

# Unidad 4

# SOLIDIFICACIÓN

*Ciencia de los materiales*

# 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

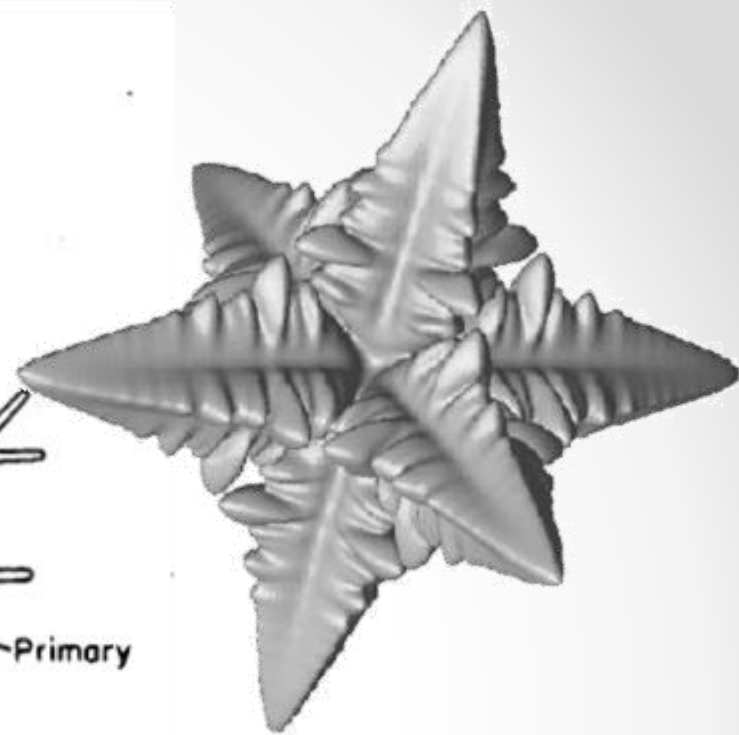
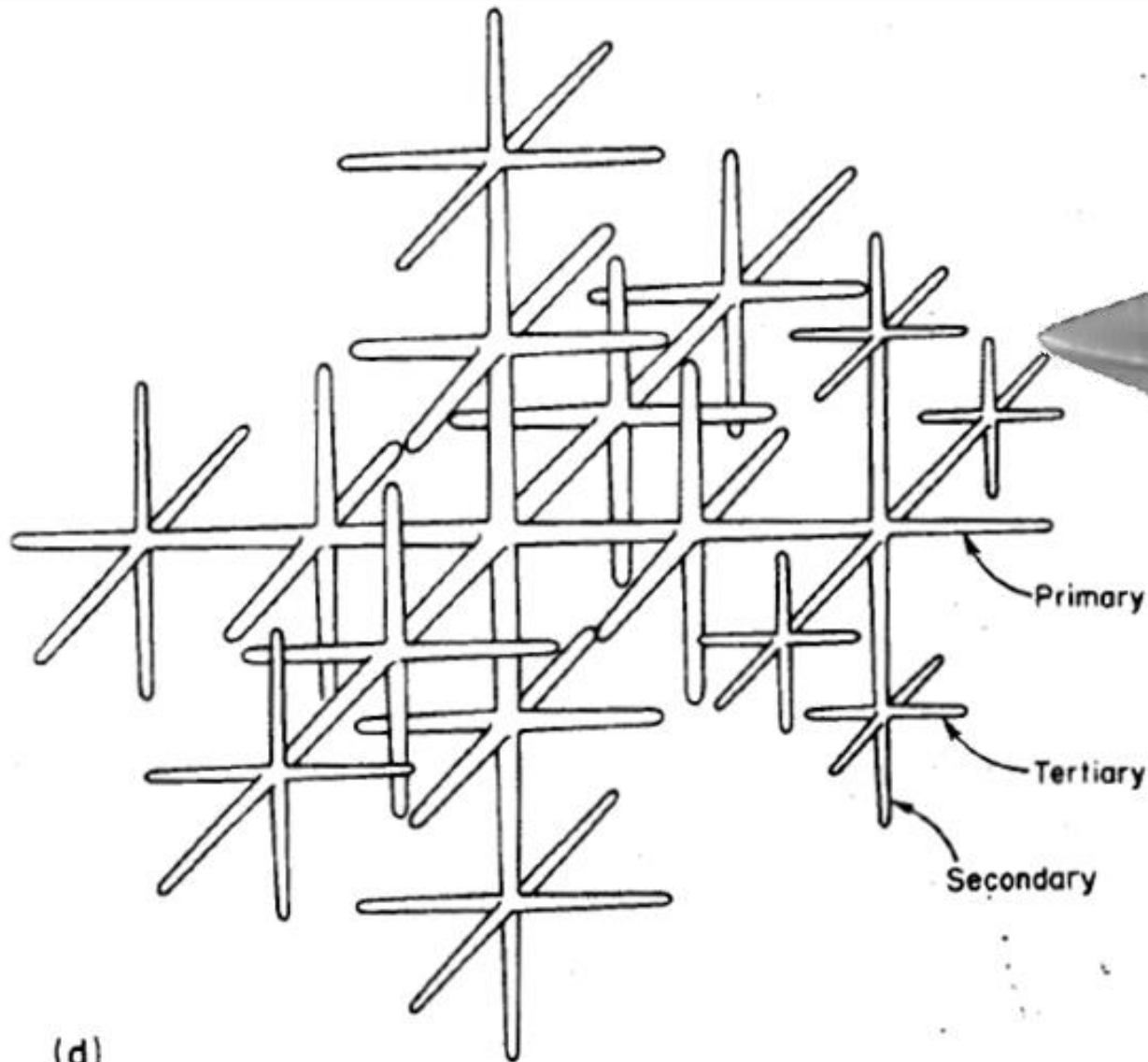
líquido

solidificación

sólido

# Mecanismo de solidificación

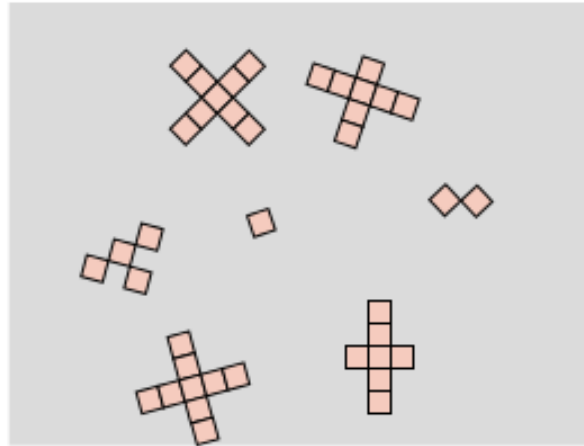
- 1 Nucleación: formación de núcleos estables en el metal fundido por agrupación de átomos.
- 2 Crecimiento: aumento de tamaño de los núcleos para formar cristales y la estructura granular.



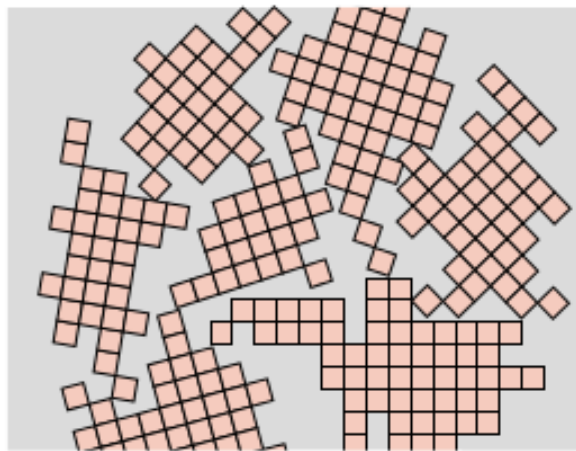
**DENDRITAS**



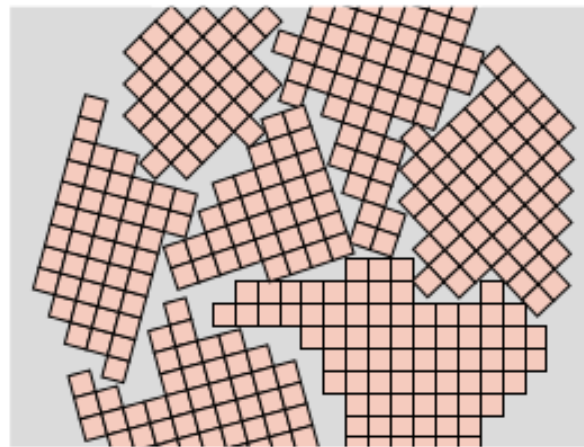
# CRECIMIENTO Y BORDE DE GRANO



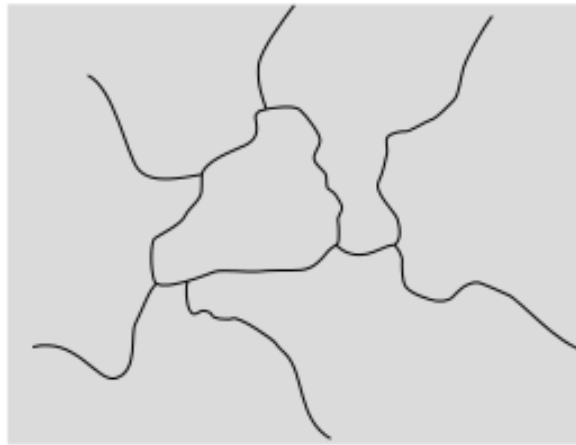
(a)



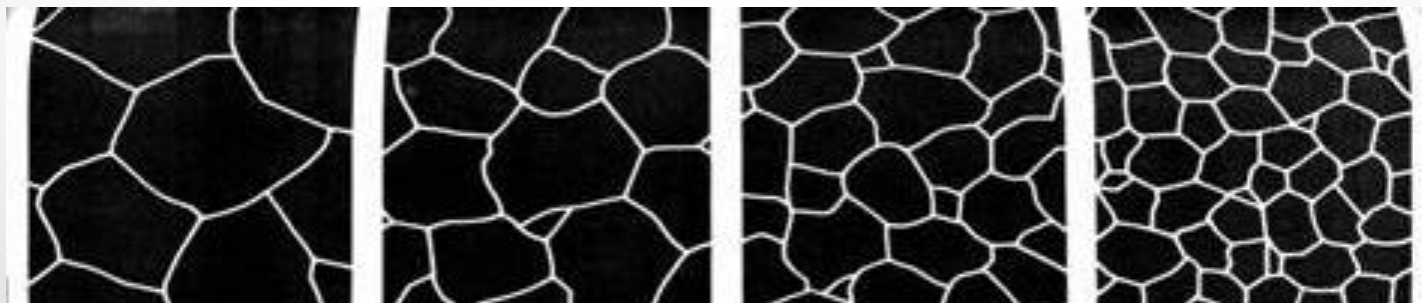
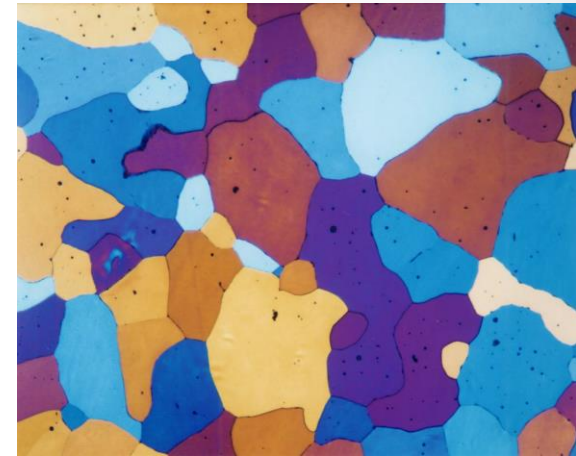
(b)



(c)



(d)



# Solidificación de mat. poliméricos

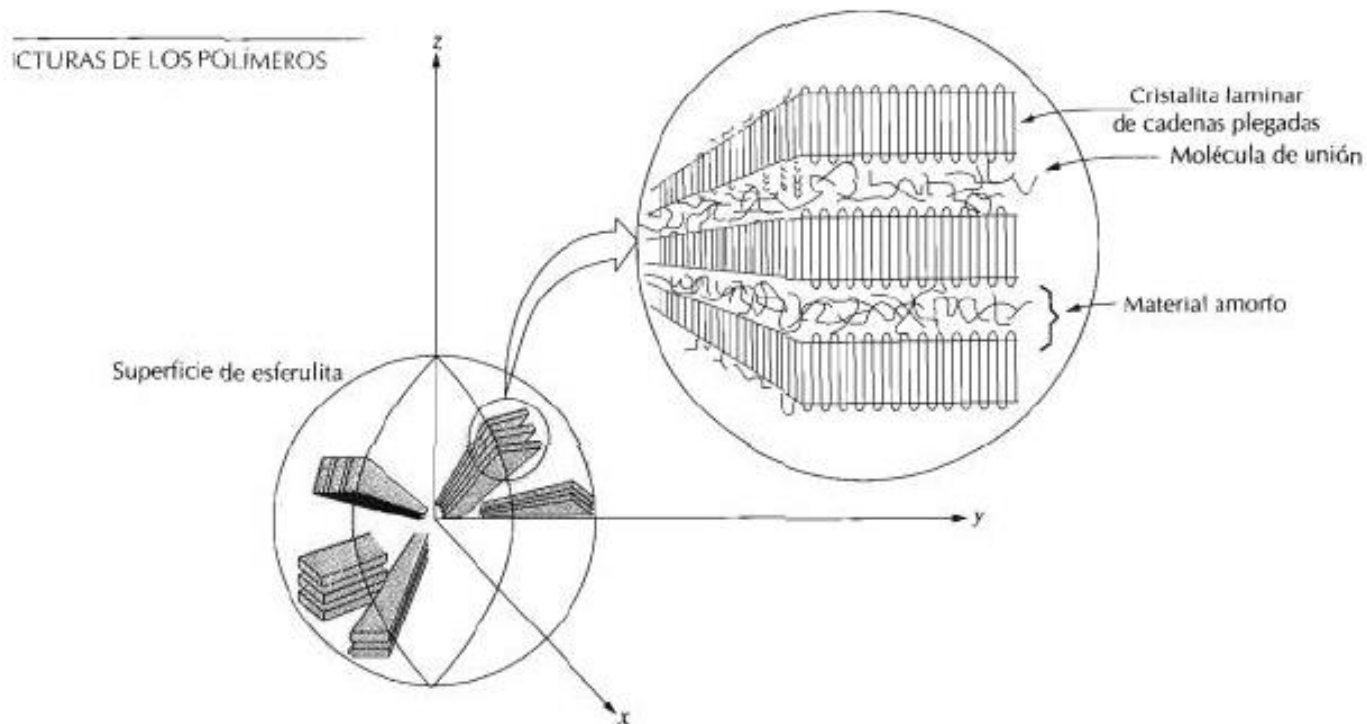
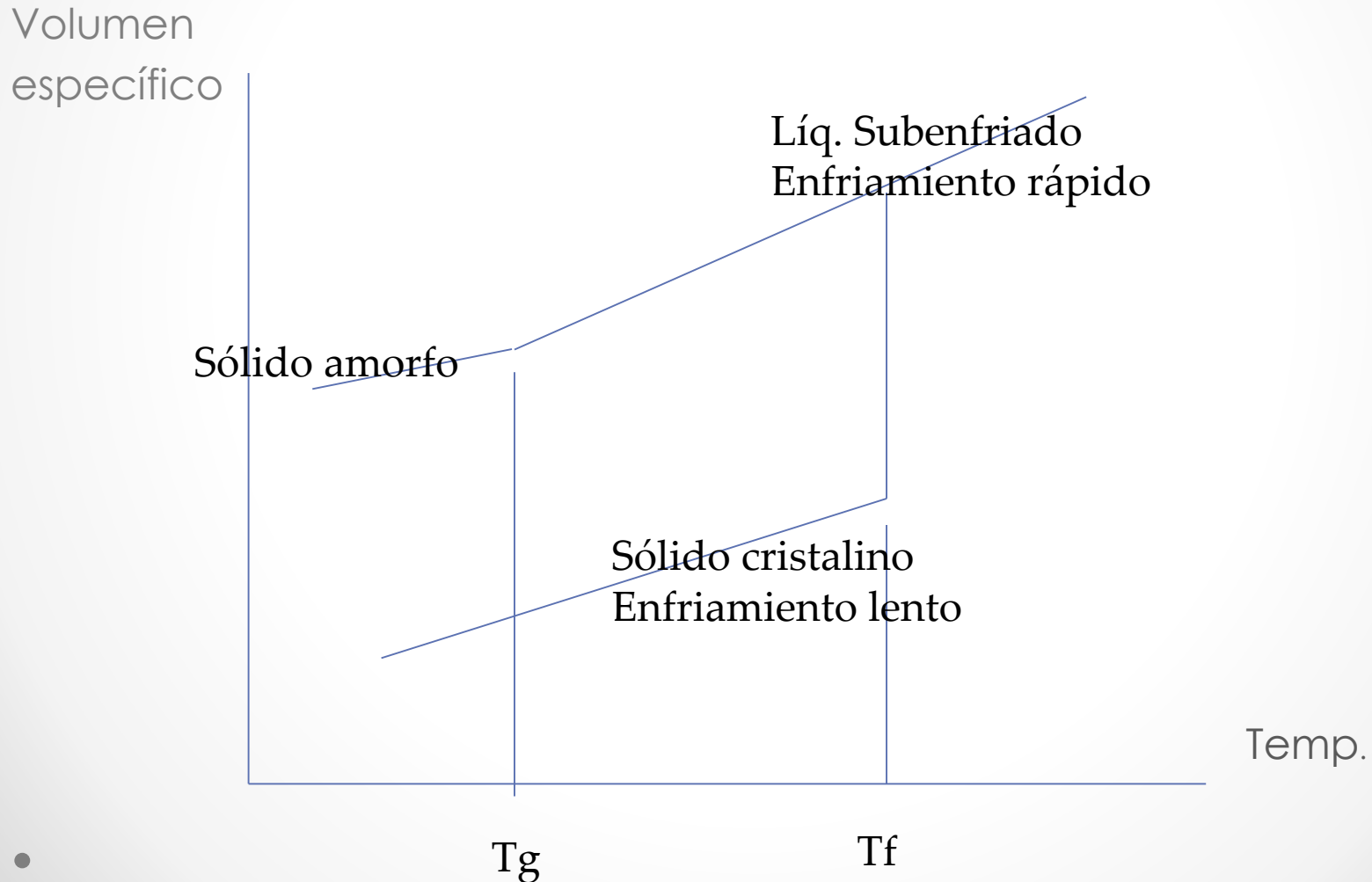


Fig. 10 Representación esquemática del detalle de la estructura de una esferulita



# Solidificación vítrea



# NUCLEACIÓN

## HOMOGÉNEA

y

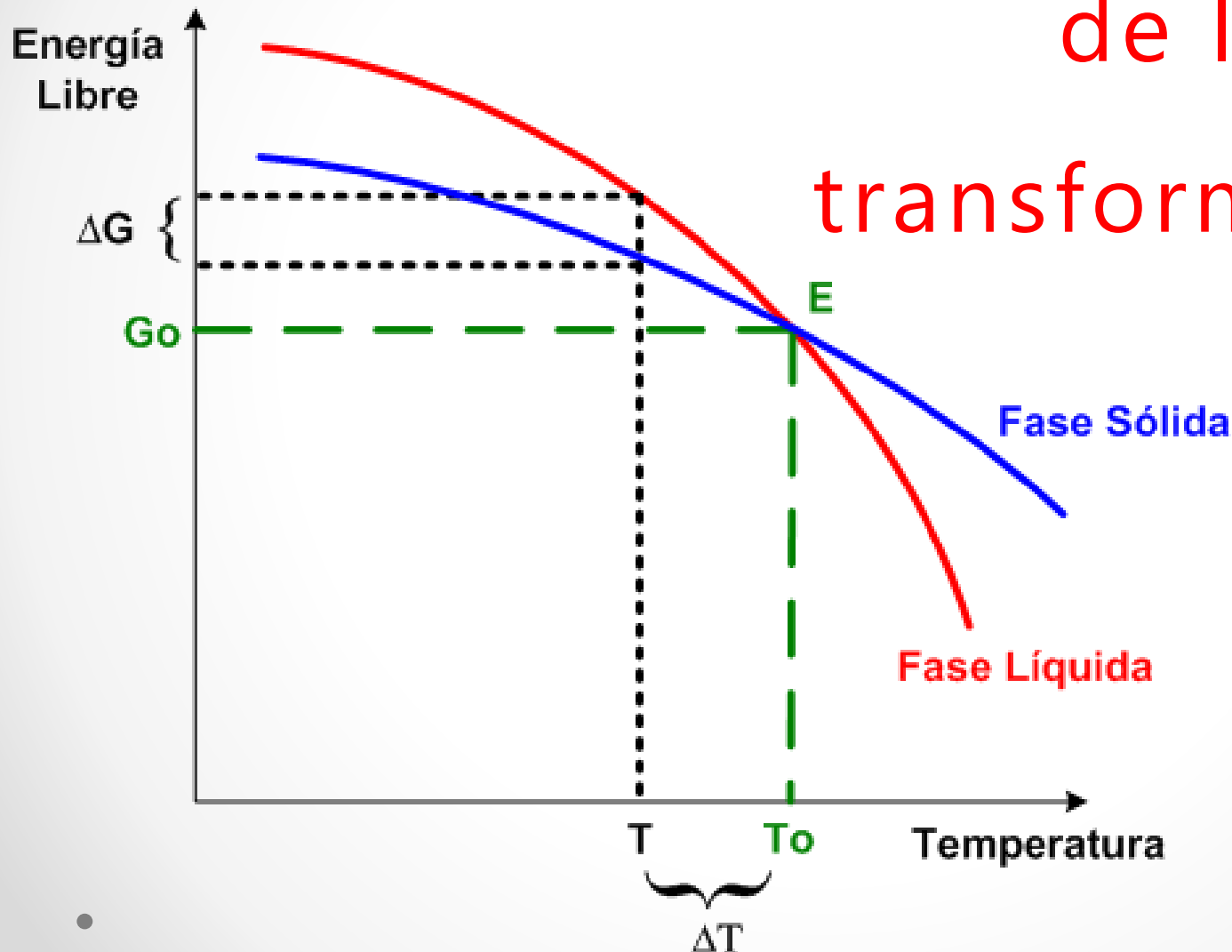
## HETEROGÉNEA

# NUCLEACIÓN

## HOMOGÉNEA

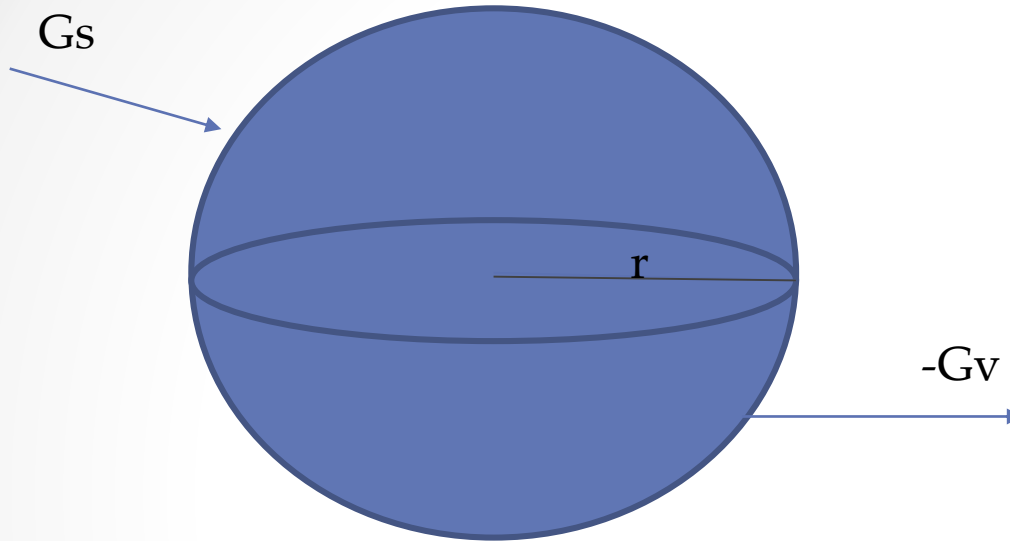
**Ocurre cuando el metal líquido proporciona por sí mismo los átomos que se requieren para formar los núcleos.**

# Fuerza impulsora de la transformación



# Balance de energía

- $G_s$



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

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

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

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

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

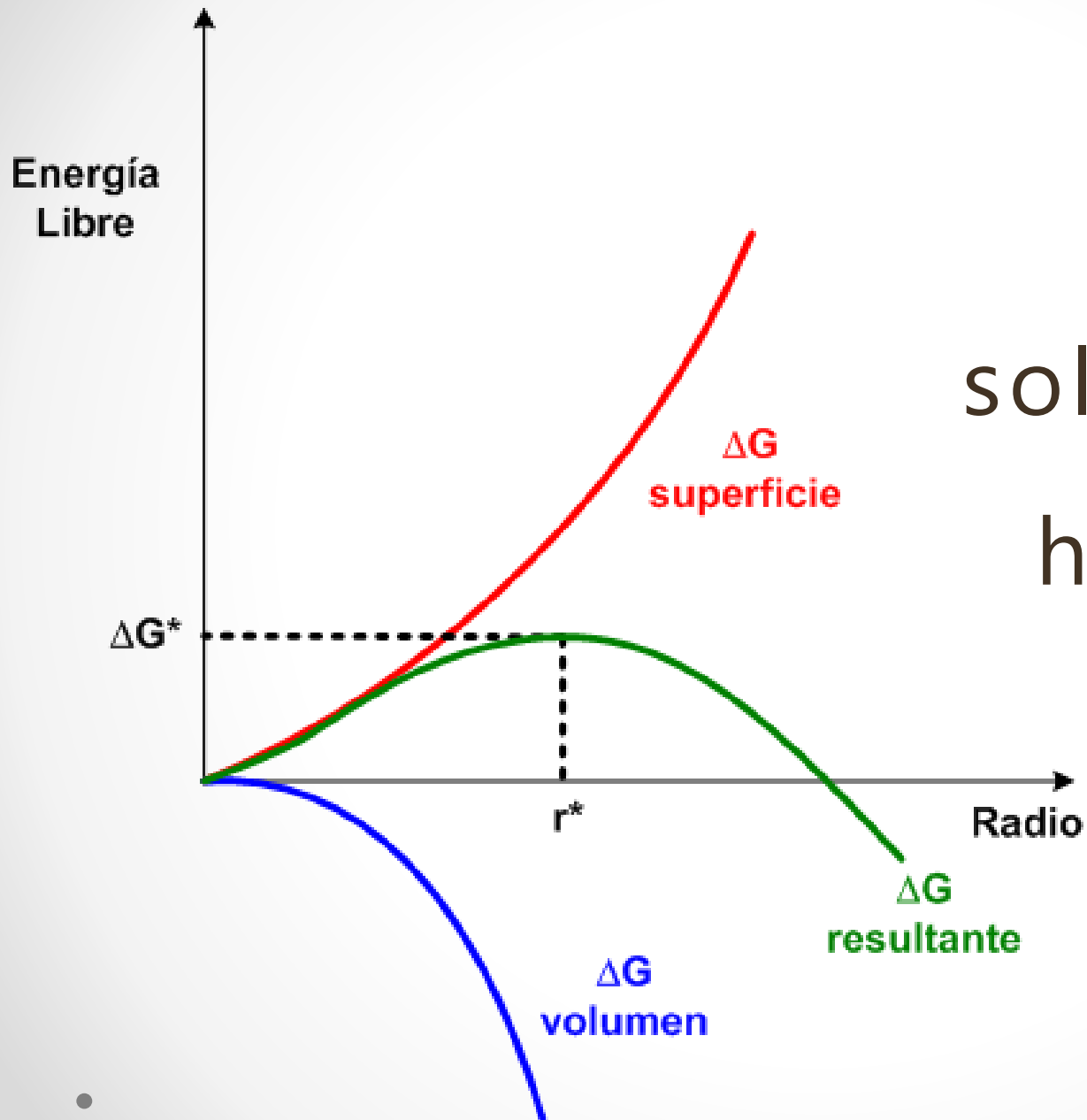
$$\Delta S = \frac{L}{T_o}$$



# 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

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

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

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

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

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

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

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

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

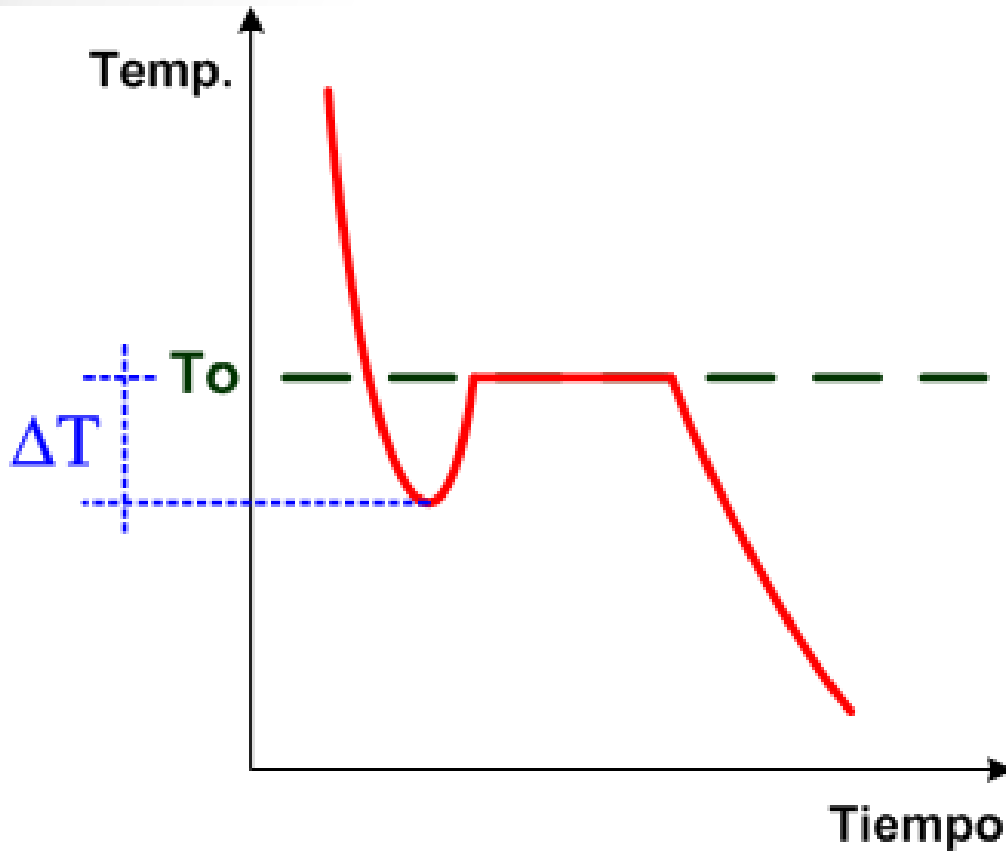
$$\Delta G = \Delta G_{\text{sup}} + \Delta G_{\text{vol}}$$

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

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

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

# 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.

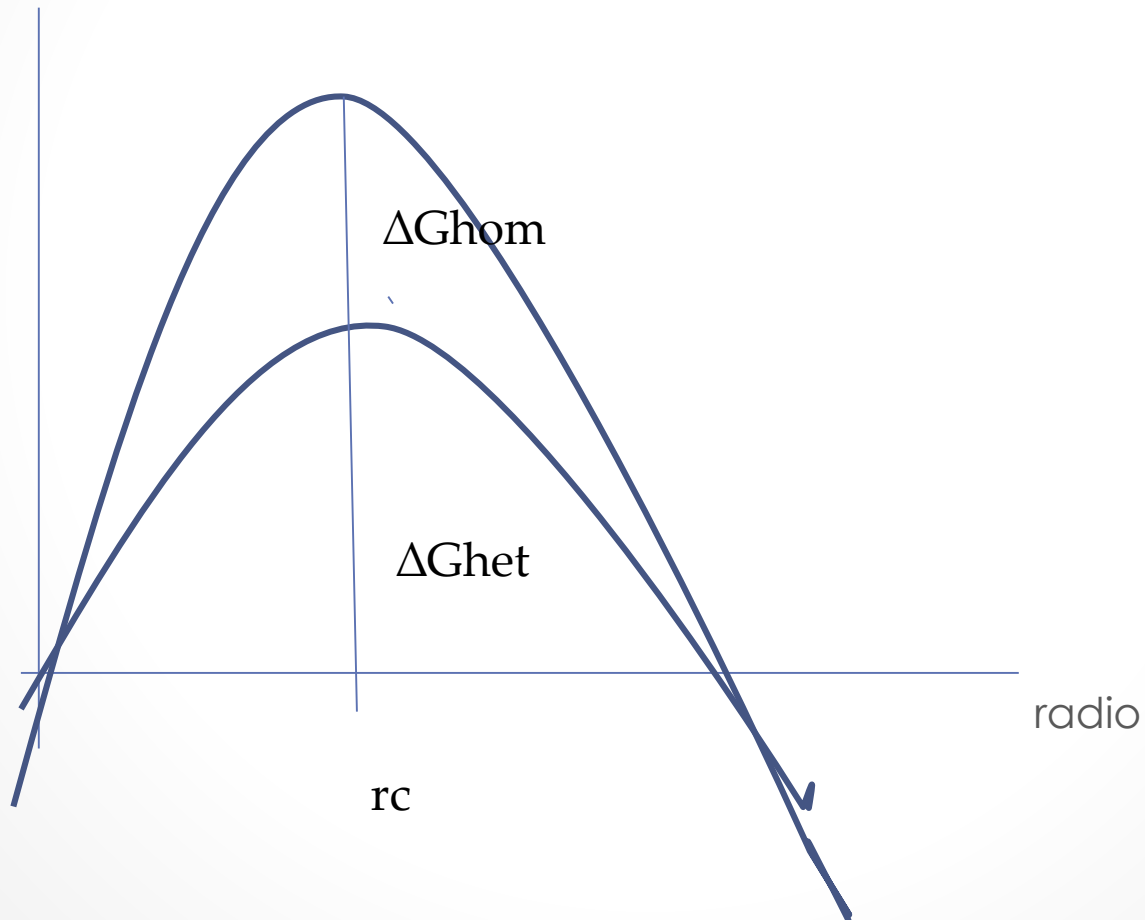
Disminuye la barrera energética:

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

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

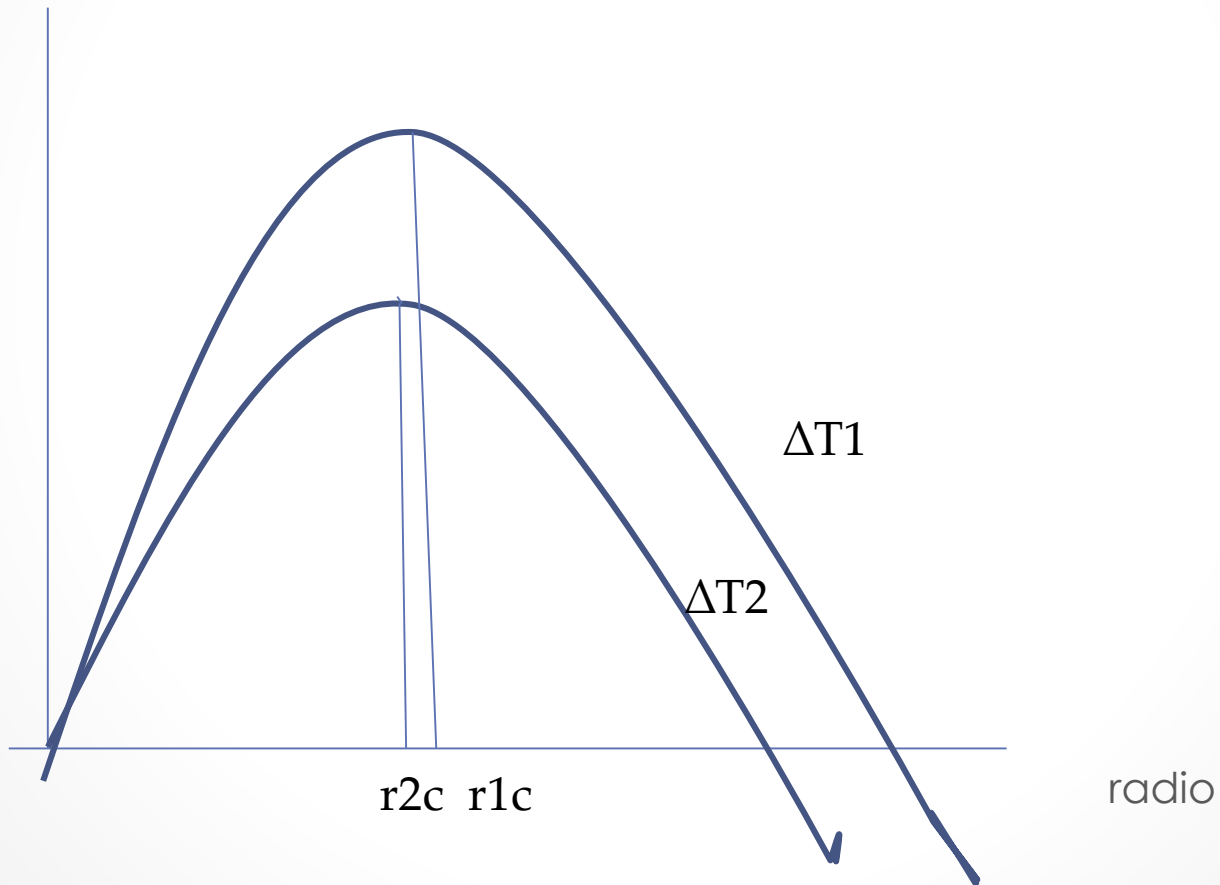
# $\Delta G_{\text{homo}}$ mayor $\Delta G_{\text{heter}}$

- $\Delta G$



# $\Delta T_2$ 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

