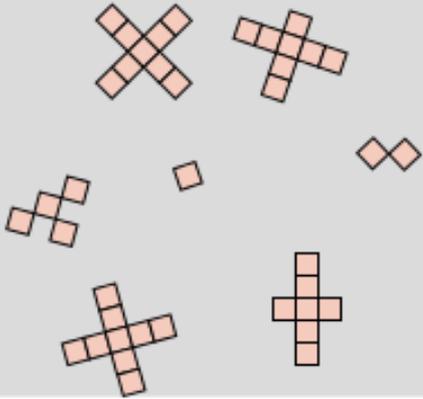


(d)

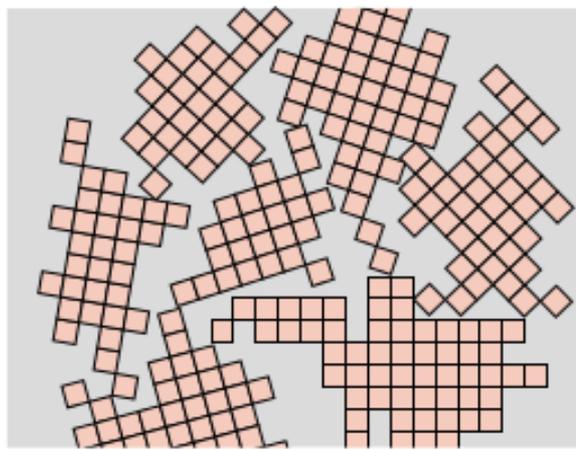
# DENDRITAS

80 μm

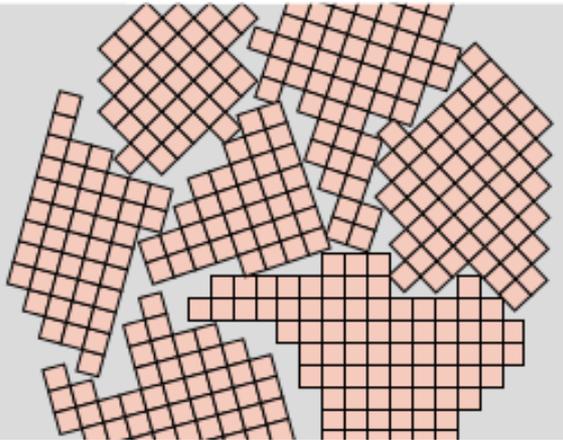
# CRECIMIENTO Y BORDE DE GRANO



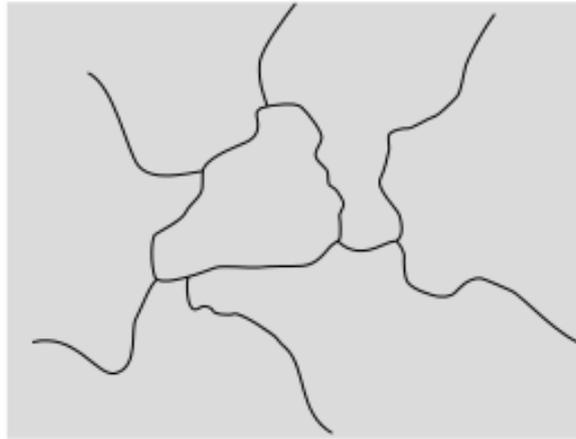
(a)



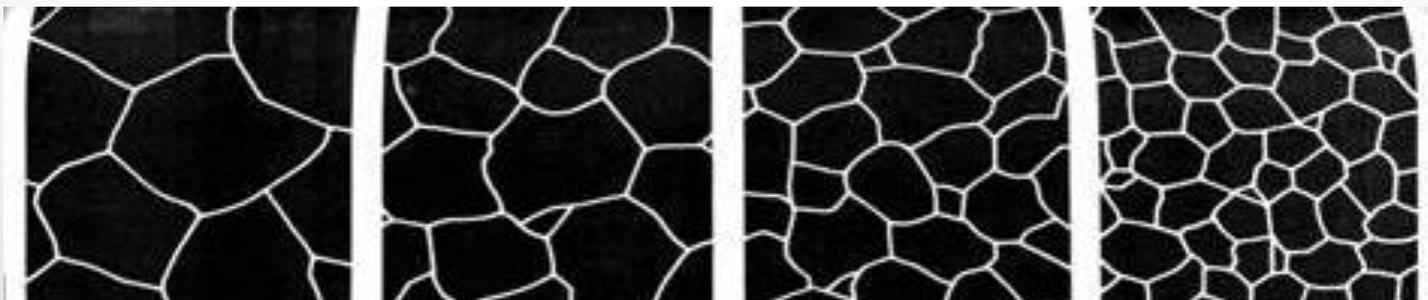
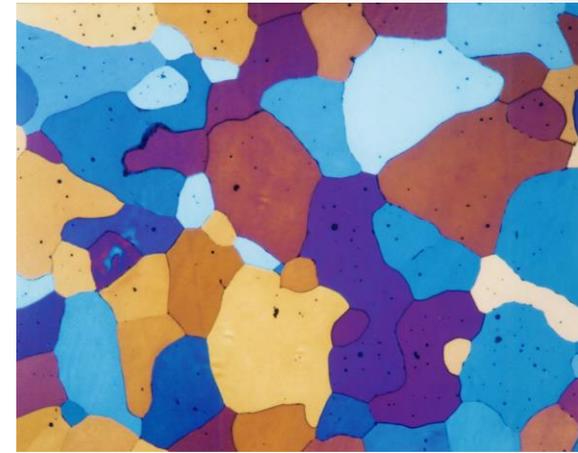
(b)



(c)



(d)



# Solidificación de mat. poliméricos

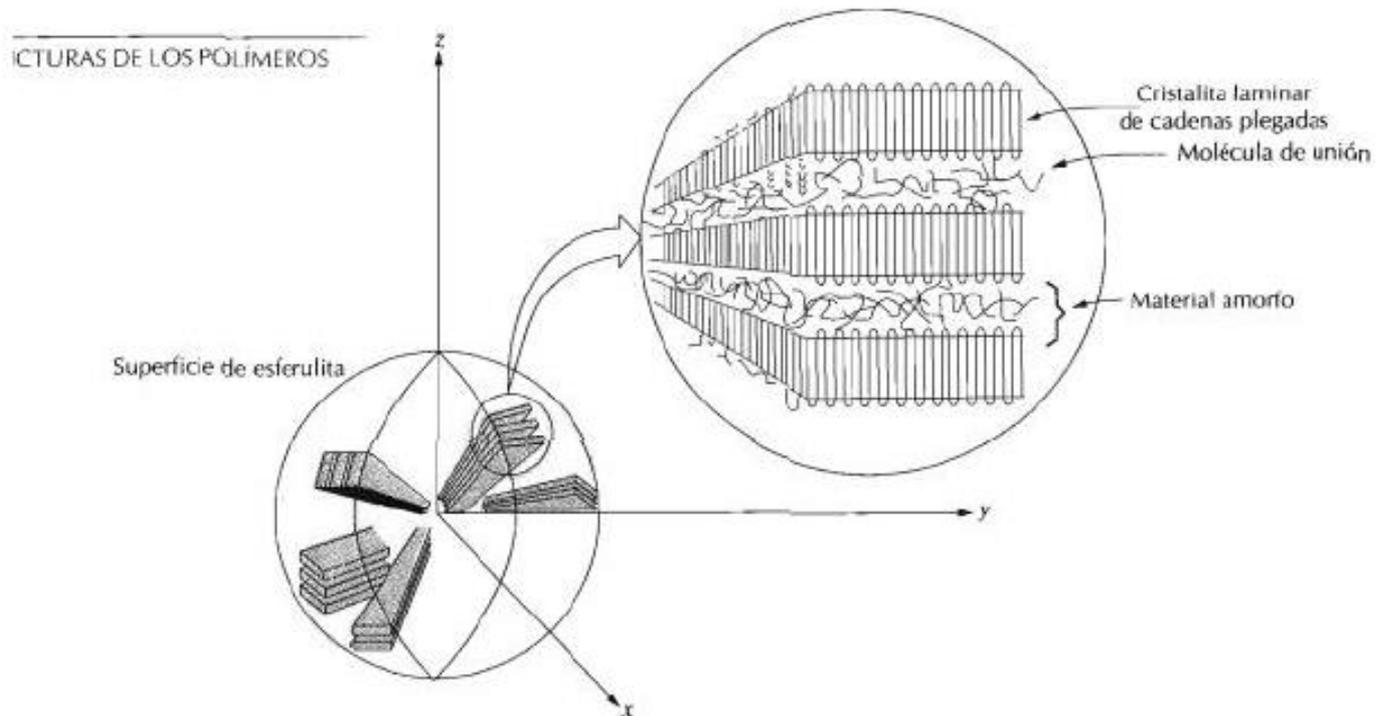
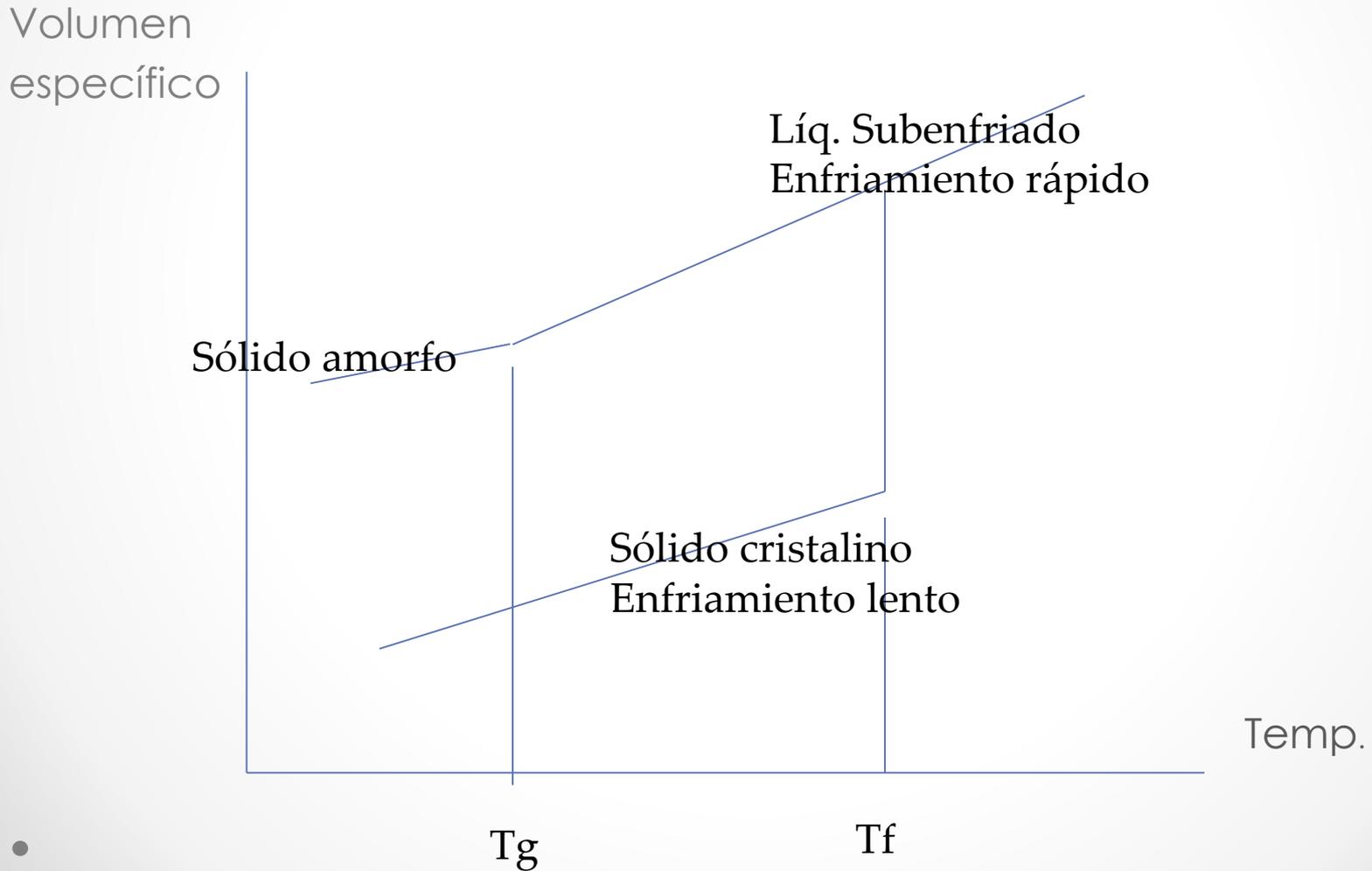


Fig. 10 Representación esquemática del detalle de la estructura de una esferulita

# Solidificación vítrea



# NUCLEACIÓN

## HOMOGENEA

y

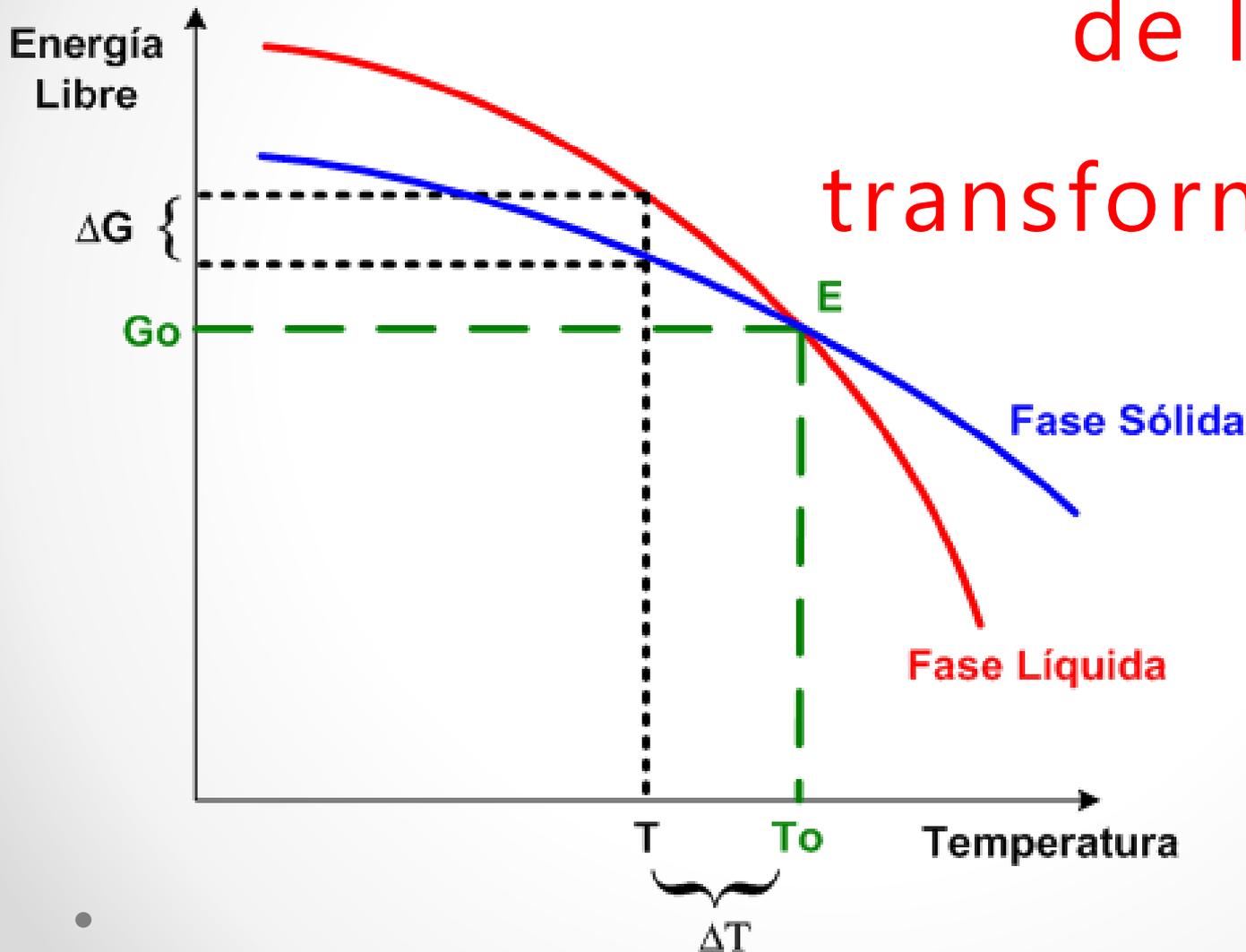
## HETEROGENEA

# NUCLEACIÓN

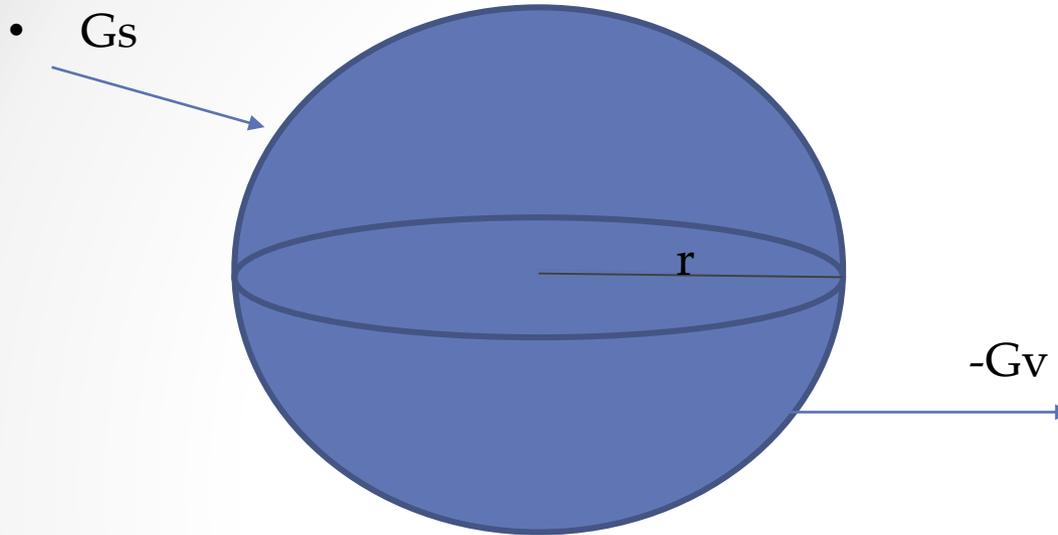
## HOMOGÉNEA

**Ocurre cuando el metal líquido proporciona por sí mismo los átomos que se requieren para formar los núcleos.**

# Fuerza impulsora de la transformación



# Balace de energía



- $\Delta G = G_s - G_v$
- Si la T es la de equilibrio
- $G_s = G_v$

$$G_{sol} = G_{liq}$$

$$H_{sol} - T_o \cdot S_{sol} = H_{liq} - T_o \cdot S_{liq}$$

$$H_{sol} - H_{liq} = T_o \cdot S_{liq} - T_o \cdot S_{sol}$$

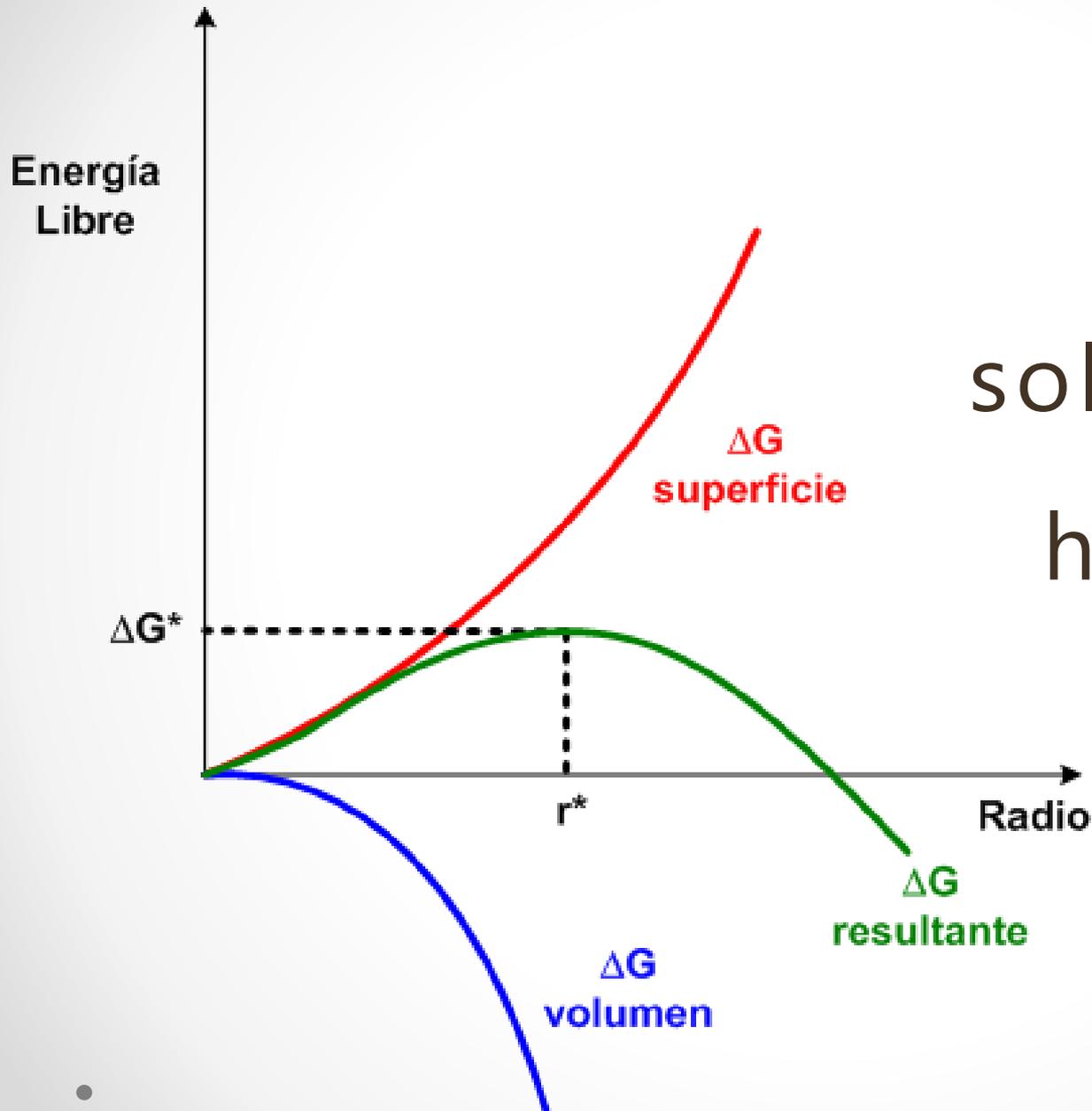
$$L = T_o \cdot (S_{liq} - S_{sol})$$

$$\Delta S = \frac{L}{T_o}$$

# Relación de $\Delta S$ con L

- $\Delta S$  es semejante para distintas estructuras cristalinas
- Es grande la energía necesaria para pasar del desorden total al ordenamiento.
- La energía interna del líquido desordenado es superior a la del sólido ordenado.
- Entonces se libera el calor latente de solidificación.

# Mecánica de la solidificación homogénea



# Cálculo del radio crítico

$$\Delta G_{vol} = -\frac{4}{3}\pi r^3 (G_{liq} - G_{sol})$$

$$\Delta G_{vol} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \left( (H_{liq} - T \cdot S_{liq}) - (H_{sol} - T \cdot S_{sol}) \right)$$

$$\Delta G_{vol} = -\frac{4}{3}\pi r^3 (L - T \cdot \Delta S)$$

$$\Delta S = \frac{L}{T_0}$$

$$\Delta G_{vol} = -\frac{4}{3} \pi r^3 \left( L - T \cdot \frac{L}{T_0} \right)$$

$$\Delta G_{vol} = -\frac{4}{3} \pi r^3 L \frac{T_0 - T}{T_0}$$

$$\Delta G_{vol} = -\frac{4}{3} \pi r^3 L \frac{\Delta T}{T_0}$$

$$\Delta G_{\text{sup}} = 4\pi r^2 \gamma \qquad \Delta G_{\text{vol}} = -\frac{4}{3}\pi r^3 L \frac{\Delta T}{T_0}$$

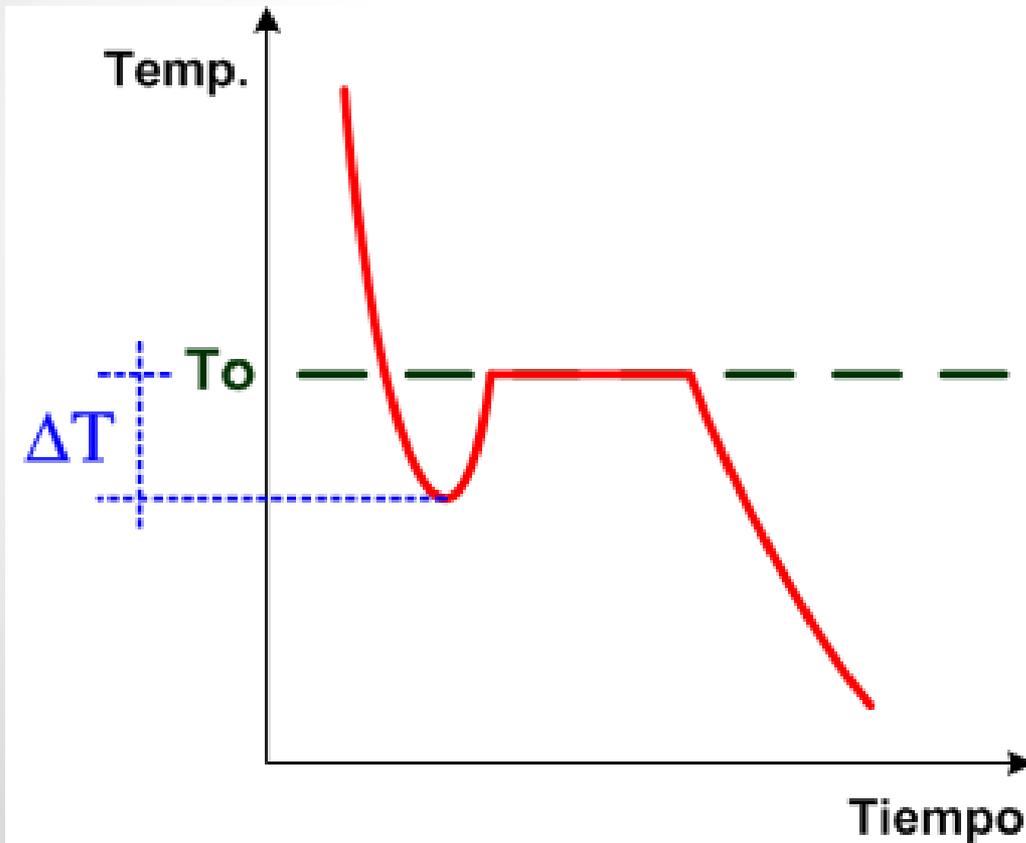
$$\Delta G = \Delta G_{\text{sup}} + \Delta G_{\text{vol}}$$

$$\Delta G = 4\pi r^2 \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 L \frac{\Delta T}{T_0}$$

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 8\pi r^* \gamma - 4\pi r^{*2} L \frac{\Delta T}{T_0} = 0$$

$$r^* = \frac{2\gamma}{L} \cdot \frac{T_0}{\Delta T}$$

# Grado de subenfriamiento



↑  $\Delta T$

↓  
↓  $r^*$   
↓

más gérmenes  
pueden pasar a  
ser núcleos de  
solidificación

↑ Cantidad de  
núcleos

↓  
Grano más fino  
(pequeño)

# NUCLEACIÓN

## HETEROGÉNEA

**Tiene lugar sobre la superficie de un agente de nucleación: molde o impurezas insolubles.**

La energía superficial para formar el núcleo estable es inferior a que si el núcleo se formara en el líquido puro.

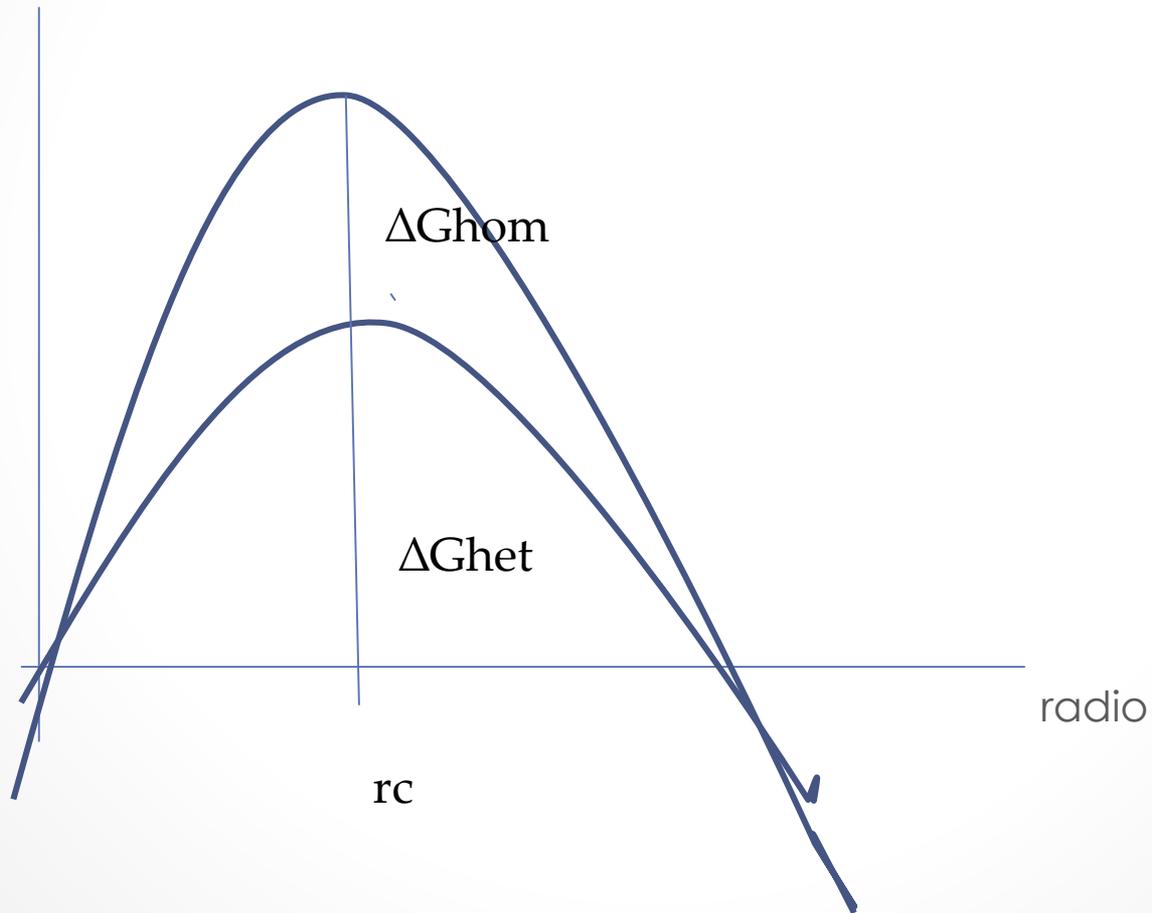
Disminuye la barrera energética:

$$\Delta G_{\text{het}}^* < \Delta G_{\text{hom}}^*$$

Al agregar impurezas, hay más sitios de nucleación y entonces se afina el grano.

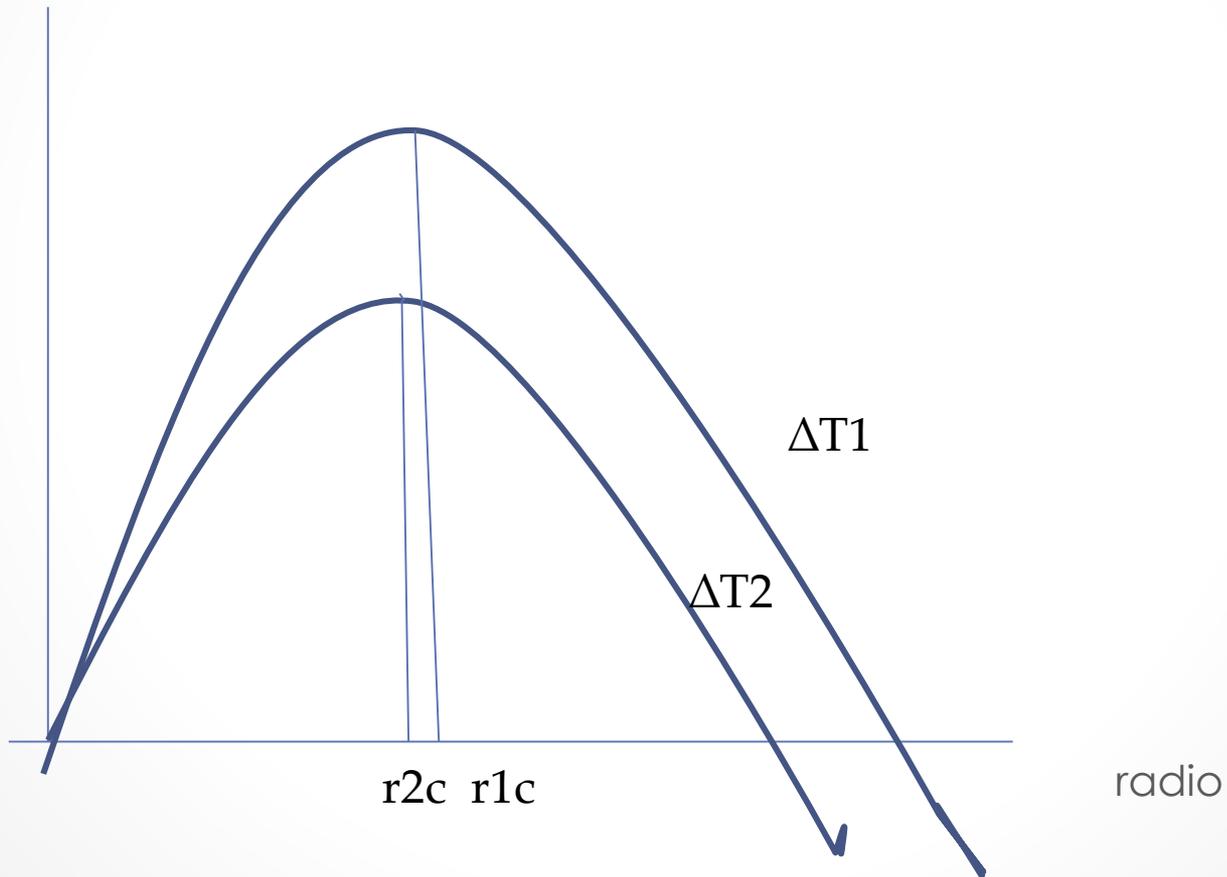
# $\Delta G_{\text{homo}}$ mayor $\Delta G_{\text{heter}}$

•  $\Delta G$



# $\Delta T_2$ mayor $\Delta T_1$

•  $\Delta G$



# ESTRUCTURA CRISTALINA DE LA SECCIÓN DE UN LINGOTE

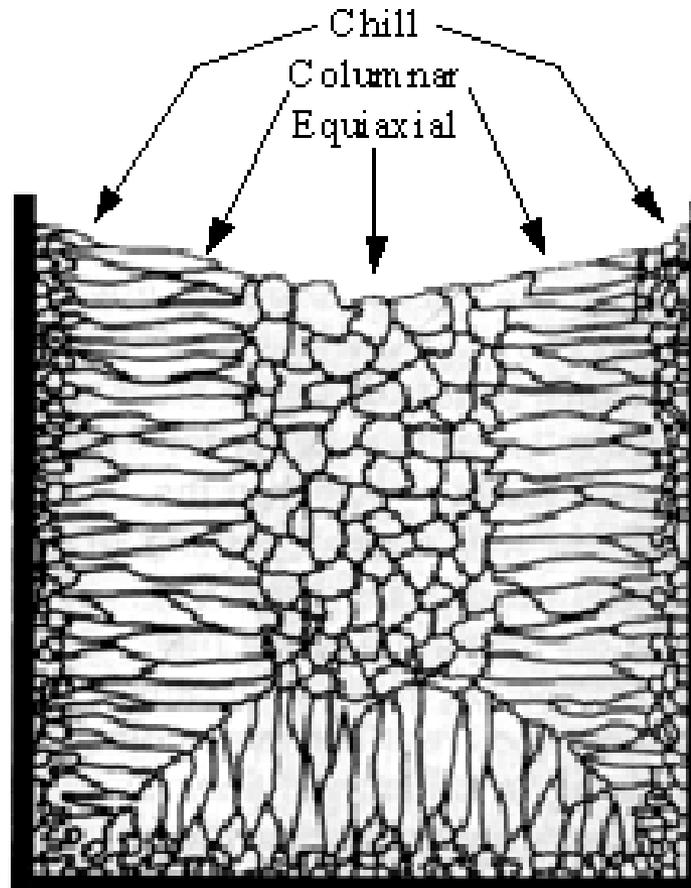


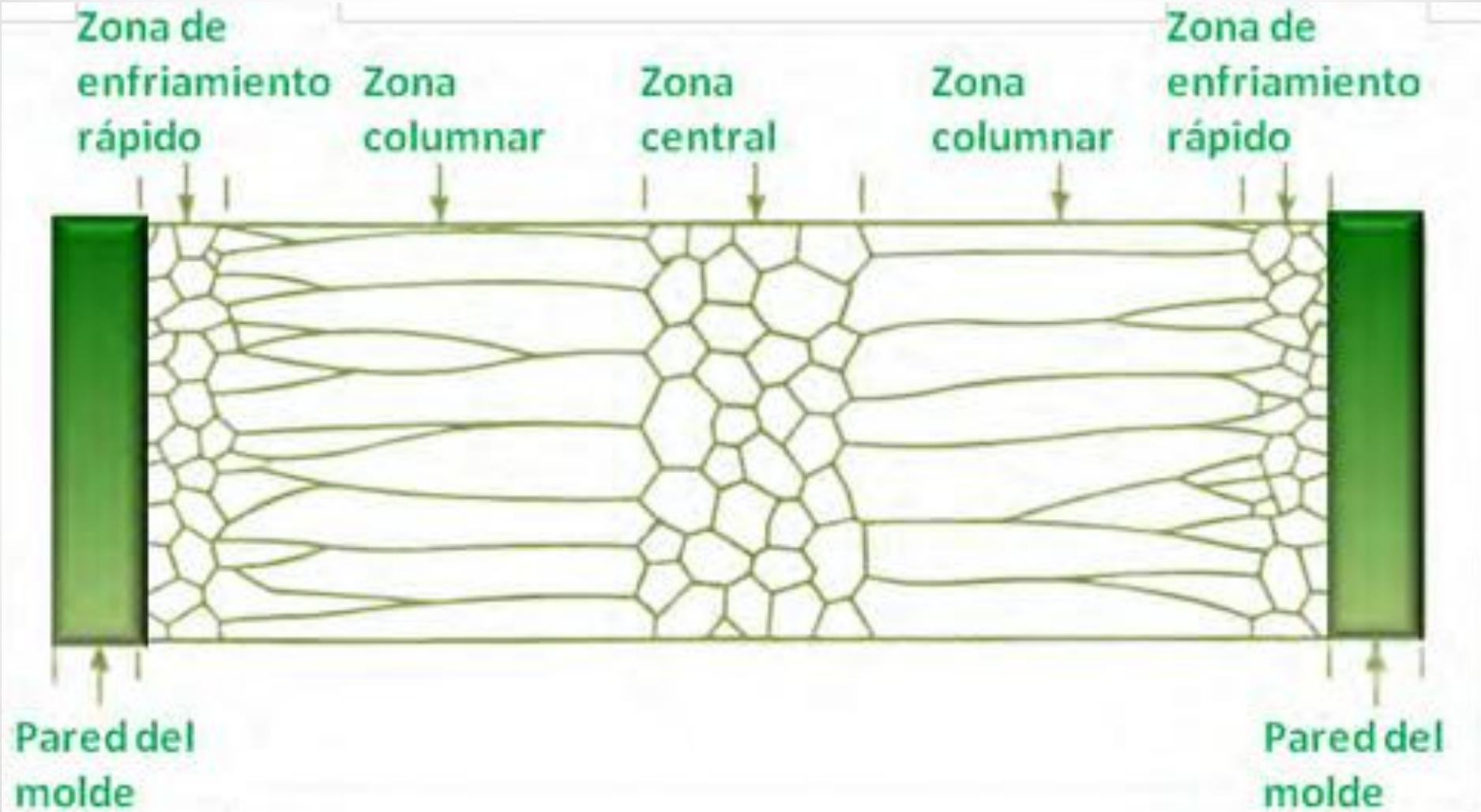
# *Solidificación según Condiciones de flujo de calor*

## *Efecto de la velocidad de enfriamiento*

- *Zona de chill* corresponde a una zona de enfriamiento rápido.
- *Zona columnar* se origina en aquellos granos de la zona chill continuando su crecimiento hacia el centro del lingote
- *Zona central de granos equiaxiales* se origina cuando la velocidad de enfriamiento es lenta

# Estructura de un lingote





# Defectos en estructuras coladas

## BURBUJAS

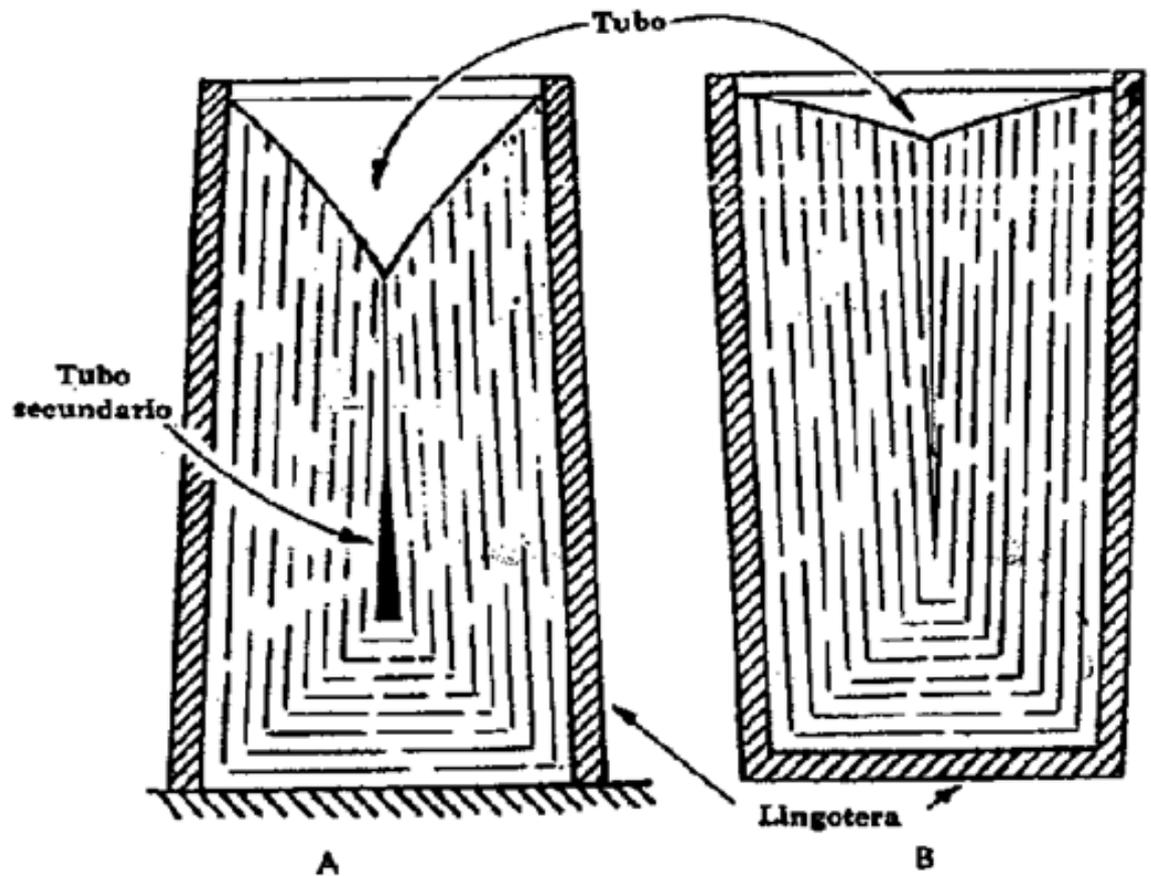
Causadas por los gases del horno, disueltos en el metal durante la fusión, o por reacciones químicas que tienen lugar en la masa fundida.



Las burbujas del gas expulsado quedan atrapadas en los brazos dendríticos y no pueden subir a la superficie.

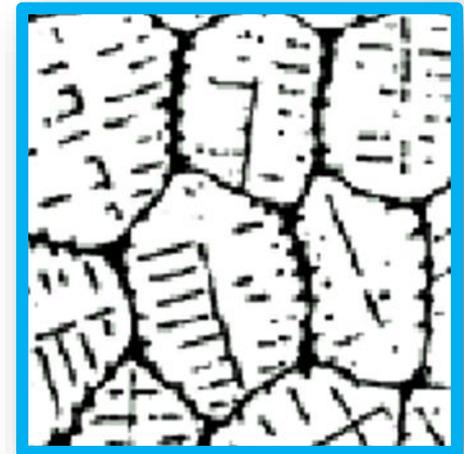
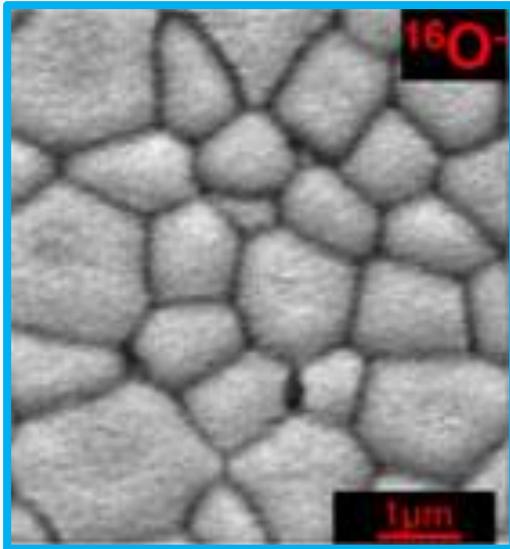
# Defectos en estructuras coladas

## RECHUPE



# Defectos en estructuras coladas

## SEGREGACION MENOR

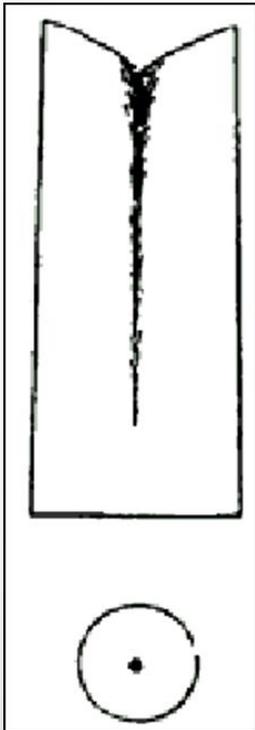


Las impurezas se depositan en los límites de los cristales

# Defectos en estructuras coladas

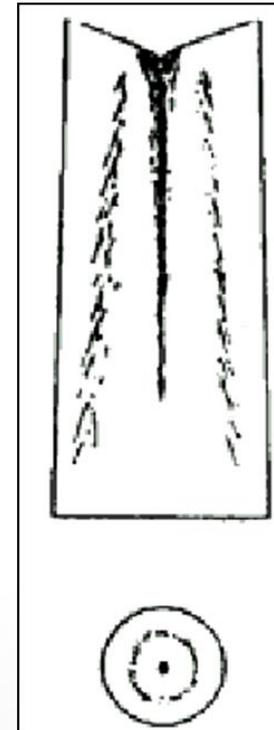
## SEGREGACION

Mayor  
(en v)



Las impurezas  
bajan el punto  
de  
solidificación

Mayor Y en v  
INVERTIDA



# RECUPERACION Y RECRISTALIZACION

-Cuando se deforma plásticamente un metal a temperaturas bastante inferiores a la de su punto de fusión, se dice que el metal ha sido **trabajado en frío**.

-La energía de deformación se acumula en forma de **dislocaciones** y de **defectos puntuales**, por ejemplo: ruptura de enlaces y vacancias.

Cuando se calienta este material ocurren dos procesos que disminuyen la energía interna almacenada:

**Recuperación**

**Recristalización**

-Además puede ocurrir el **crecimiento de grano**, cuando se continúa el recocido luego de completarse la recristalización.



# RECUPERACION

-Es la primera etapa del proceso de recocido, con mayor temperatura (menor a  $0.4T_f$ ) se produce el alivio de esfuerzos internos causados por el trabajo en frío, (tensiones residuales), y también se producen cambios microestructurales

-Comprende una serie de fenómenos como los siguientes:

Aniquilación de defectos puntuales

Poligonización

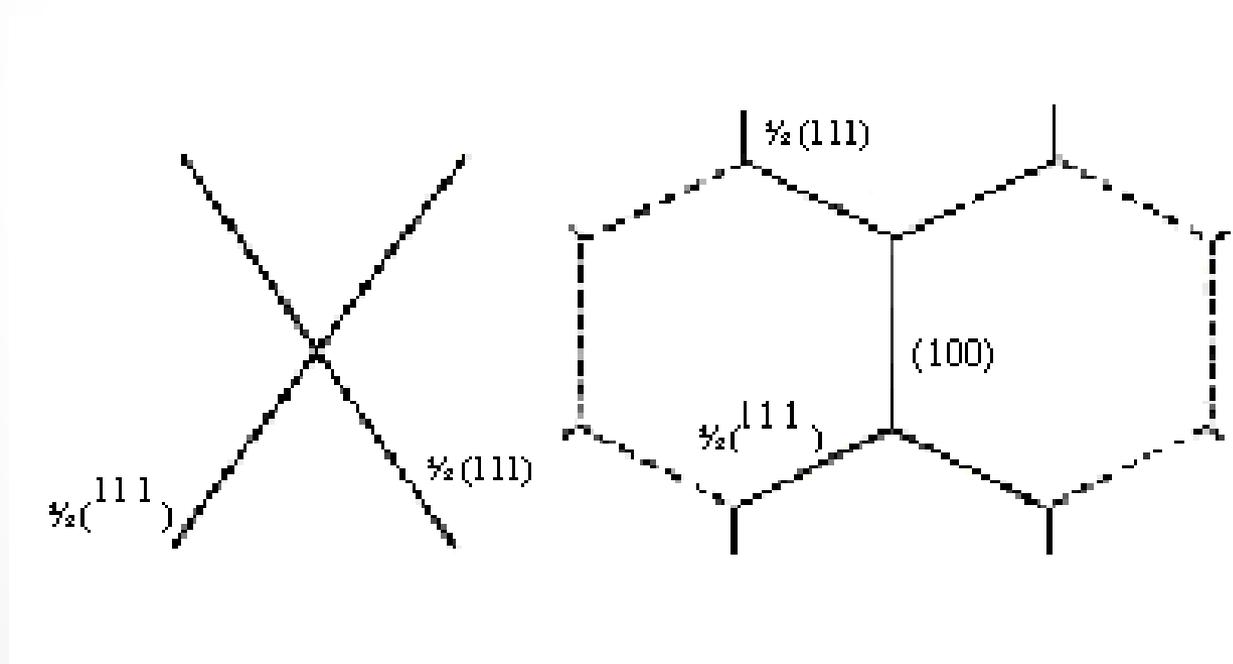
Caída de la resistividad eléctrica (R)

-La aniquilación de defectos puntuales consiste en la difusión, mediante la adición de calor, de las vacancias hacia las dislocaciones y bordes de granos, así se logra disminuir su cantidad hasta el número de equilibrio a la temperatura correspondiente.

-La resistividad eléctrica (R) se ve afectada cuando las vacancias emigran a bordes de granos y disminuyen en número porque su campo de deformaciones interfiere con el flujo de los electrones.

# RECUPERACION

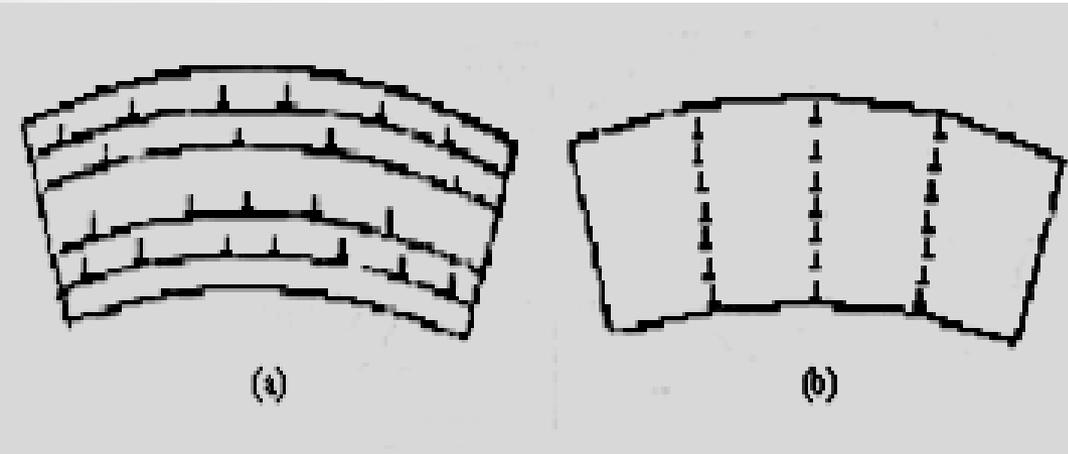
Las dislocaciones comienzan a agruparse y a reordenarse en configuraciones de menor energía, que se disponen en hexágonos formando subgranos, poligonización. Redes hexagonales.



# Recuperación. Poligonización

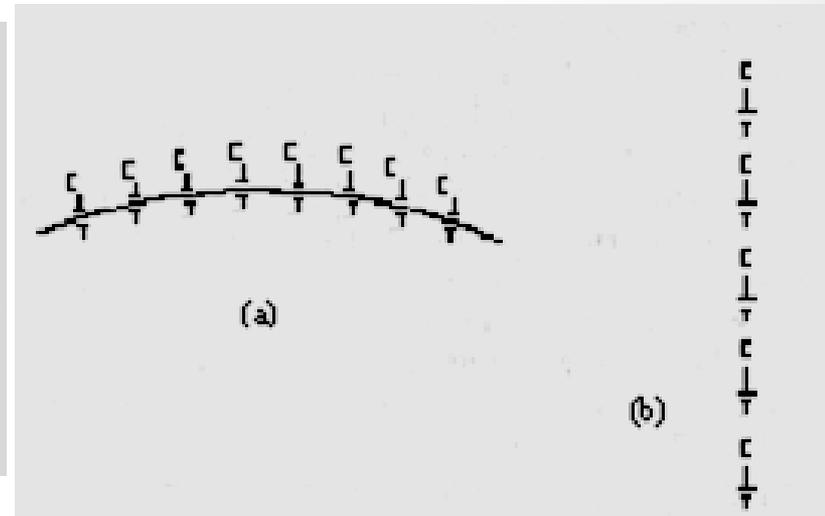
-Cuando dislocaciones de borde del mismo signo se acumulan sobre el mismo plano de deslizamiento, sus campos de deformación son aditivos. Las regiones inmediatamente superior e inferior a los planos de deslizamiento son zonas de alta concentración de tensiones, de tracción y de compresión respectivamente.

-Cuando se disponen en una secuencia perpendicular al plano de deslizamiento, los campos de deformación de las dislocaciones adyacentes se cancelan unos a otros.



**(a) Dislocaciones en exceso sobre planos de deslizamiento**

**(b) Reordenamiento de dislocaciones después de la poligonización.**



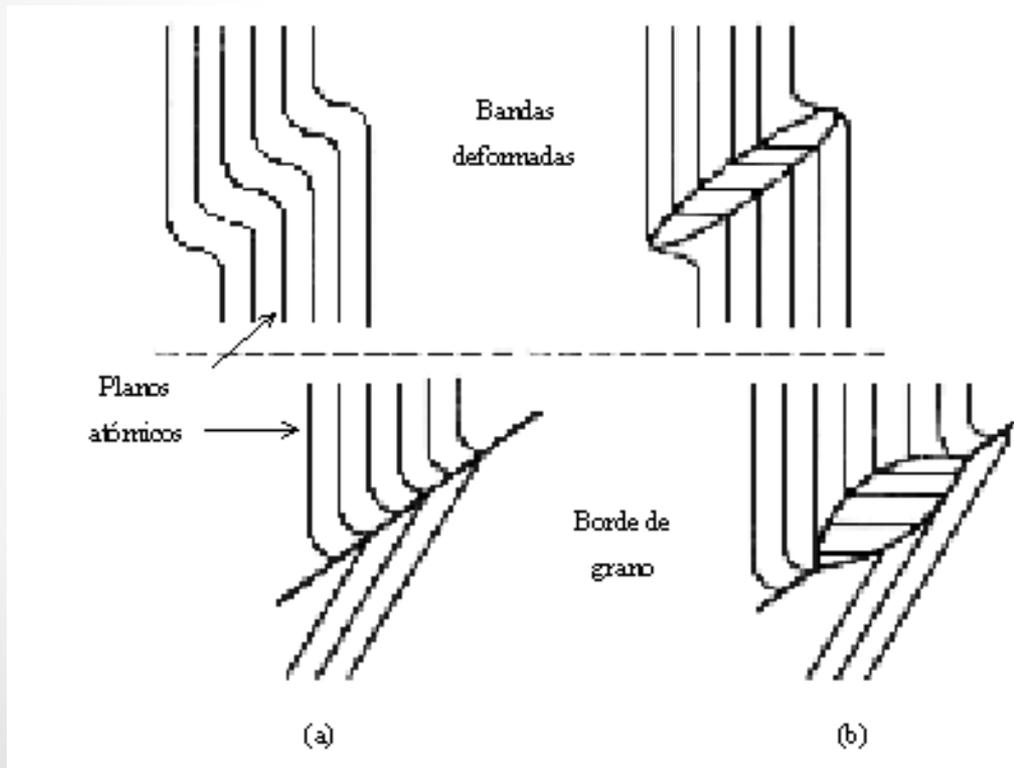
**(a) Disposición de alta energía de dislocaciones;**

**(b) Disposición de dislocaciones de baja energía.**

**C y T: compresión y tracción**

# RECRISTALIZACIÓN

Si un metal previamente deformado en frío, es recocido a una temperatura sobre  $0,4 - 0,5 T_{\text{fusión}}$  (temperatura de recristalización), aparecen nuevos cristales en la microestructura. Los que se nuclean en zonas con alta densidad de dislocaciones, como los planos de deslizamiento, y en borde de grano por su alta energía.



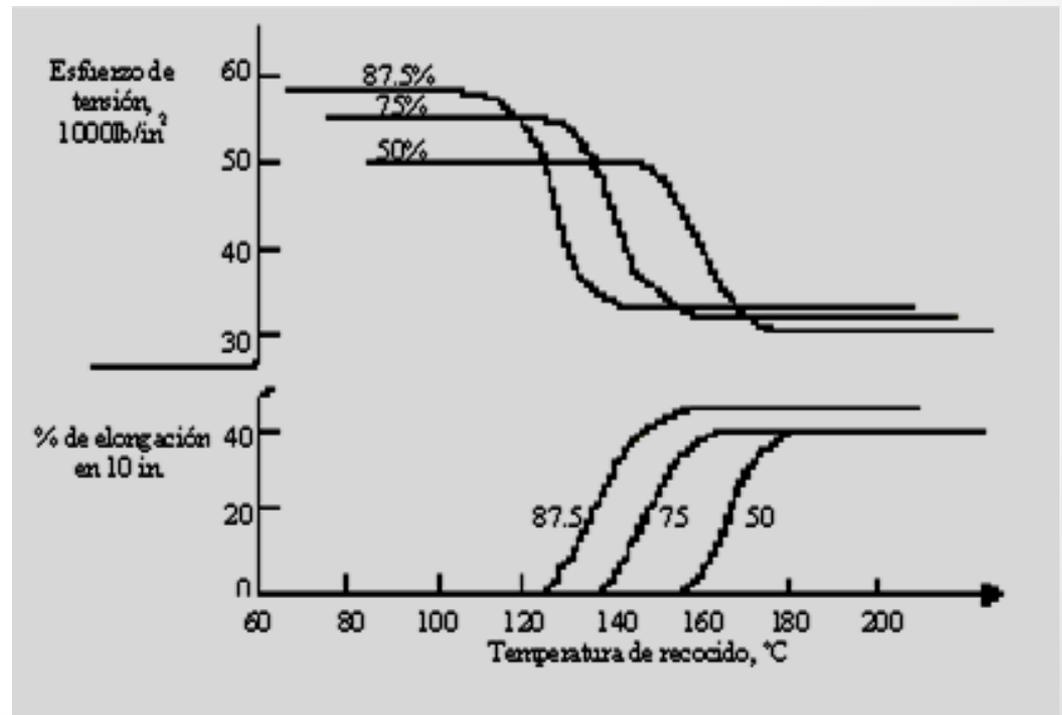
*Representación esquemática de cómo en regiones de la red cristalina altamente deformadas, se nuclean nuevos granos recristalizados.*

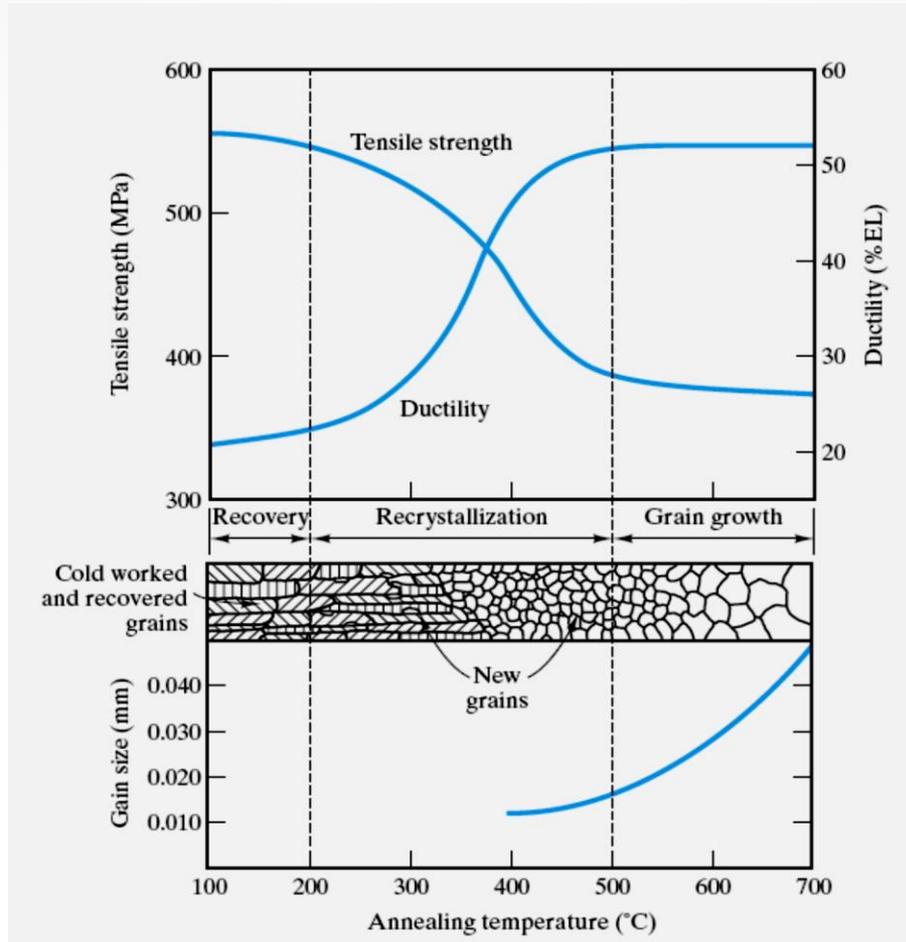
## Temperatura de recristalización

-La temperatura de recristalización corresponde a la temperatura aproximada a la que un material trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora.

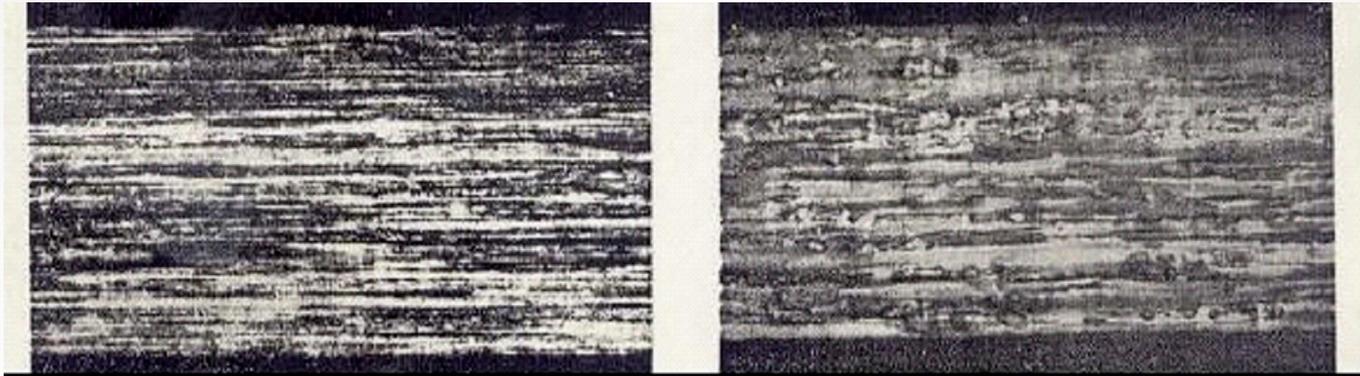
-La recristalización es sensible a cambios en la temperatura a la que se realiza, también es sensible a la deformación en frío previa. (140°C con 87,5%; 160°C con 75% y 180°C con 50%)

*Variación de la tensión máxima y del porcentaje de elongación con la temperatura de recocido y con el porcentaje de def. en frío previo para un alambre de cobre puro.*



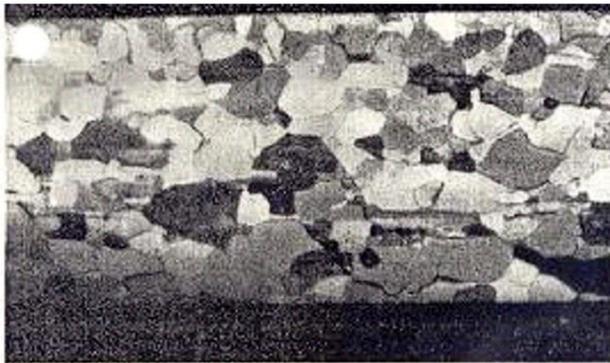


Efecto de la temperatura de recocido en la fuerza y ductilidad de una aleación de latón que muestra que la mayoría del ablandamiento de la aleación ocurre durante la etapa de recristalización.



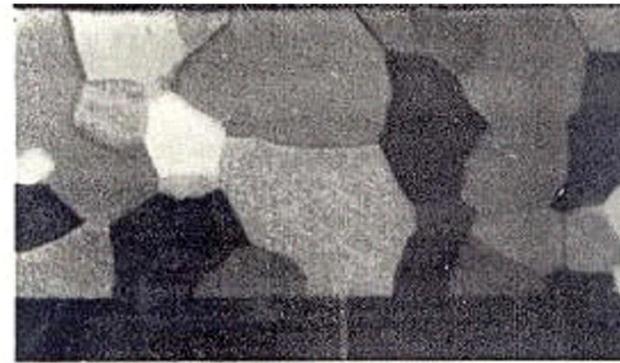
**Laminación en frío**

**Inicio de recristalización**



300°C

100 μ



400°C

**Recristalización completa**

**Crecimiento del grano**

# Bibliografía

-Apuntes de la cátedra

-CAP 4: SMITH - Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.

-ASKELAND - 6º Edición

-<http://aprendemostecnologia.org/2009/03/16/metodo-de-moldeo-por-arena/>