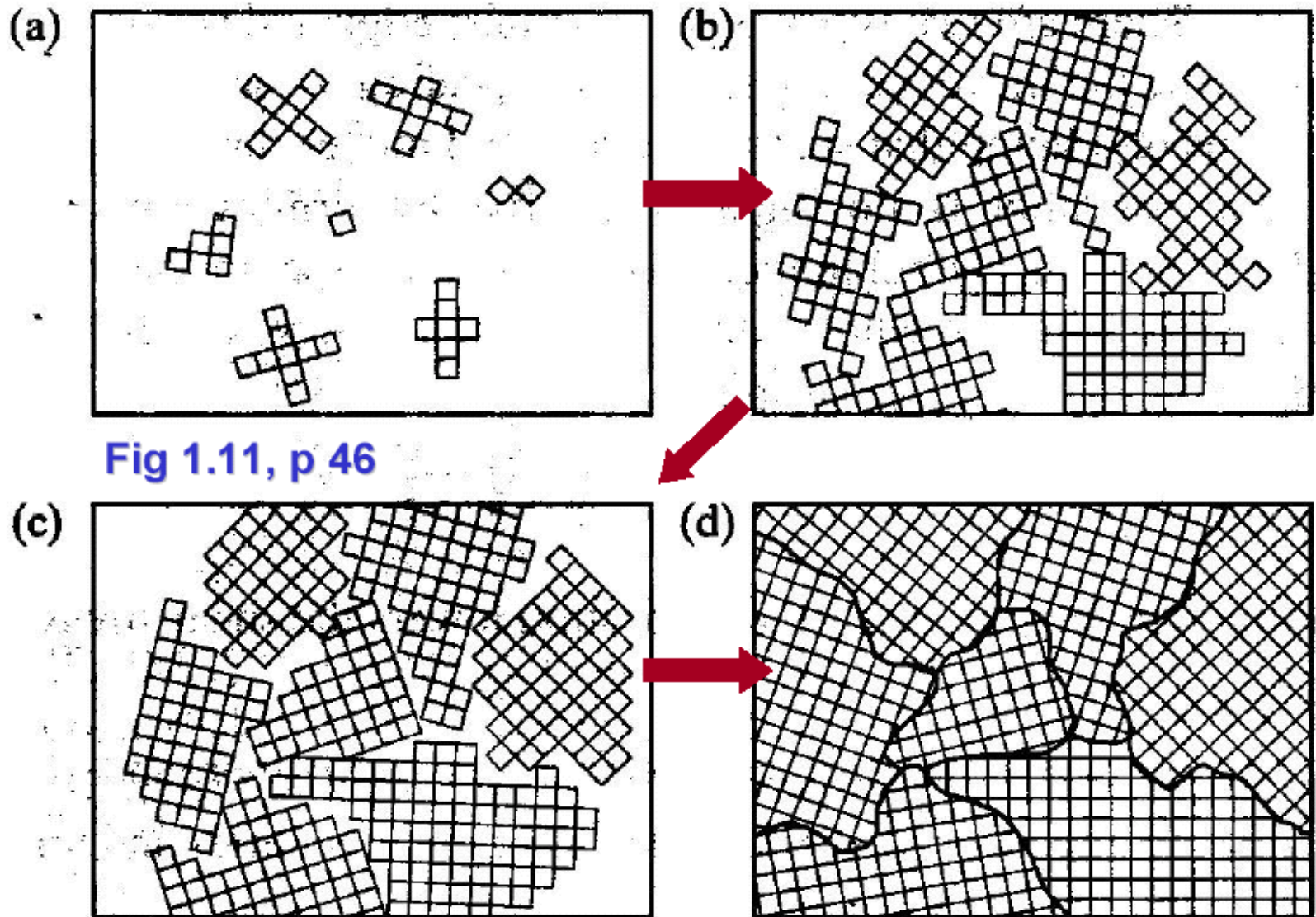


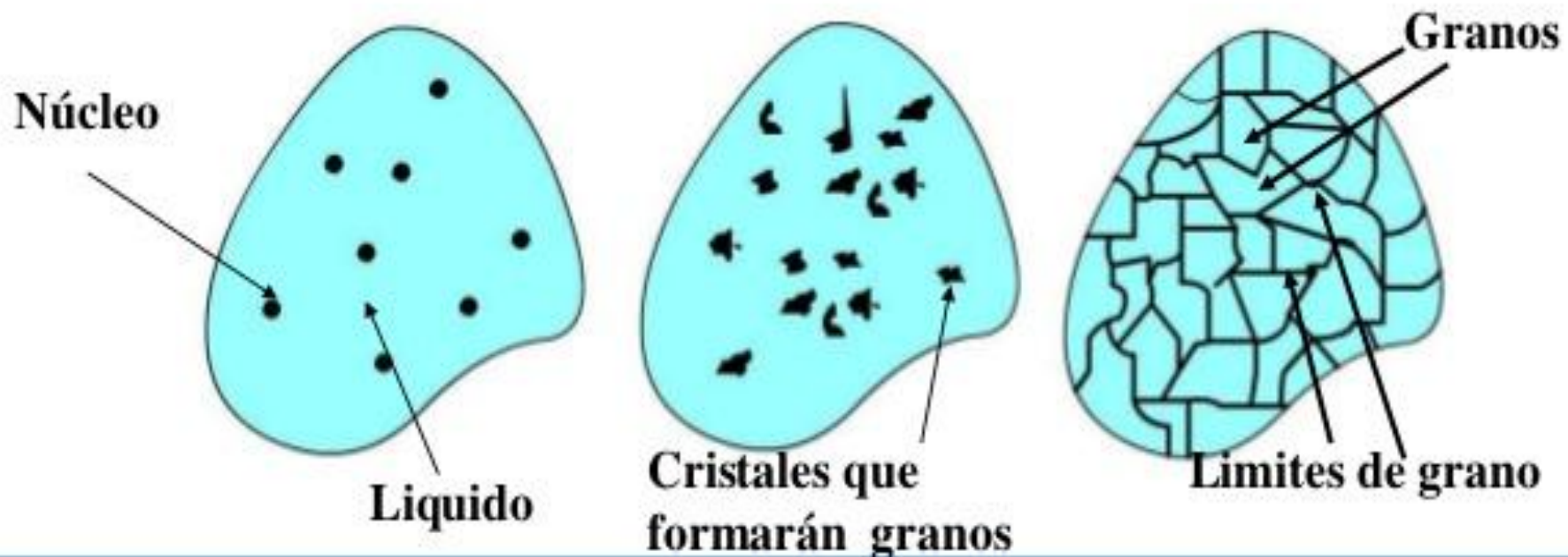
GRANOS

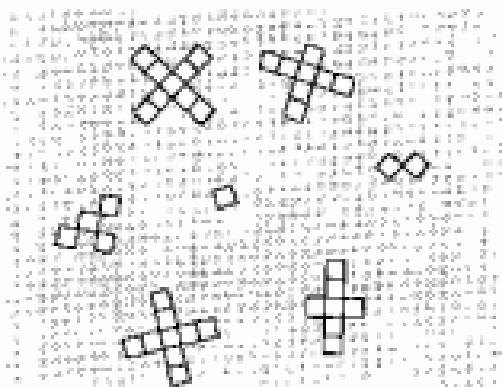
Julio Alberto Aguilar Schafer

Formación de estructuras policristales a granos

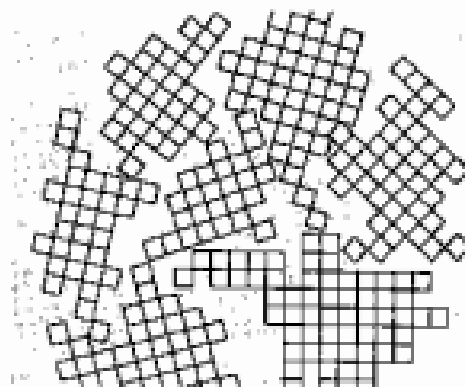


- Los Metales son fundidos para producir partes acabadas y semiacabadas.
- Los dos pasos de solidificación
 - **Nucleación** : Formación de un núcleo estable.
 - **Crecimiento del núcleo** : Formación de la estructura del grano.
- Los gradientes térmicos definen la forma de cada grano.

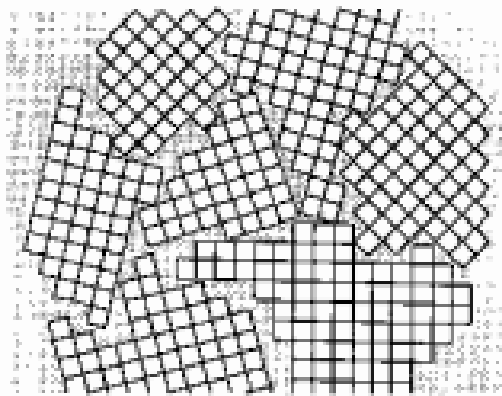




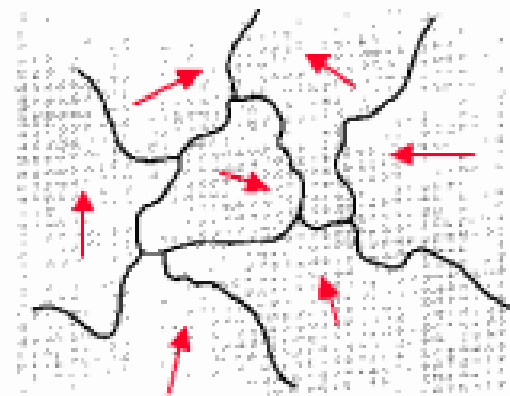
(a)



(b)



(c)

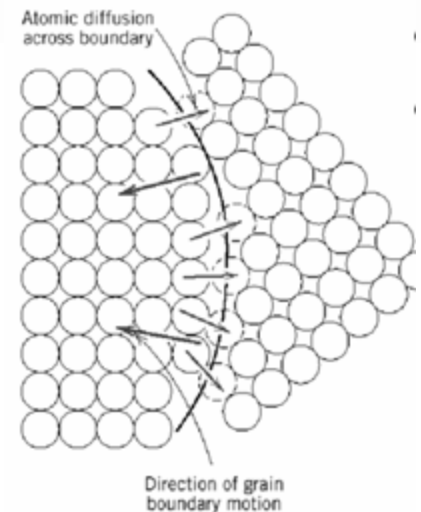


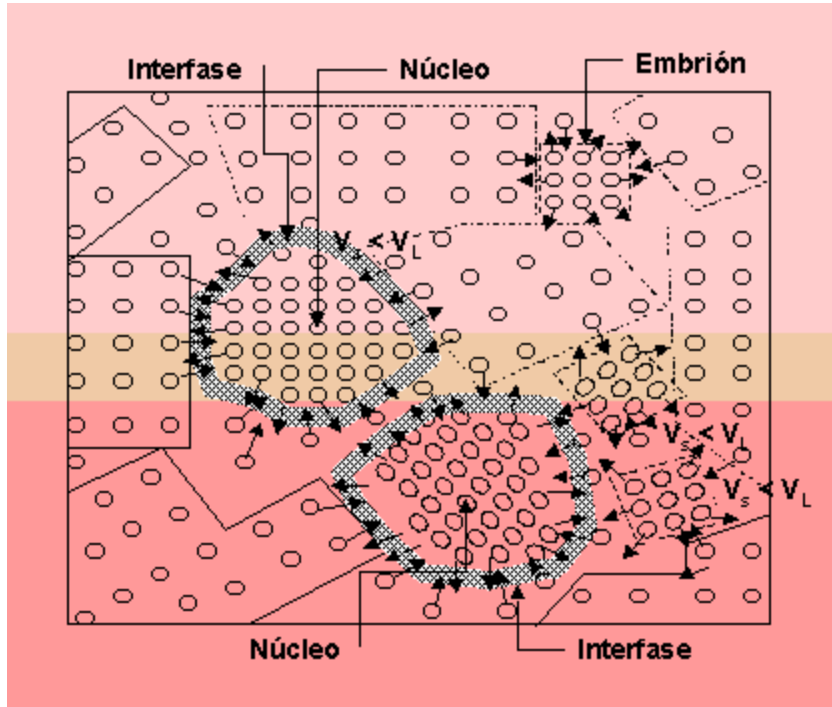
(d)

- a) small crystalline nuclei
- b) crystalline growth

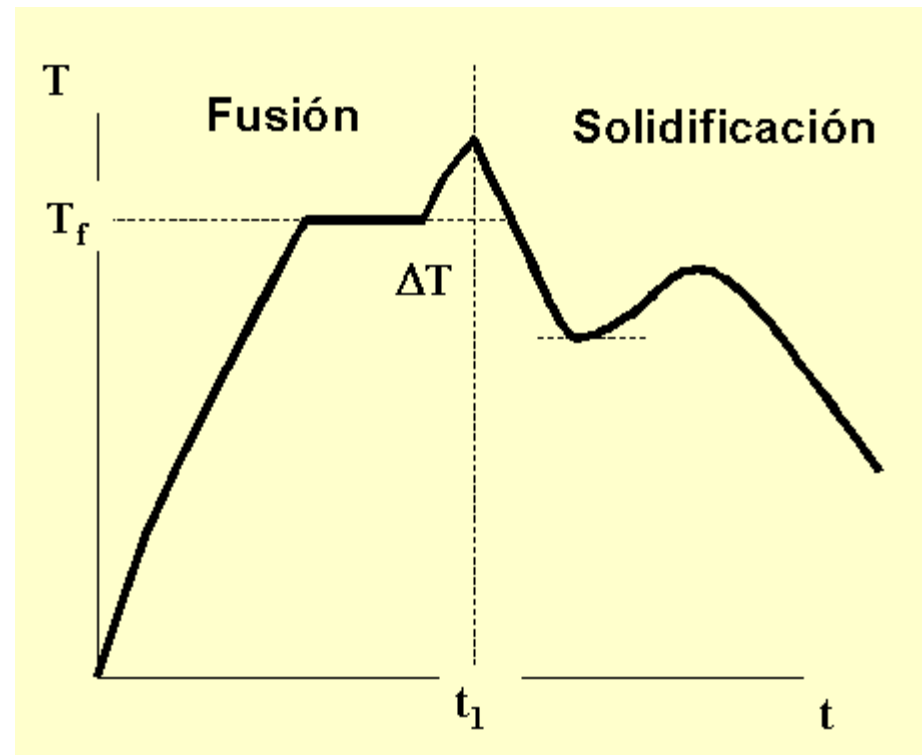
- c) solidified: irregular grains
- d) microscopic view

**Esquema (muy simplificado)
de un borde de grano**





Formación de embriones durante la solidificación.

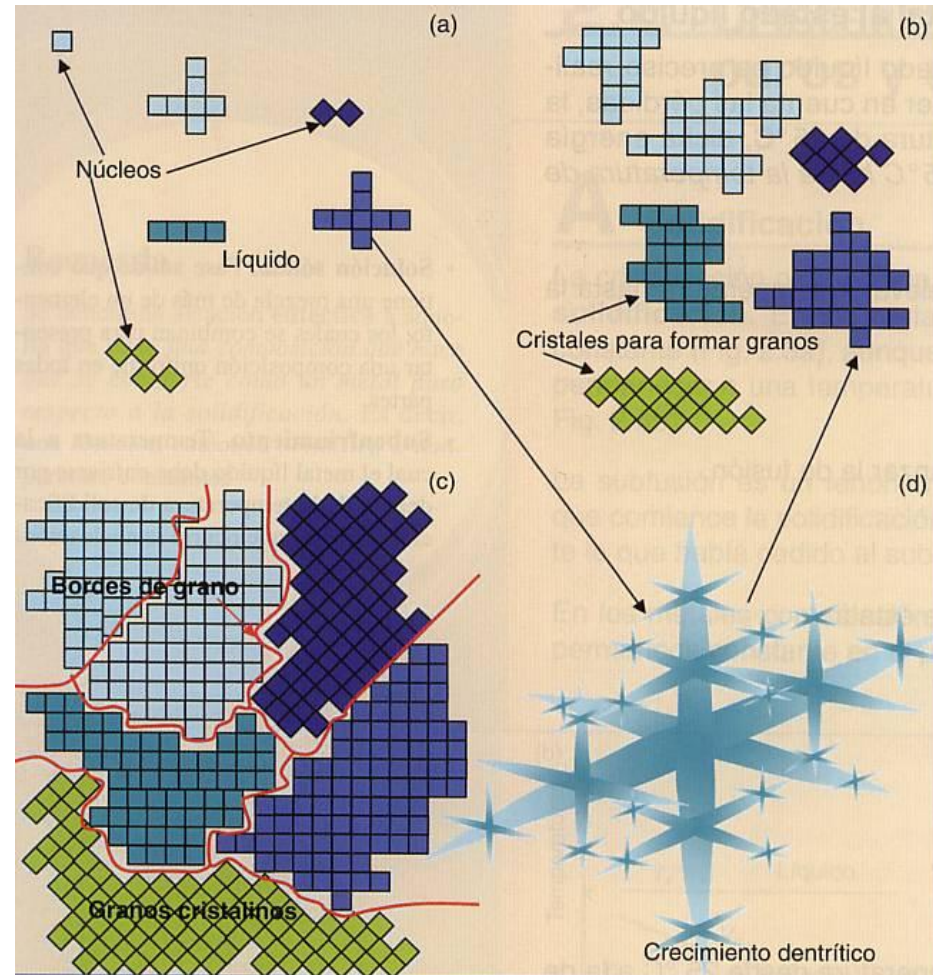


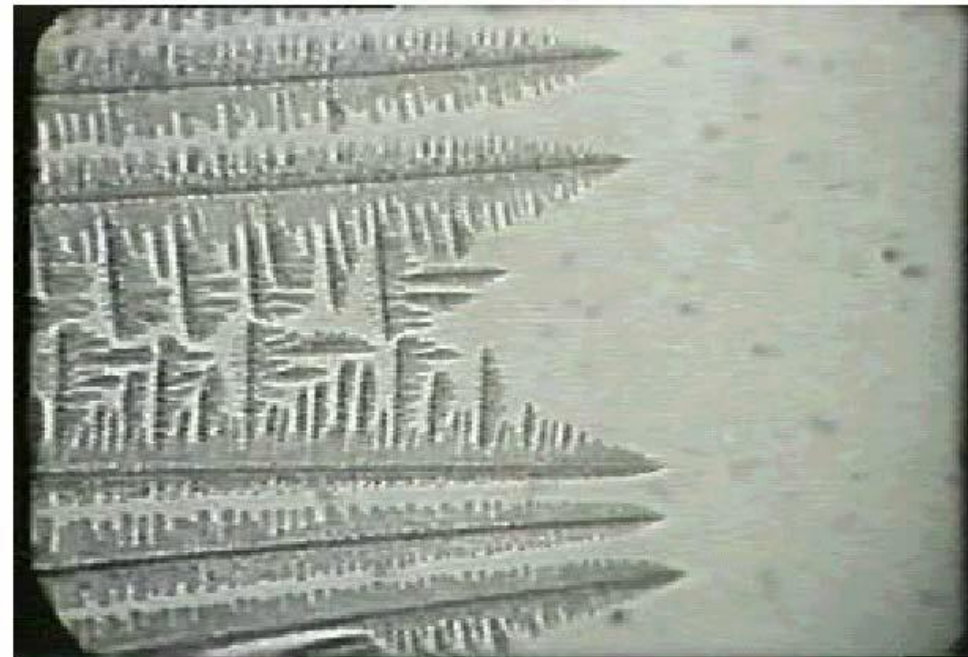
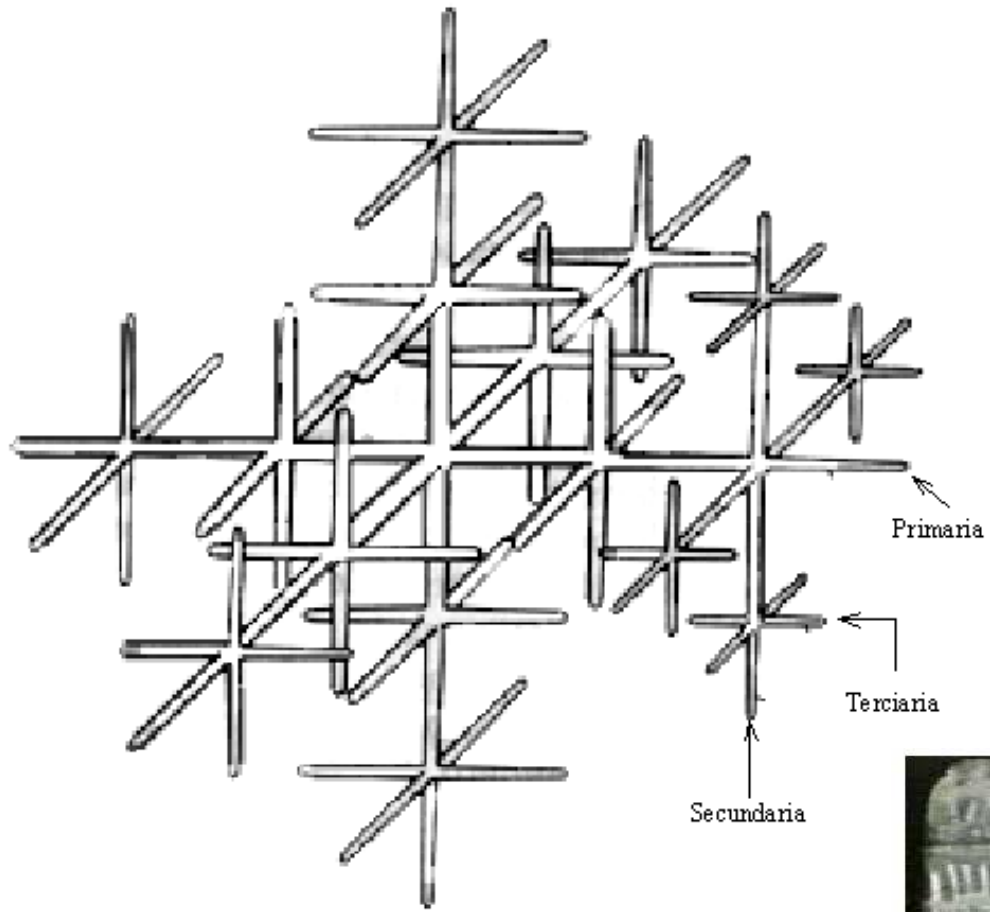
Formación de embriones durante la solidificación.

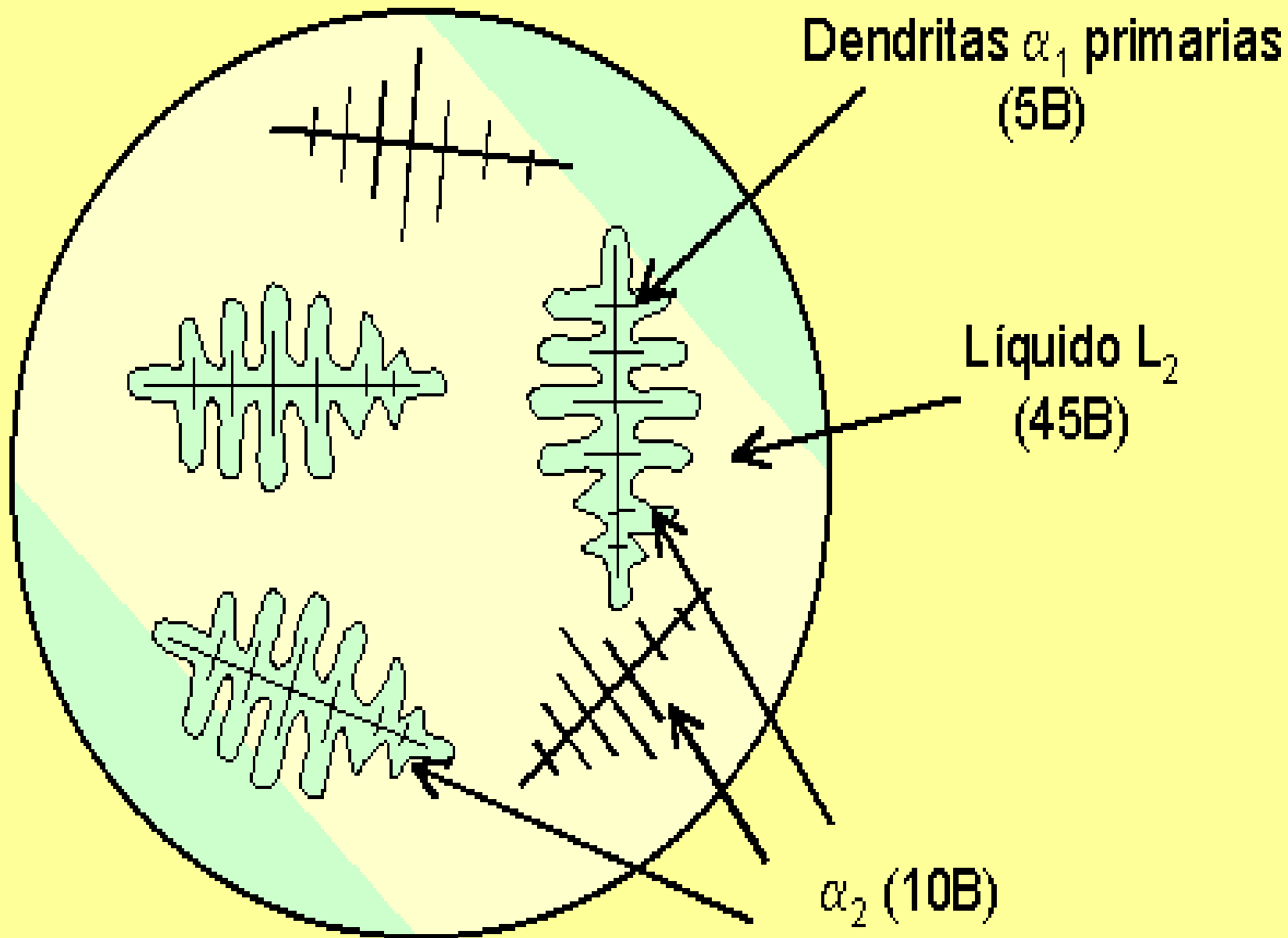
Etapas de solidificación.

En la solidificación de un metal o aleación se dan las siguientes etapas.

- a) **Nucleación** o formación de núcleos estables en la masa fundida.
- b) **Cristalización** o crecimiento del núcleo en las tres direcciones del espacio, en las denominadas dendritas para dar origen a cristales.
- c) **Formación del grano.** Los cristales anteriores van dando a su vez origen a una estructura granular. Interesa que el tamaño de estos granos sea pequeño ya que se obtienen mejores propiedades mecánicas.

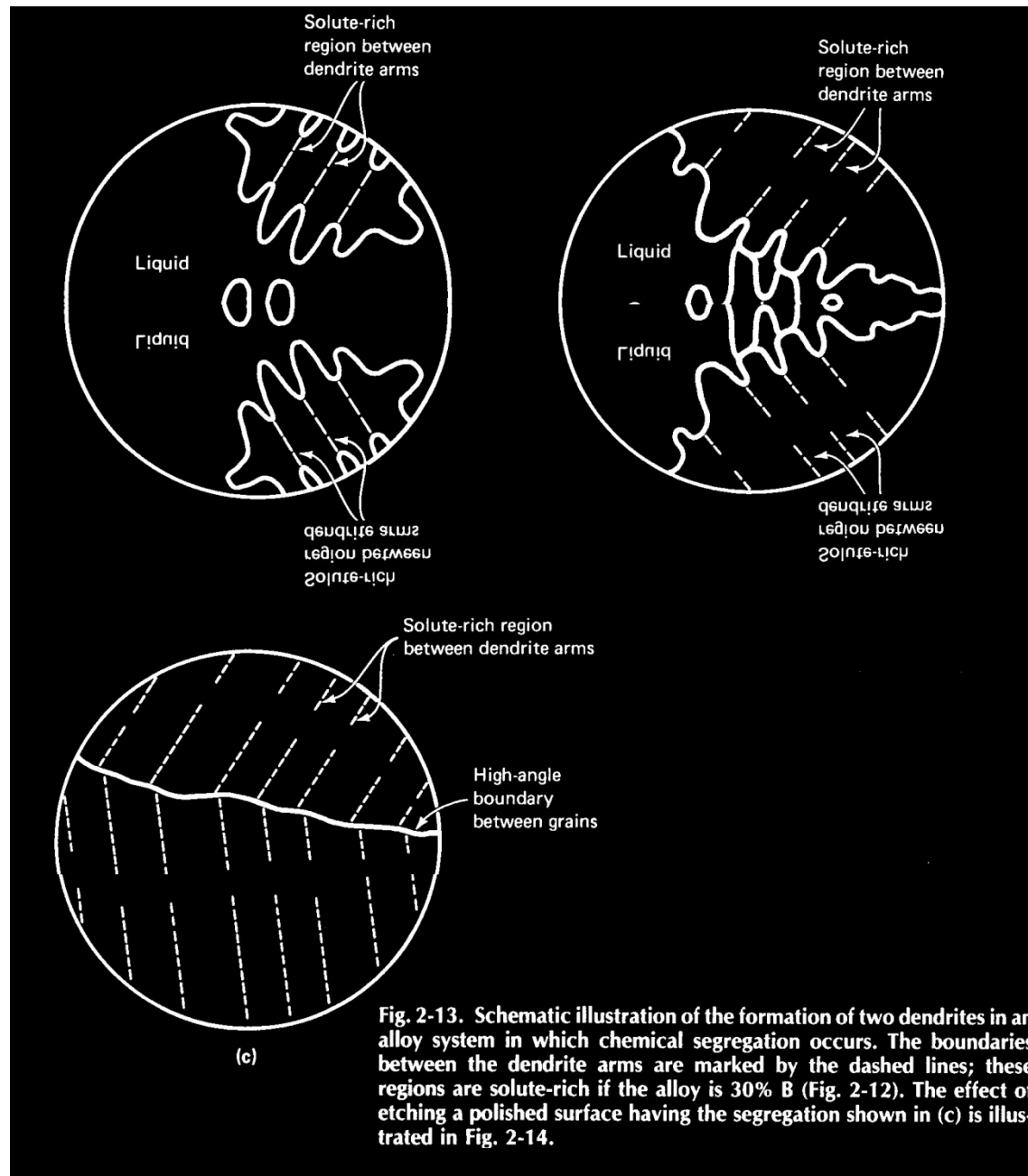






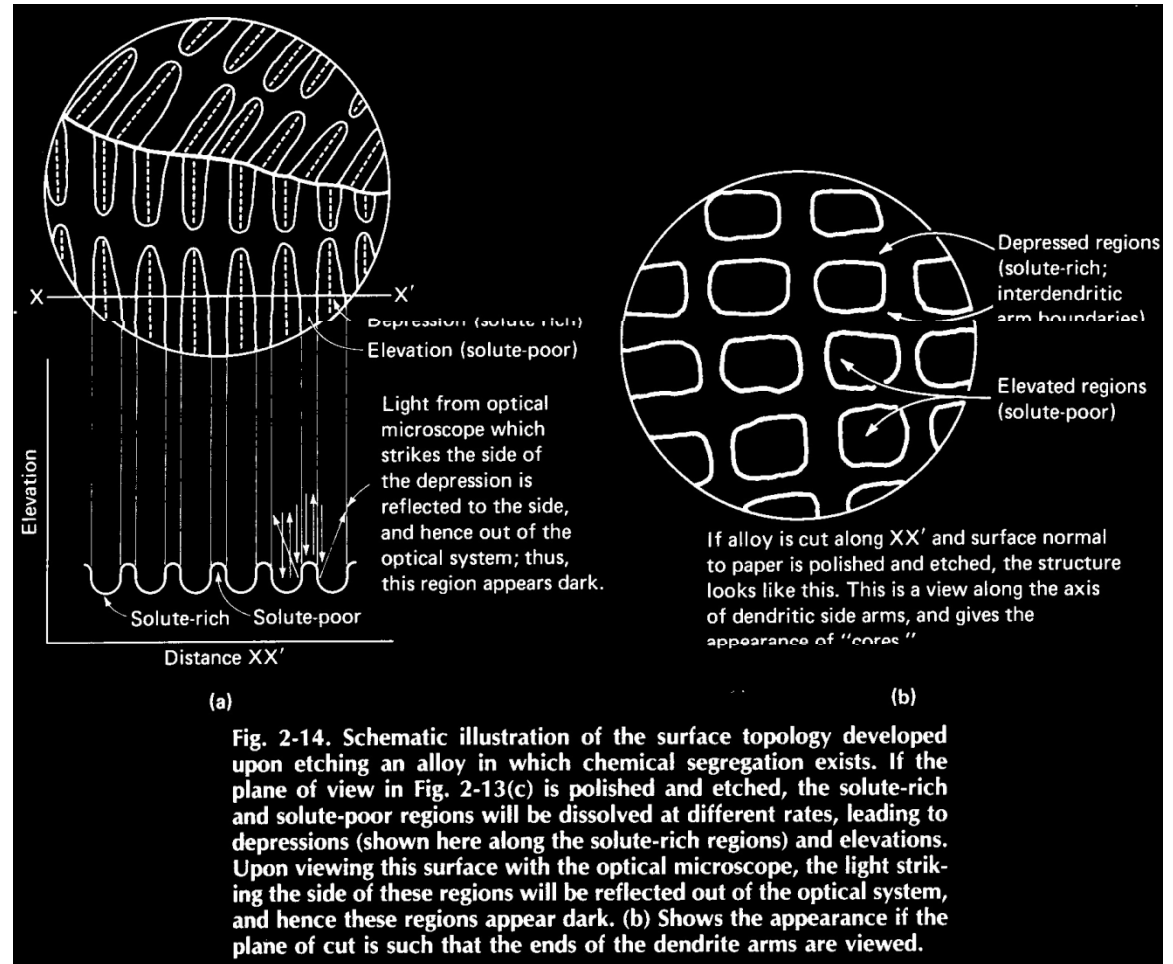
SOLIDIFICACION DE METALES

FORMACION DE DENDRITAS QUE PRESENTAN SEGREGACION QUIMICA



SOLIDIFICACION DE METALES

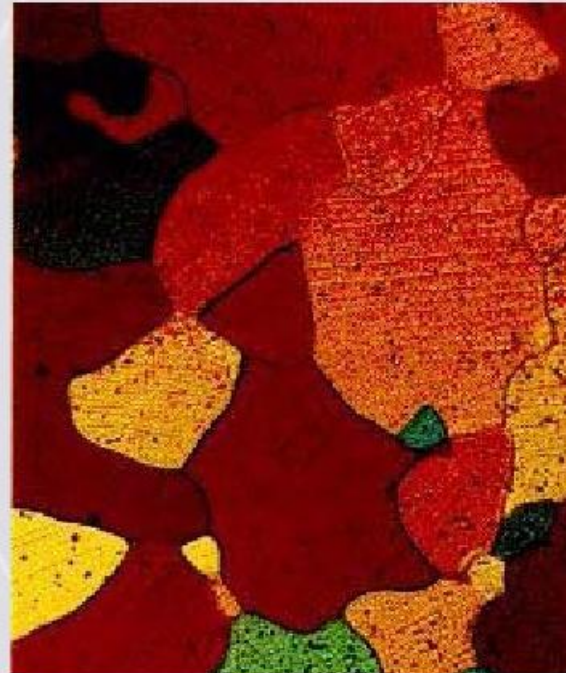
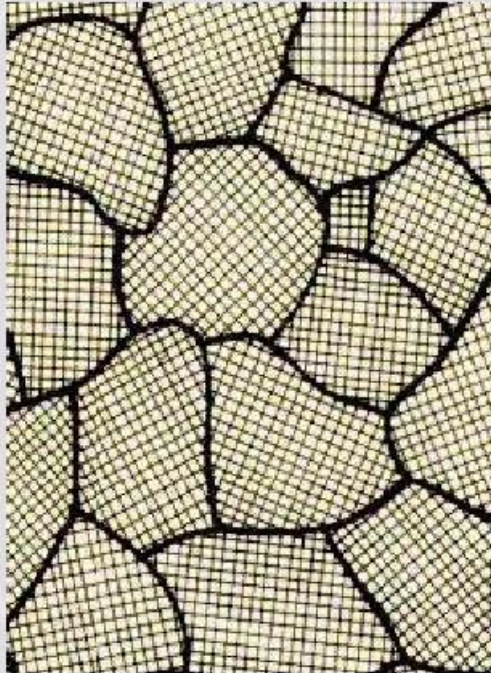
REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA TOPOLOGIA SUPERFICIAL PRODUCTO DE SEGREGACION QUIMICA DURANTE EL CRECIMIENTO DENDRITICO



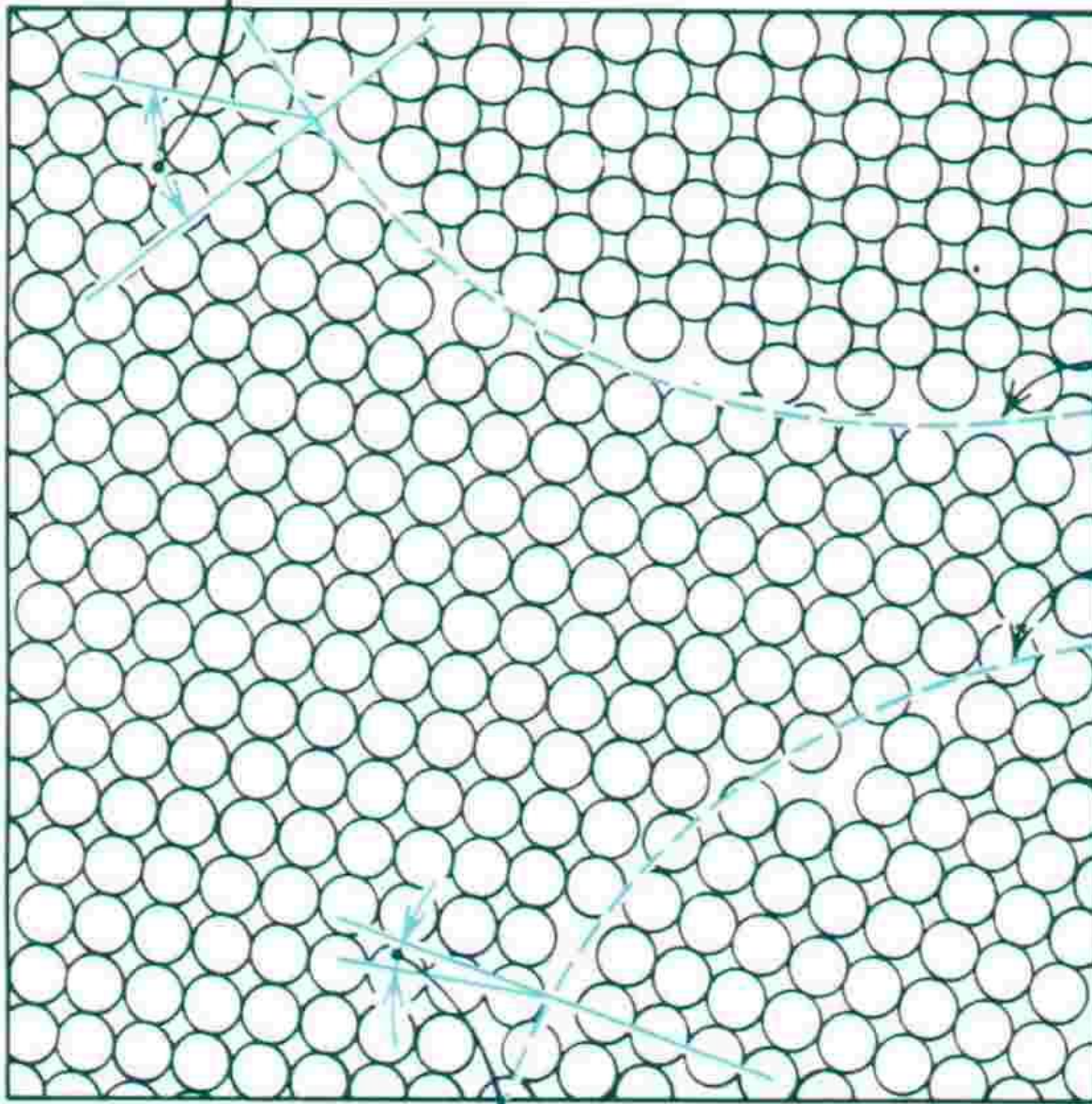
Morfología Cristalina

Material policristalino:

- La mayoría de los sólidos cristalinos son un conjunto de muchos cristales pequeños o granos
- Se obtiene al enfriar el material desde el estado fundido



Angle of misalignment



High-angle grain boundary

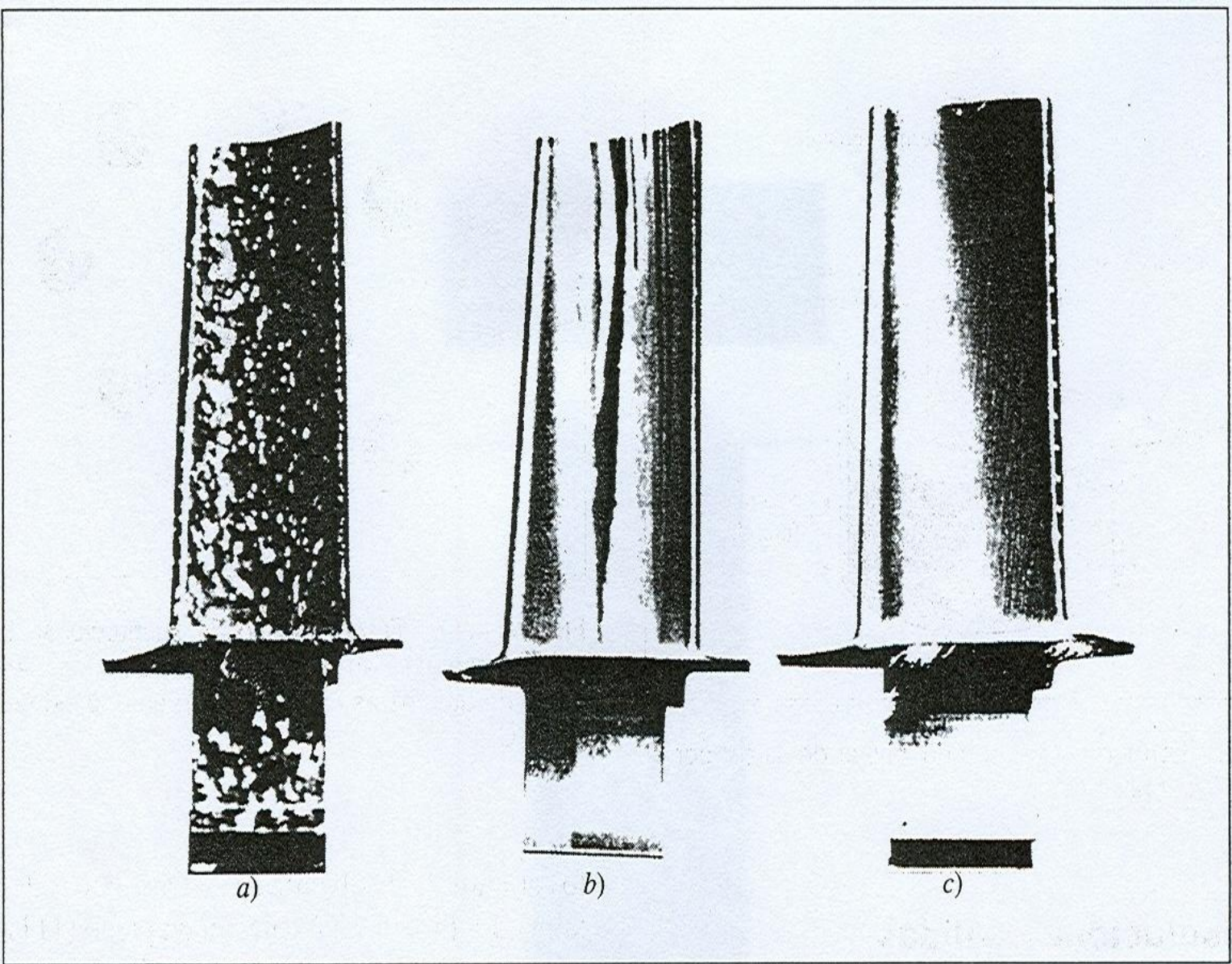
Low-angle grain boundary

Angle of misalignment

ESTRUCTURA DE MONOCRISTALES

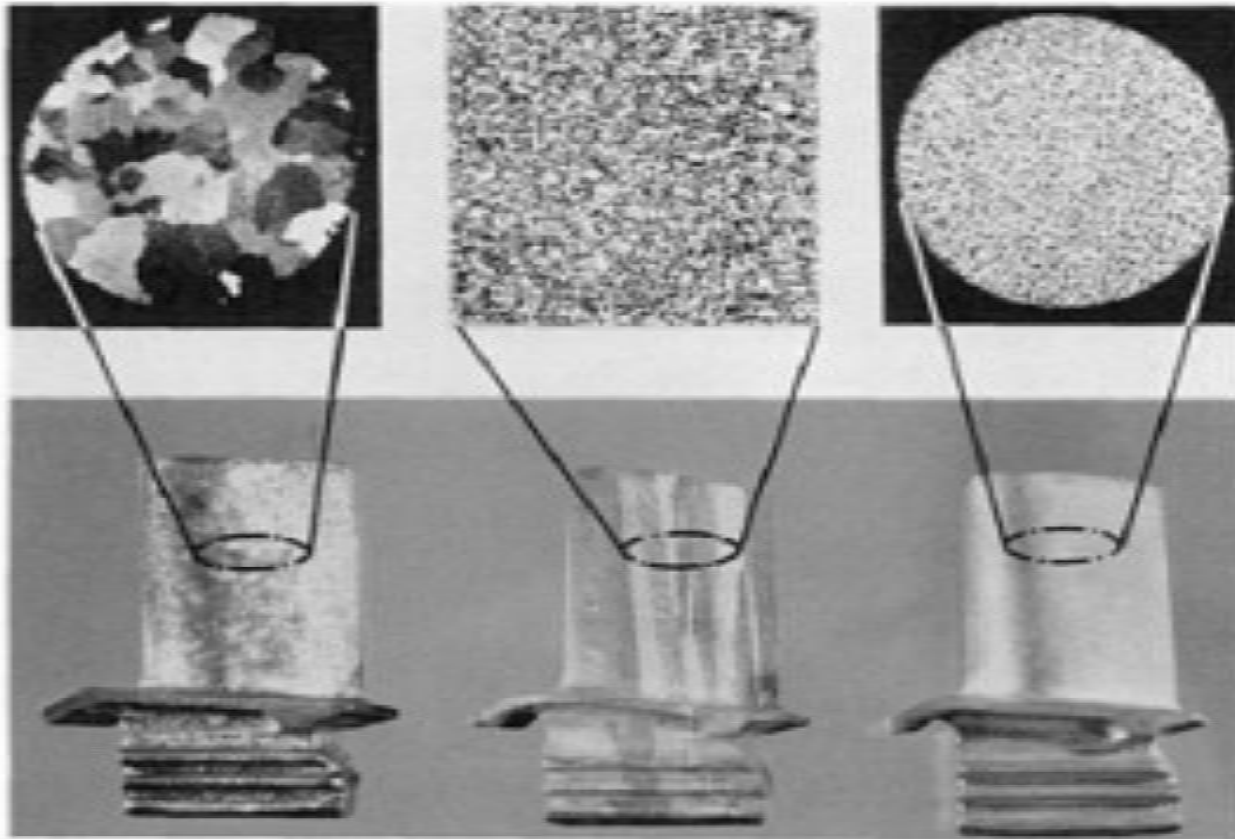
Alabe de turbina de avion





(Cortesía de Pratt and Whitney Co.)

FIGURA 4.11. Álabes de una turbina de gas con diferentes estructuras granulares: a) Policristalino equiaxial; b) policristalino columnar, y c) monocristal.



**Cristales
equiaxiales**

**Cristales
columnares**

Monocrista

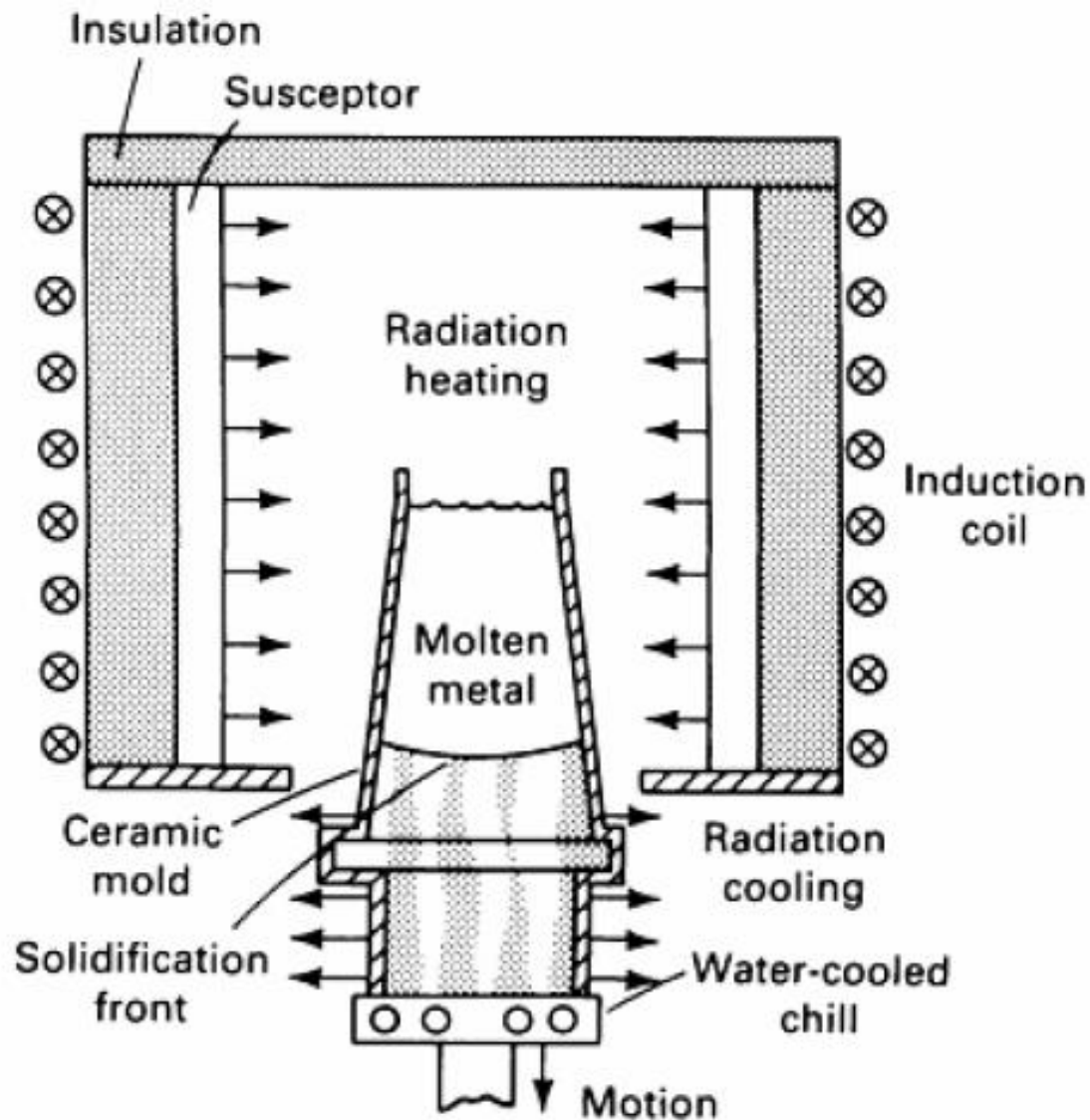
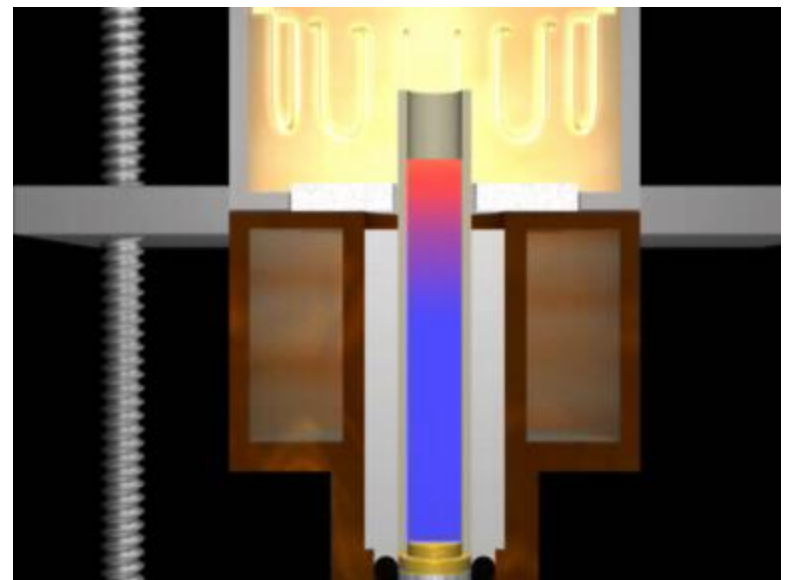
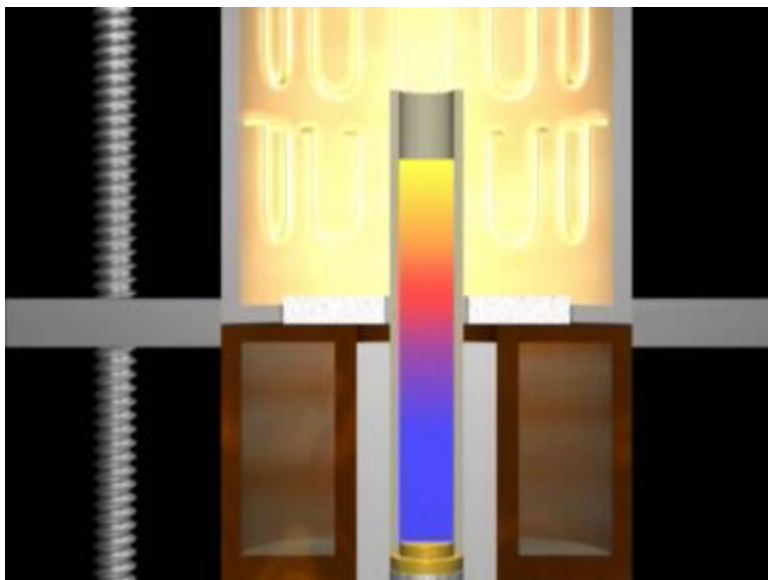
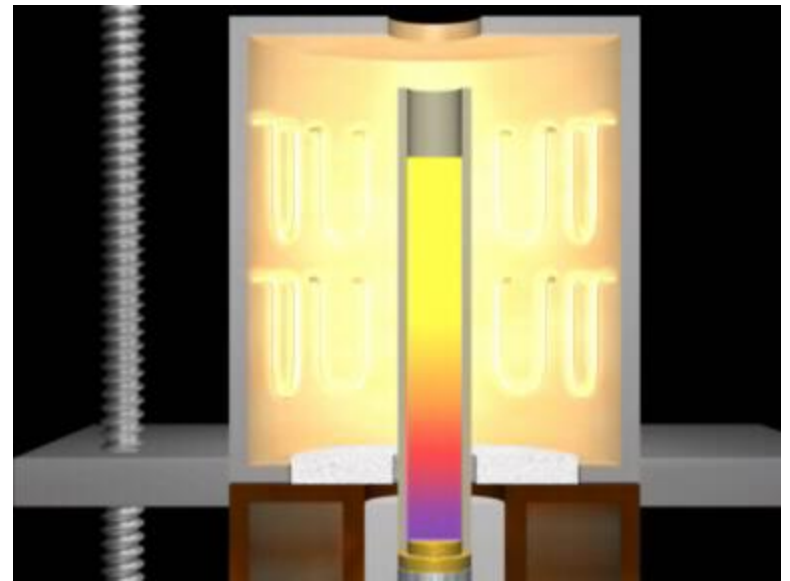
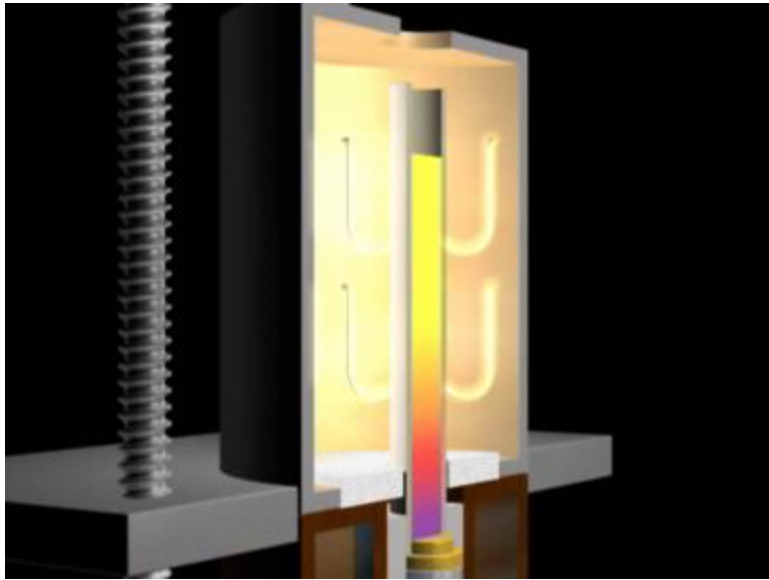
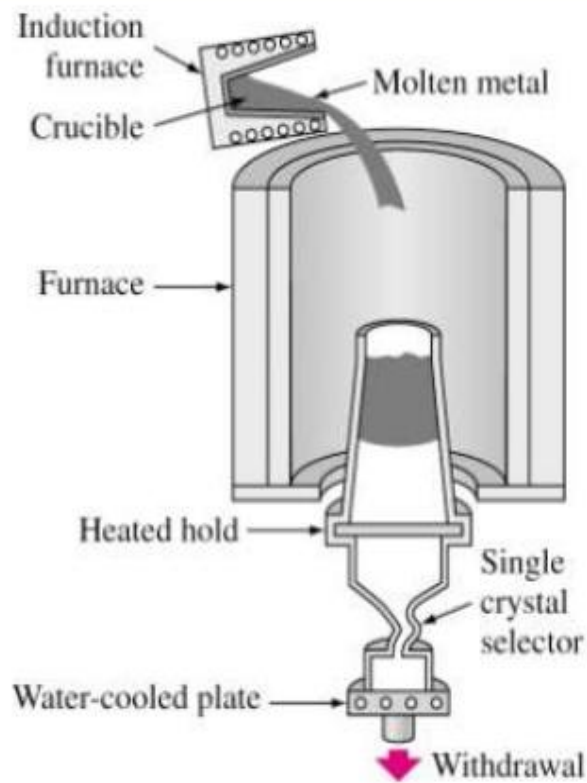


Fig. 3 Schematic showing the directional solidification process. Source: Ref 2

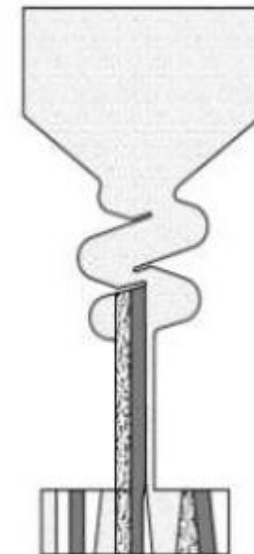




(a)

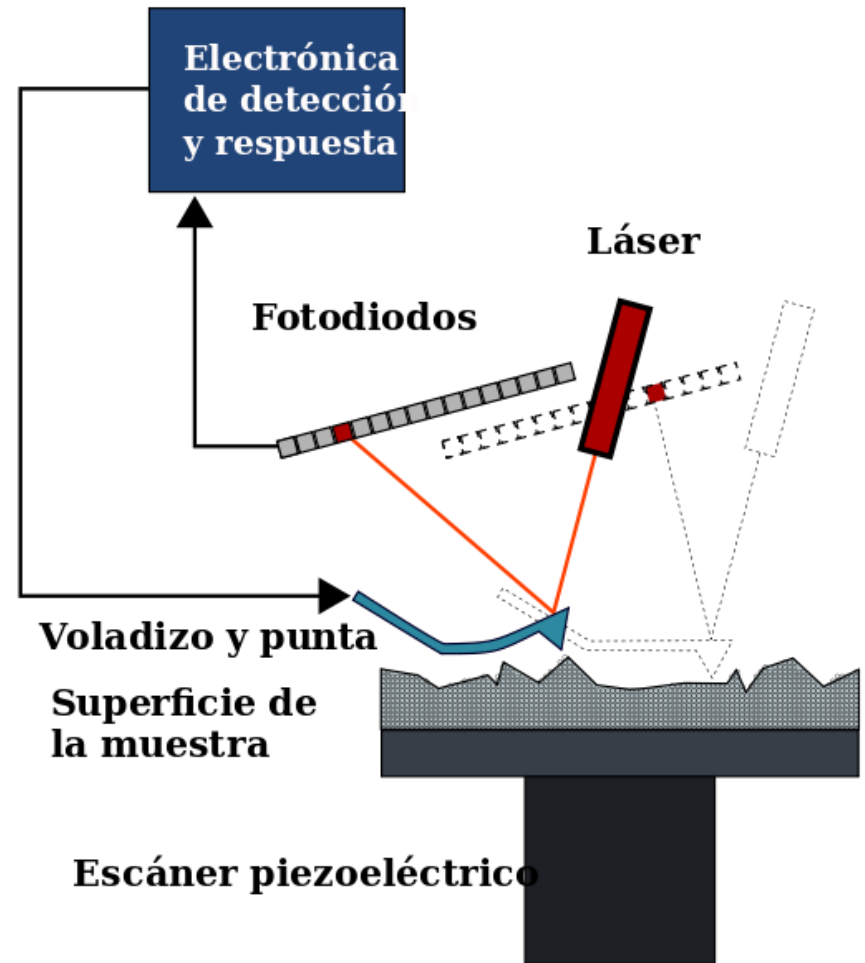


(b)



(c)

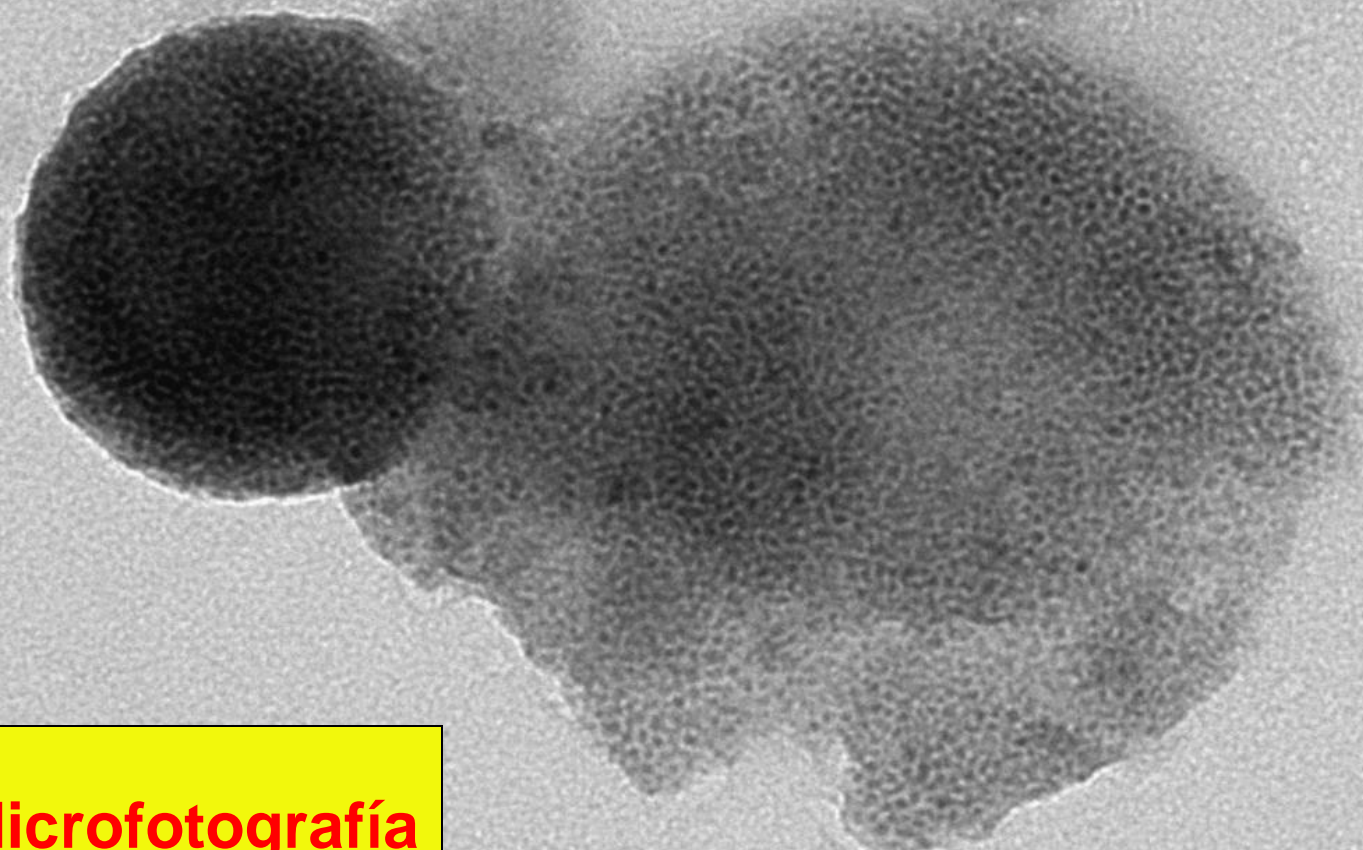
- a) Esquema del proceso para la producción de alabes monocristalinos para turbinas de gas.
- b) Primer plano de la sección de moldeo para producir un alabe monocristalino mostrando el crecimiento competitivo durante la solidificación debajo del selector de monocristales.
- c) El mismo caso que b) pero mostrando la supervivencia de un solo grano durante la solidificación a través de un selector de monocristales.



Microscopía Electrónica de Transmisión

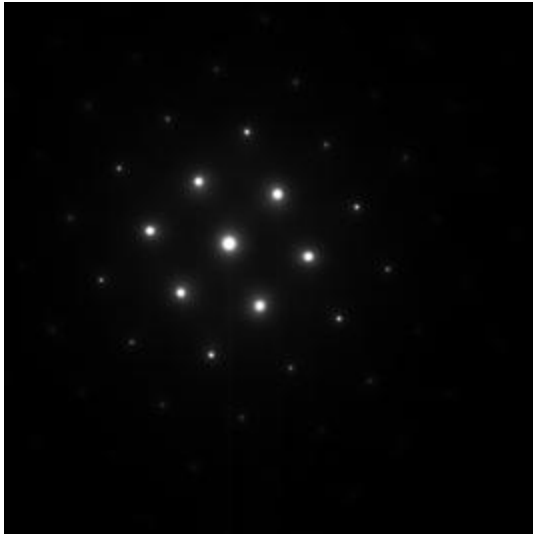
**Microfotografía
FeO**

100 nm



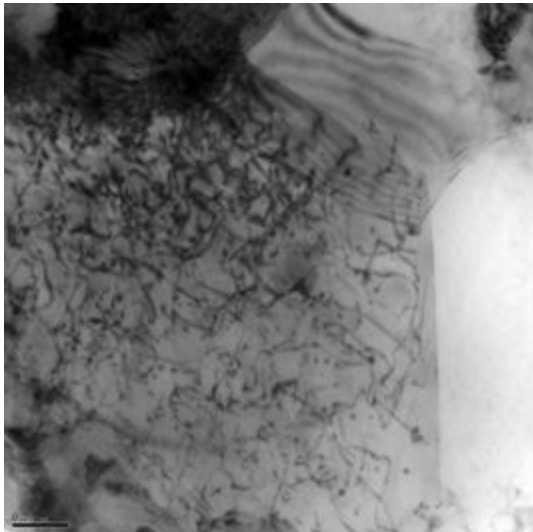
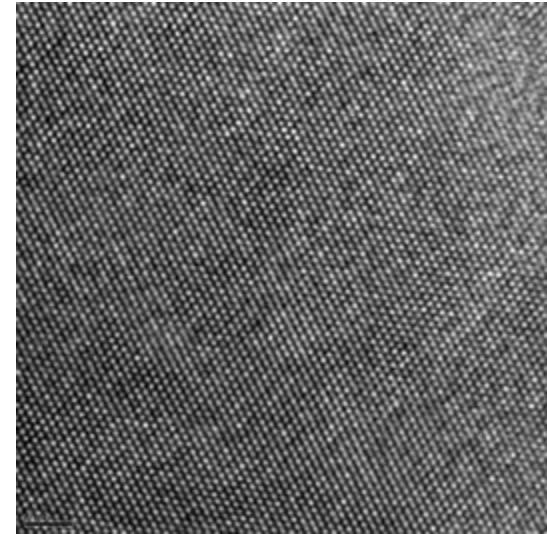
Monocristales

- **Los materiales estructurales, que deben resistir esfuerzos, frecuentemente son policristalinos.** Aún así, los monocristales se ocupan para aplicaciones especiales: (p.e., álabes monocristalinos de turbinas).
- Los monocristales se usan mucho en instrumentación y en electrónica (celdas solares, relojes de cuarzo, piezoeléctricos, etc.).
- Los monocristales también son importantes en ciencias. En particular, para comprender bien el comportamiento de los policristales es necesario conocer previamente el de los monocristales



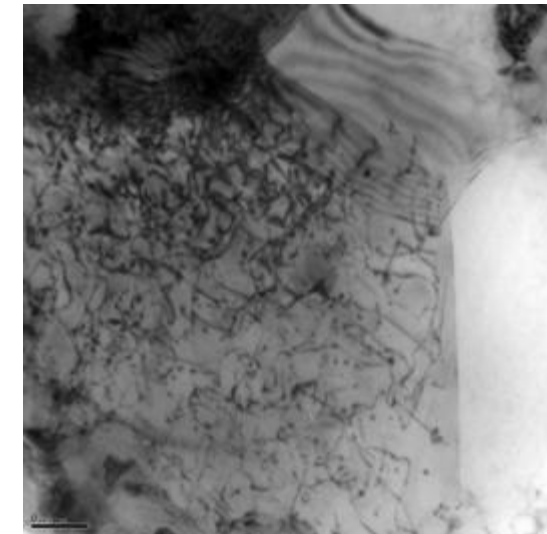
← Difracción
de
electrones

Alta
resolución →
HR-TEM

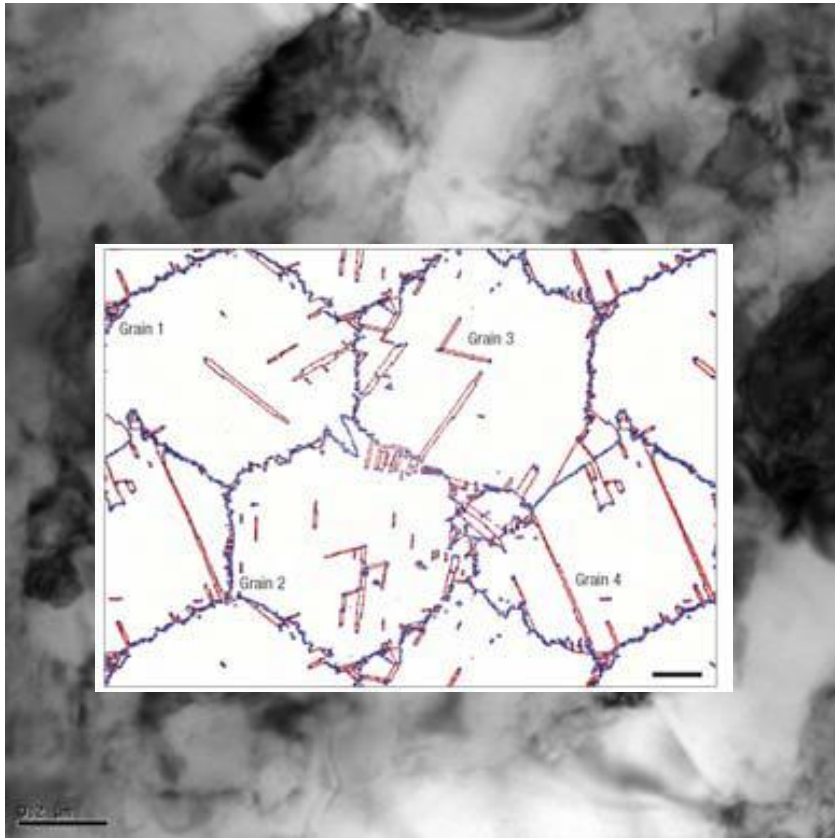


← Defectos
cristalino
s

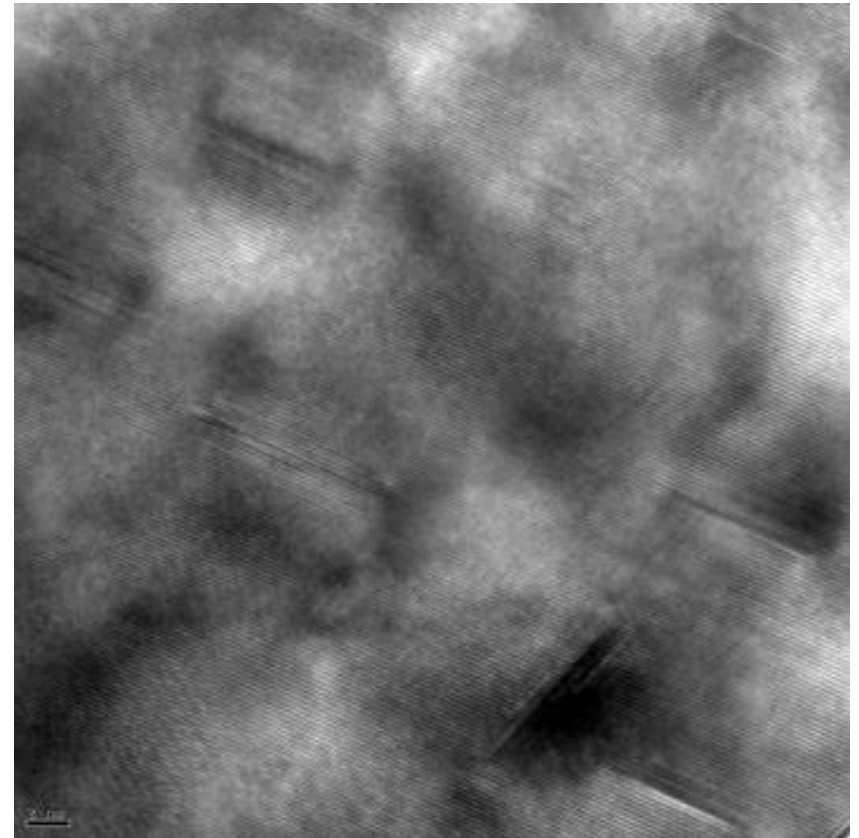
Estructura
de →
granos



Comportamiento Mecánico de Al Nanocristalino

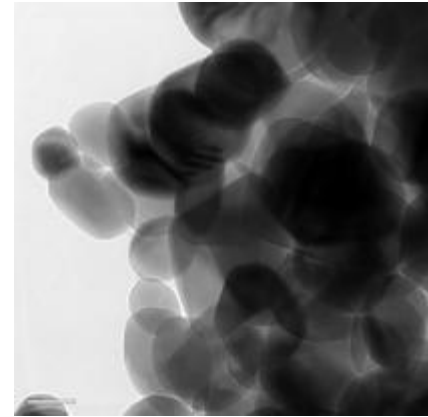
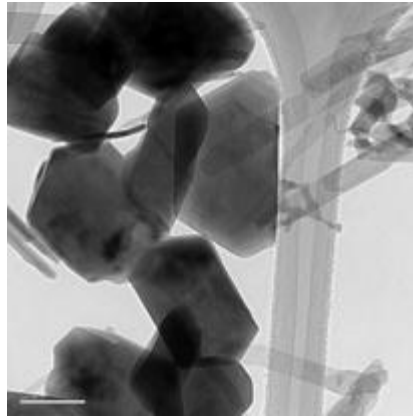
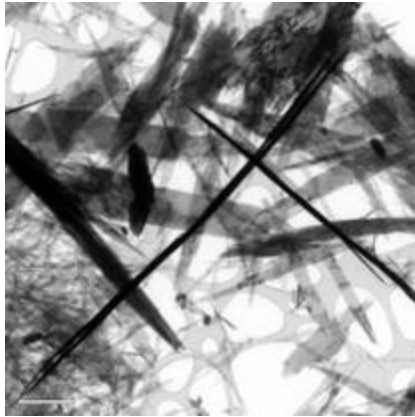


Campo Claro
Estructura de grano
nanométrica

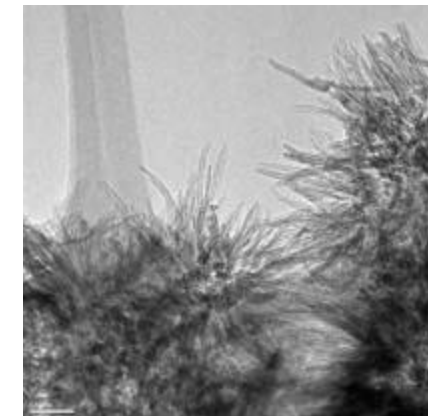
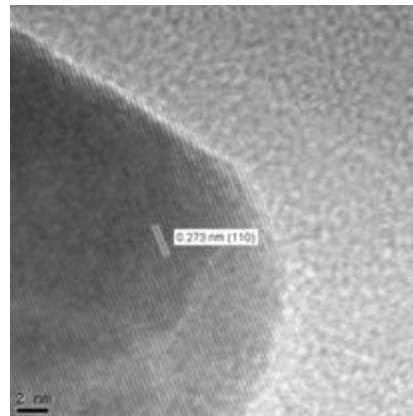
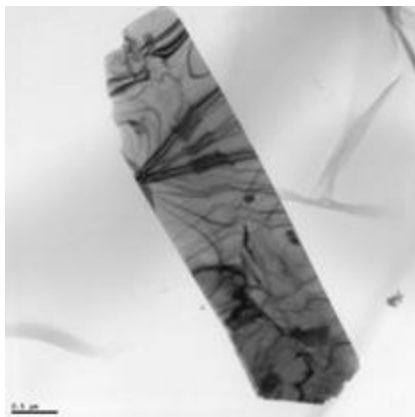


HRTEM
Defectos cristalinos

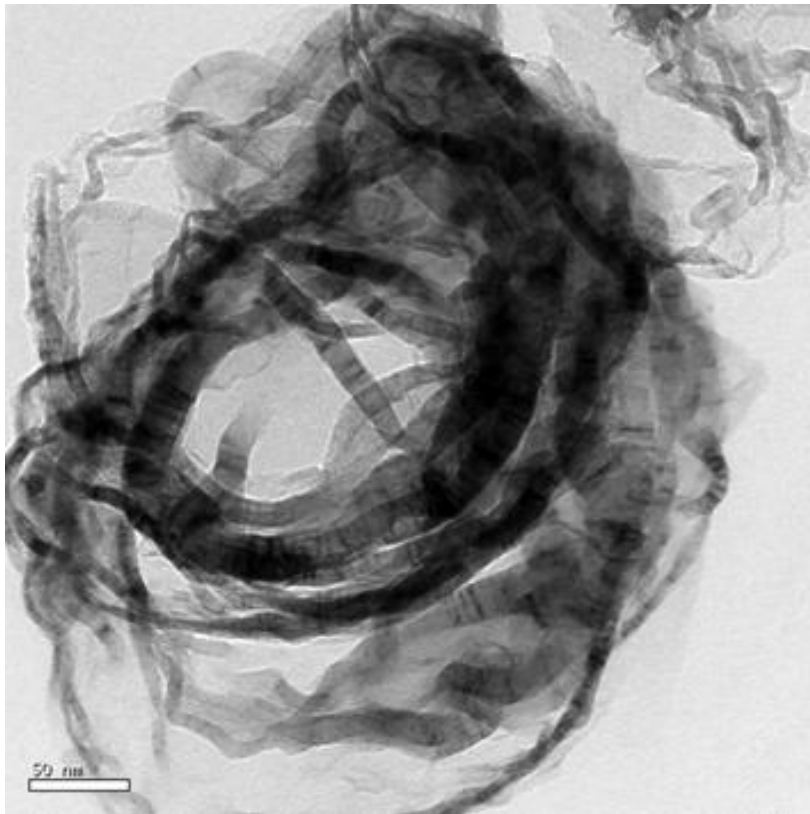
Nanopartículas de MoO₃ (condensación)



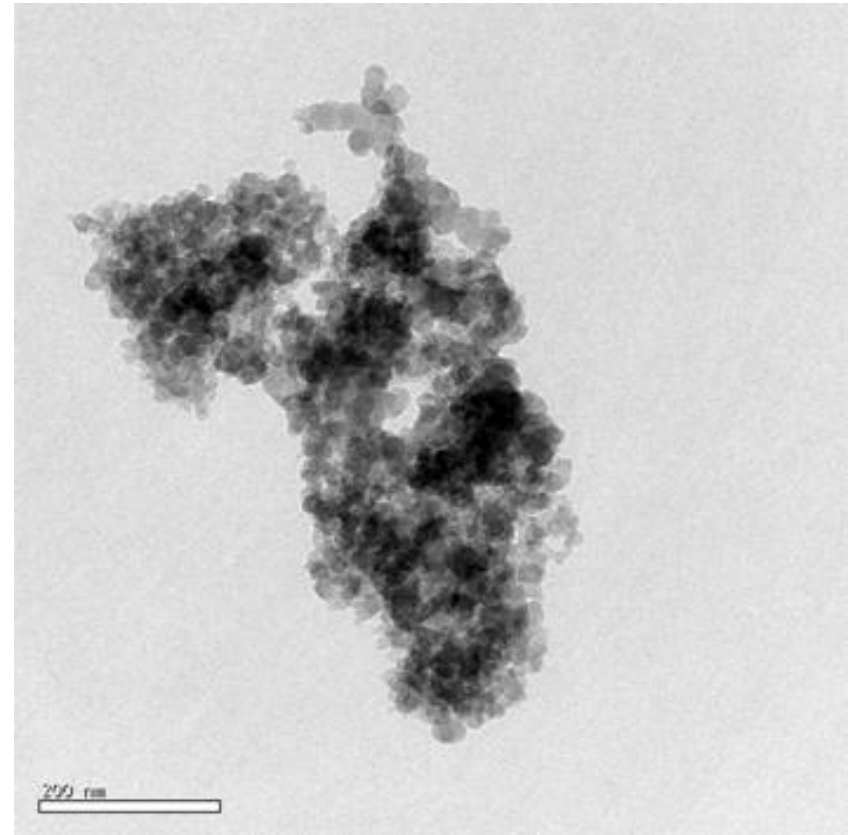
Nanopartículas de CuO (reacción hidrotérmal)



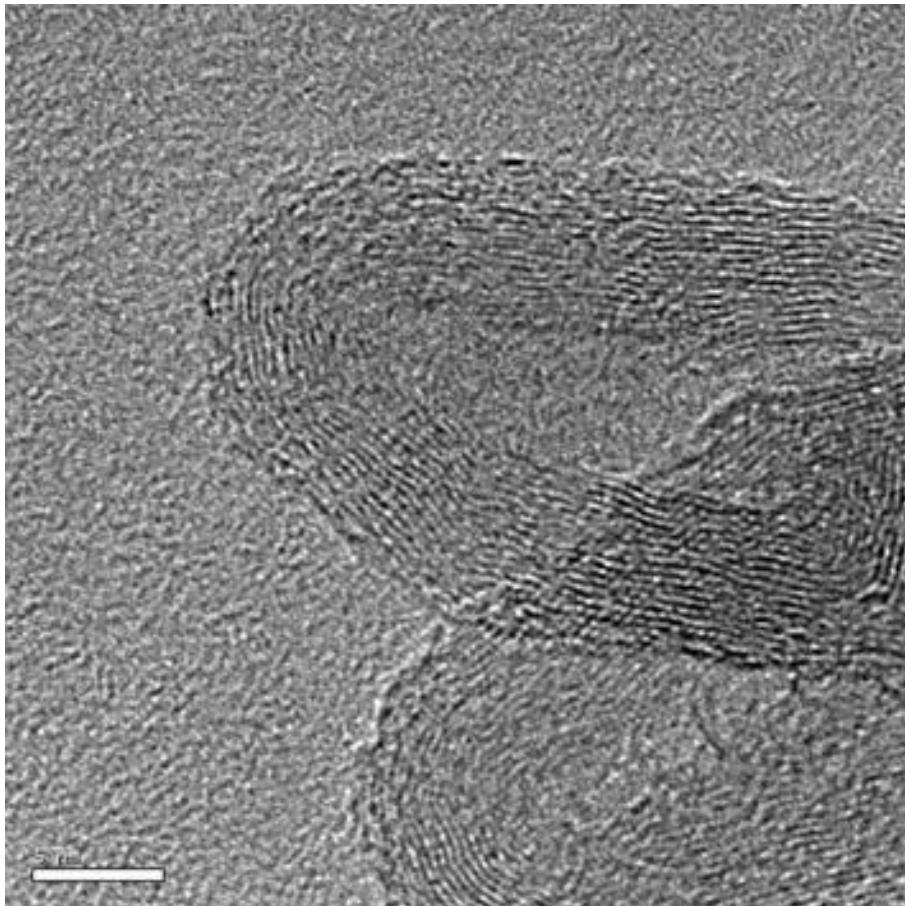
Nanopartículas – Emisiones Vehículos Diesel



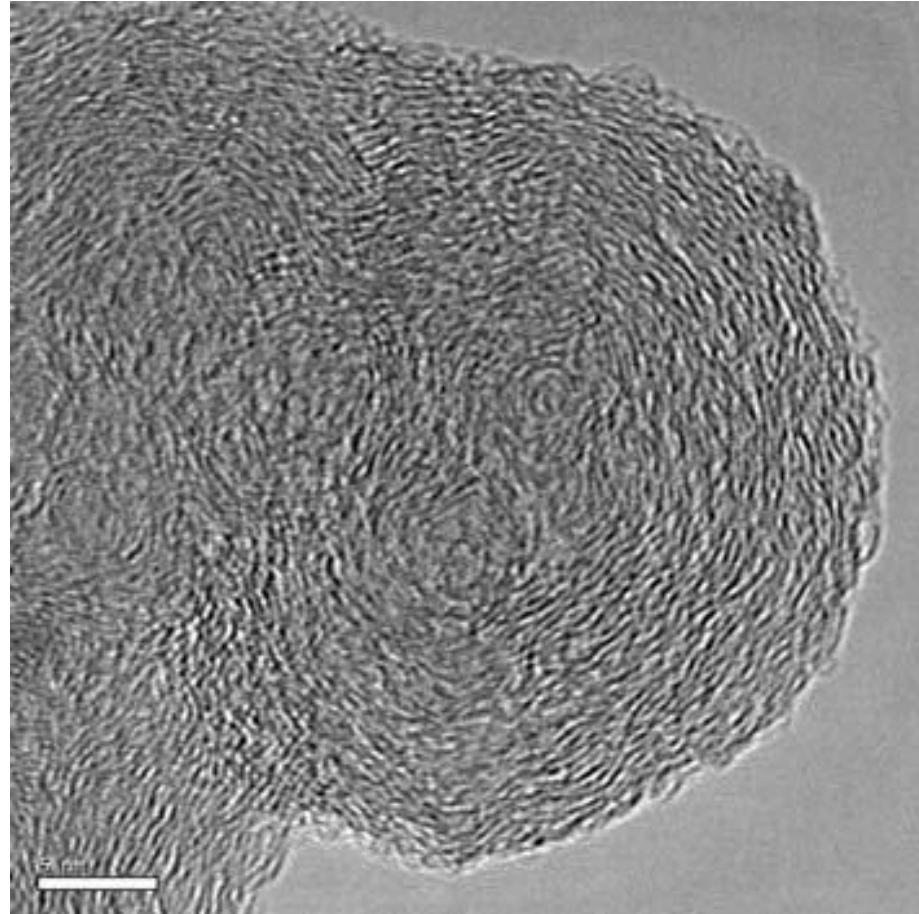
Nanocintas de carbono



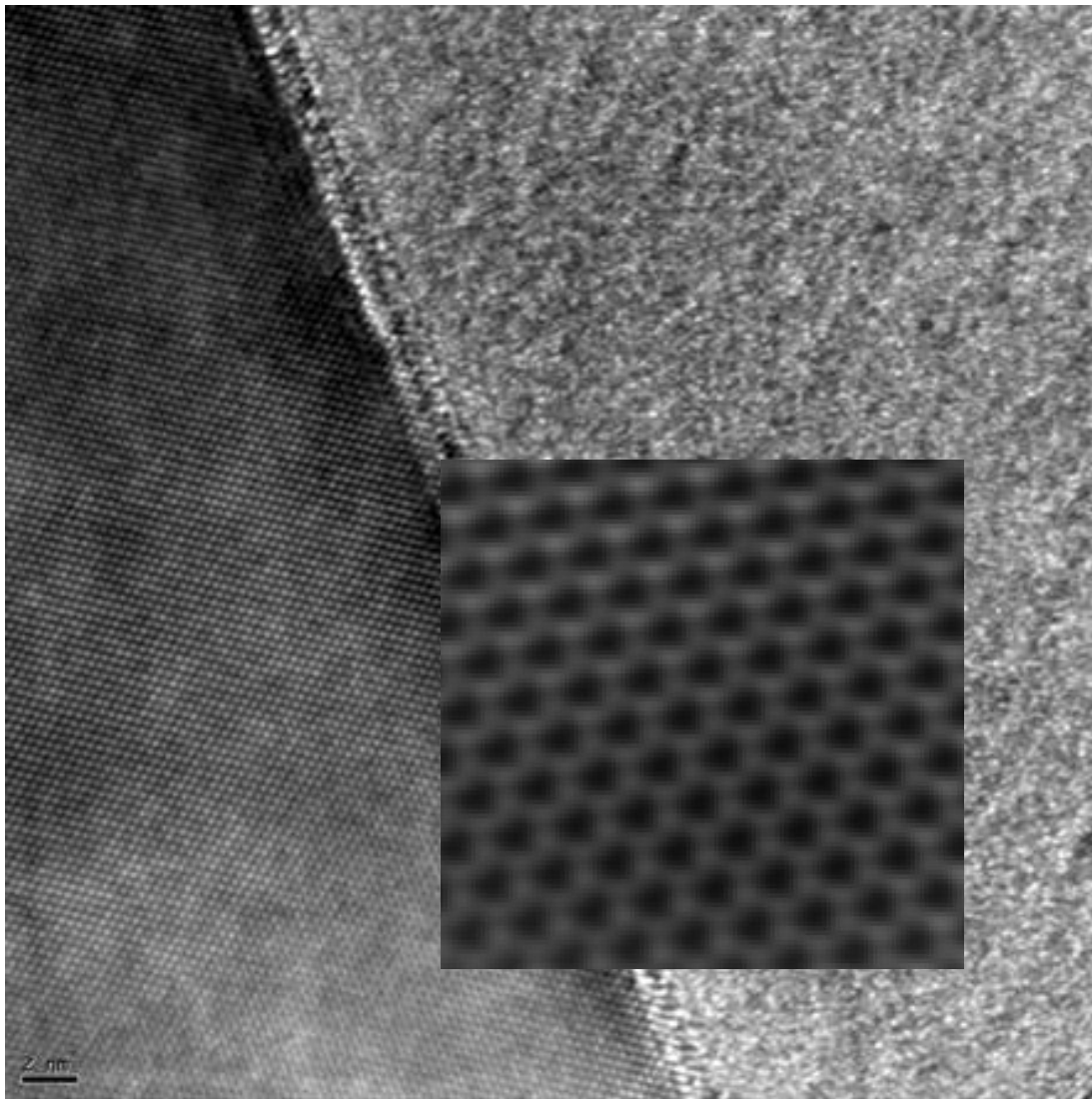
**Clusters de Partículas
Esféricas Amorfas**



Nanotubos



**Nanopartícula
amorfa/grafítica**



Se observa la estructura atómica directamente

Película delgada de SiC-amorfo (izq.) sobre Si cristalino (der.)

Microscopía Electrónica de Barrido. (Scanning Electron Microscopy (SEM))



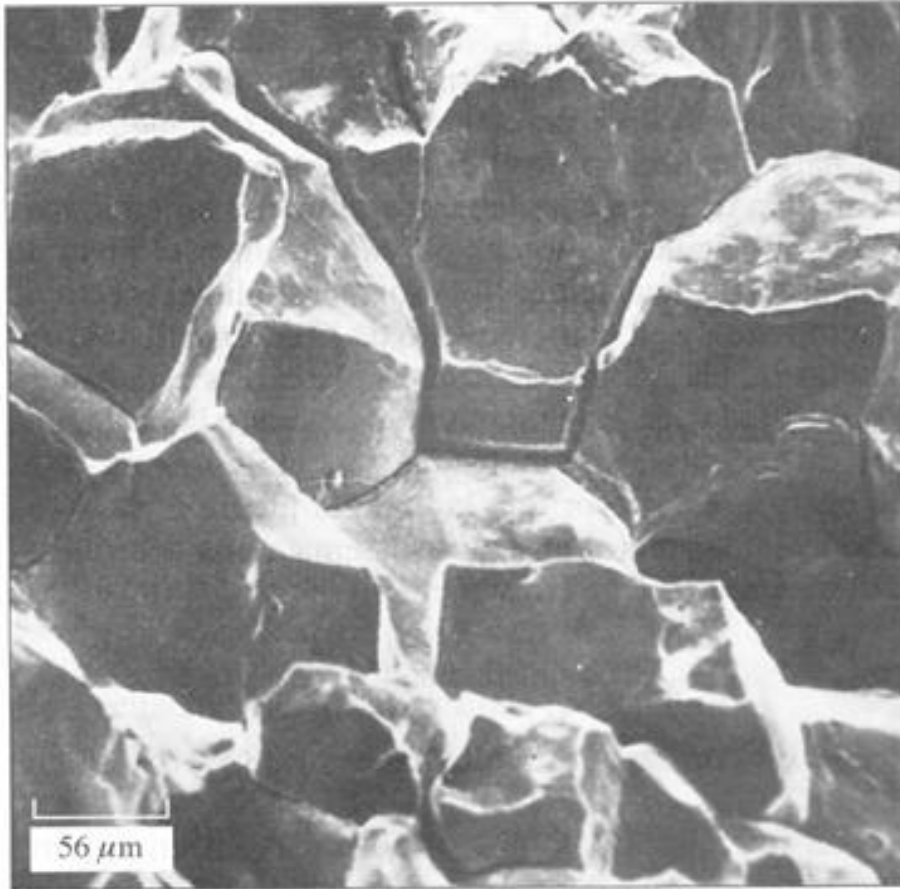
(Cortesía de JEOL Ltd.)

Mayores aumentos que el óptico y mayor profundidad de campo.

En ambiente de vacío. Se le puede acoplar microsondas químicas.

También sirve para muestras biológicas que deben ser preparadas (por evaporación de agua y conductividad eléctrica).

Fractografía electrónica de barrido



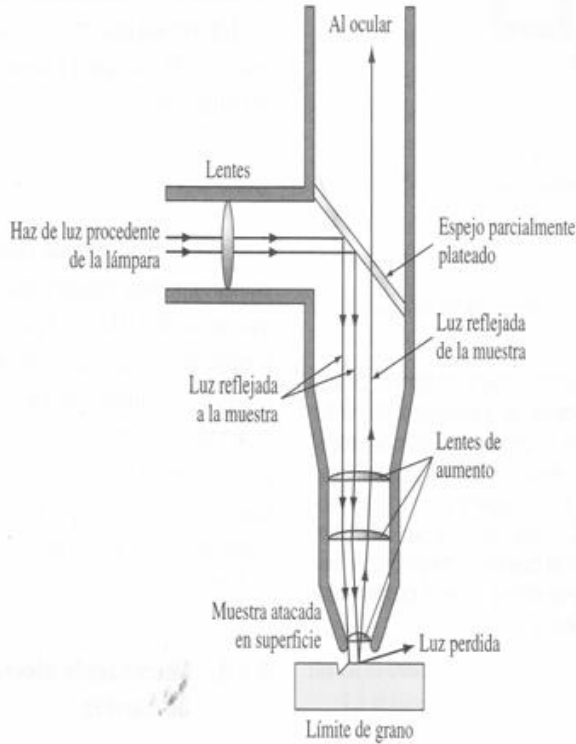
La fractografía, por el relieve de una superficie de fractura, requiere una gran profundidad de campo.

Se trata de una material que ha fallado por corrosión intergranular.

Ancho aproximado de la zona observada: 0,25 mm

(Según «Metals Handbook», vol. 9, «Fractography and Atlas of Fractographs», 8.ª ed., American Society for Metals, 1974, p. 77.)

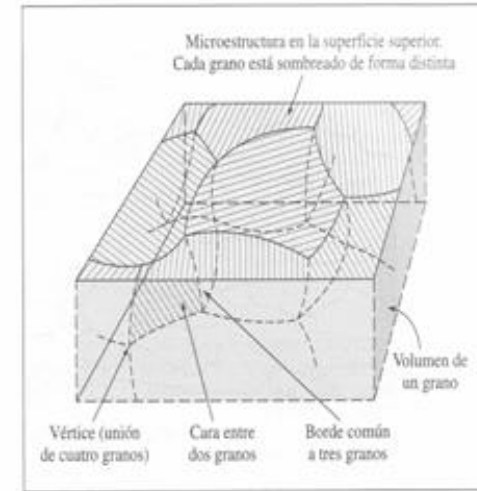
Microscopía Óptica para Materiales



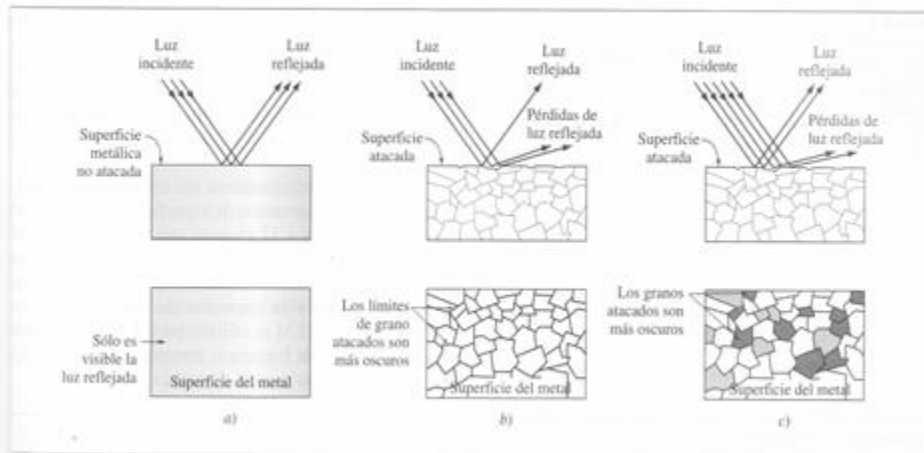
Esquema de un microscopio óptico de luz reflejada. Hasta unos 1000X.

Permite observar una superficie de material pulida a espejo, y atacada con un reactivo químico apropiado

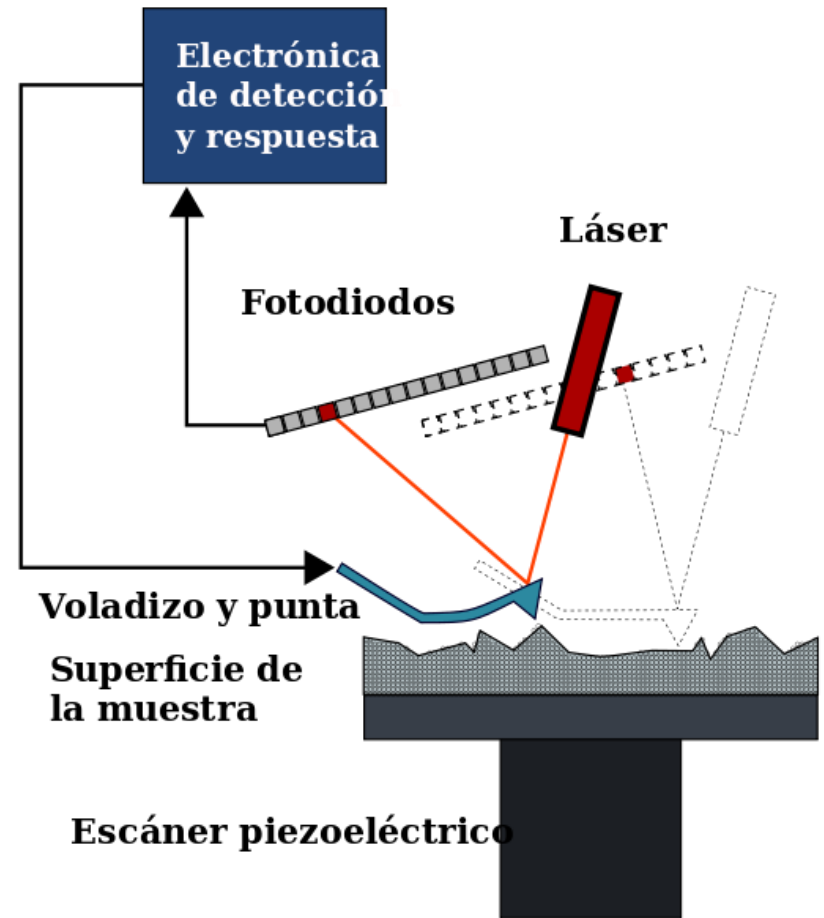
Granos observados sobre una superficie del policristal.



(Según A. G. Guy, «Essentials of Materials Science», McGraw-Hill, 1976.)



Efecto de la intensidad del ataque químico sobre la imagen por microscopía óptica. Material monofásico.

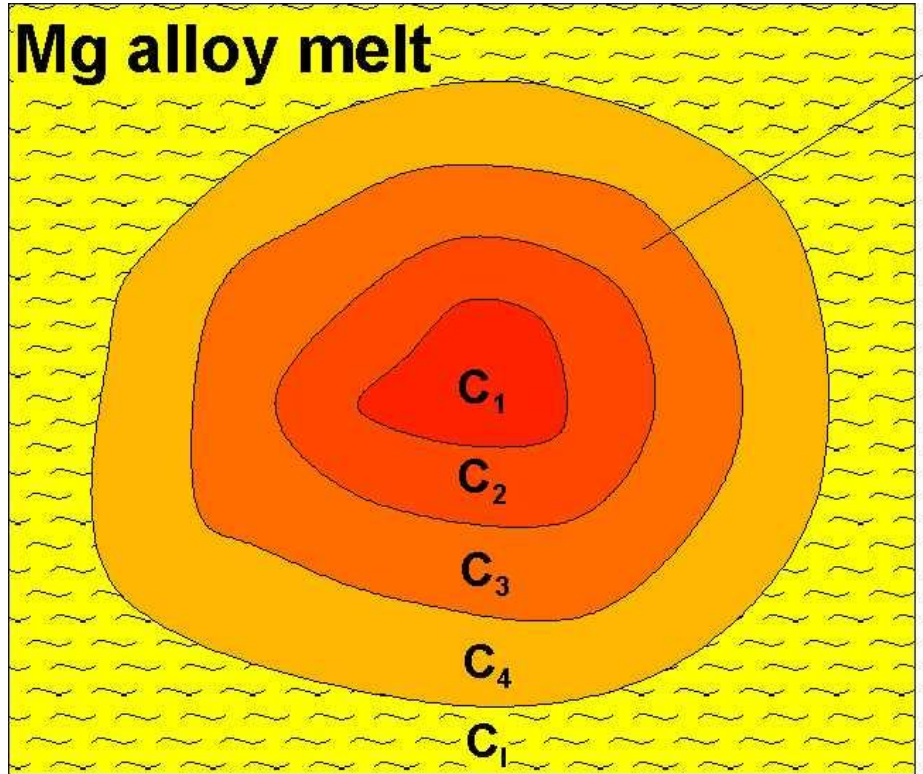


Microscopía Electrónica de Transmisión

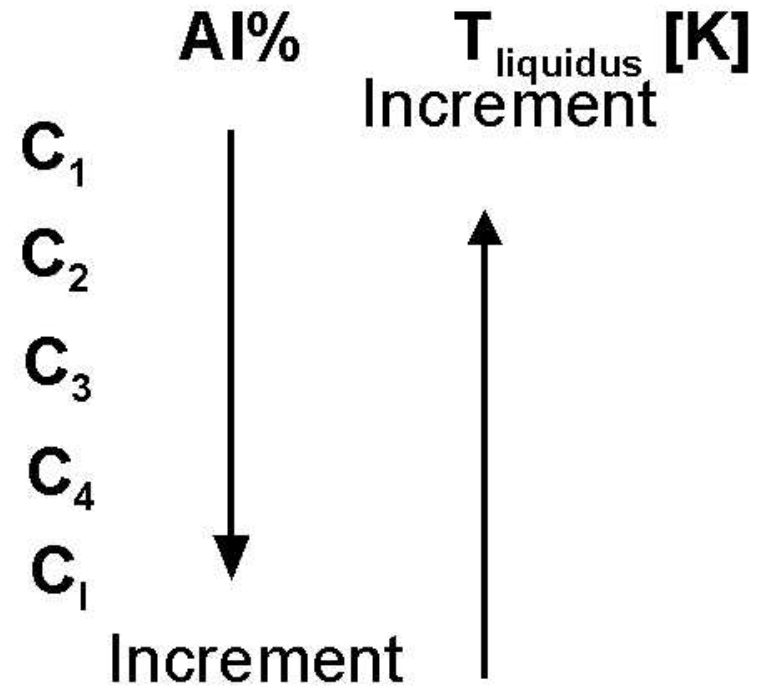
**Microfotografía
FeO**

100 nm

Mg-Al Legierungen



Grain



SOLIDIFICACION DE METALES

CURVAS DE ENFRIAMIENTO METAL PURO

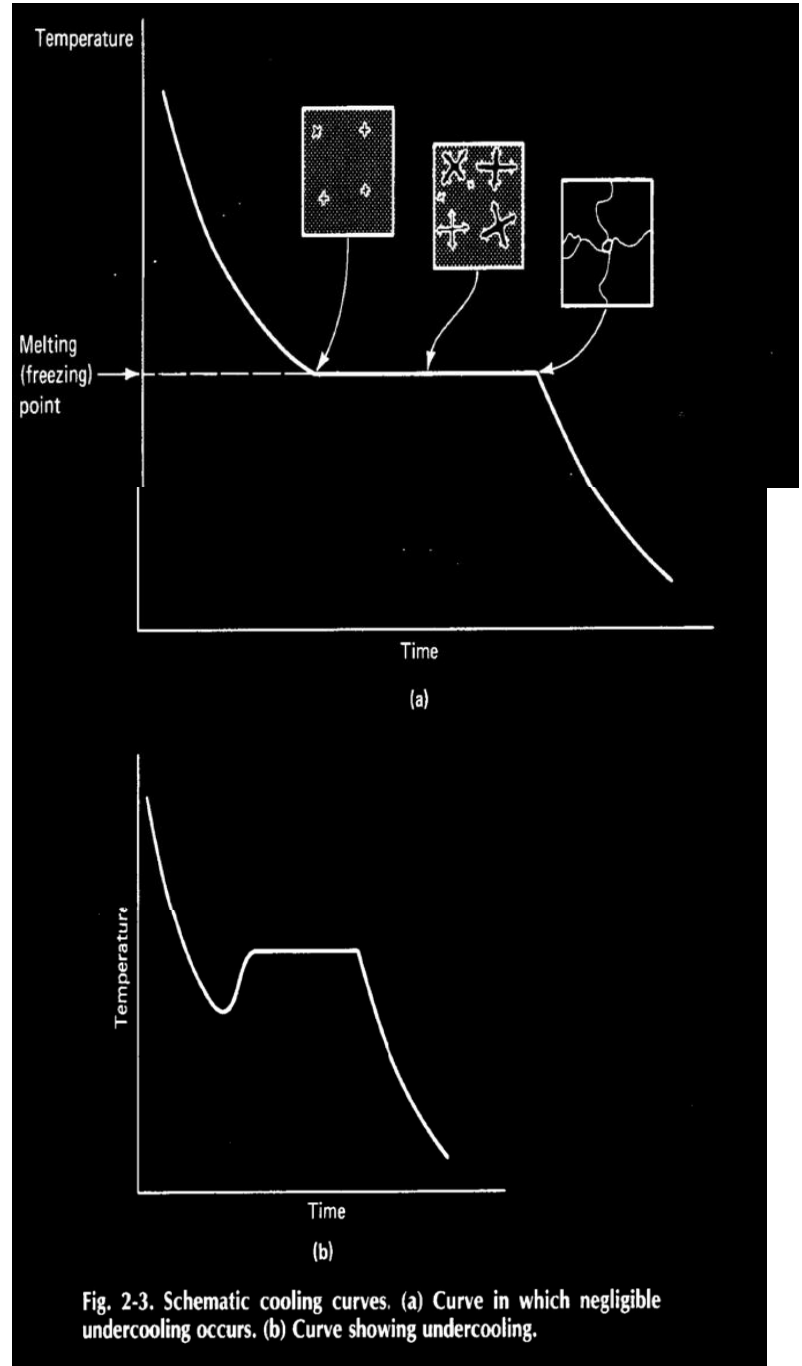
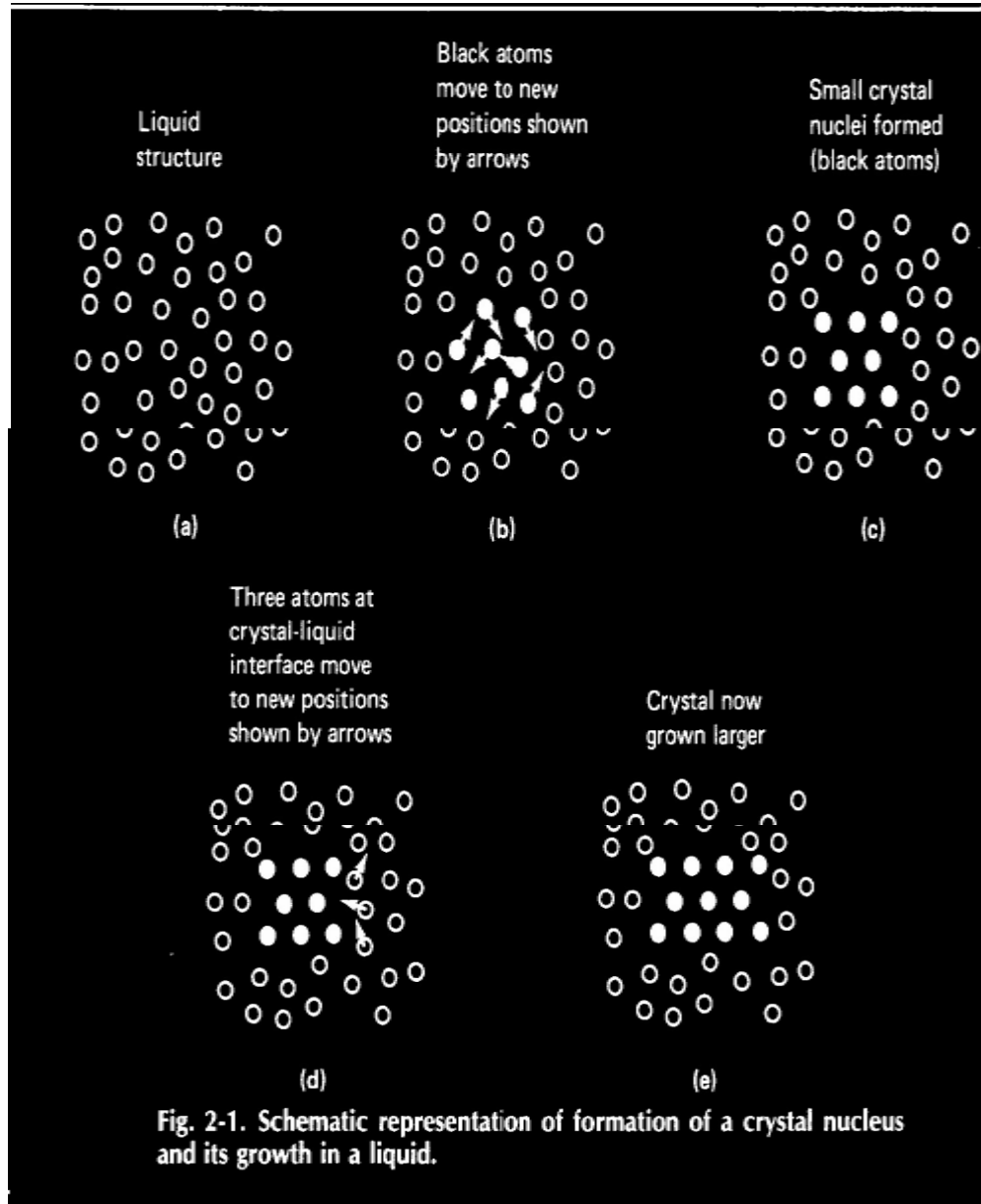


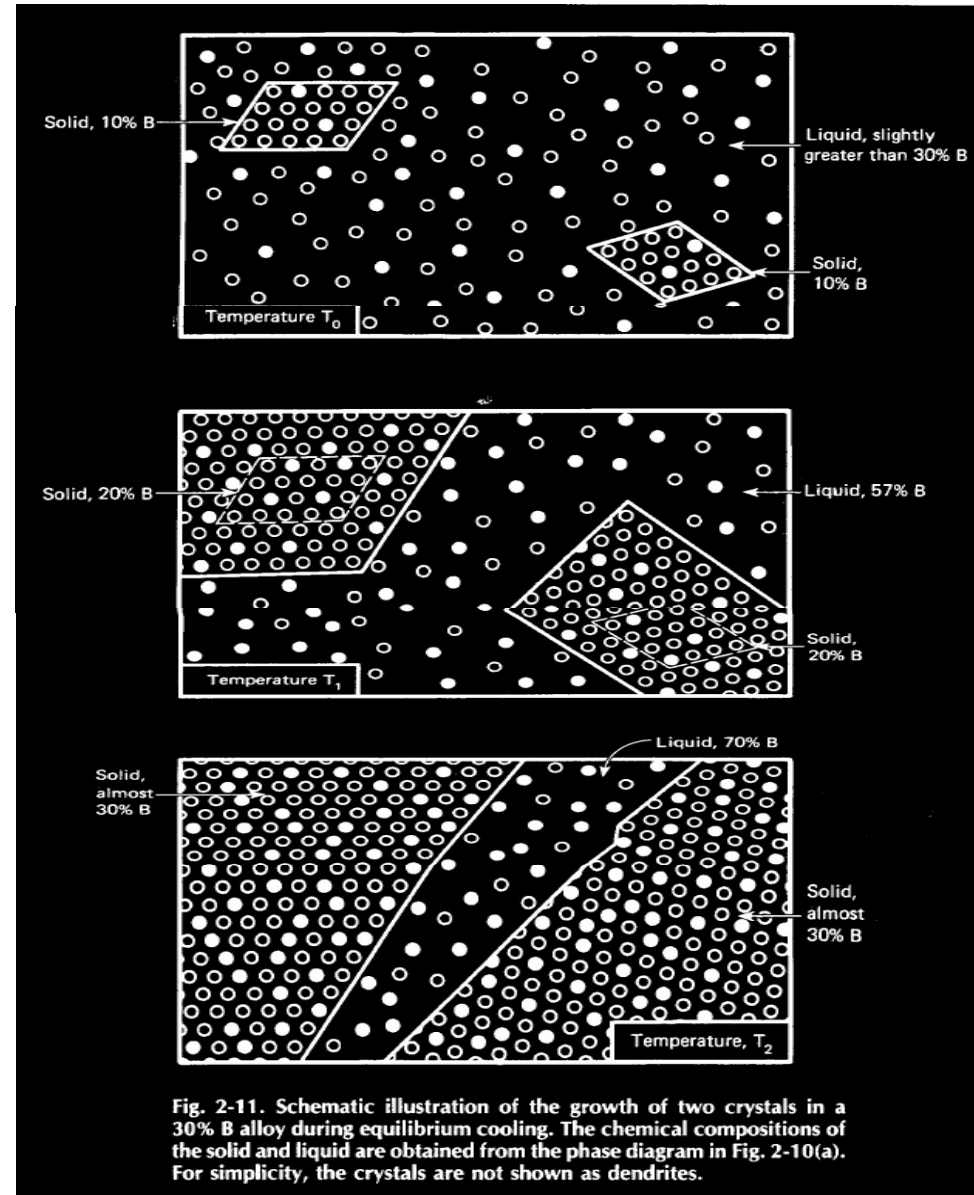
Fig. 2-3. Schematic cooling curves. (a) Curve in which negligible undercooling occurs. (b) Curve showing undercooling.

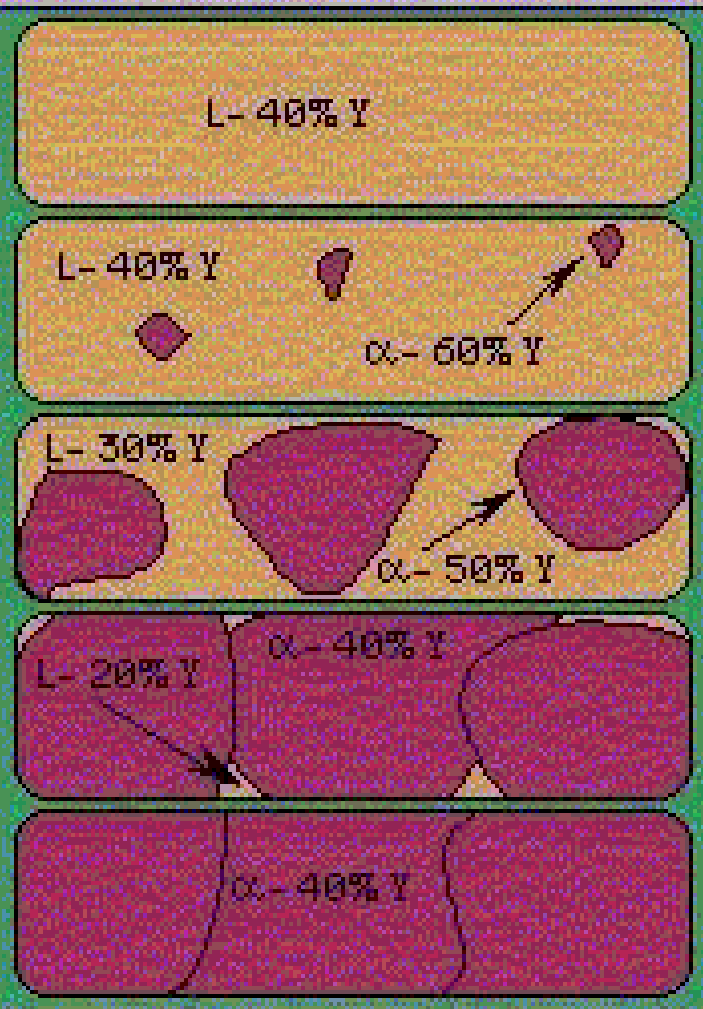
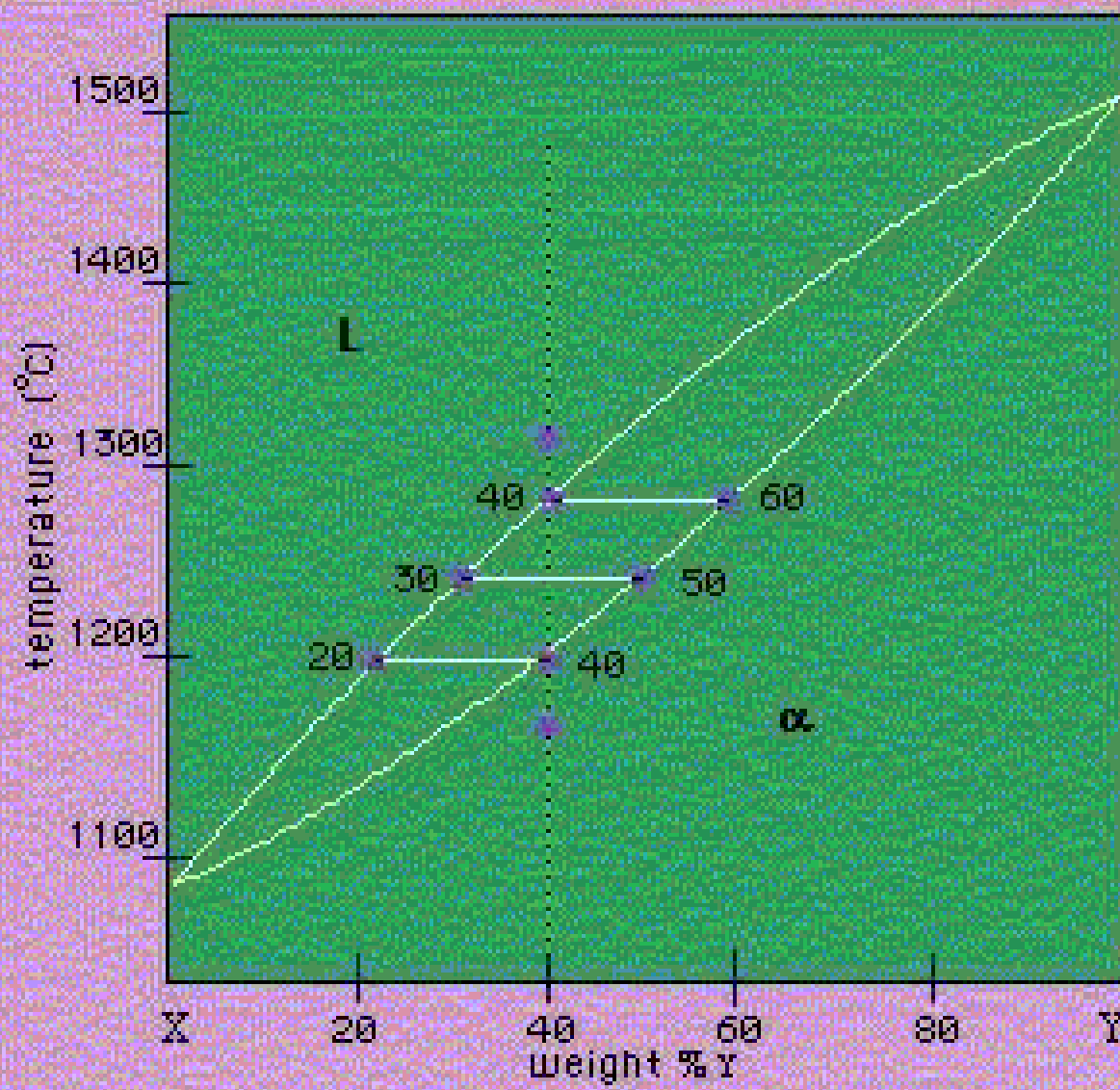
SOLIDIFICACION DE METALES

FORMACION DE NUCLEOS CRISTALINOS EN EL LIQUIDO

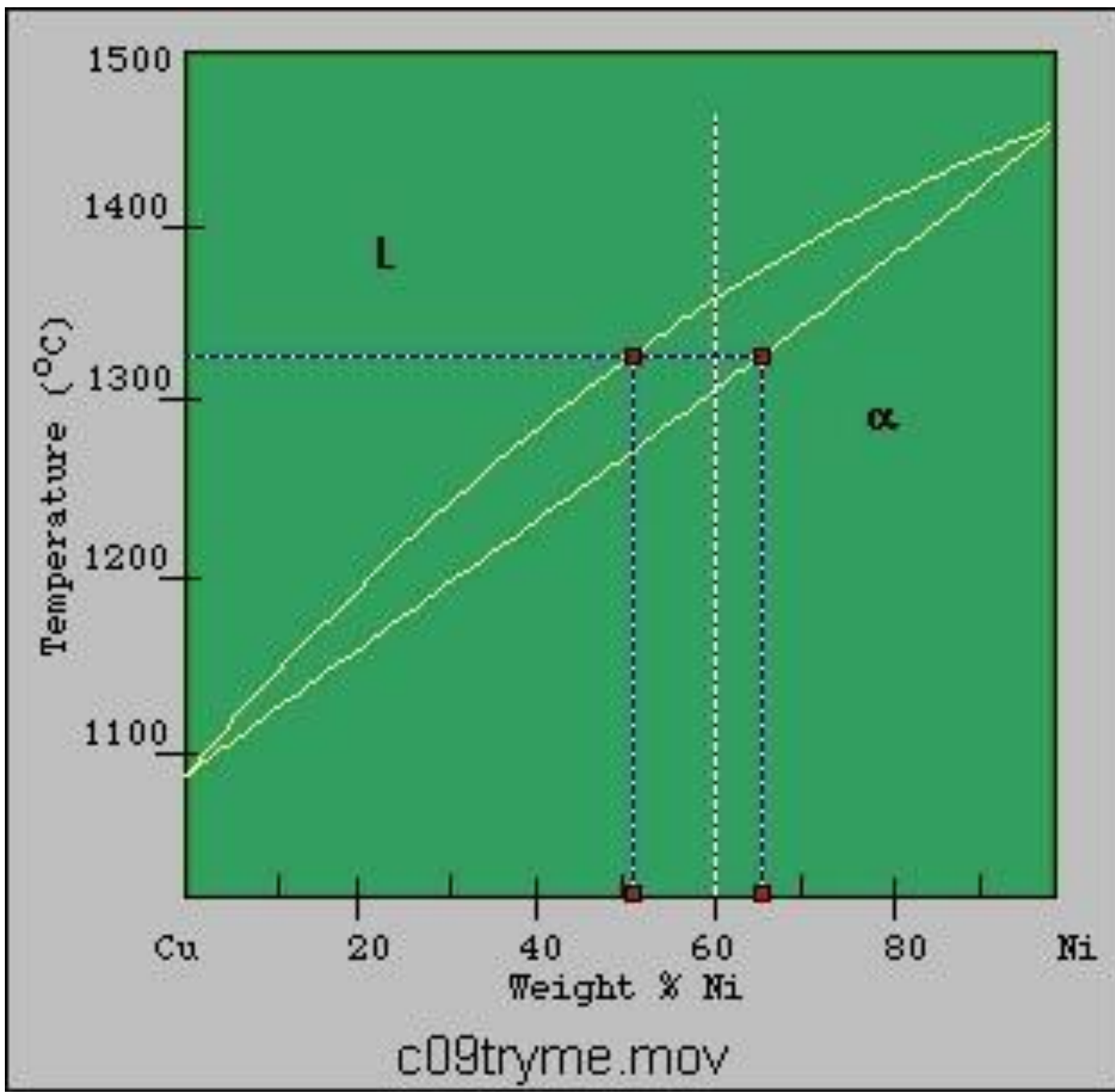


ESQUEMA DE LAS ETAPAS DE SOLIDIFICACION DE UNA ALEACION BINARIA

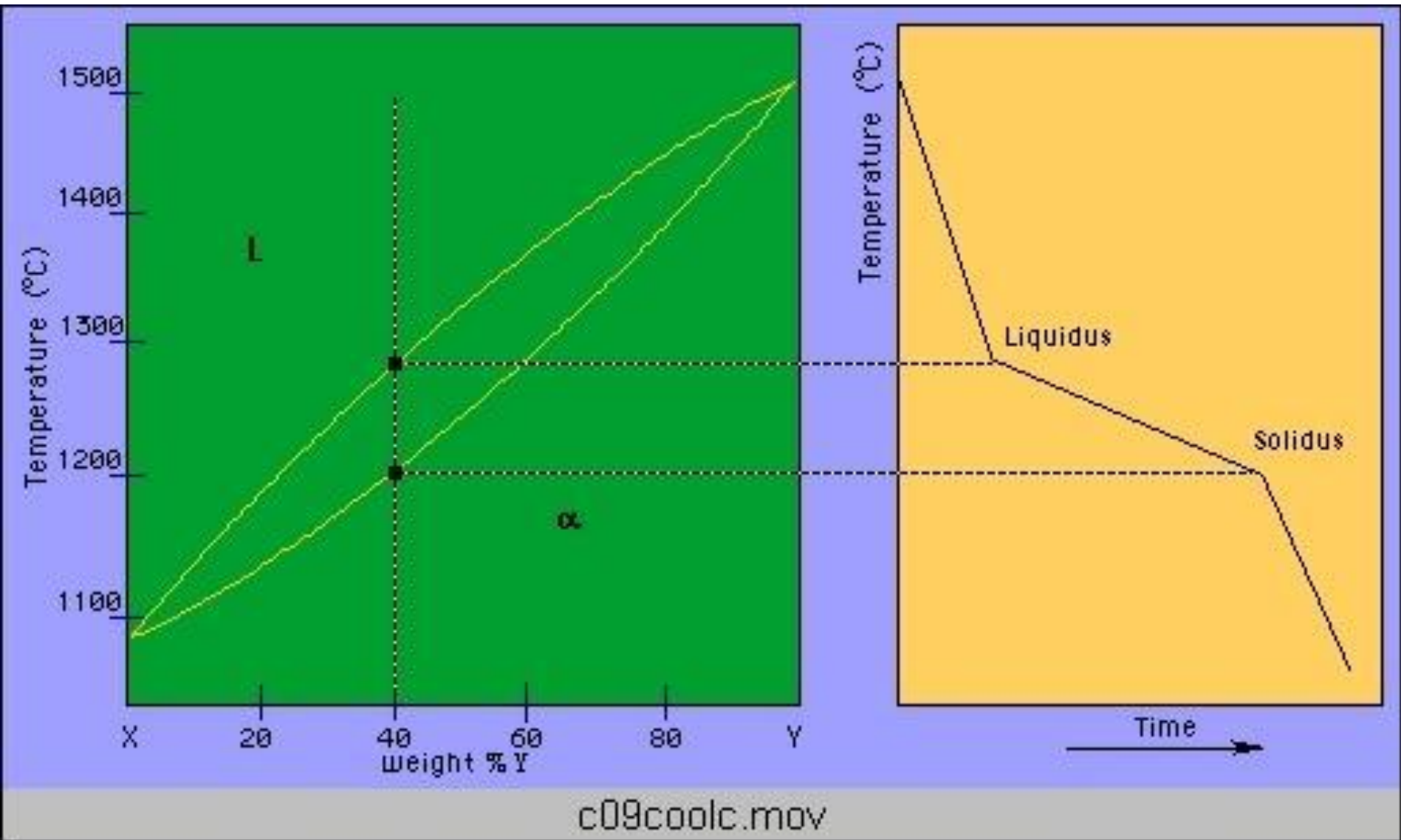


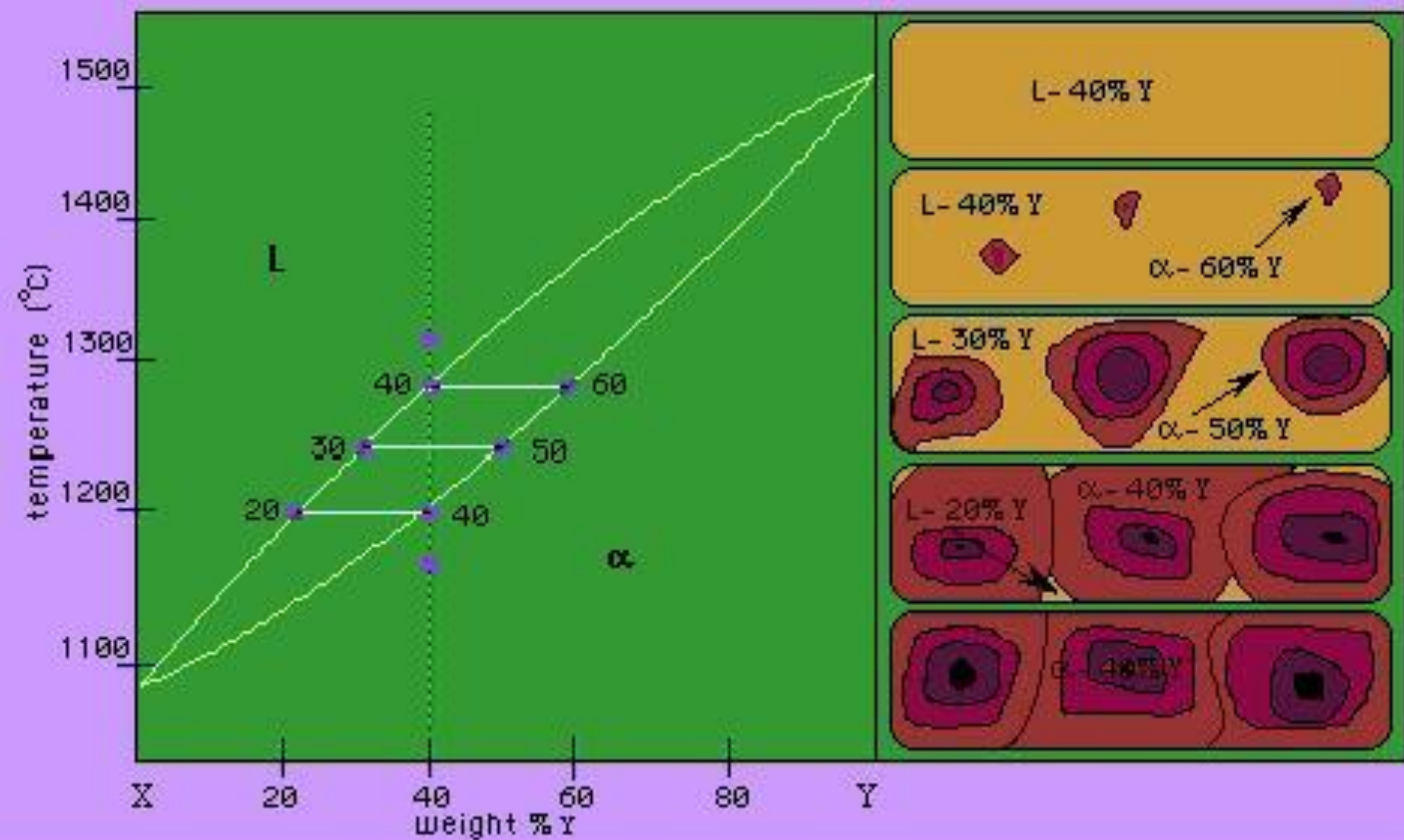


c09solid.mov



c09tryme.mov





FORMA COMO SE DESARROLLAN LOS GRANOS

- Zona columnar

Granos alargados orientados en una dirección cristalográfica particular (normalmente perpendicular a la pared del molde). Su formación esta determinada por el proceso de crecimiento. Pueden existir dendritas. Comportamiento posterior anisotrópico

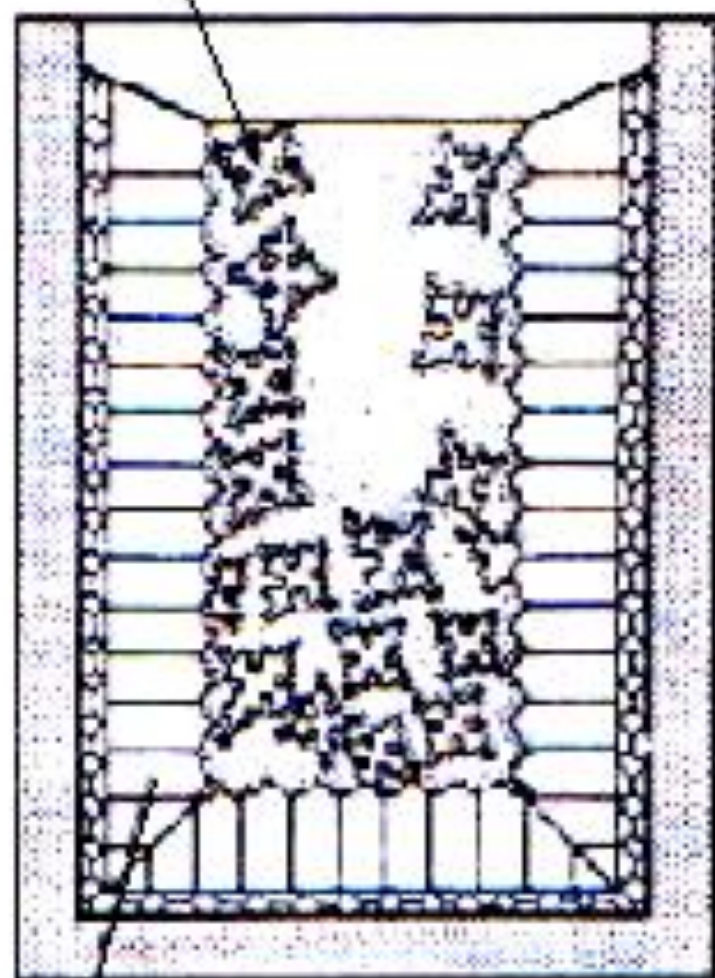
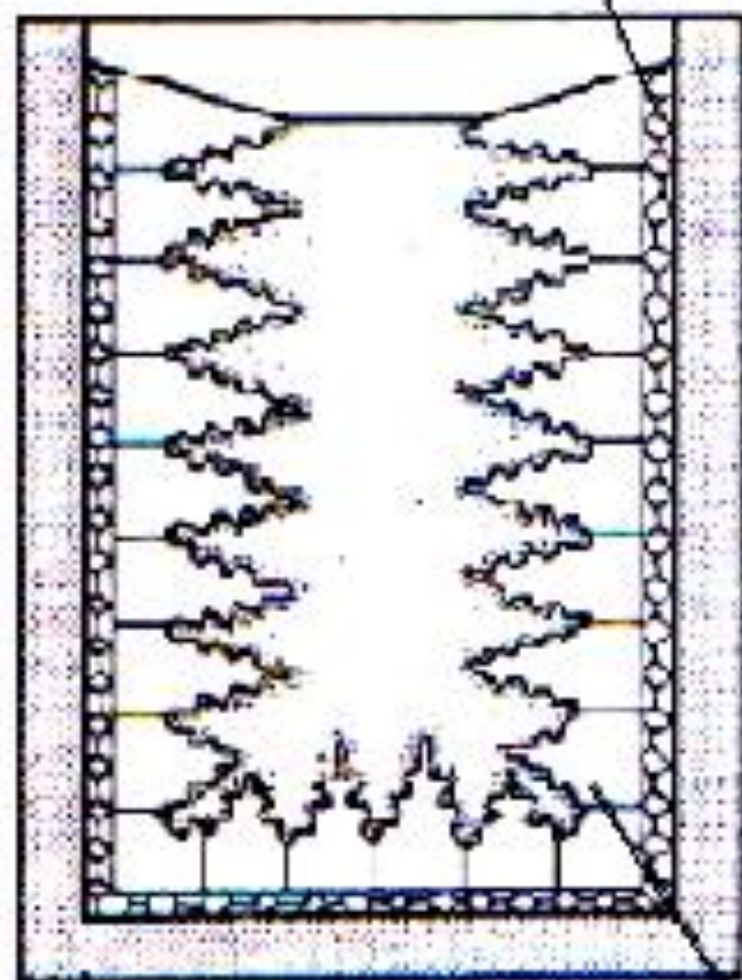
En casos sin orientaciones preferentes o líquidos no subenfriados, el crecimiento columnar es substituido por el planar

- Zona equiaxial

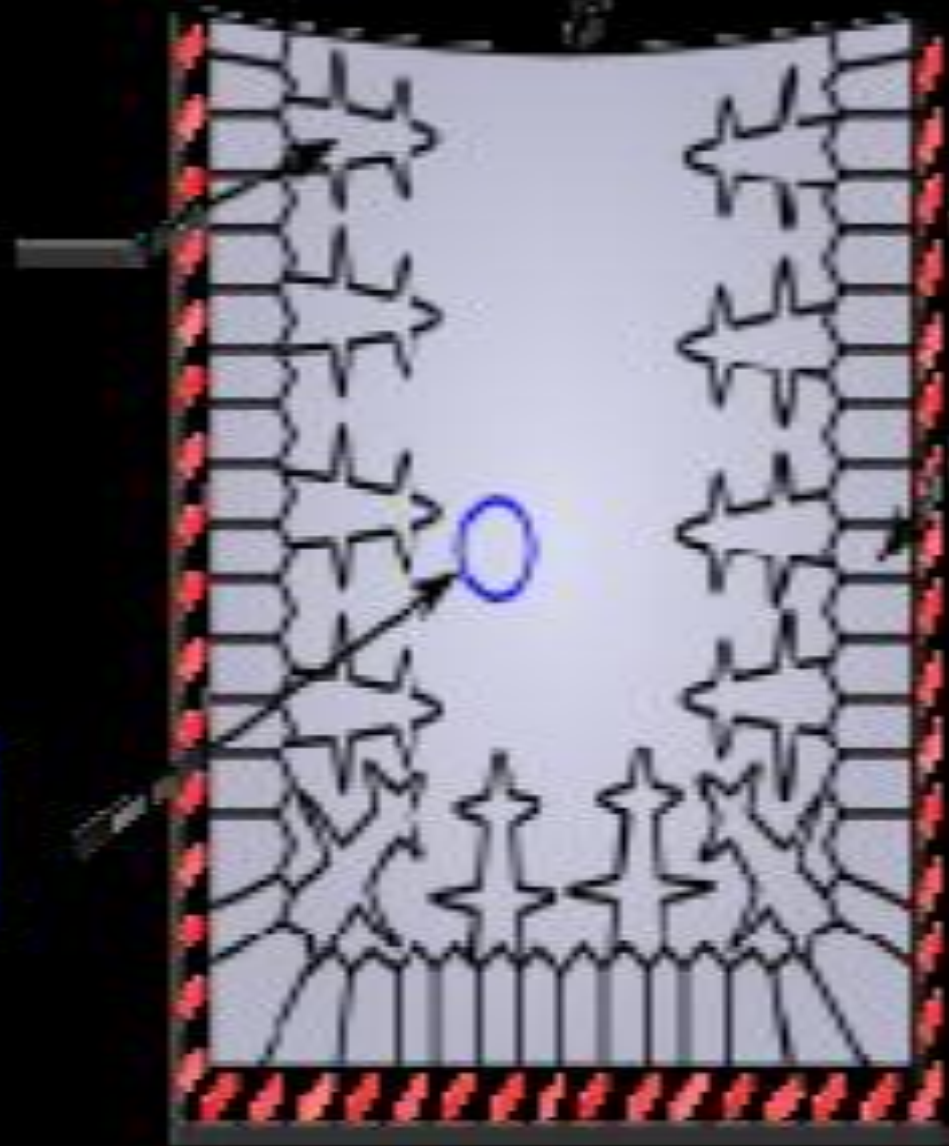
Situada en el centro del lingote. Granos redondos orientados al azar.

Detienen el crecimiento de los granos columnares. Su aparición se favorece mediante la incorporación de impurezas o refinadores de grano. Comportamiento posterior isotrópico.

zona equiaxial



zona columnar



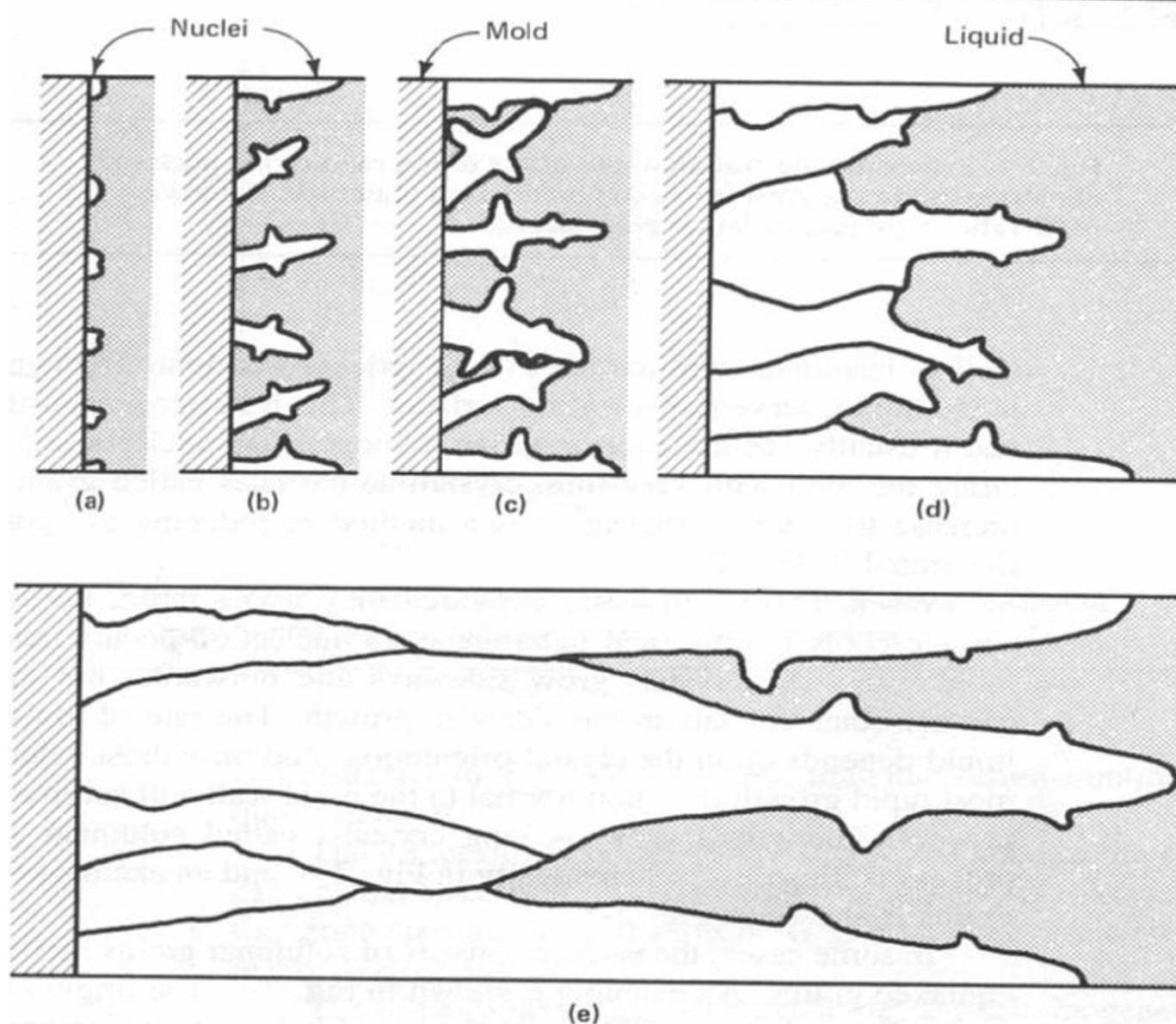
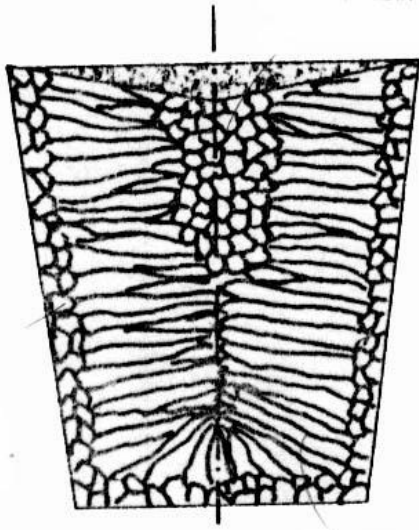
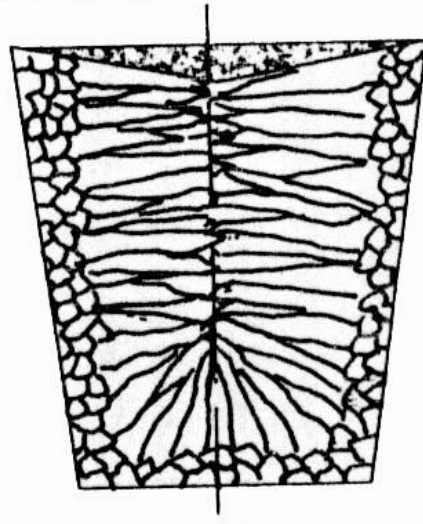


Fig. 2-6. Schematic illustration of the formation of columnar grains.

**CRECIMIENTO DE GRANOS
COLUMNARES**

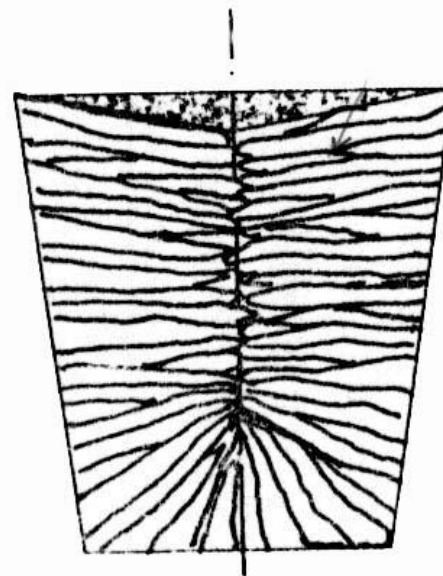


(a)

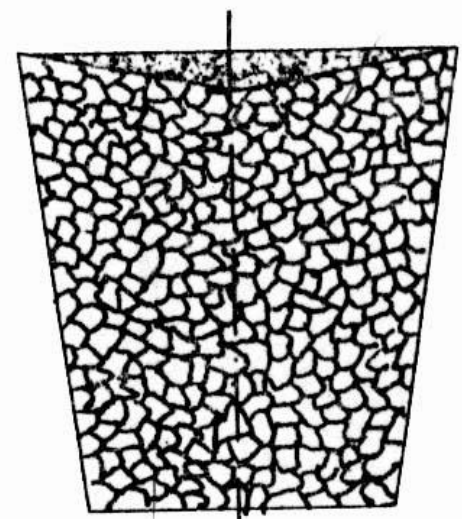


(b)

ESTRUCTURA DE LOS LINGOTES

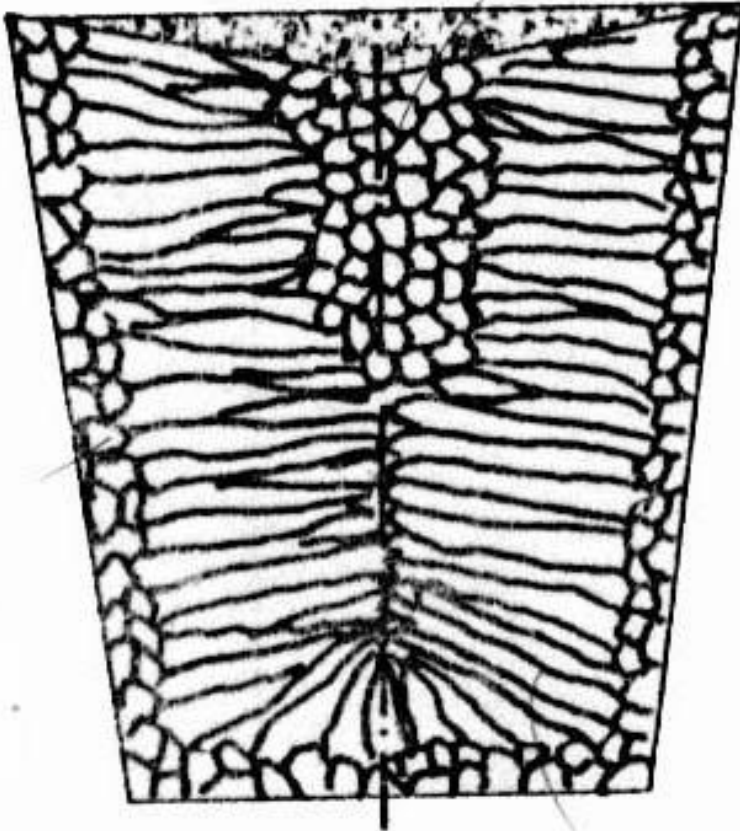


a



b

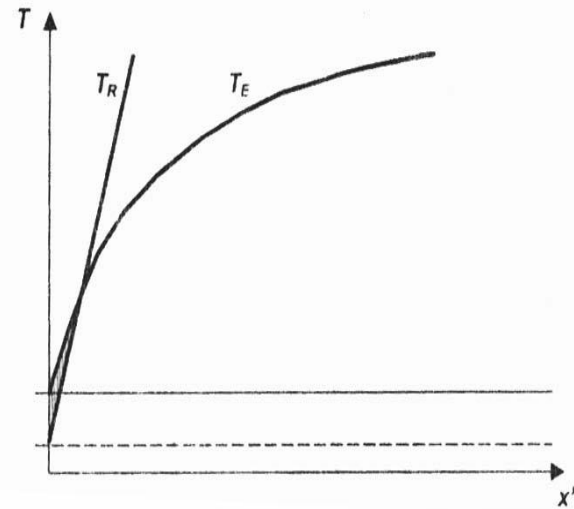
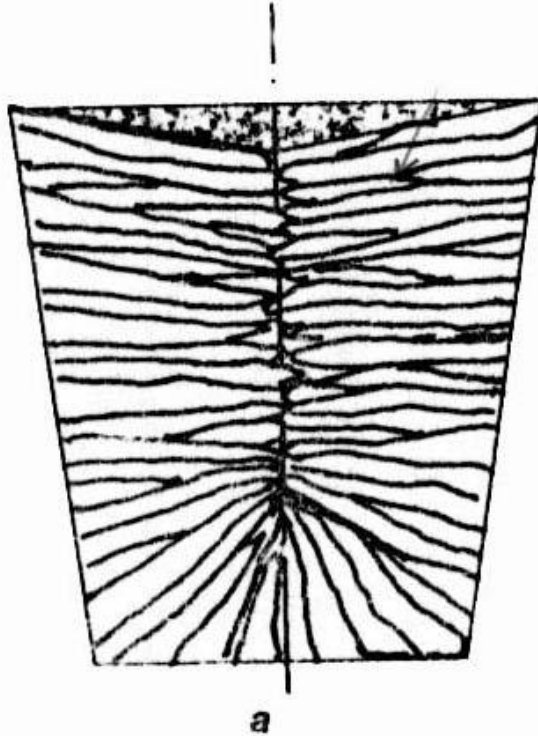
ESTRUCTURA DE LOS LINGOTES



EQUIAXIAL INTERNA (x subenf. const)

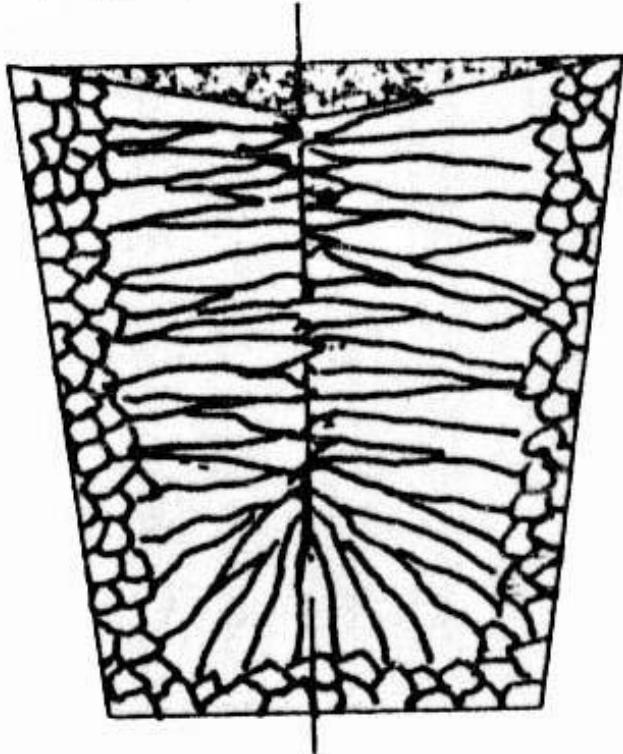
- * núcleos sobrevivientes
- * extremos de columnas
- * nueva nucleación
- * nucleación en la capa superior

ESTRUCTURA DE LOS LINGOTES

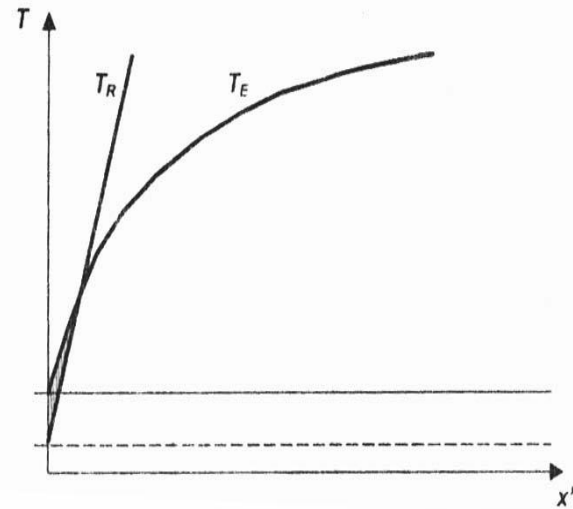


**Subenfriamiento escaso:
molde precalentado
Colada a alta temperatura**

ESTRUCTURA DE LOS LINGOTES

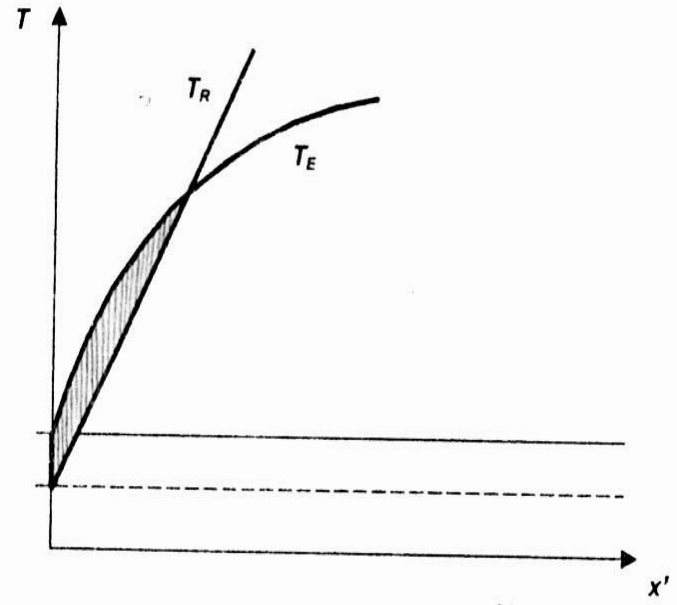
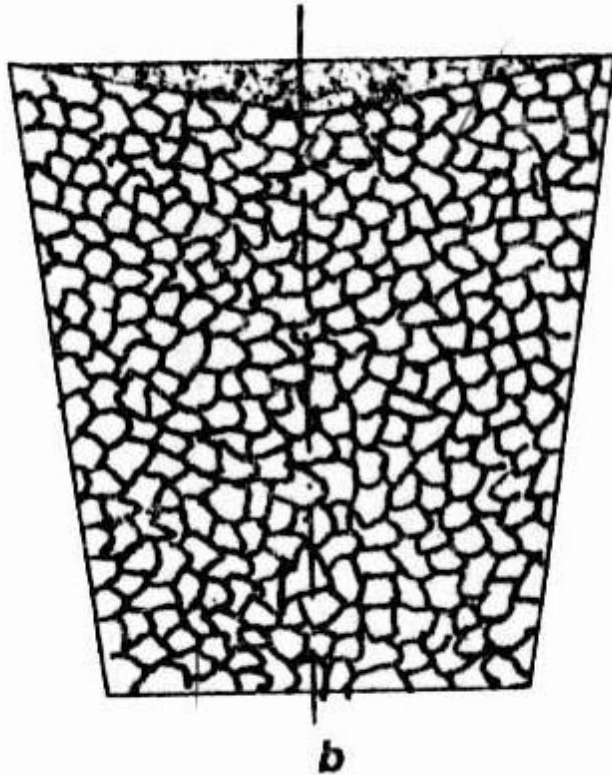


(b)

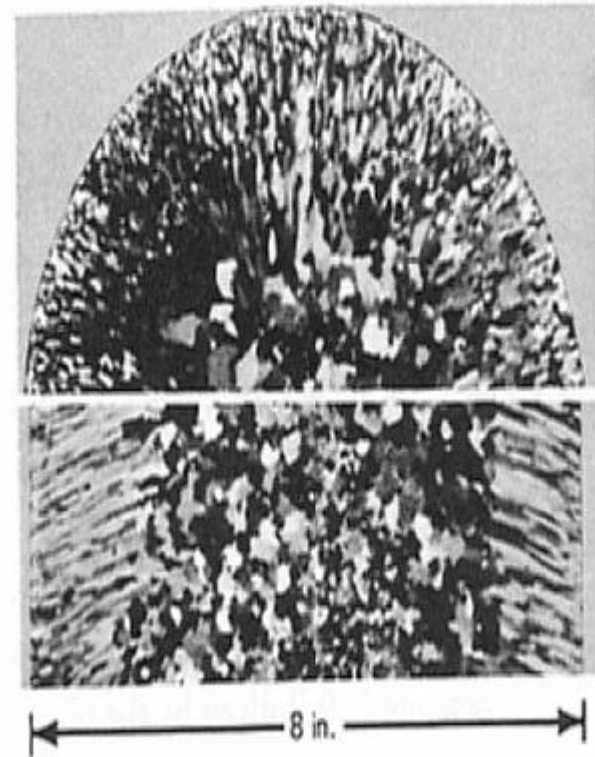
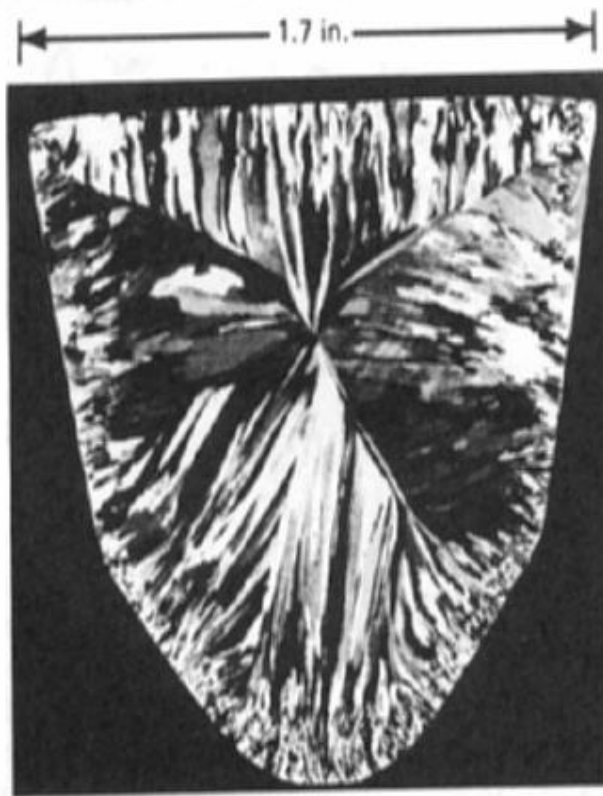


**Sin equiaxial interna:
Colada a alta temperatura
Molde frío**

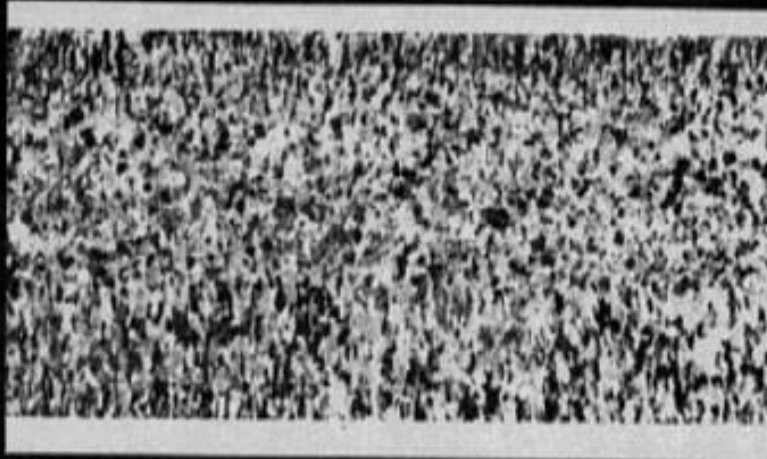
ESTRUCTURA DE LOS LINGOTES



Colada a temperatura normal
Molde frío

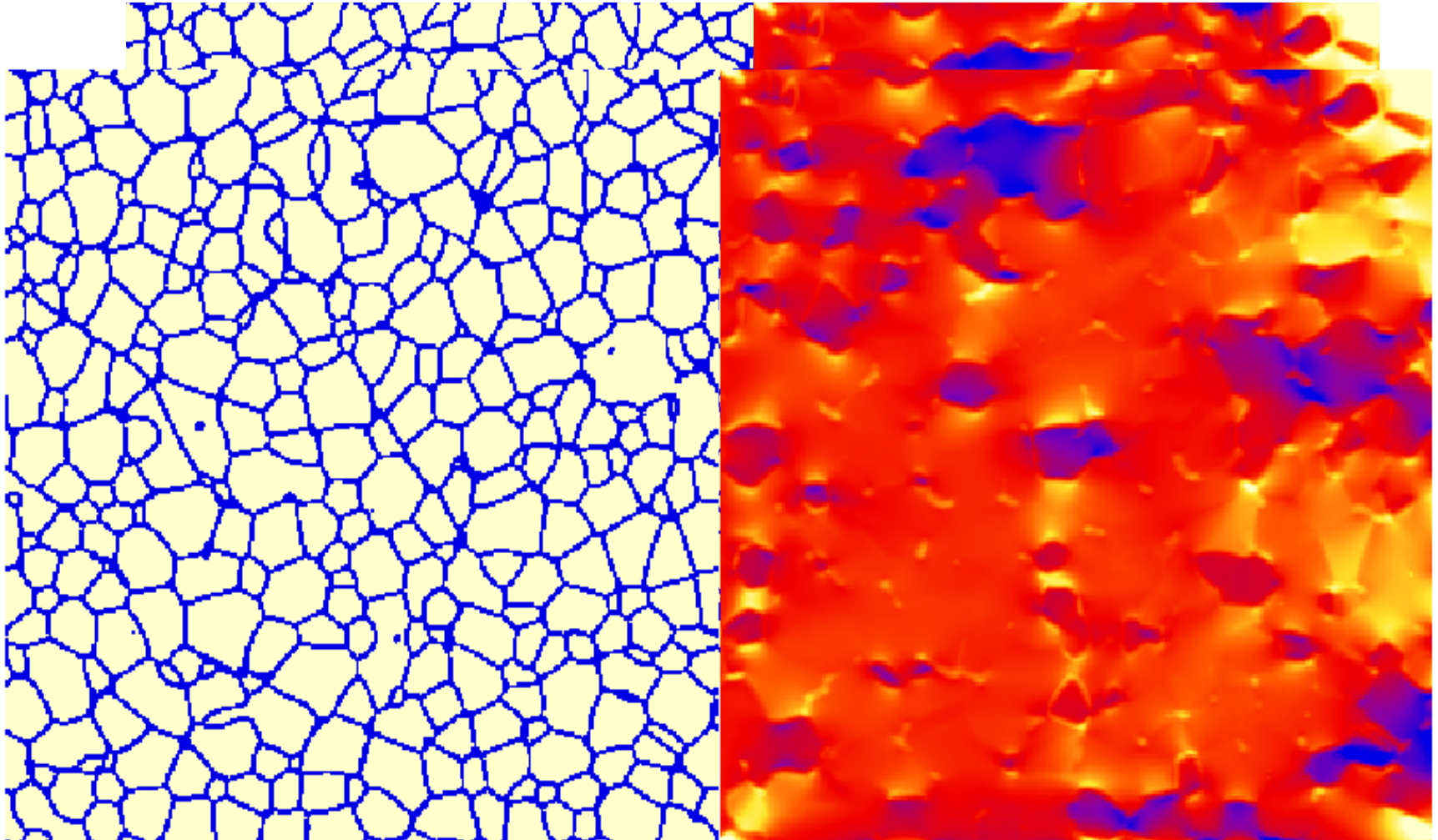


MACROESTRUCTURA DE SOLIDIFICACION DE UN LINGOTE DE LATÓN DE CORTE LIBRE (360) MOSTRANDO GRANOS COLUMNARES CRECIENDO DESDE LA SUPERFICIE Y GRANOS EQUIAXIALES EN EL CENTRO. LA FOTO SUPERIOR ES UNA SECCION TRANSVERSAL Y LA INFERIOR CORRESPONDE AL FONDO

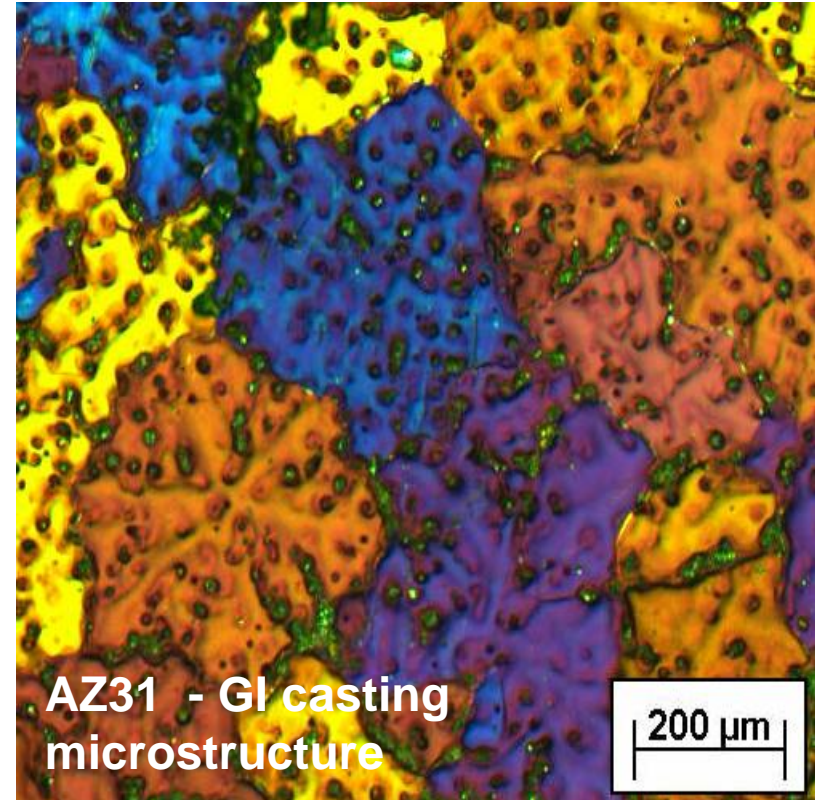
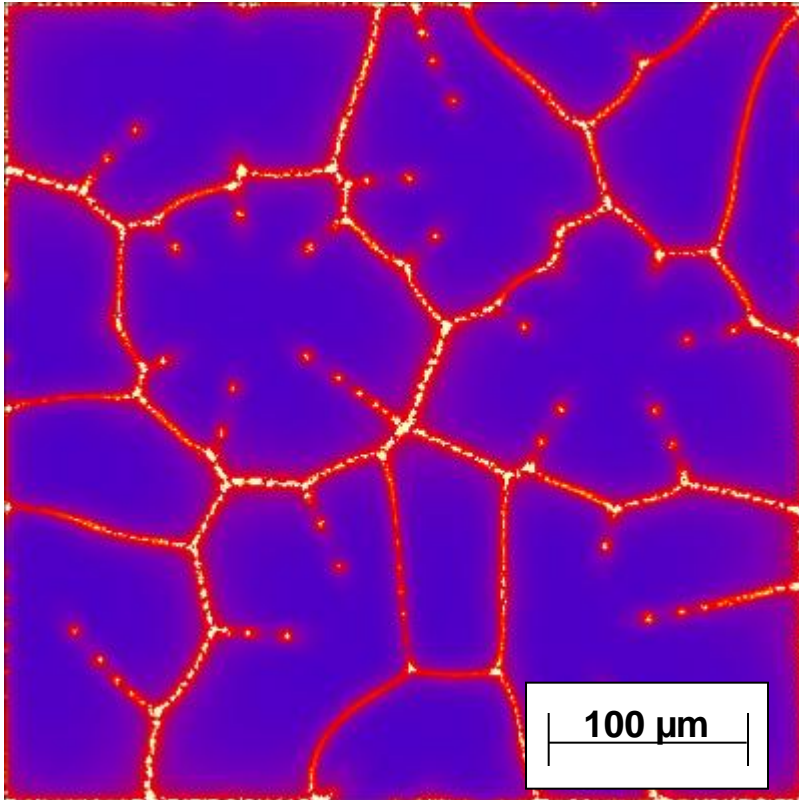


**EFFECTO DE AFINANTES SOBRE EL
TAMAÑO DE GRANO EN ALUMINIO
1100**

Solid State Transformations: Elastic Stress during γ - α Transformation



Equiaxed Solidification of Mg-Al₃-Zn (AZ31)



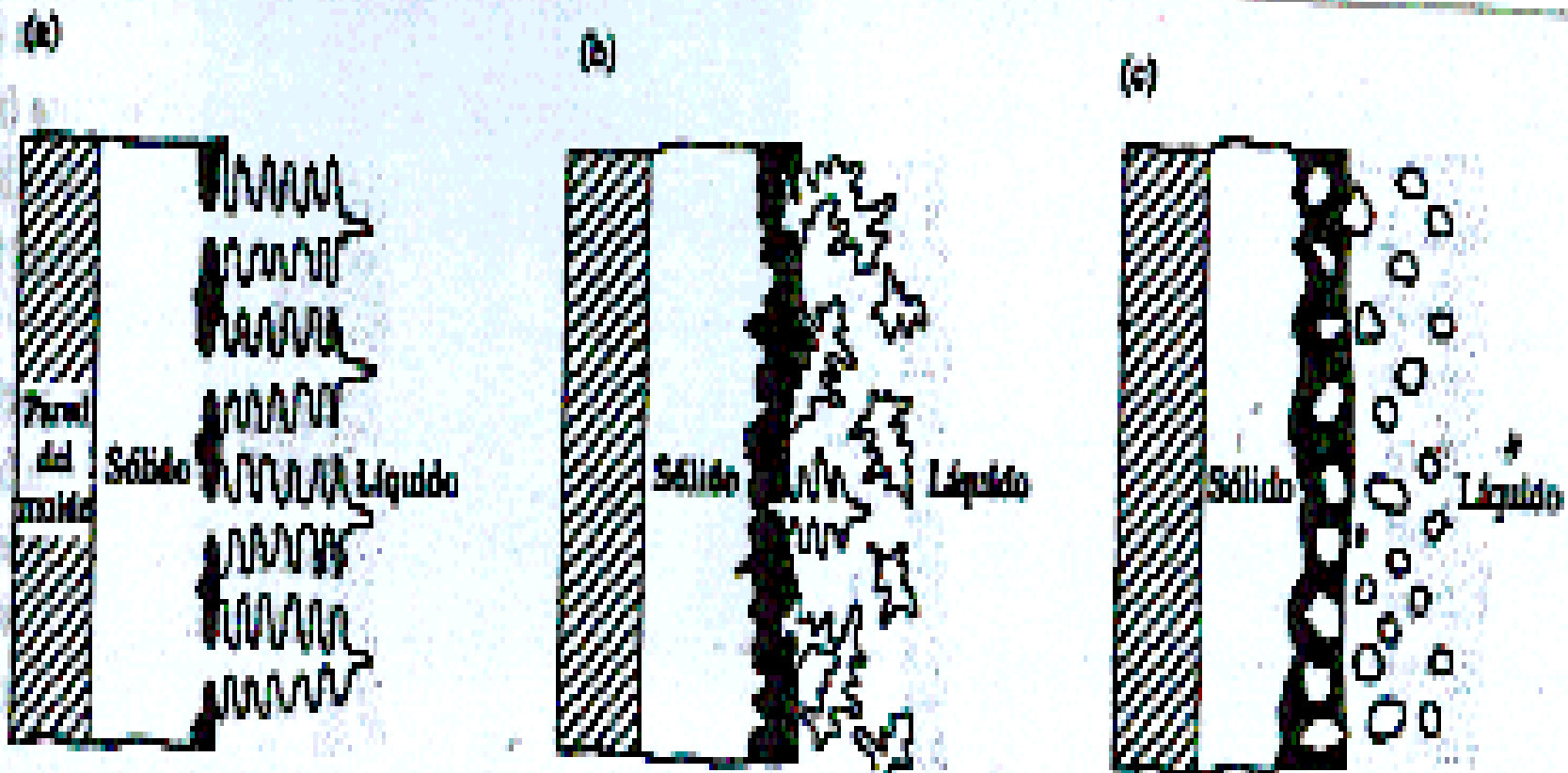
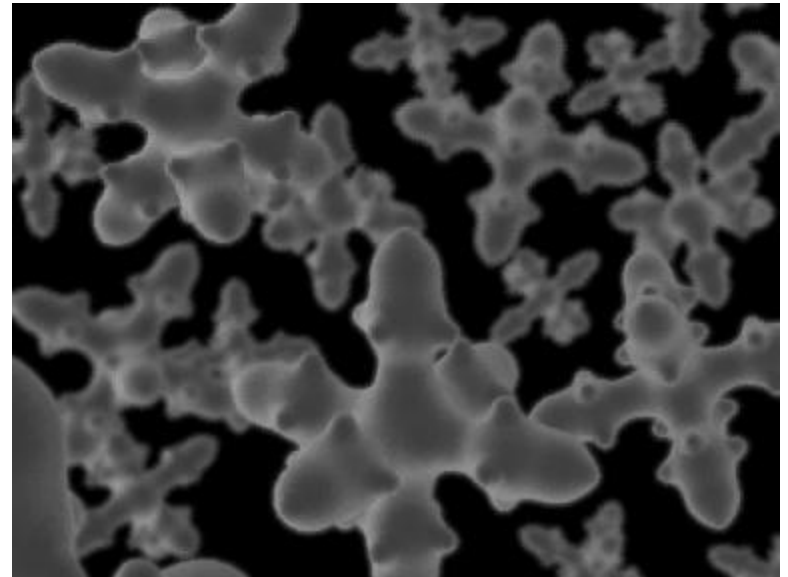
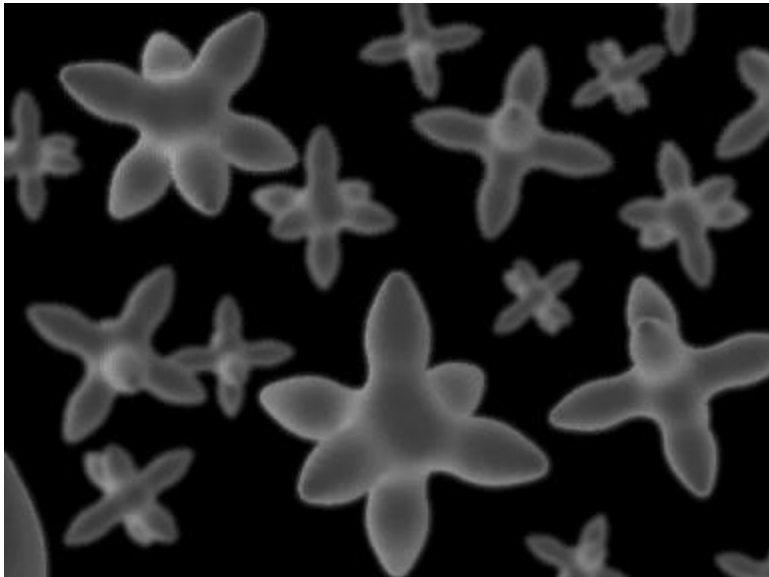
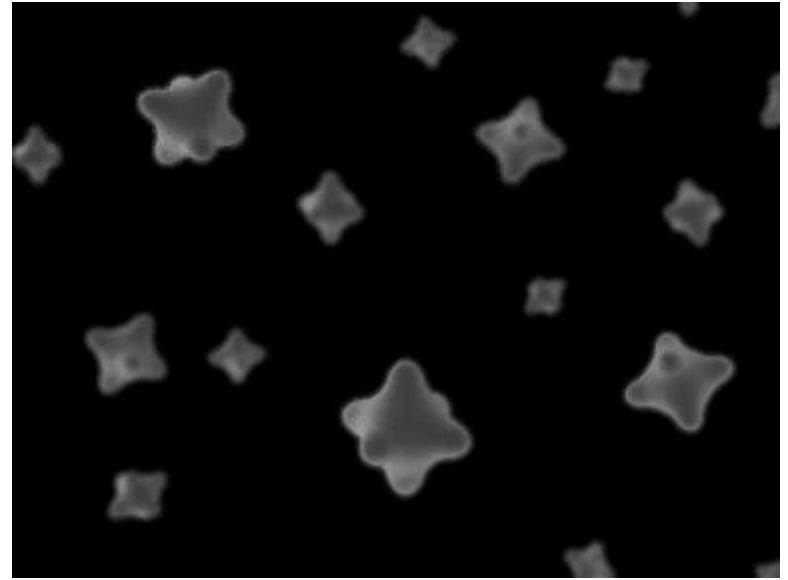
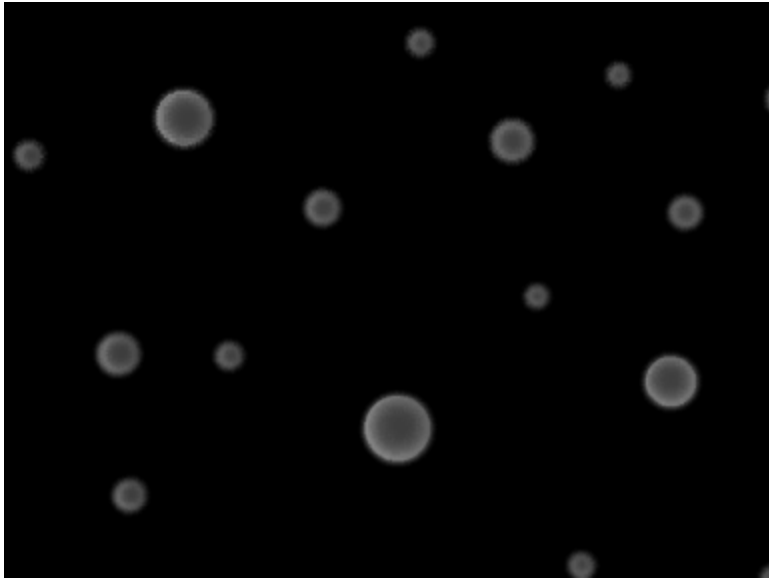
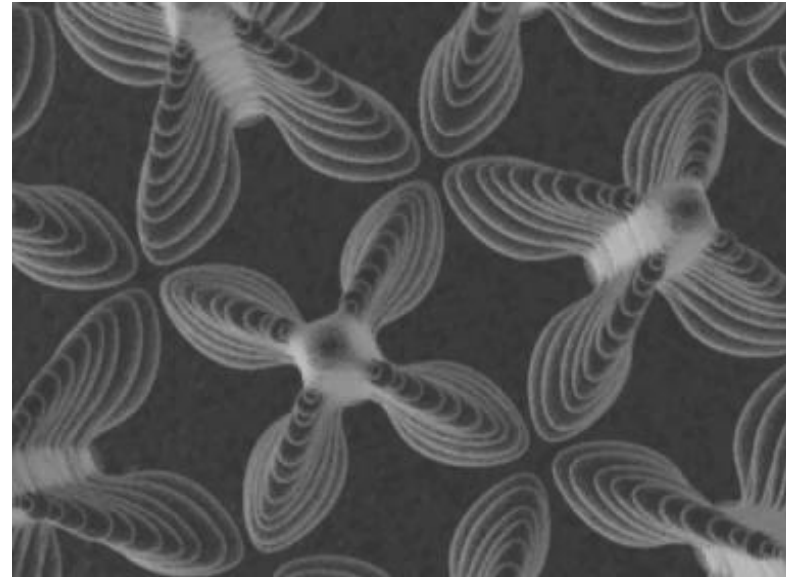
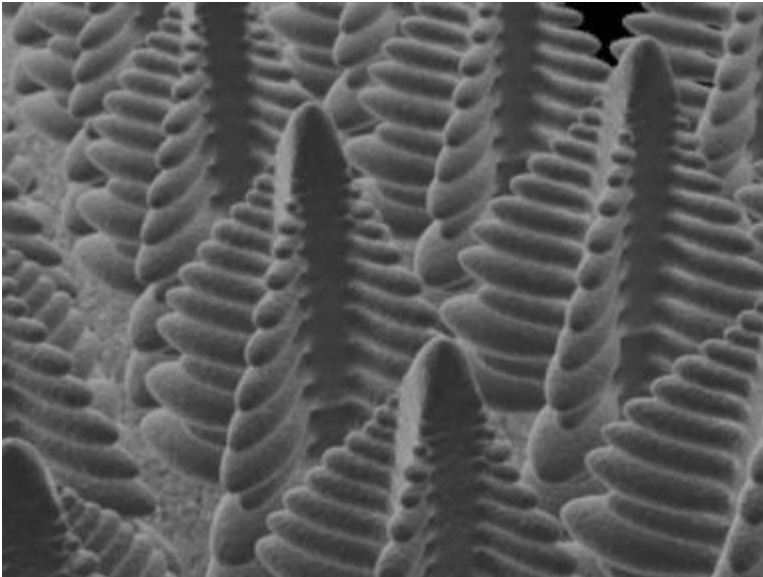
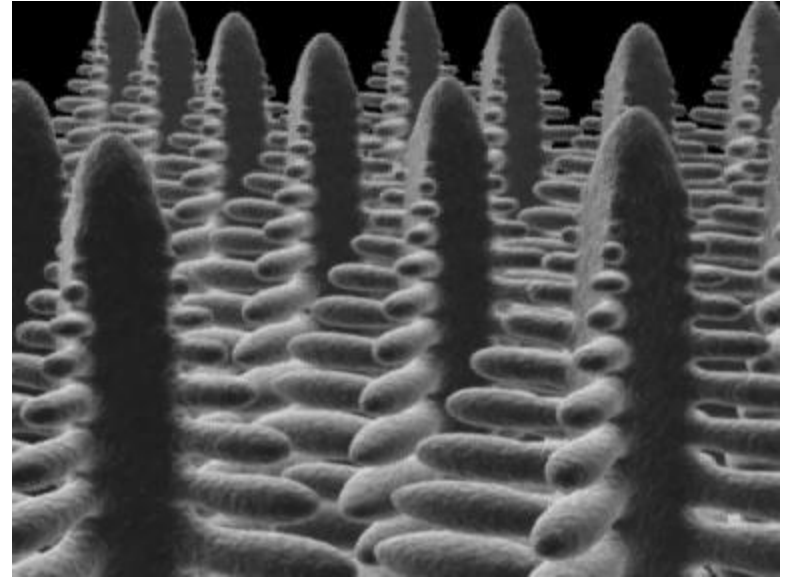
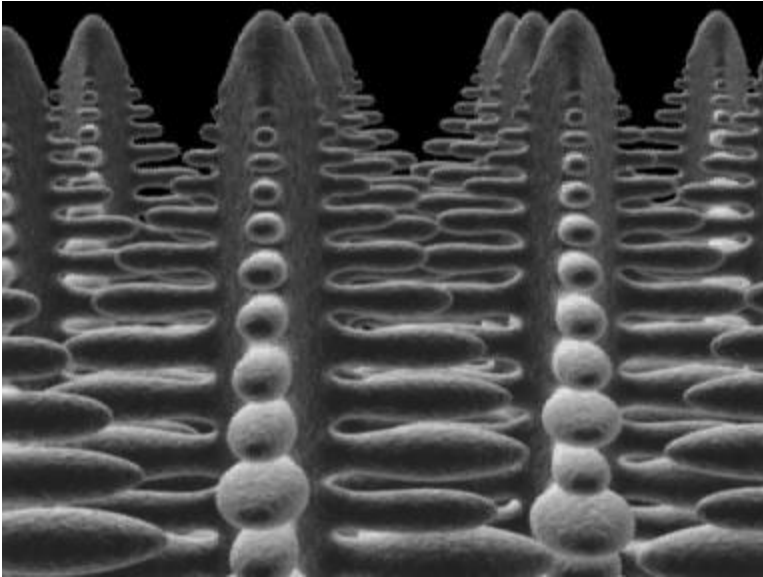


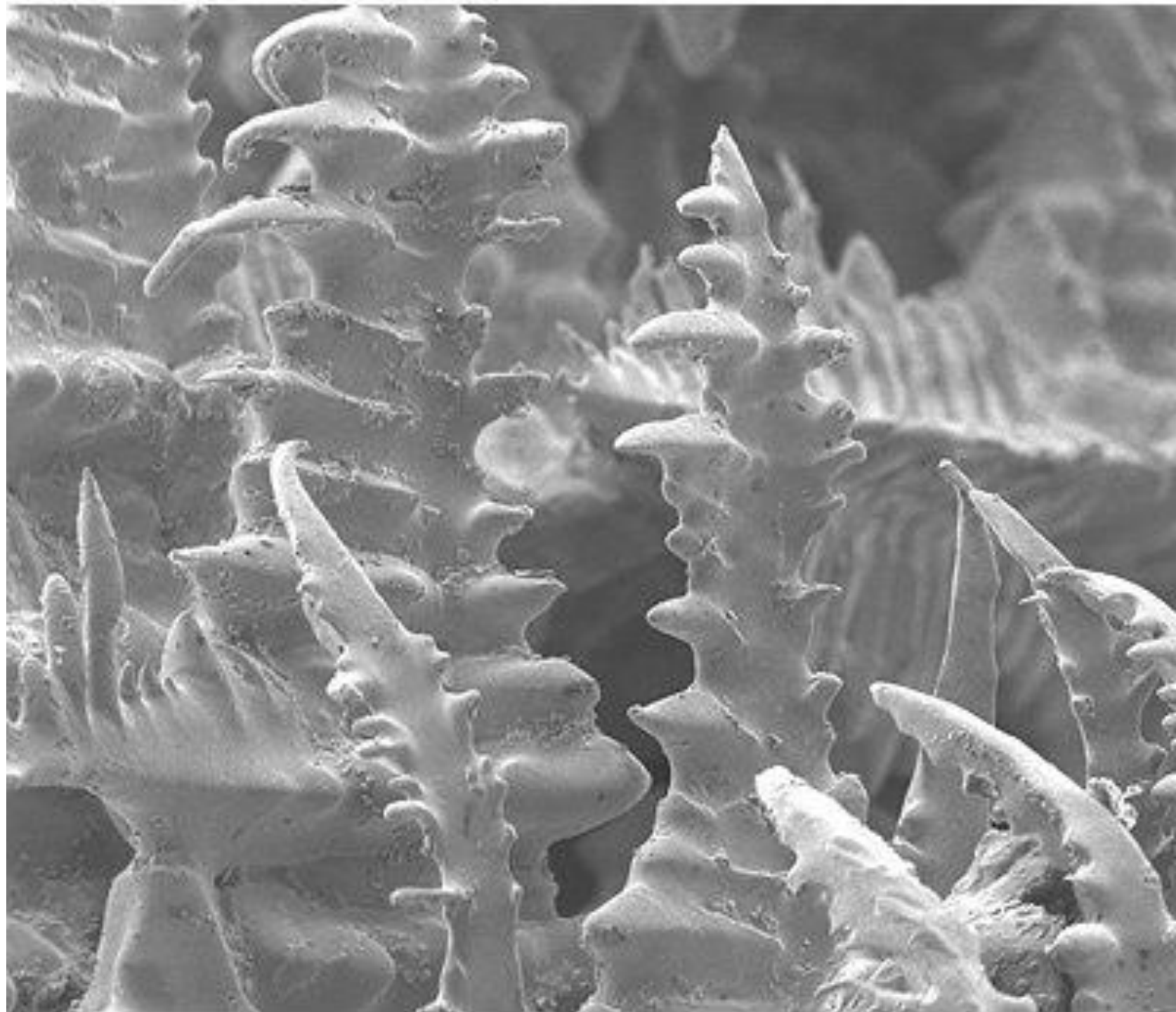
FIGURA 10.5 Ilustración esquemática de tres tipos básicos de estructuras fundidas: (a) dendrítica columna; (b) dendrítica equidimensional; y (c) no dendrítica equiaxiales. Fuente: D. Apellan.

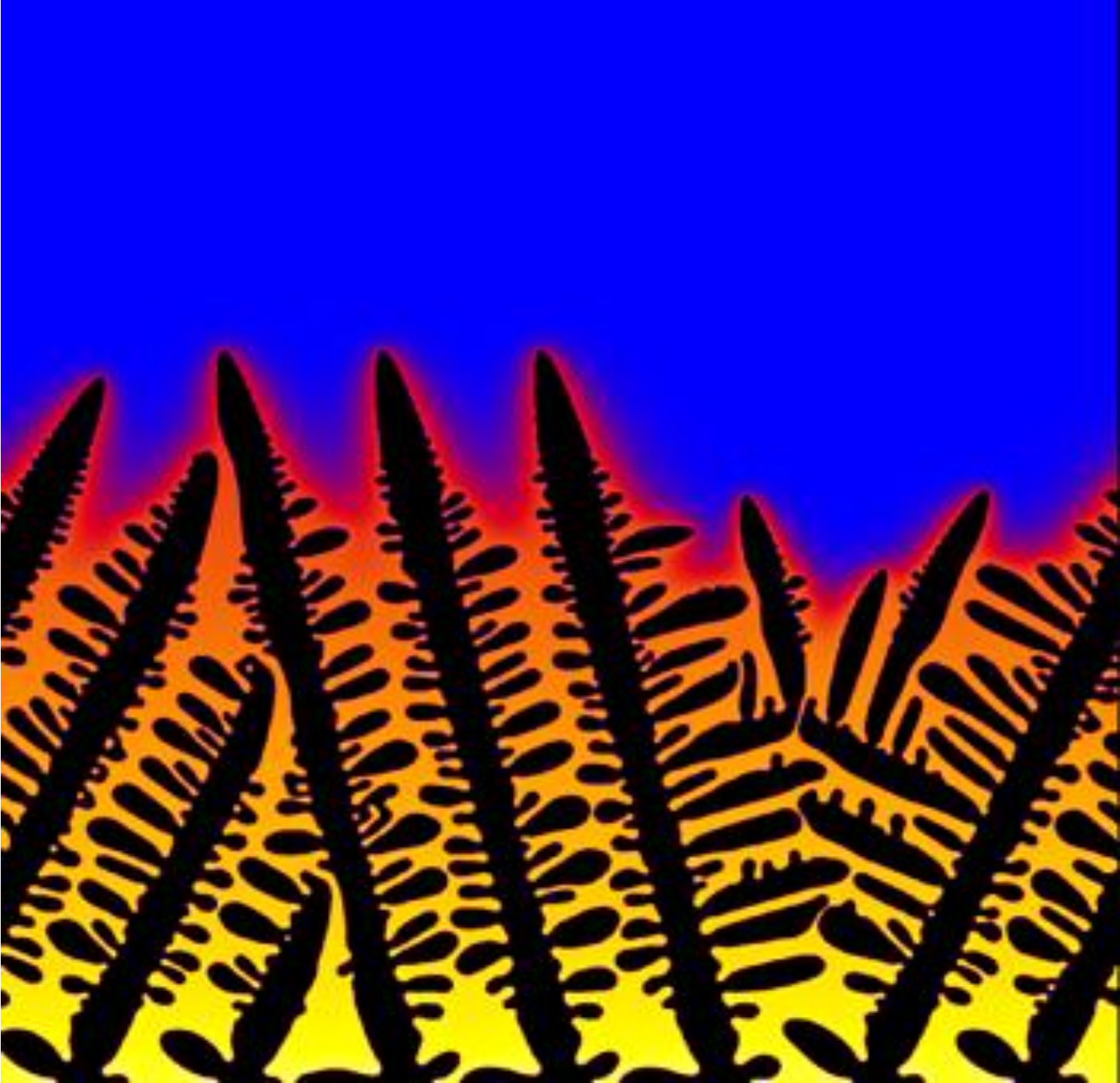
Formación de dendritas

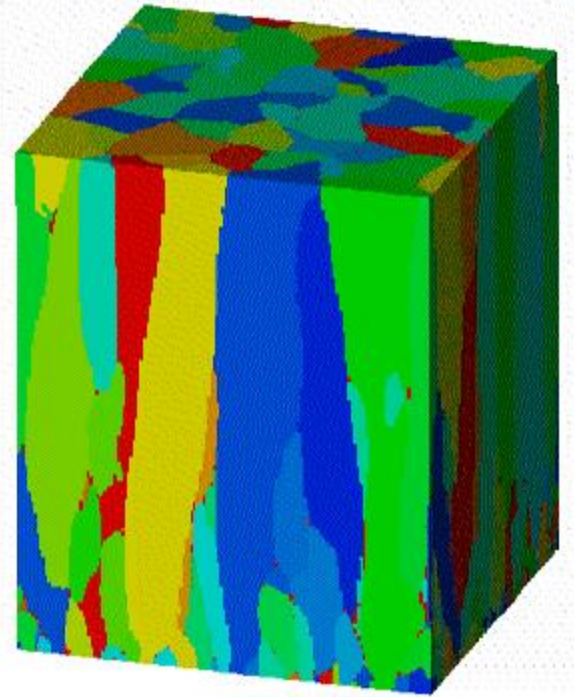
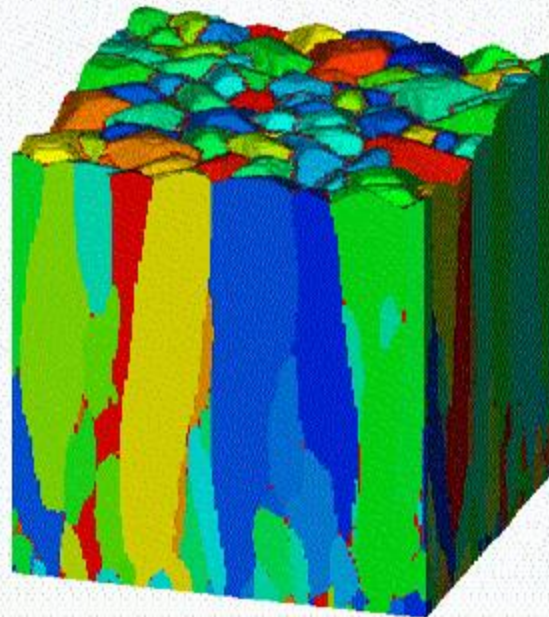
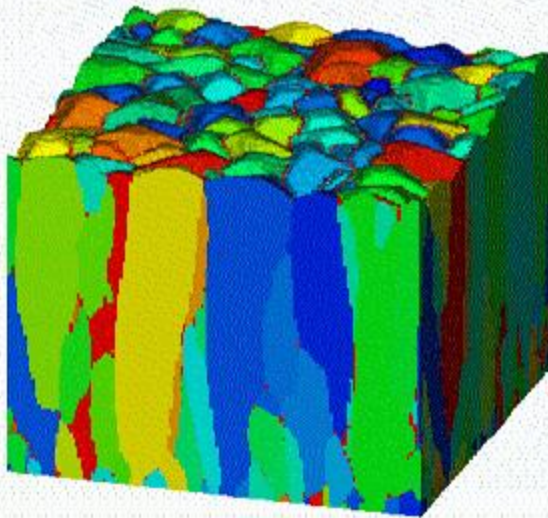
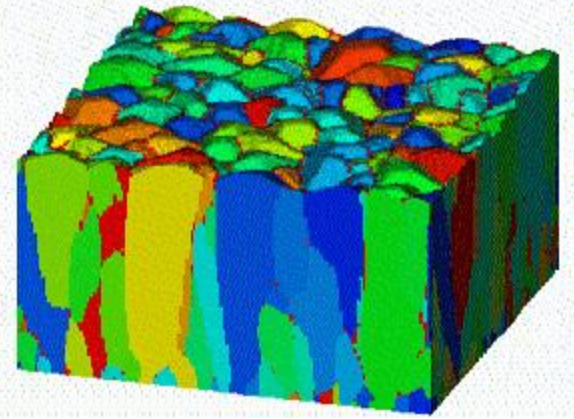
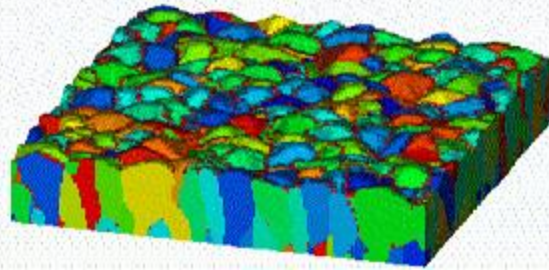
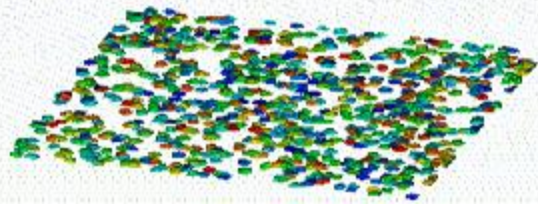


Dentritas (arborecensia)









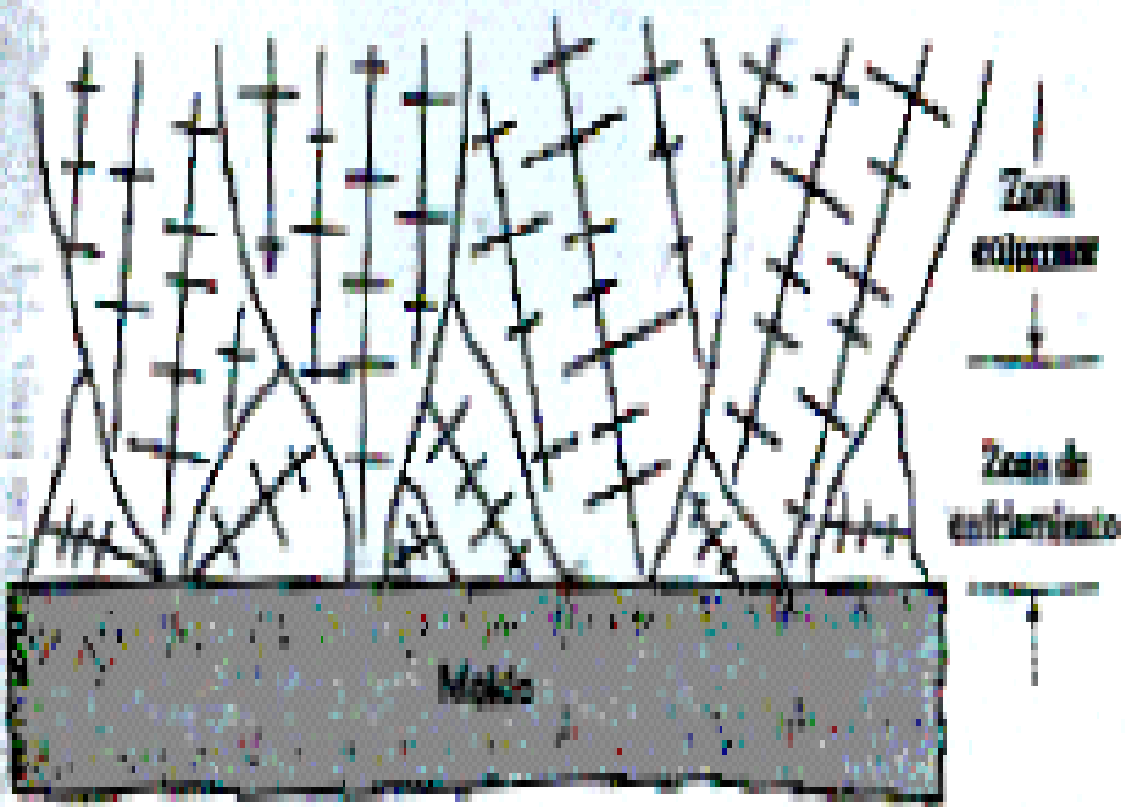
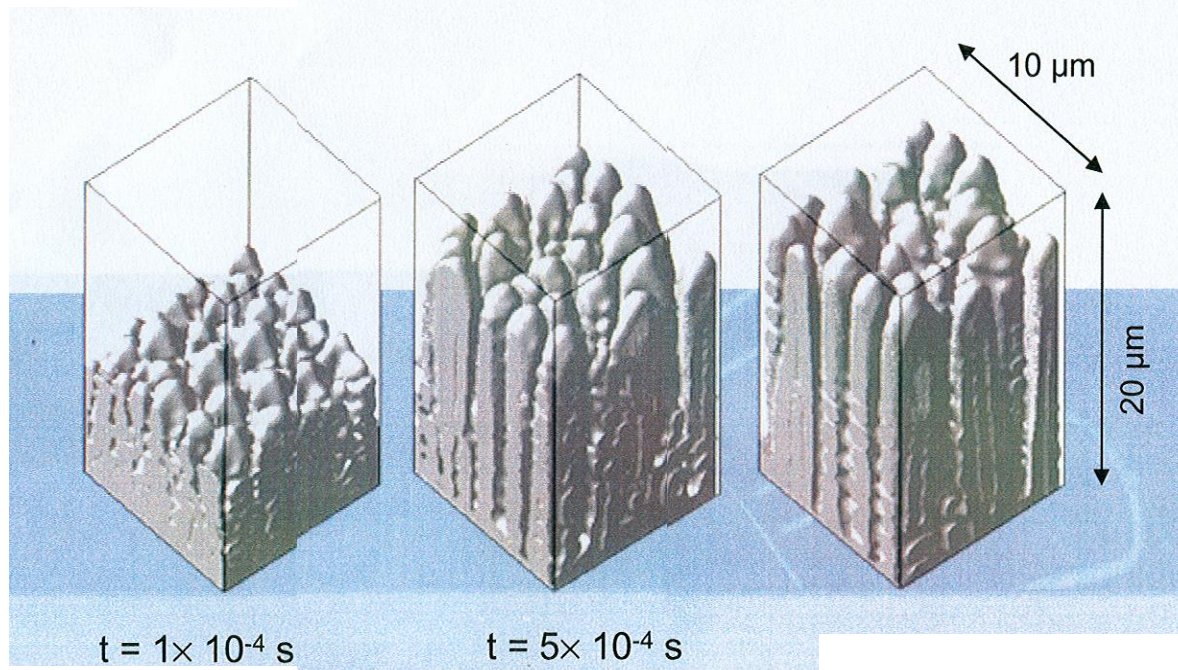
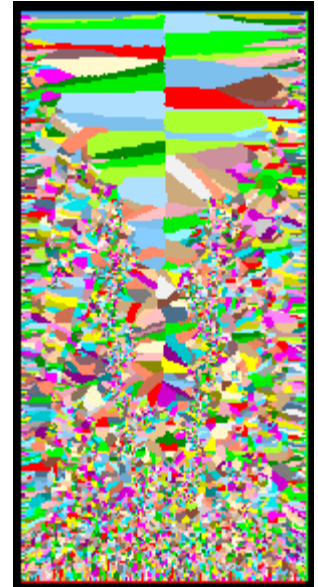
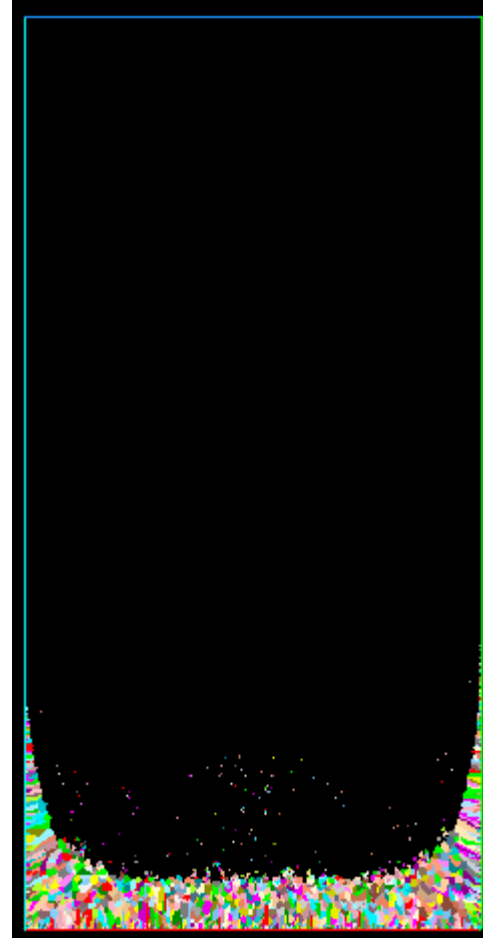
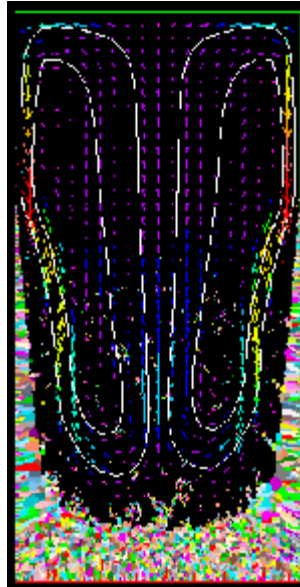
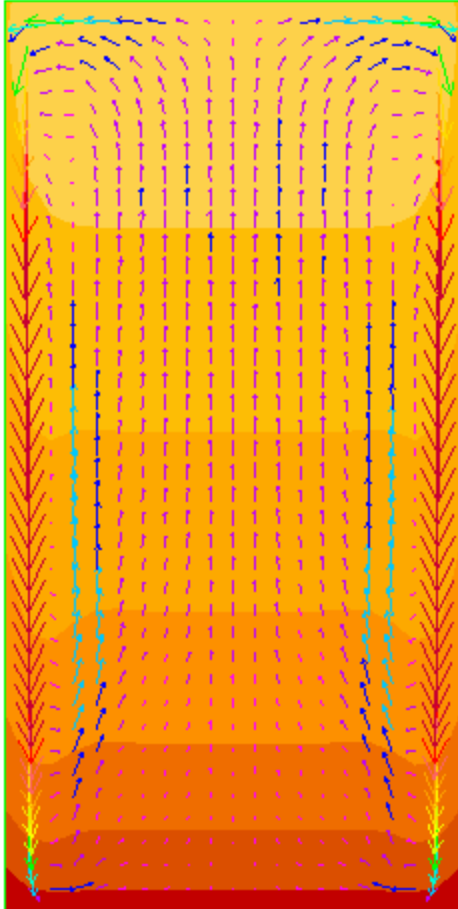


FIGURA 10.2 Desarrollo de una textura preferida en una pared de un molde frío. Nótese que sólo crecen granos favorablemente orientados alejándose de la superficie del molde.

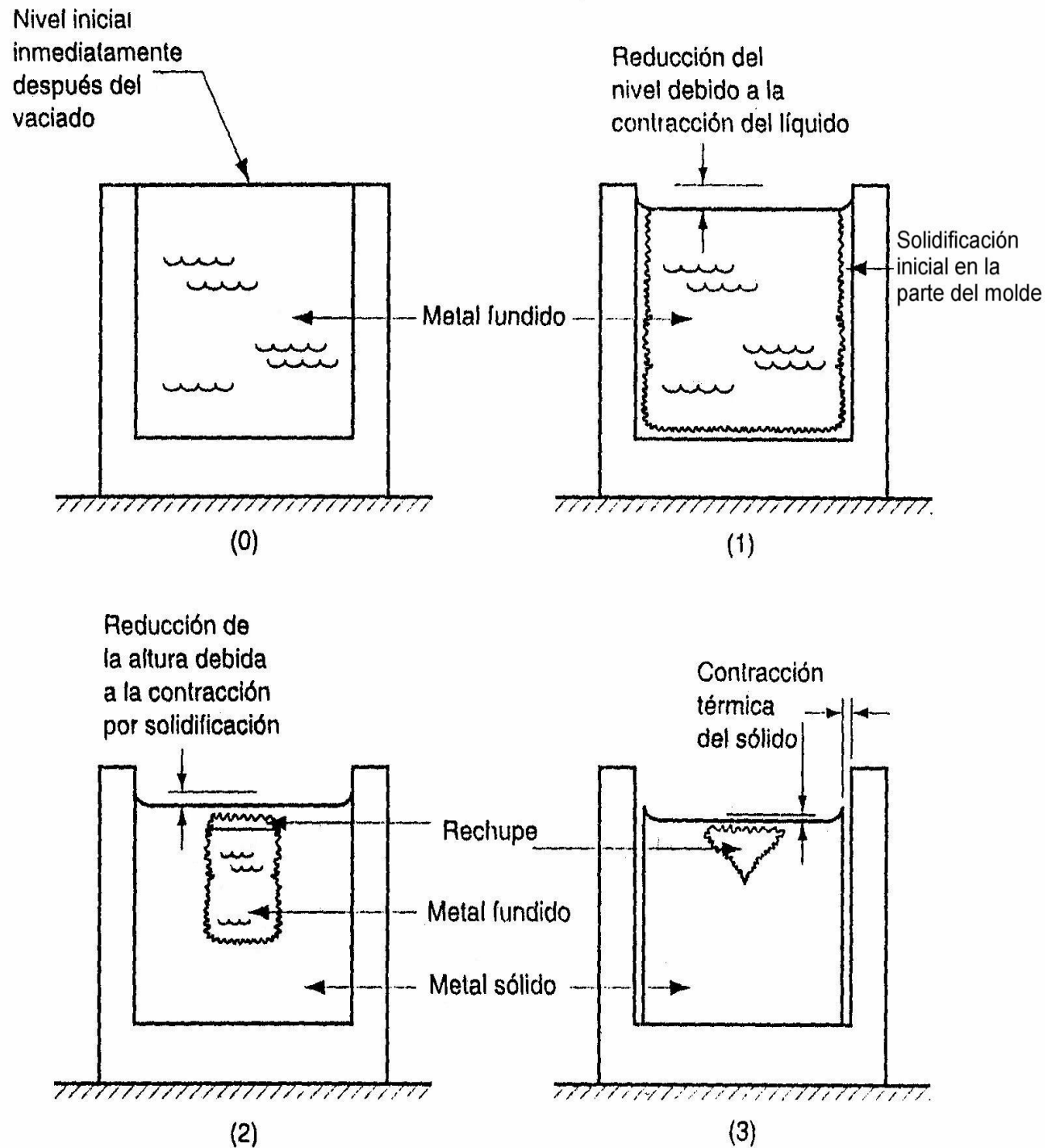
Formación de dendritas columnares de AlSi1.2



Solidificación de lingotes

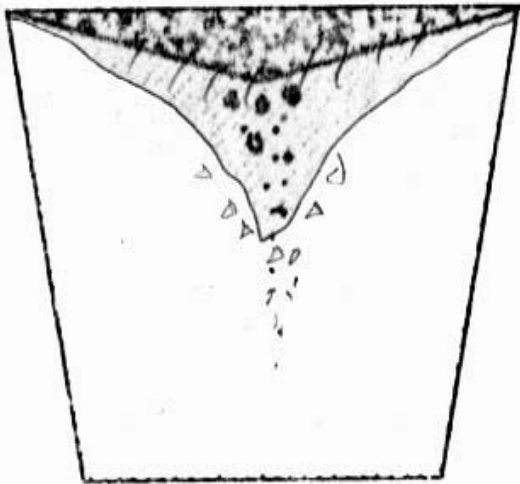


Contracción de una fundición cilíndrica durante la solidificación y enfriamiento:

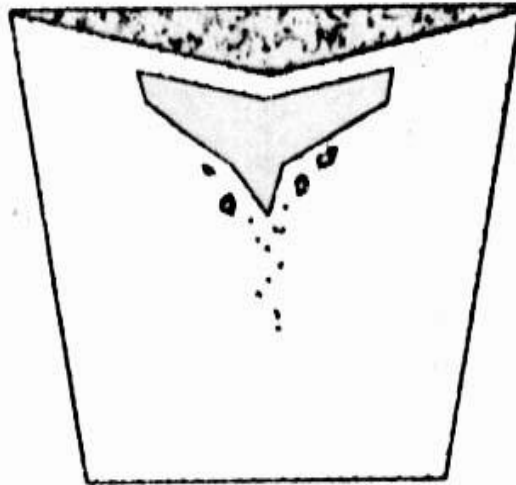


DEFECTOS DE LOS LINGOTES:

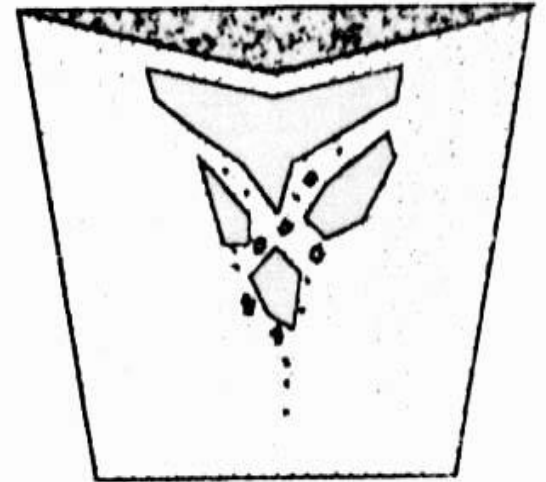
Porosidad
y rechupes



a



b

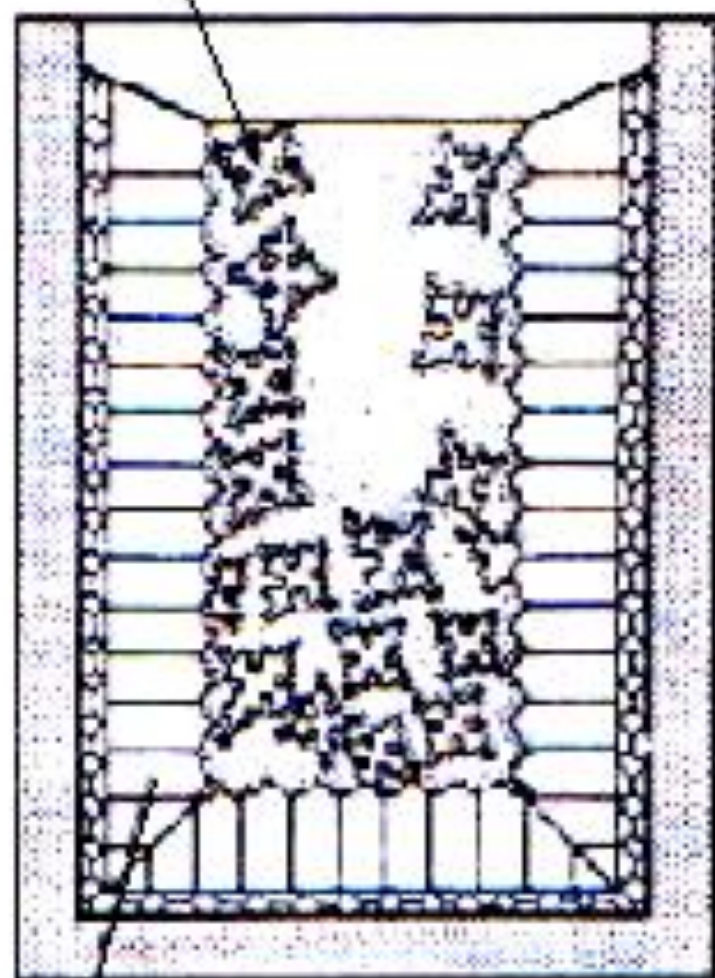
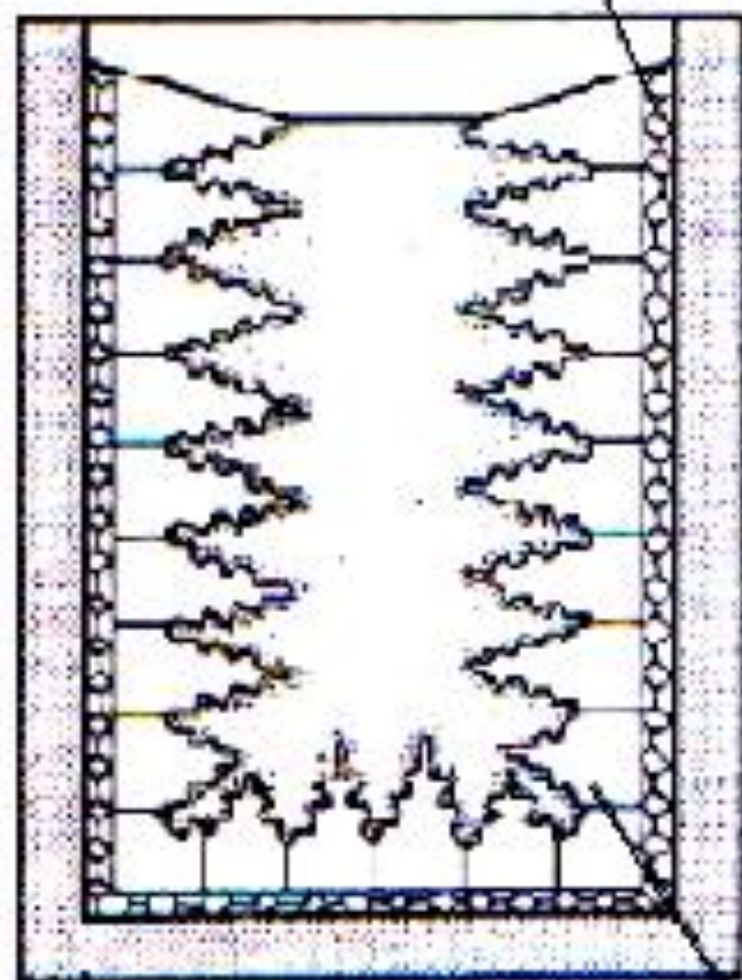


c

Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del sólido

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación %	Contracción térmica del sólido %
• Aluminio	• 7.0	5.6
• Aleación de aluminio (típica)	• 7.0	5.0
• Fundición de hierro gris	• 1.8	3.0
• Fundición de hierro gris al alto carbono	• 0	3.0
• Fundición de acero al bajo carbono.	• 3.0	7.2
• Cobre	• 4.5	7.5
• Bronce (CuSn)	• 5.5	6.0

zona equiaxial



zona columnar

Bordes de grano

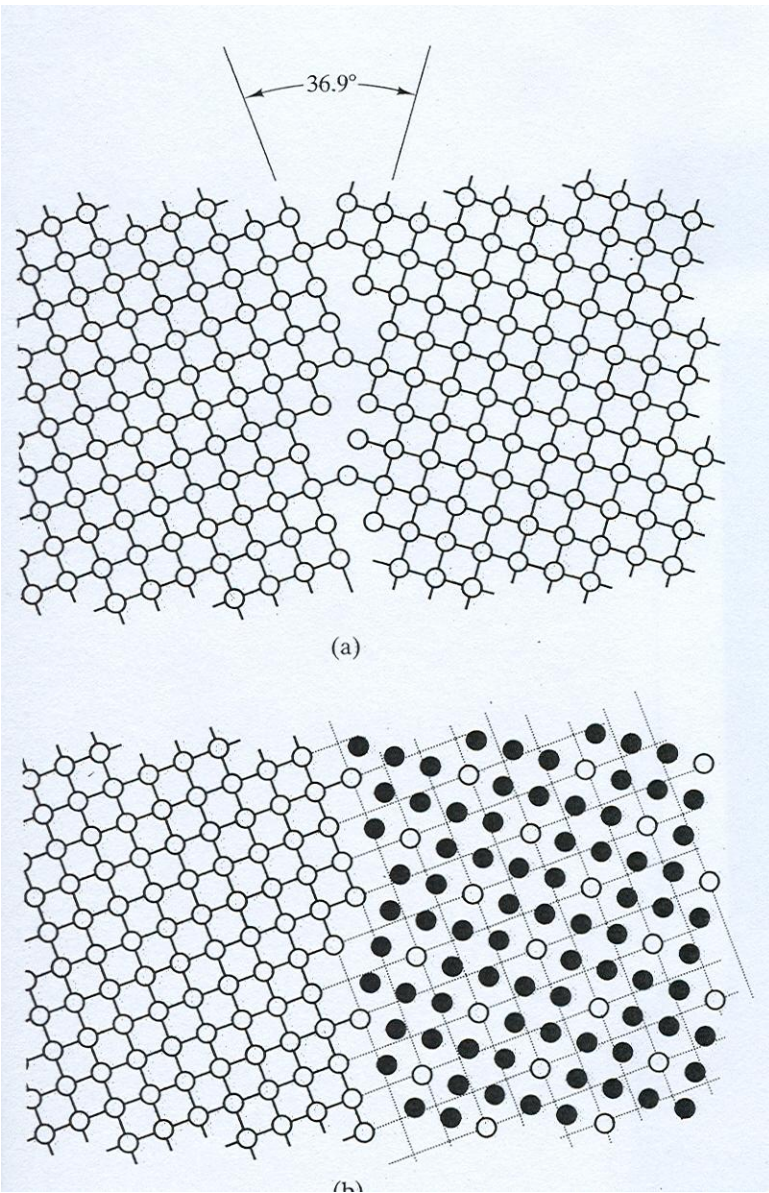
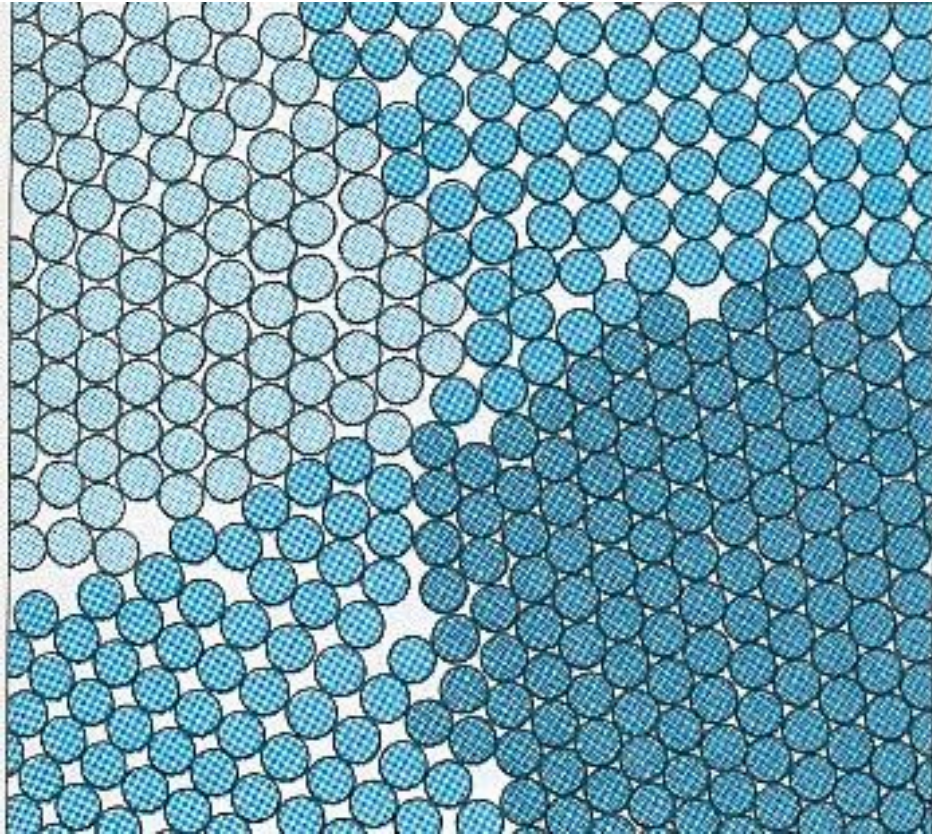
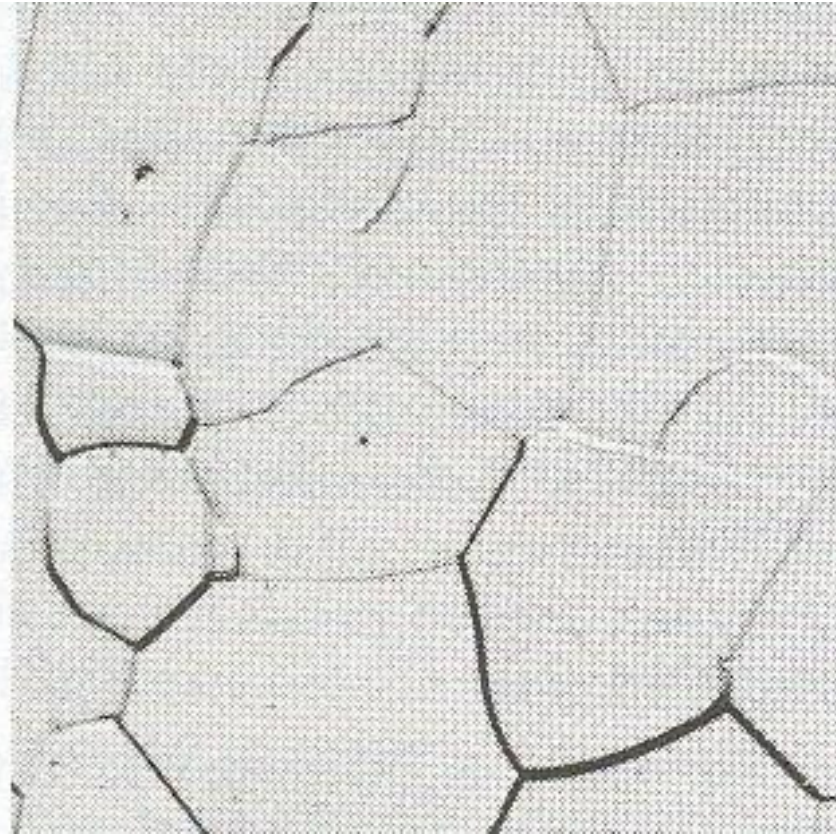


Figura 4.20. (a) Un borde de grano de ángulo grande ($\theta = 36.9^\circ$) entre dos granos con una red cuadrada puede representarse por una serie de puntos de red coincidentes, como se muestra en (b). Puesto que uno de cada cinco átomos del grano de la derecha coincide con la red del grano de la izquierda, se dice que la frontera tiene $\Sigma^{-1} = 1/5$ o $\Sigma = 5$.

(a)



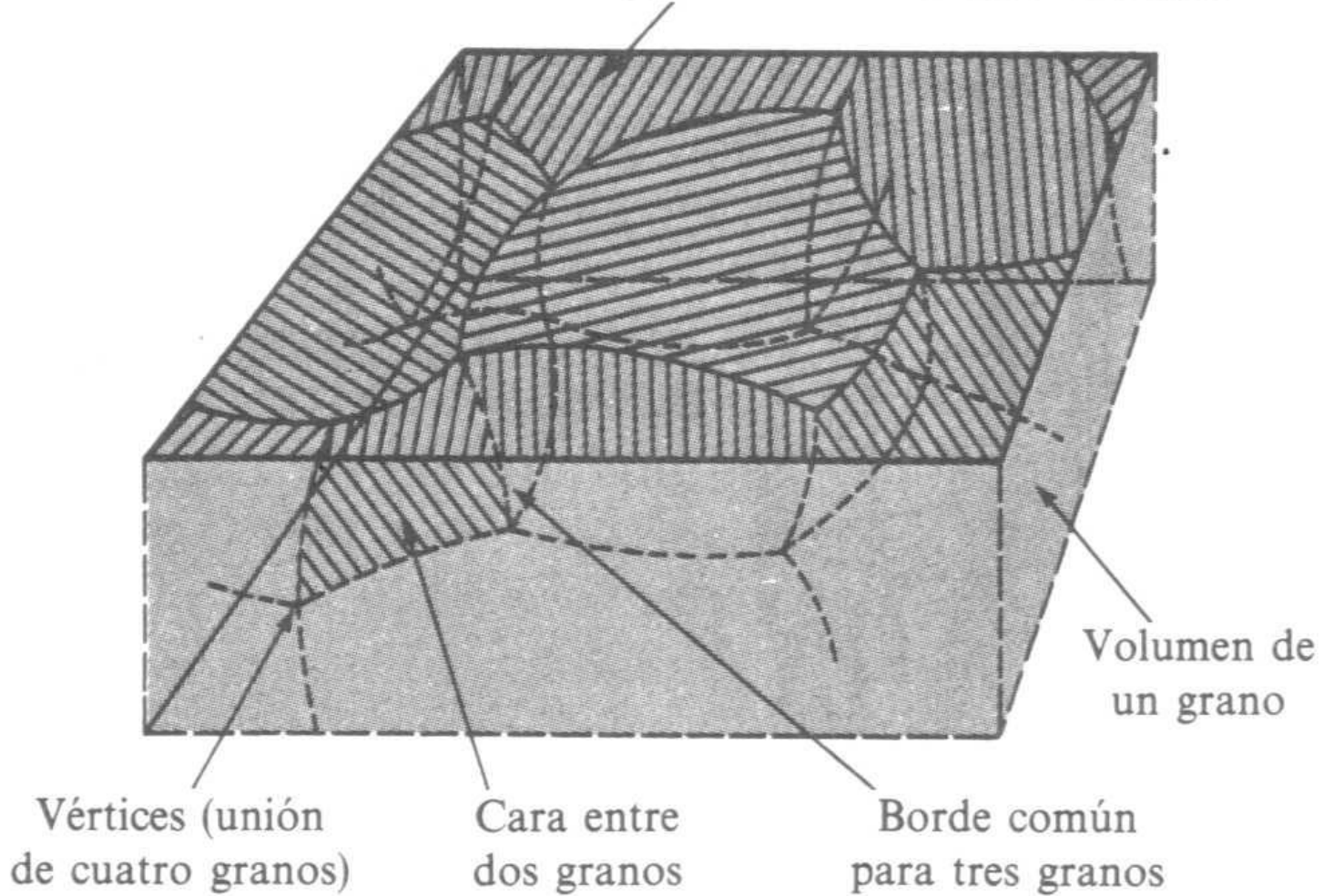
(b)



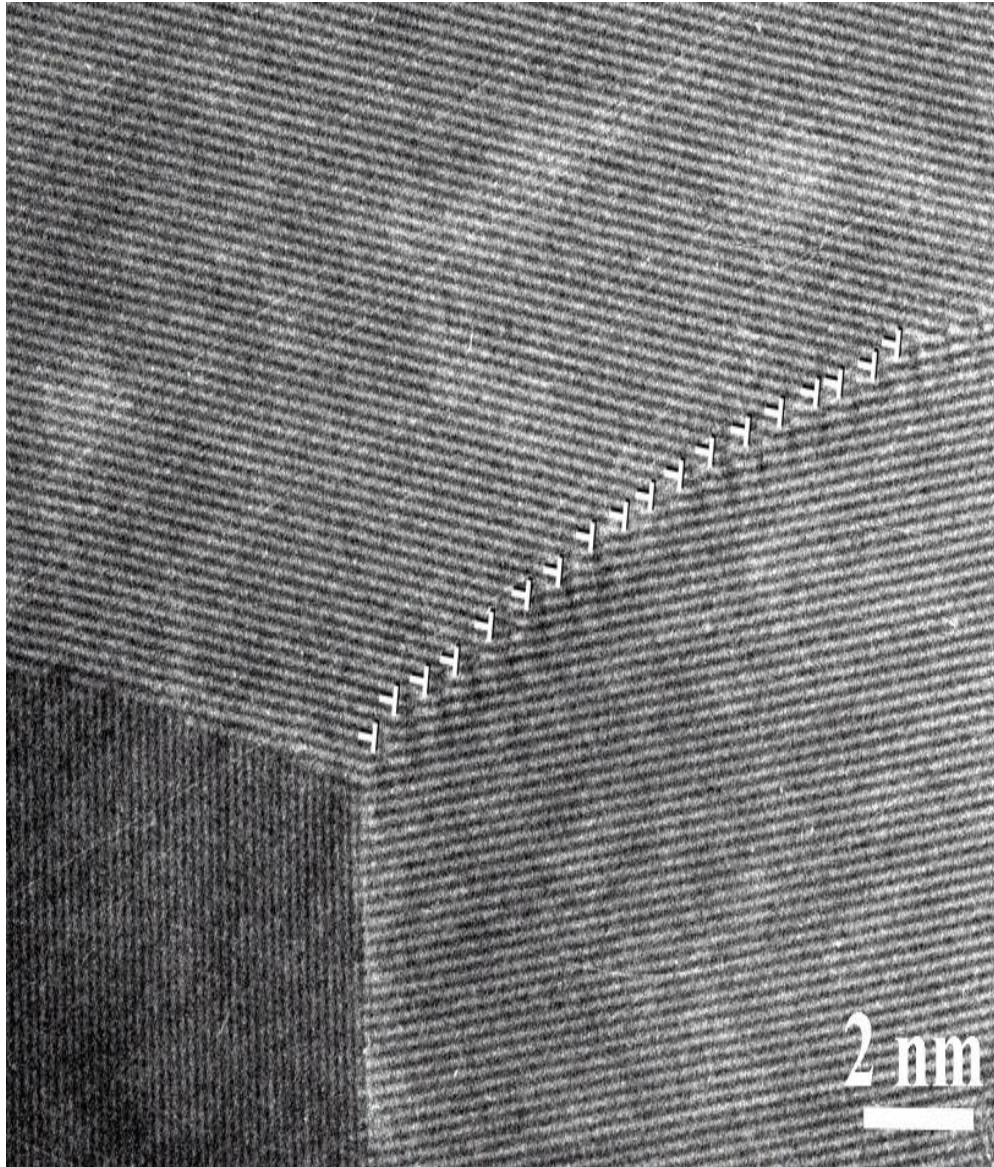
(a) Esquema que muestra el ordenamiento de los átomos en la formación del borde de grano.

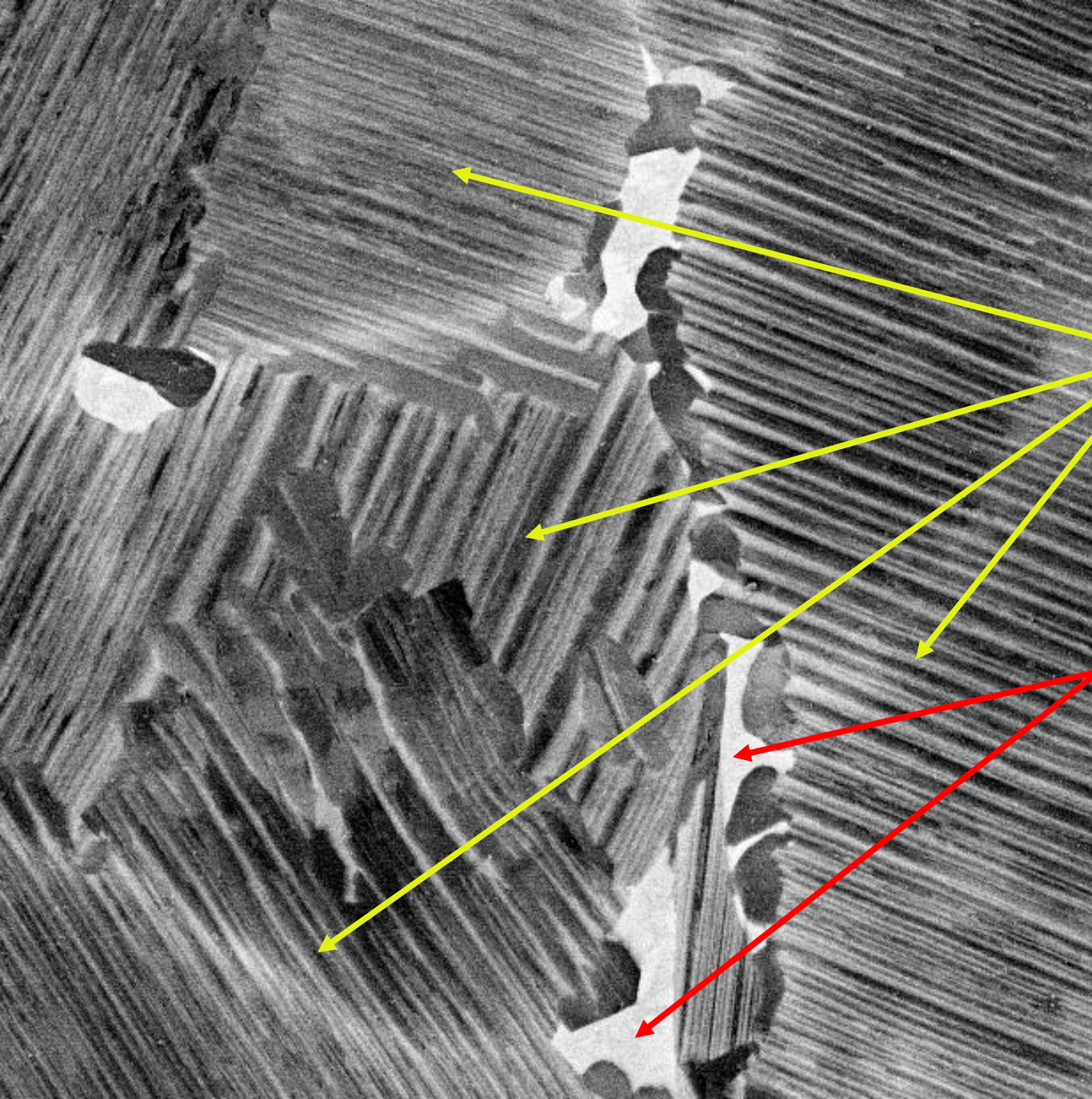
(b) Granos y límites de grano en una muestra de acero inoxidable.

Microestructura en la superficie superior.
Cada grano está sombreado diferente



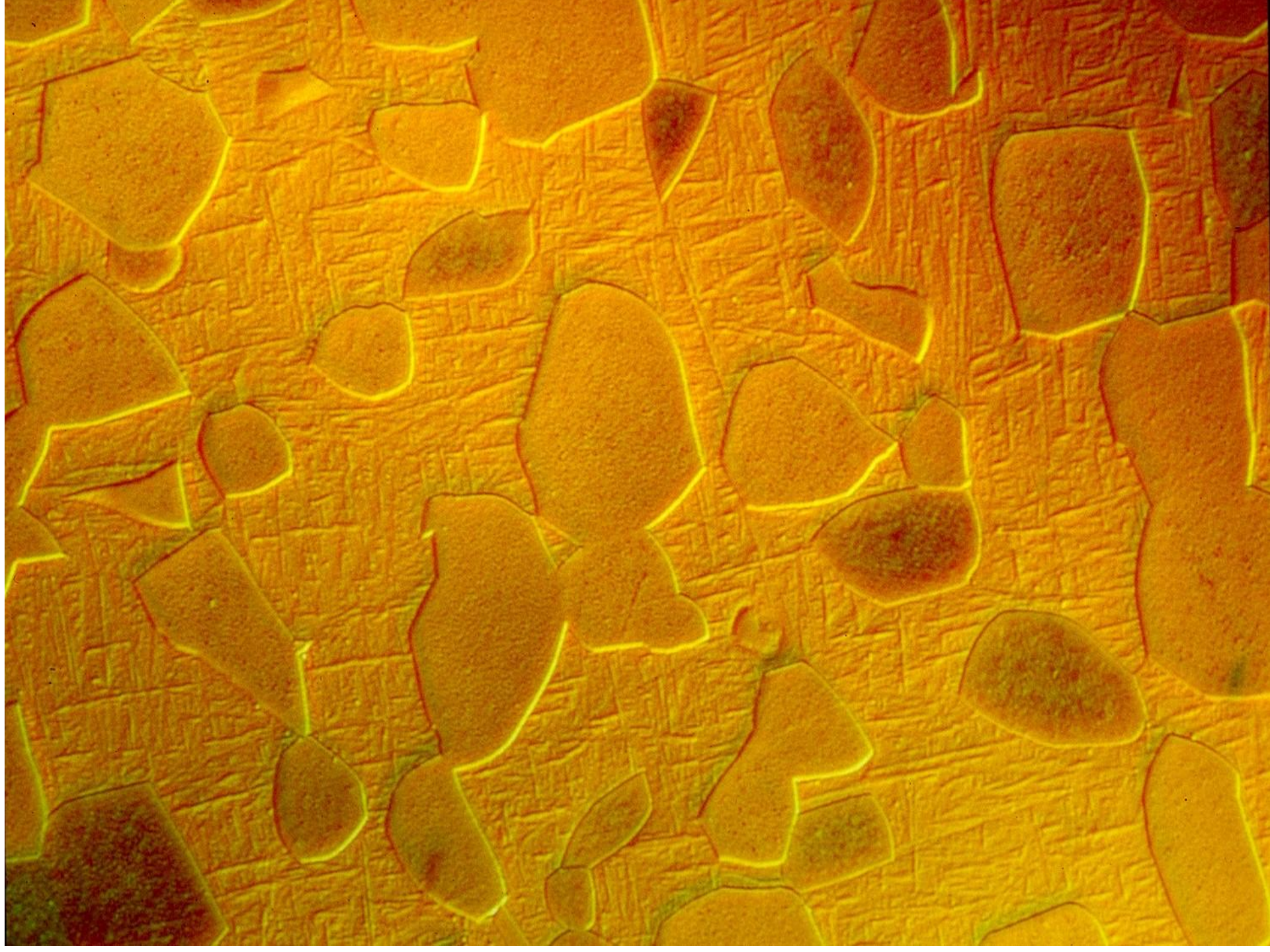
Material policristalino

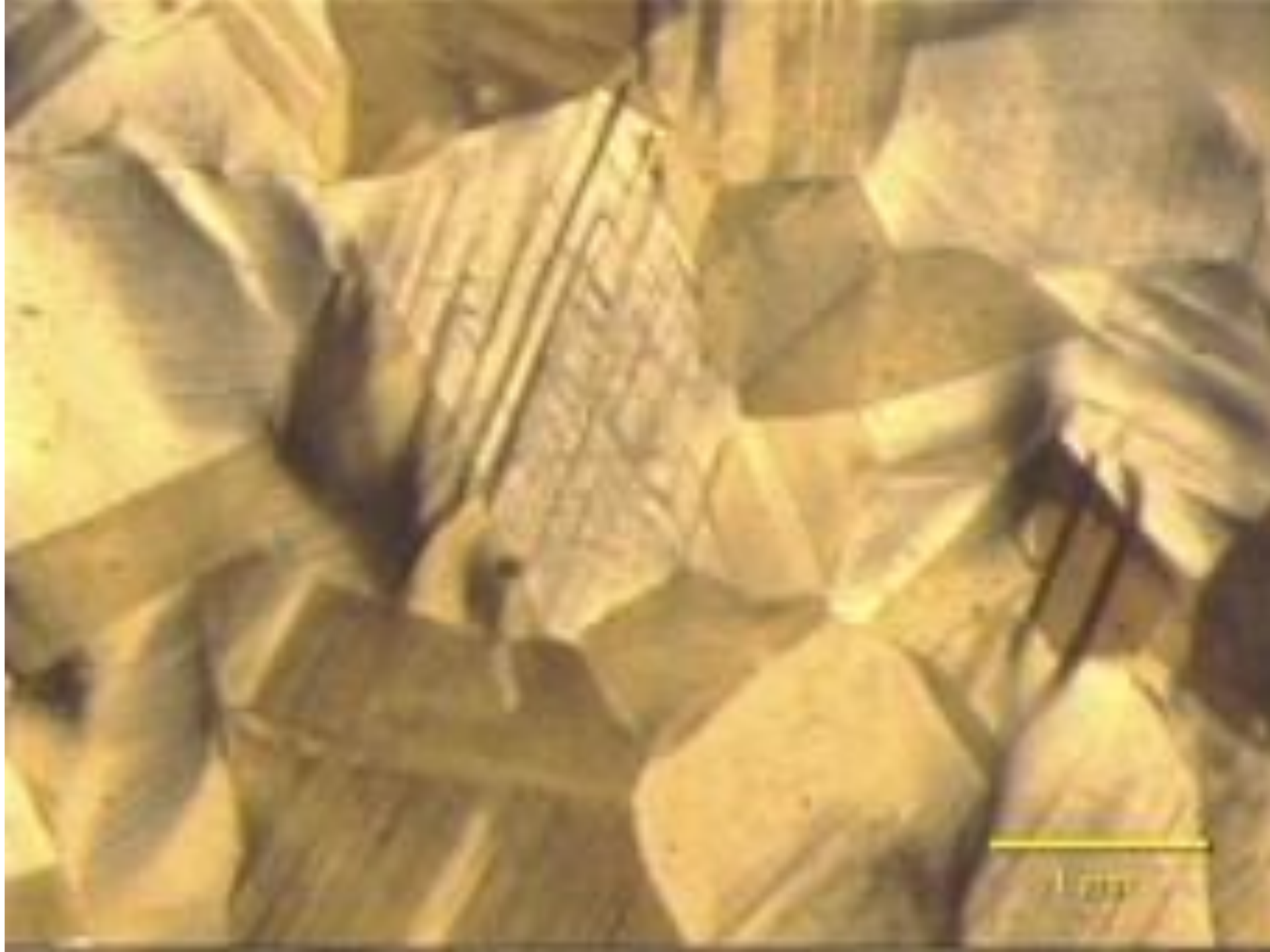




GRANOS
(CRISTALES)

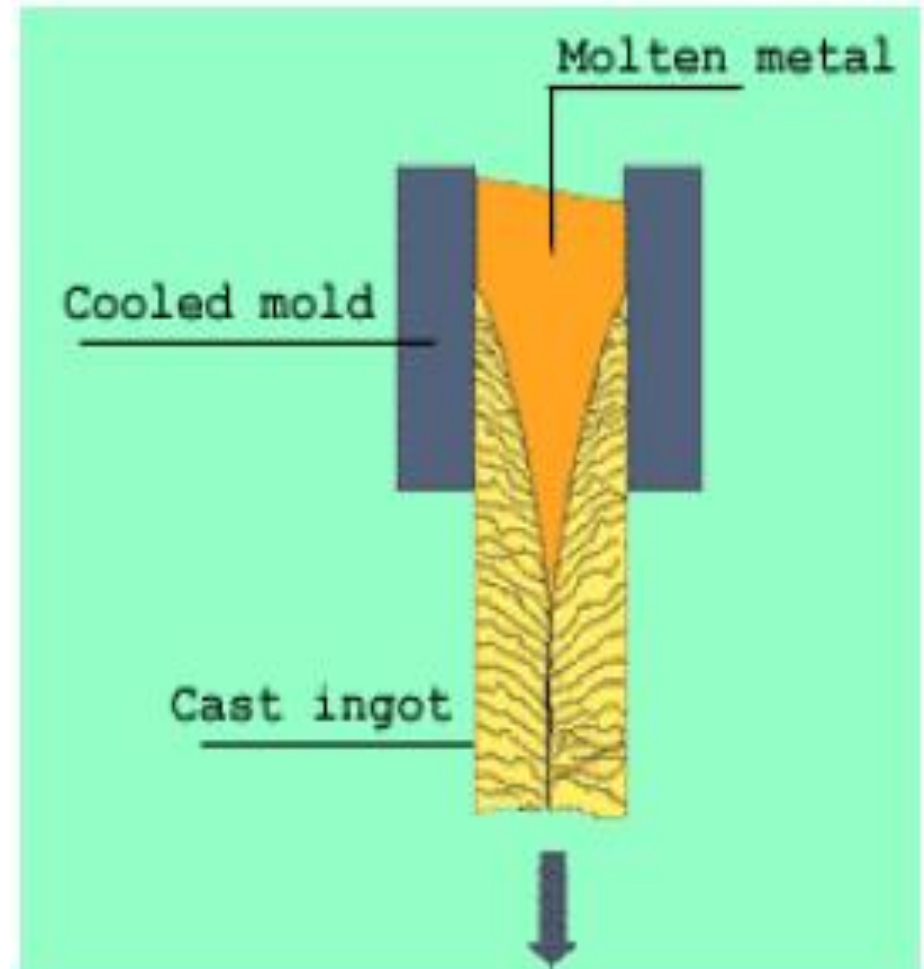
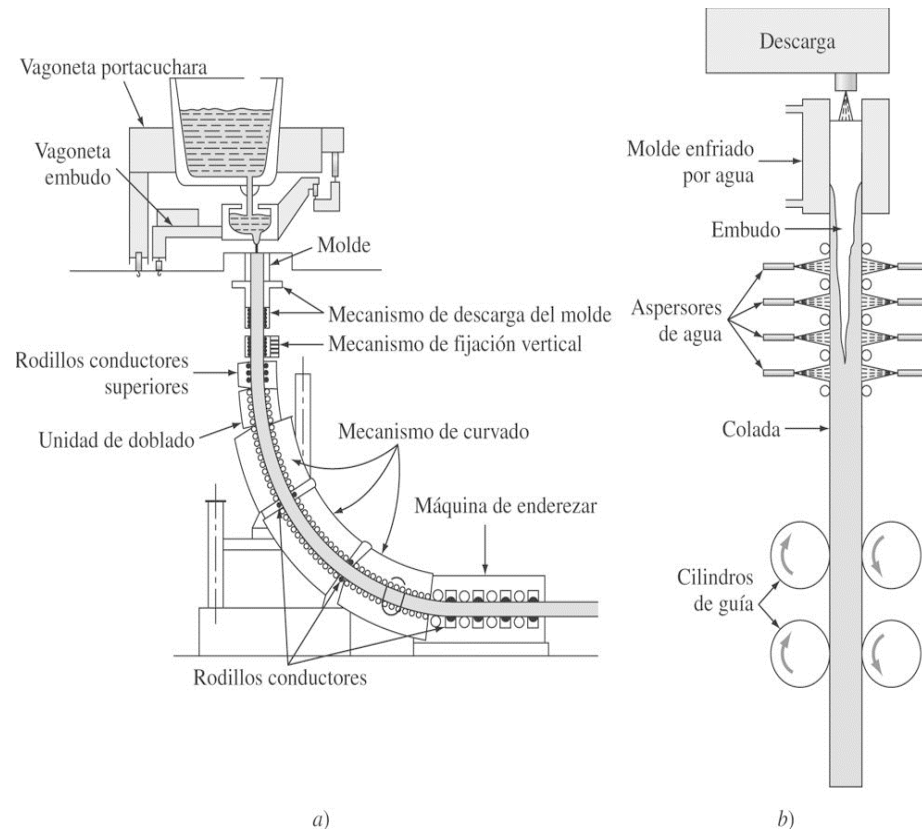
ESPACIOS
INTERGRANULARES

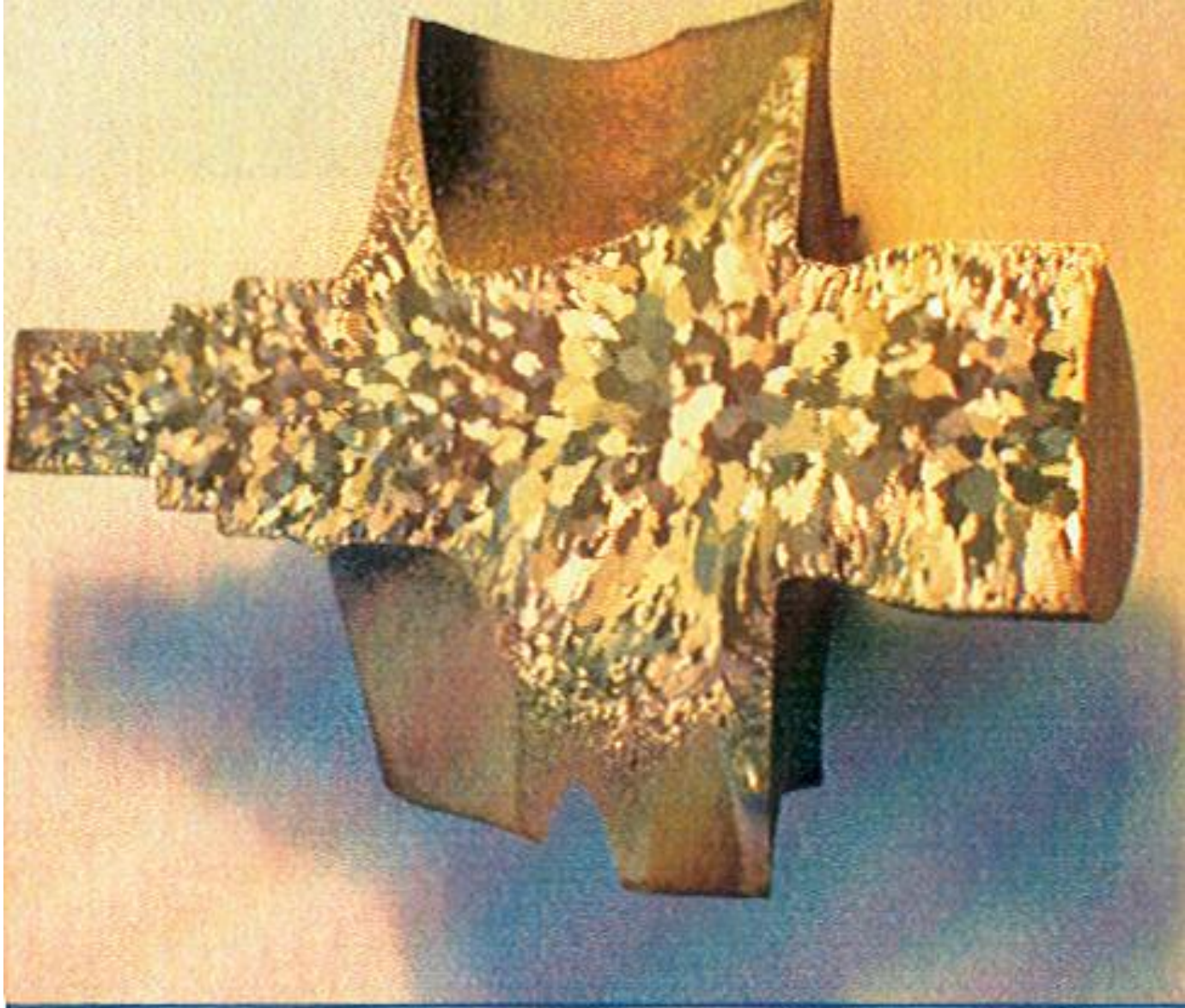
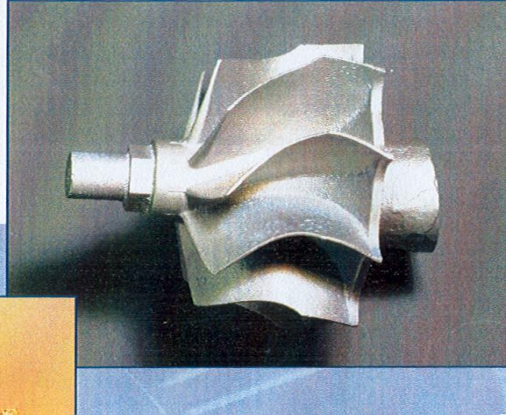




1 cm

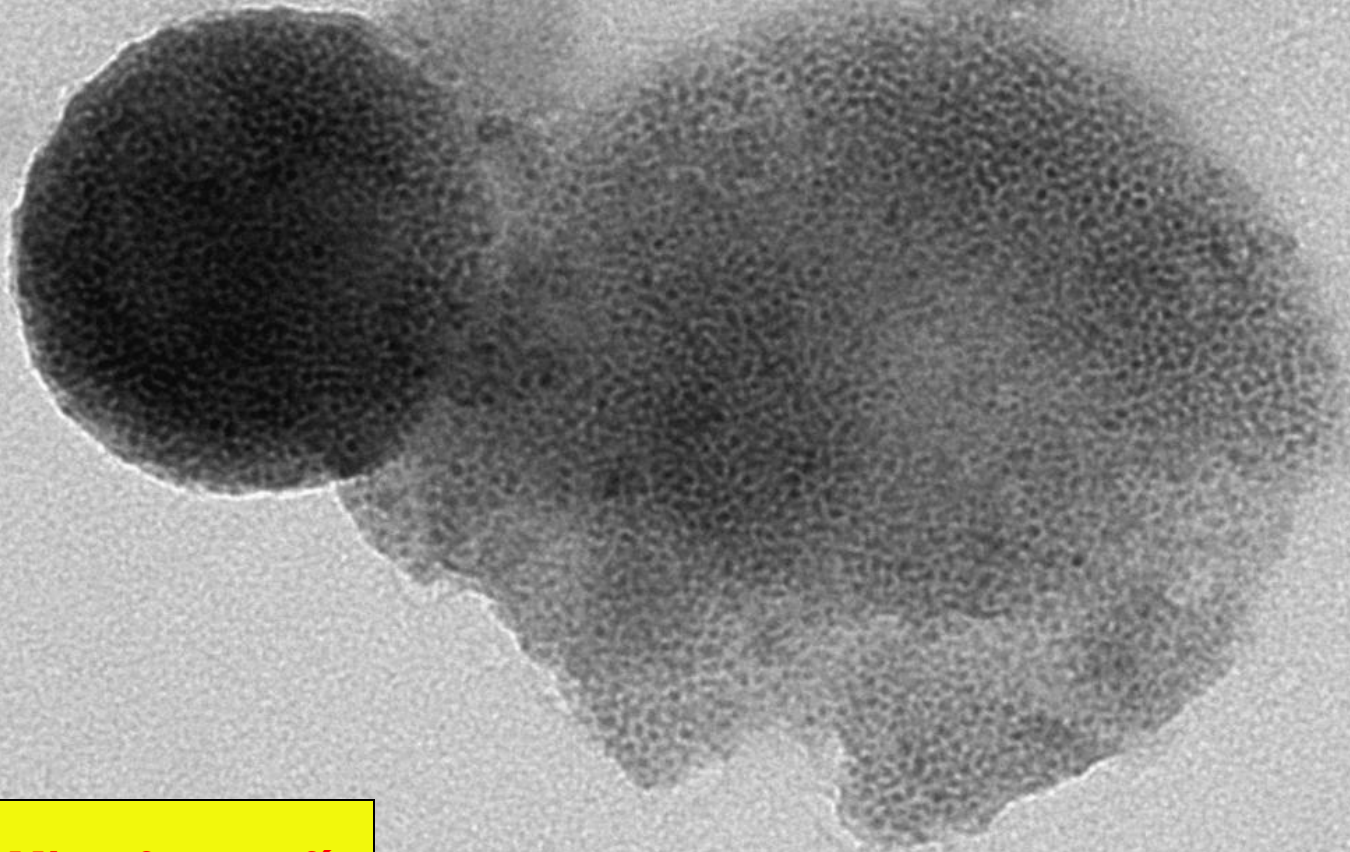
Formación de granos columnares en la colada continua





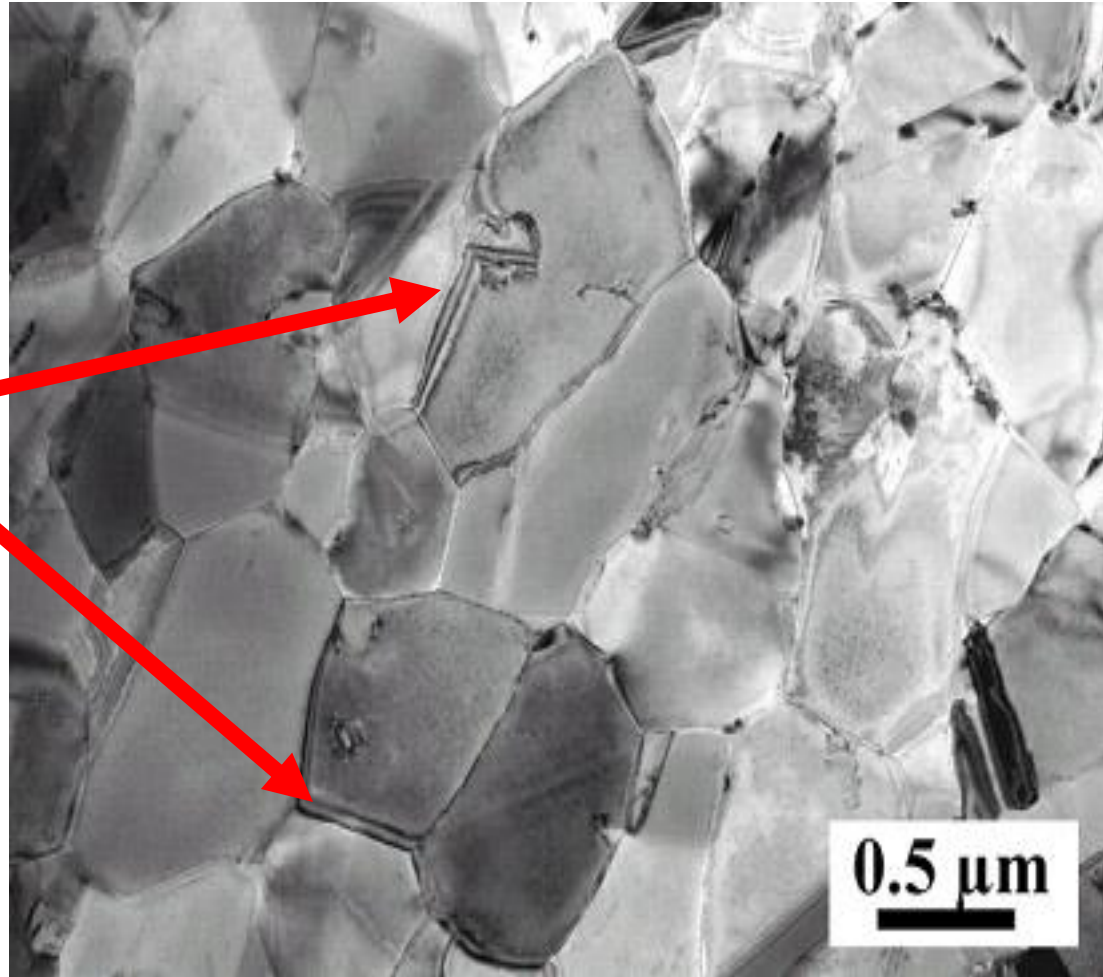
**Microfotografía
FeO**

100 nm

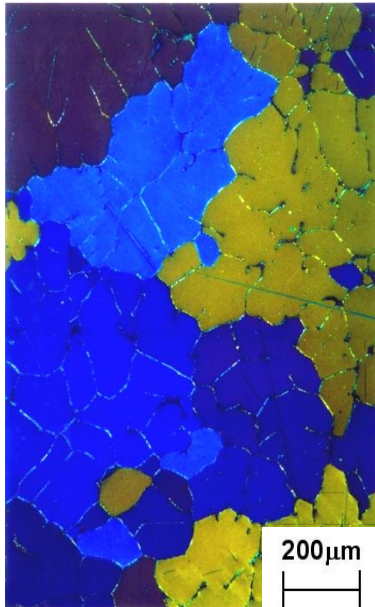


Espacios intergranulares

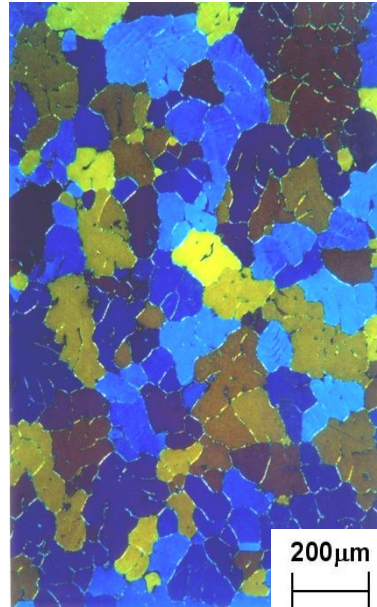
Oxidos
e
impurezas



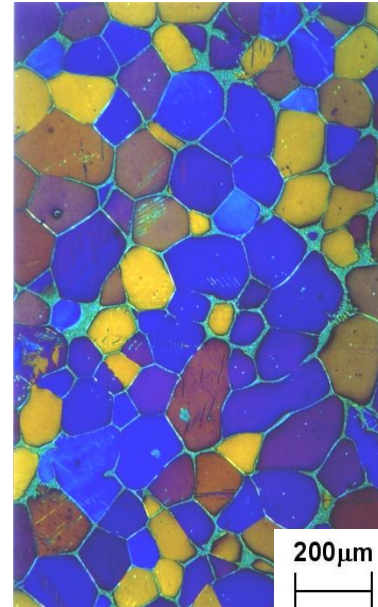
Microstructure development of the Mg alloy MEZ



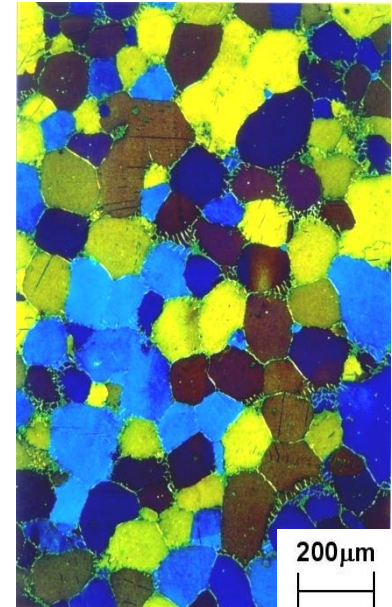
feedstock material



RSCT thixo pre-material



re-heated material

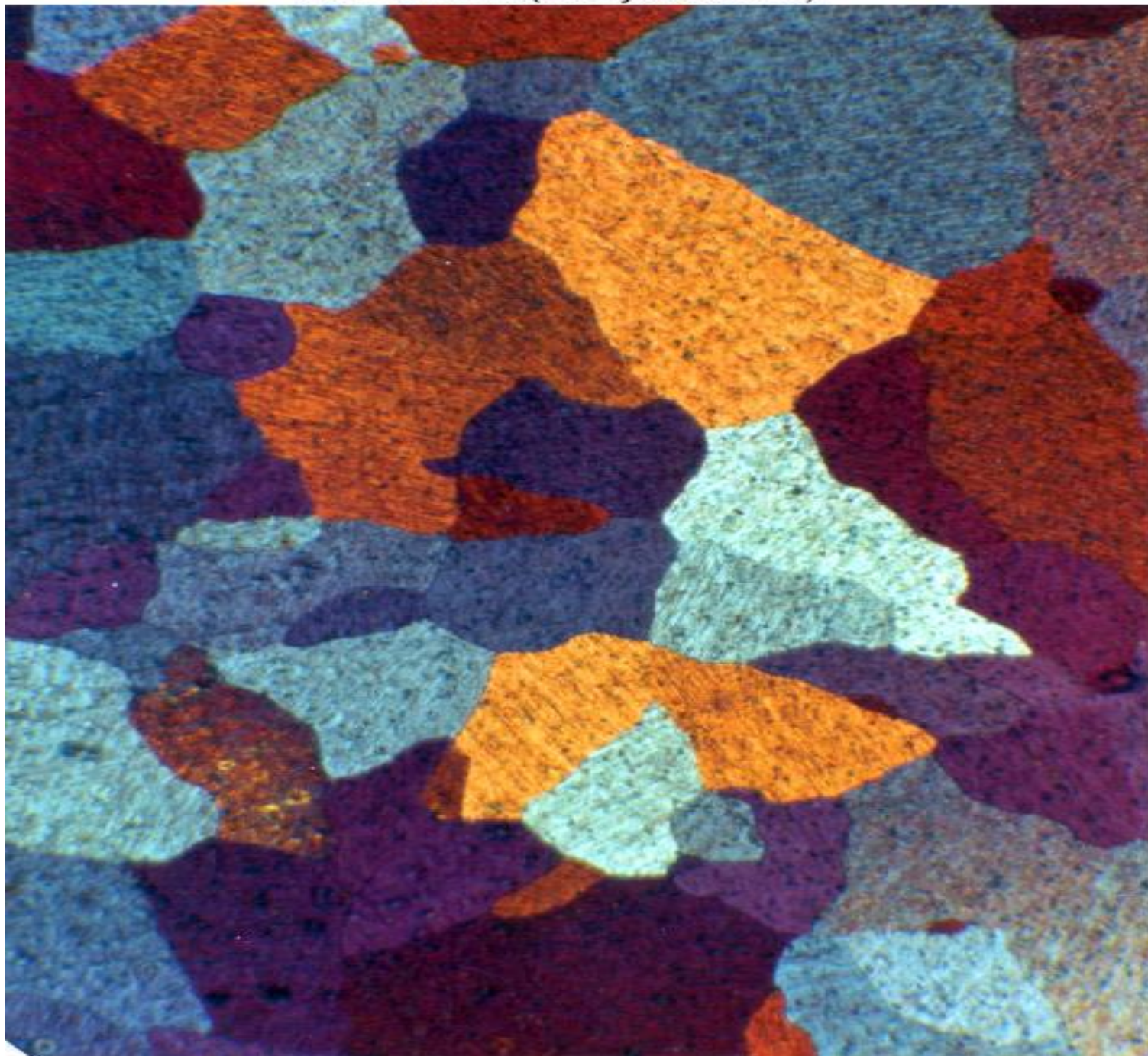


thixocast material

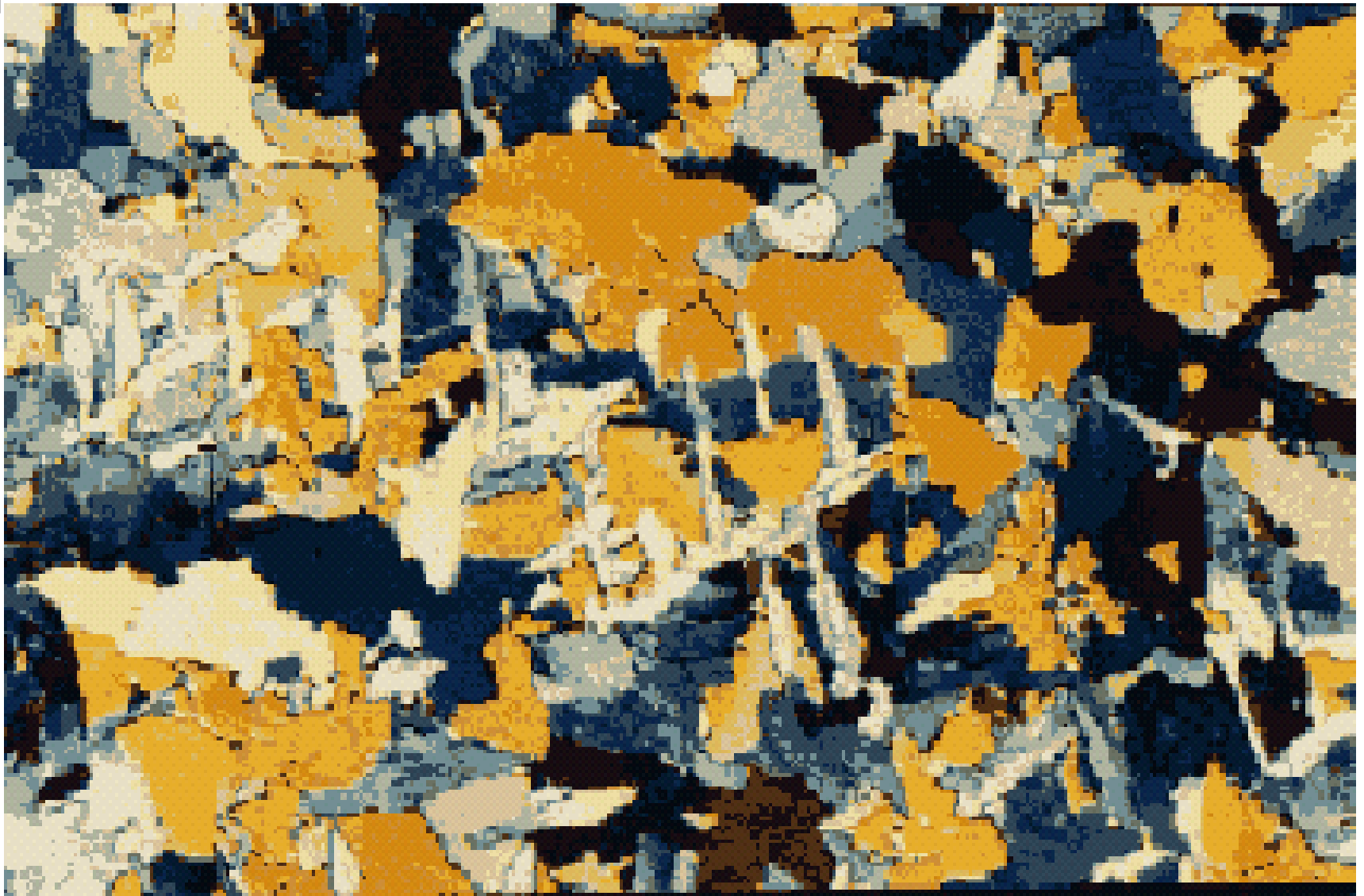
Microstructure analysis

Aluminium (recrystallized)

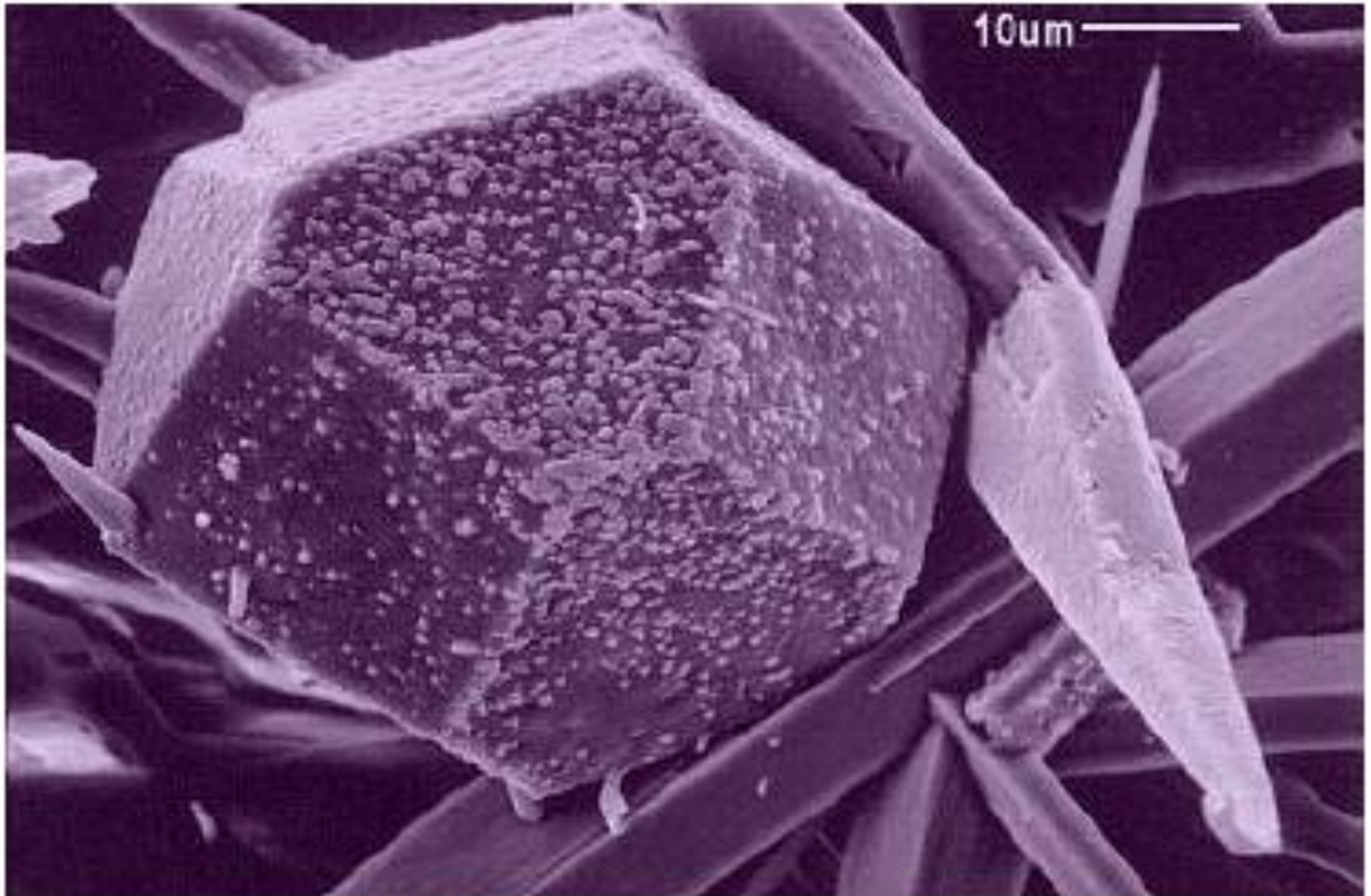
EXC



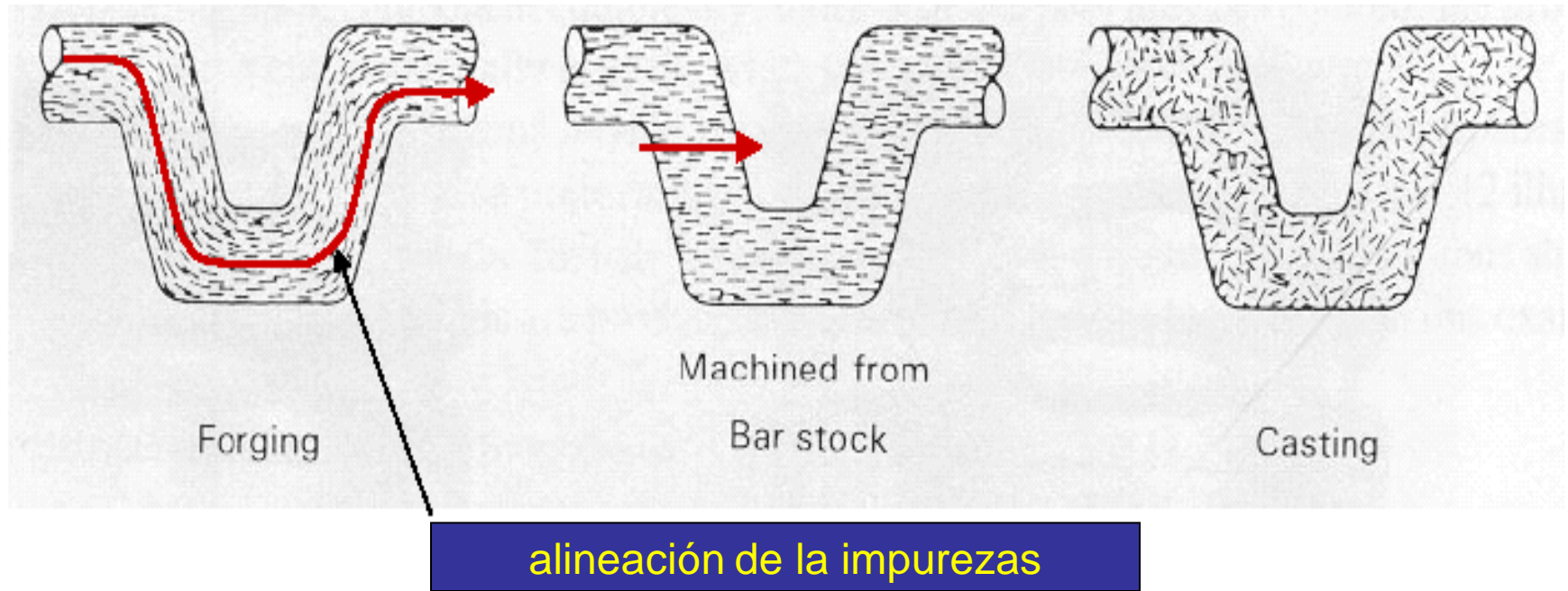
Micrografia de acero al Neoibio



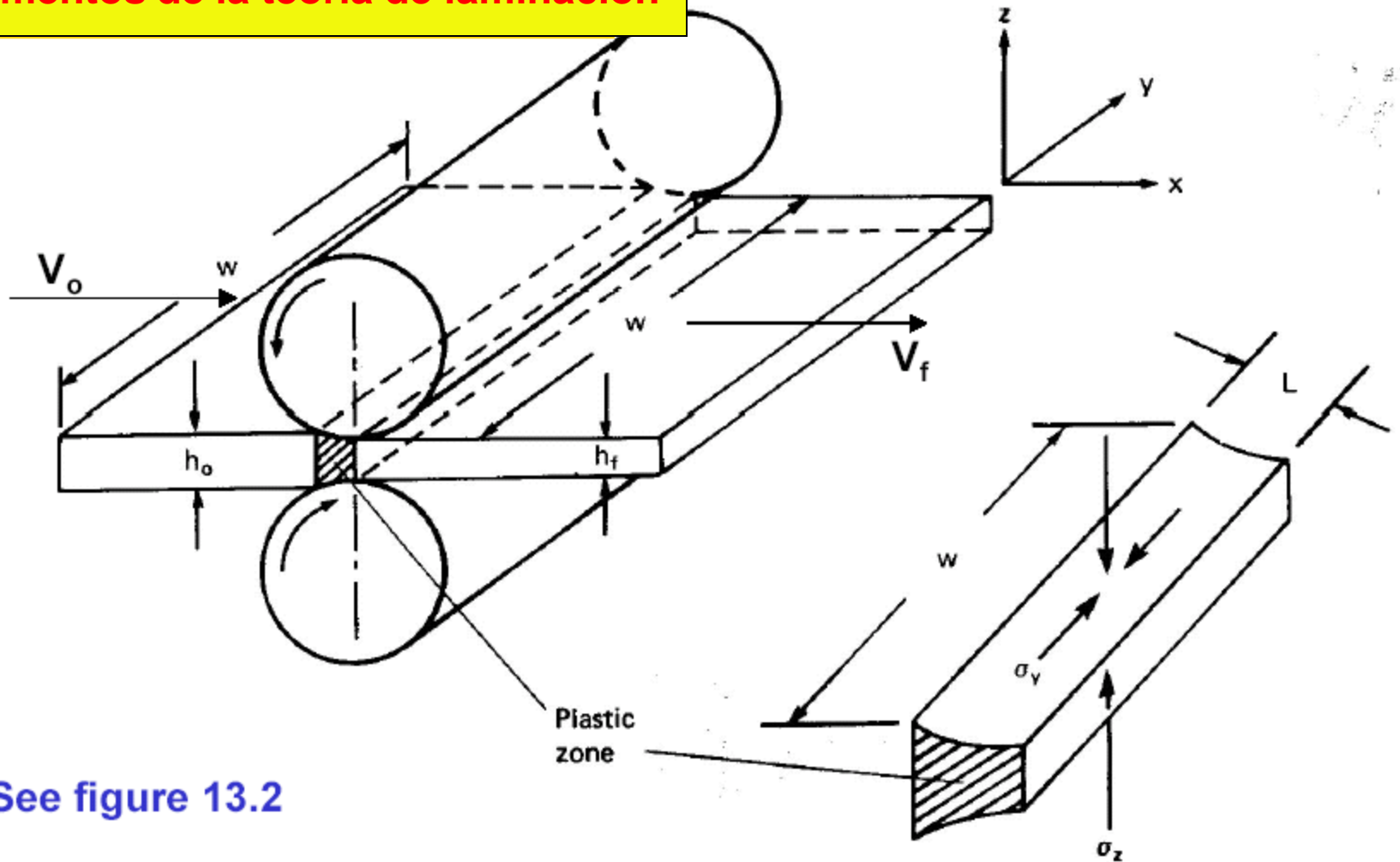
Cristal de martensita



Ordenamiento de las impurezas



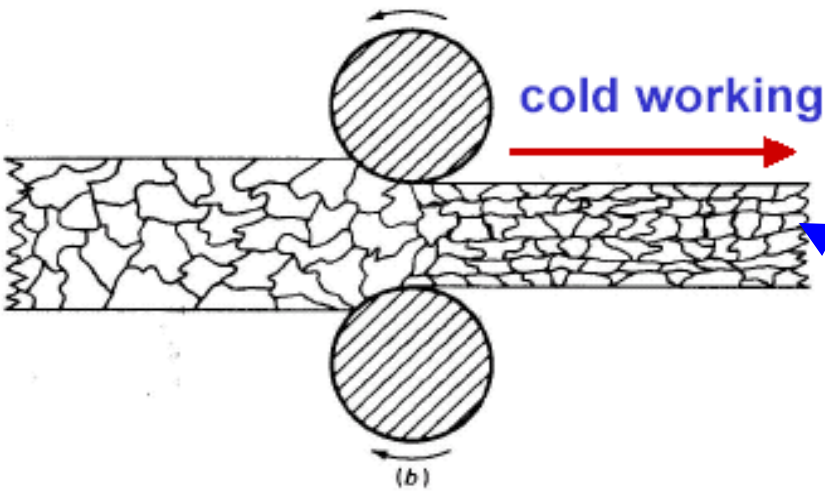
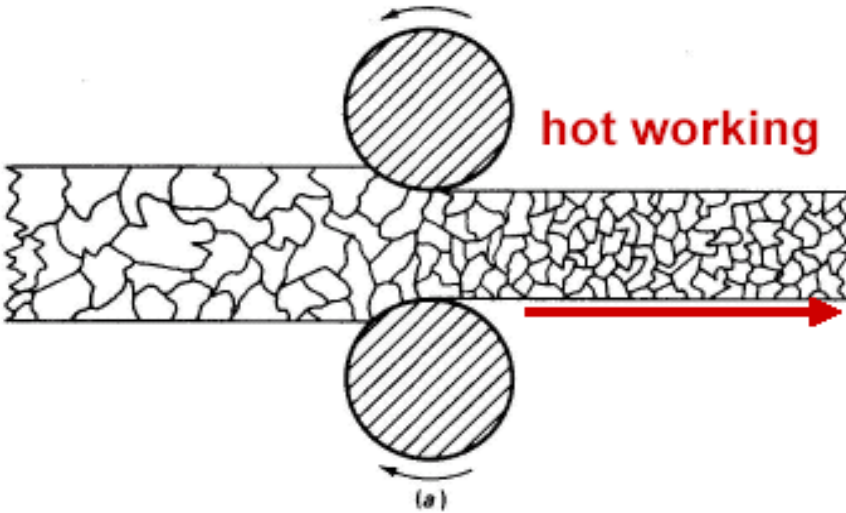
Fundamentos de la teoría de laminación



See figure 13.2

Schematic of the deformation zone in flat rolling.

Effects of mechanical work on grain size and shape:
(a) hot work and (b) cold work.



Modificación de los granos durante la laminación

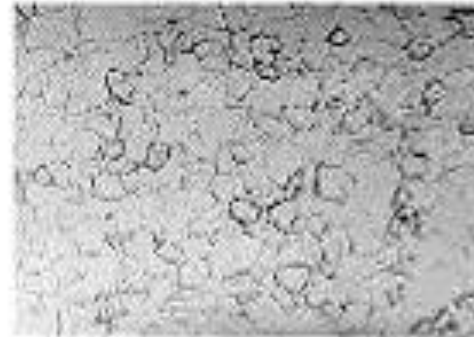


Microestructura de un acero inoxidable dúplex laminado

Acritud en los granos

LAMINACIÓN EN CALIENTE

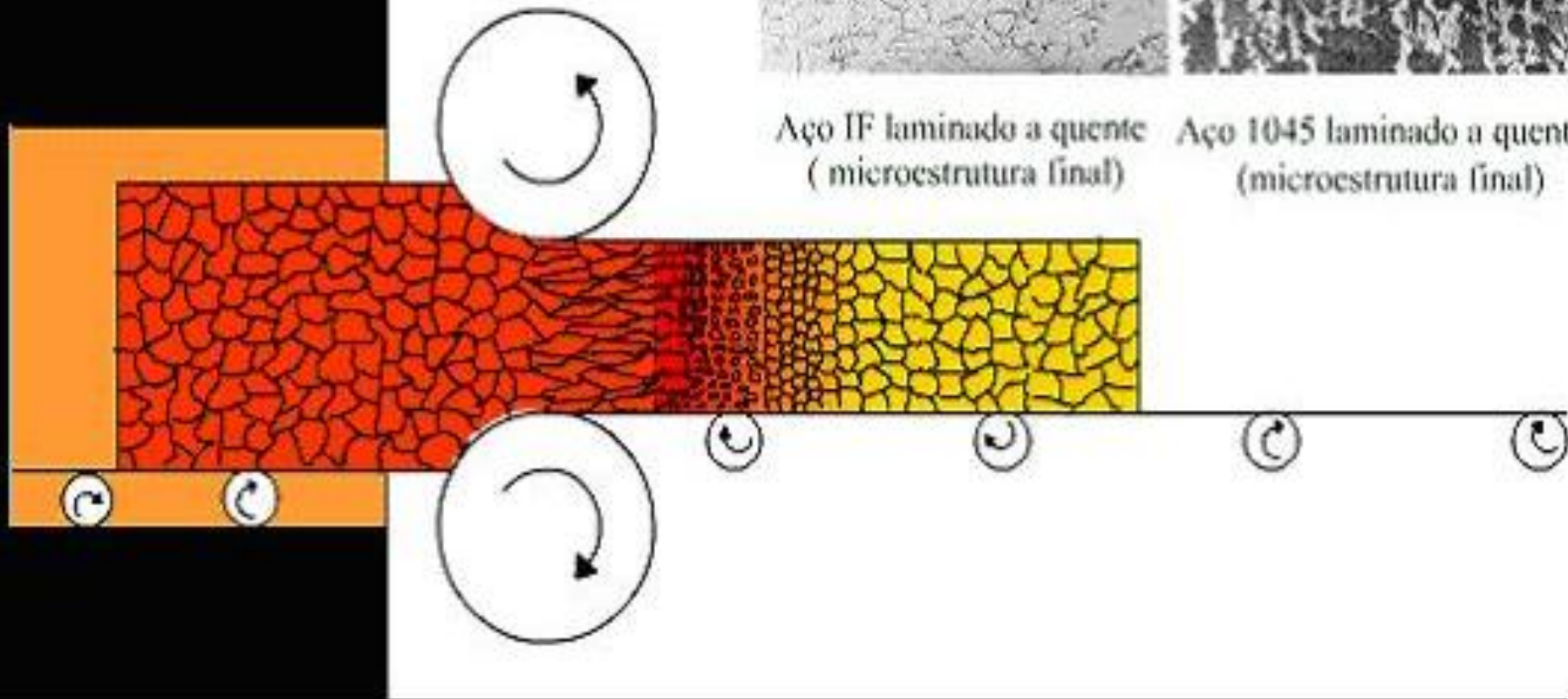
FORNO

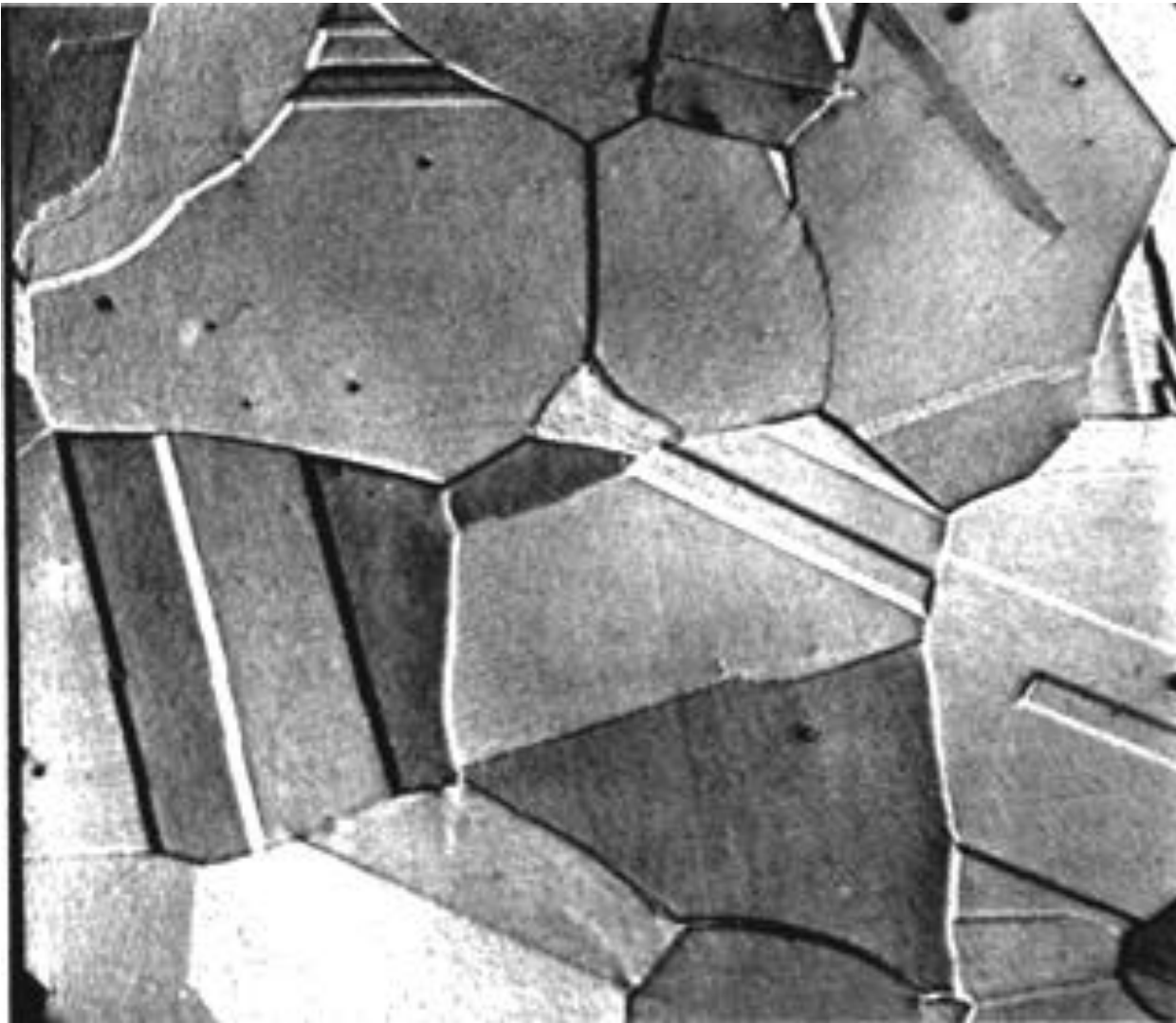


Aço IF laminado a quente
(microestrutura final)

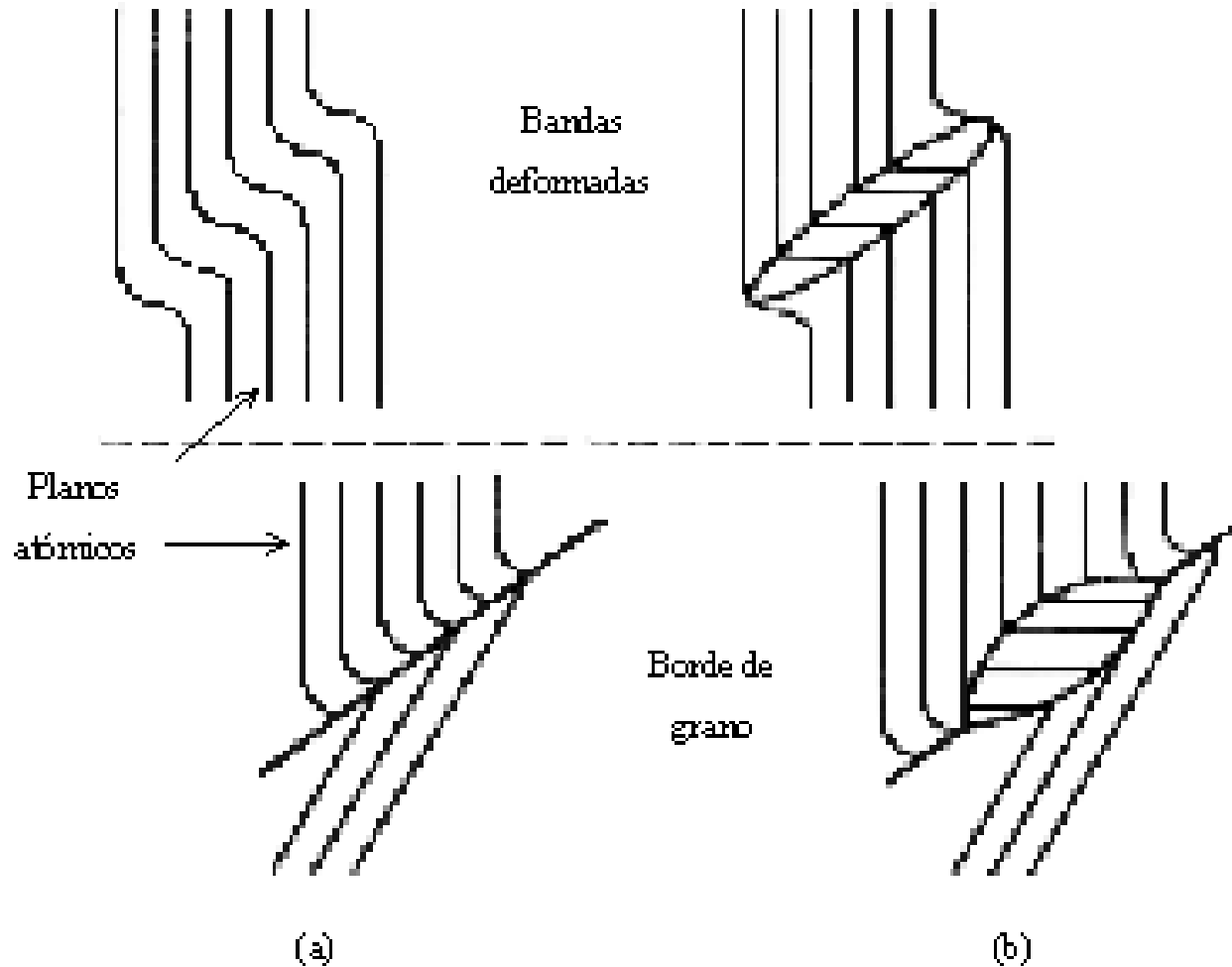


Aço 1045 laminado a quente
(microestrutura final)

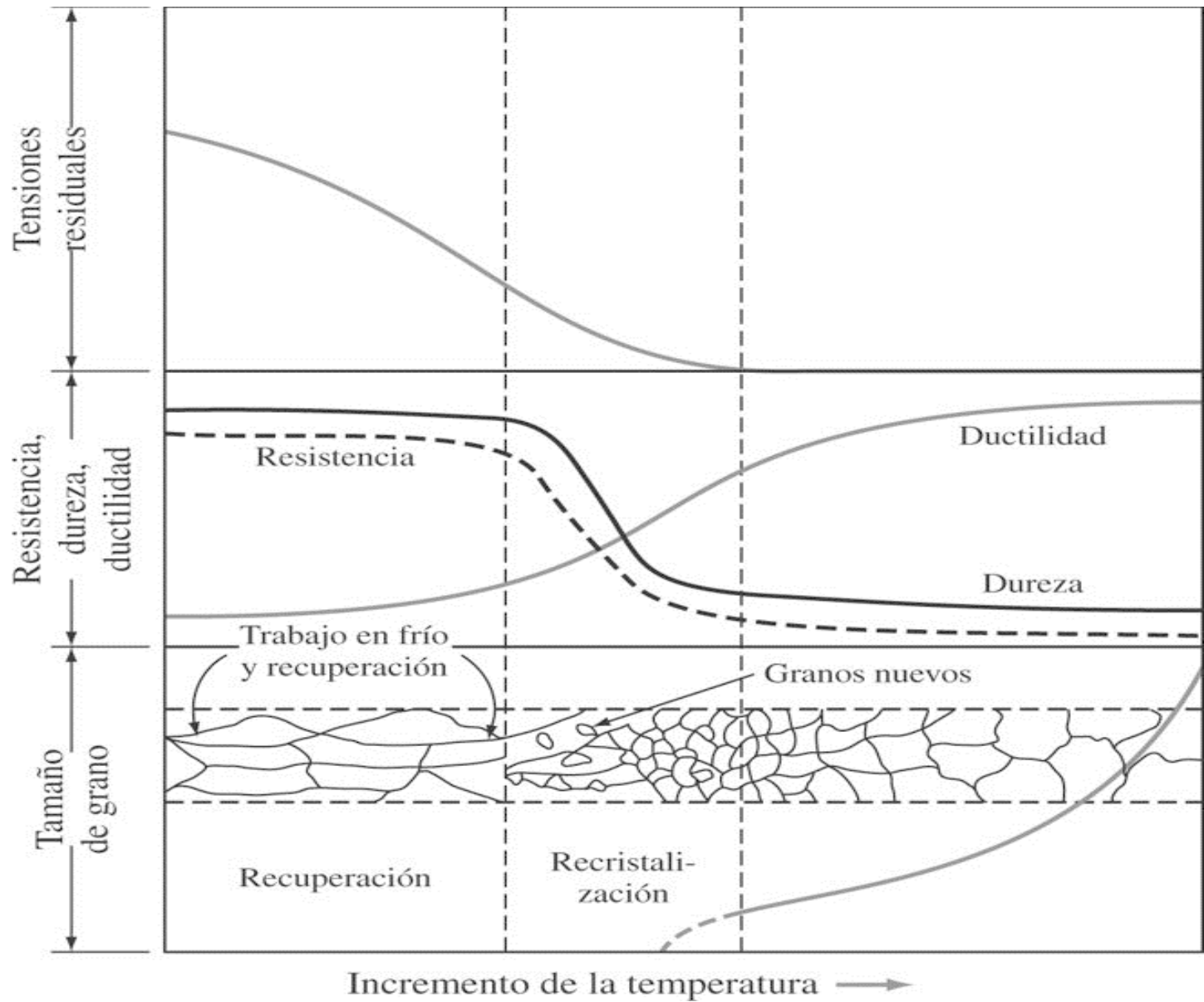




**Fotografía de granos Latón, con
re DISPOSICIÓN de dislocaciones**



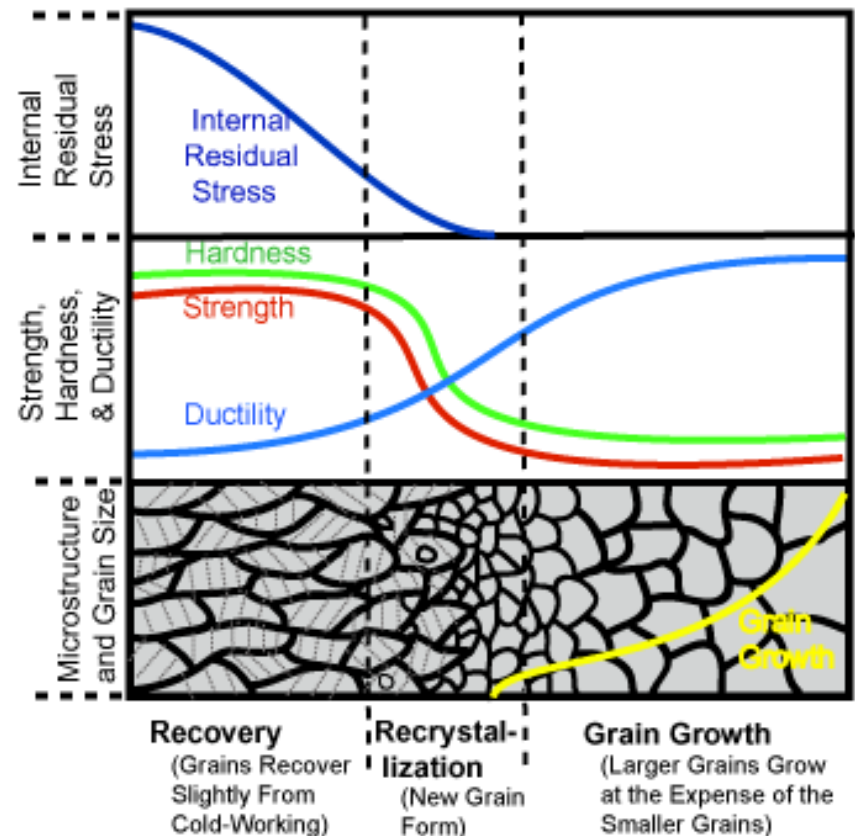
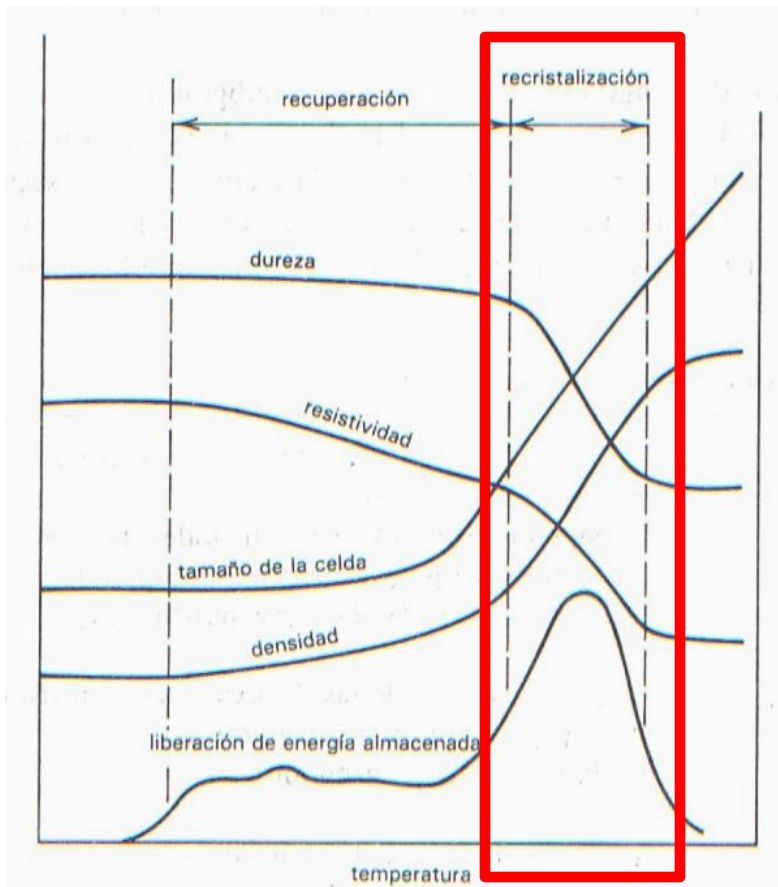
Esquema de zonas altamente deformadas en trabajo en frío, donde surgen los nuevos granos.

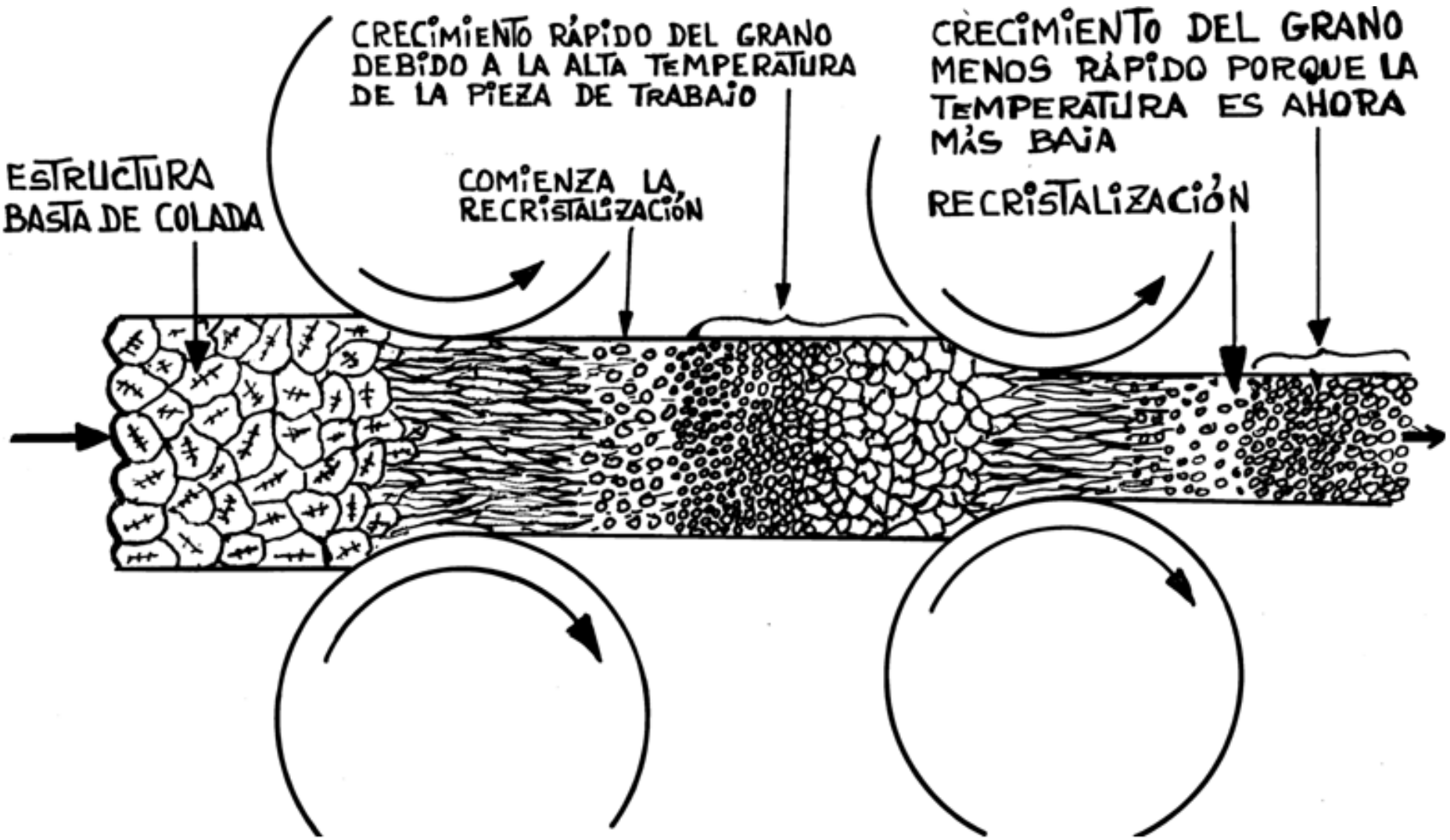


Efecto del recocido en los cambios sobre la estructura y las propiedades mecánicas de un metal trabajado en frío.

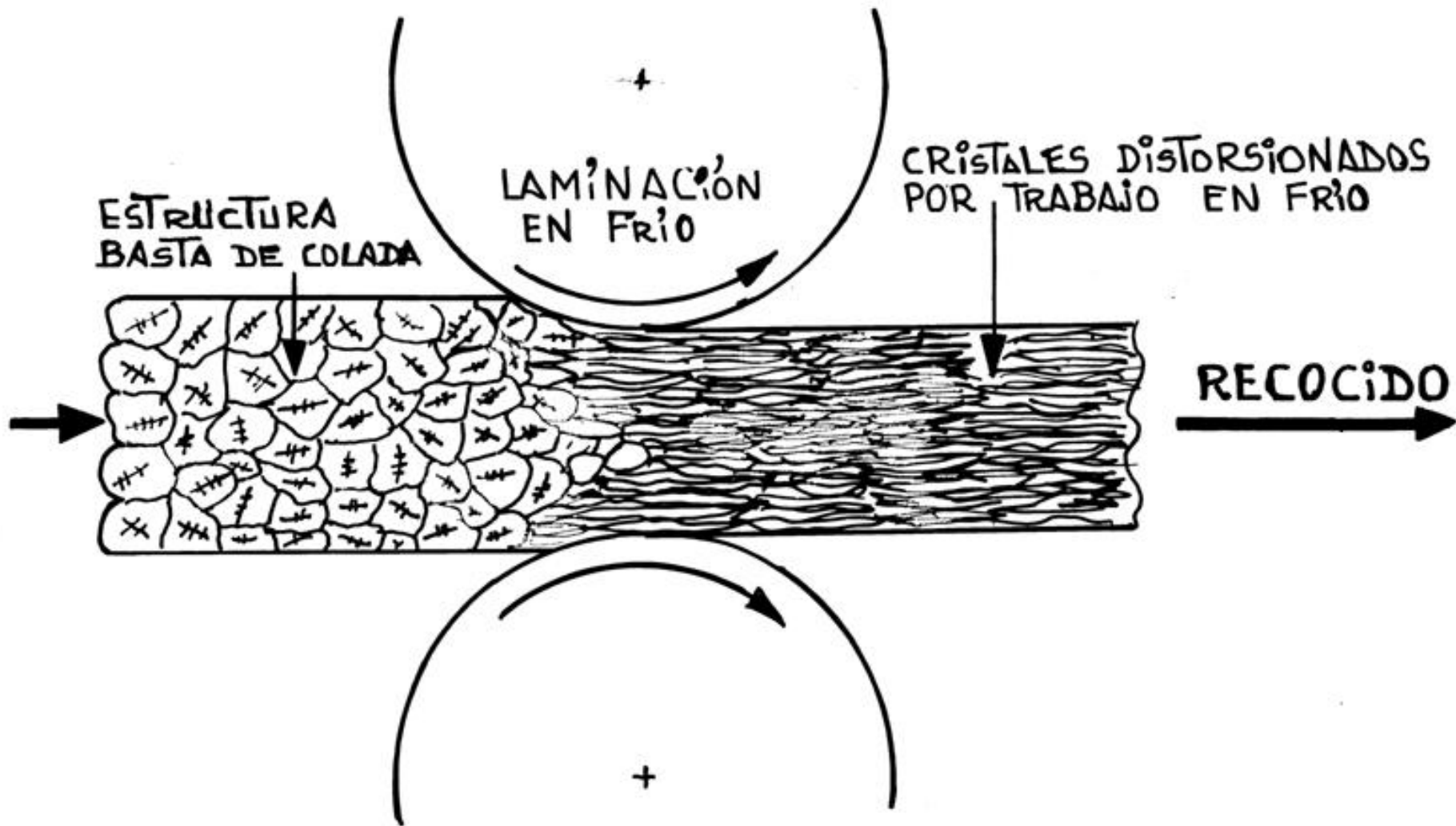
RECOCIDO / RECRISTALIZACIÓN

Es un proceso que se desarrolla por nucleación y crecimiento, los sitios preferenciales de nucleación de los nuevos granos son las regiones más deformadas, como bordes de grano, planos de deslizamiento, y en zonas de alta energía como precipitados de segunda fase y, también, en torno a inclusiones no metálicas

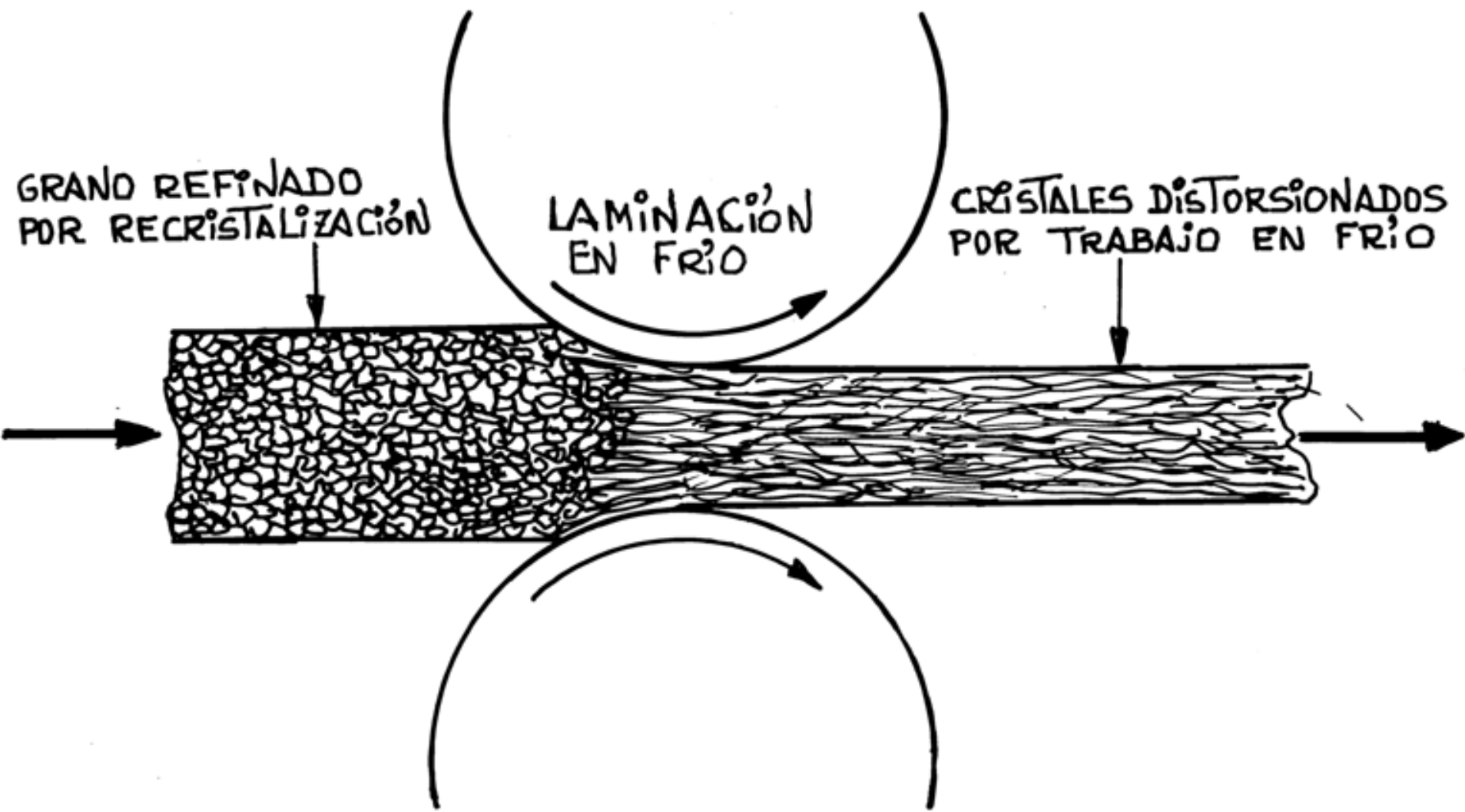




Laminación en caliente.

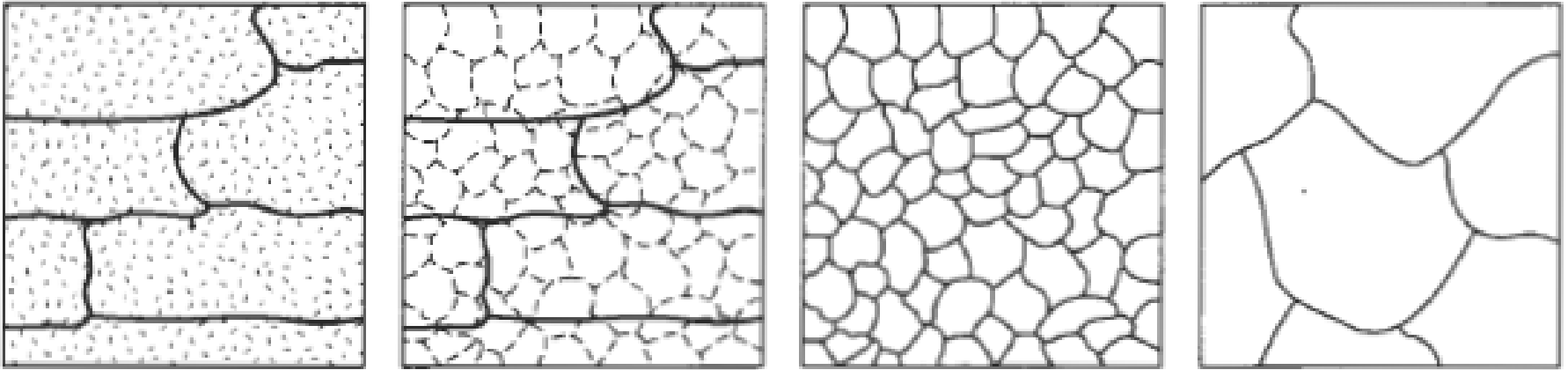


Laminación en frío y recocido (fase1)



Laminación en frío y recocido (fase 2).

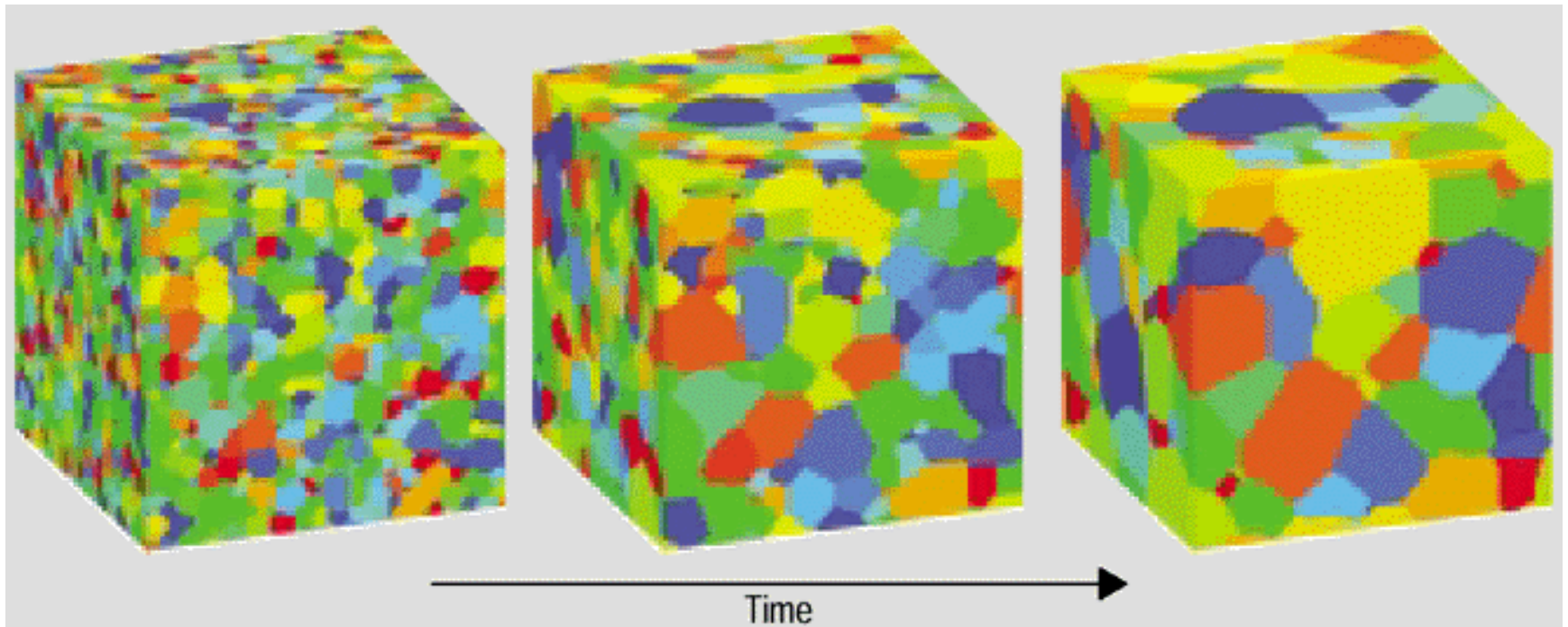
Recocido:

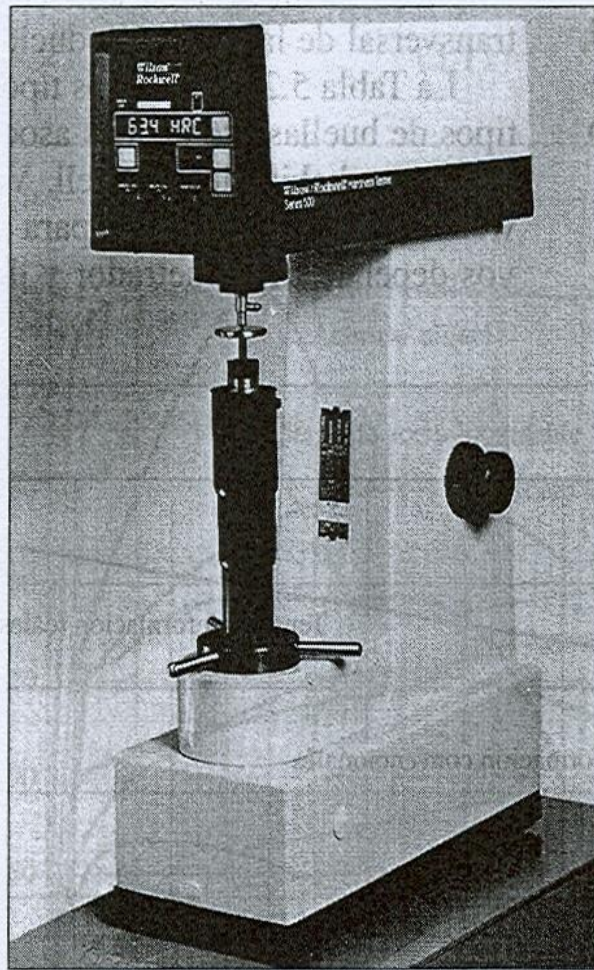


←—————→ ←—————→ ←—————→
Recuperación Recristalización Crecimiento
de grano

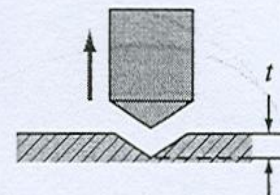
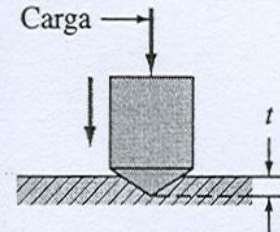
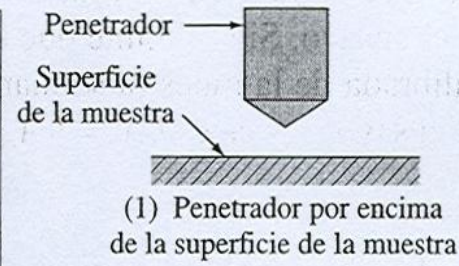
Tiempo
—————→

- ❖ **Restauración o recuperación:** Todos los fenómenos de recocido que se presentan antes de la aparición de granos nuevos sin deformación.
- ❖ **Recristalización:** Es la nucleación de los granos nuevos sin deformación
- ❖ **Crecimiento de grano:** Consumo gradual de la matriz trabajada en frío debido el crecimiento de estos granos.





a)

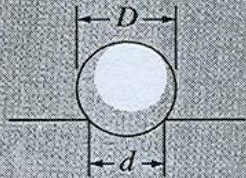

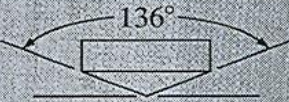

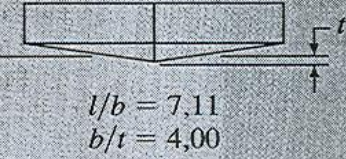
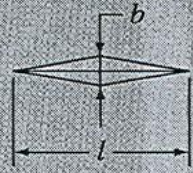
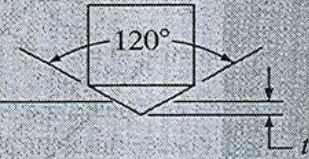

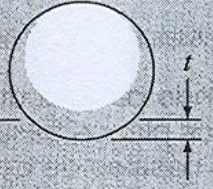



b)

[a) Cortesía de Page-Wilson Co.]

FIGURA 5.27. a) Durómetro para dureza Rockwell, y b) etapas para la medida de la dureza con un penetrador cónico de diamante. La profundidad t determina la dureza del material. A menor valor de t , mayor dureza del material.

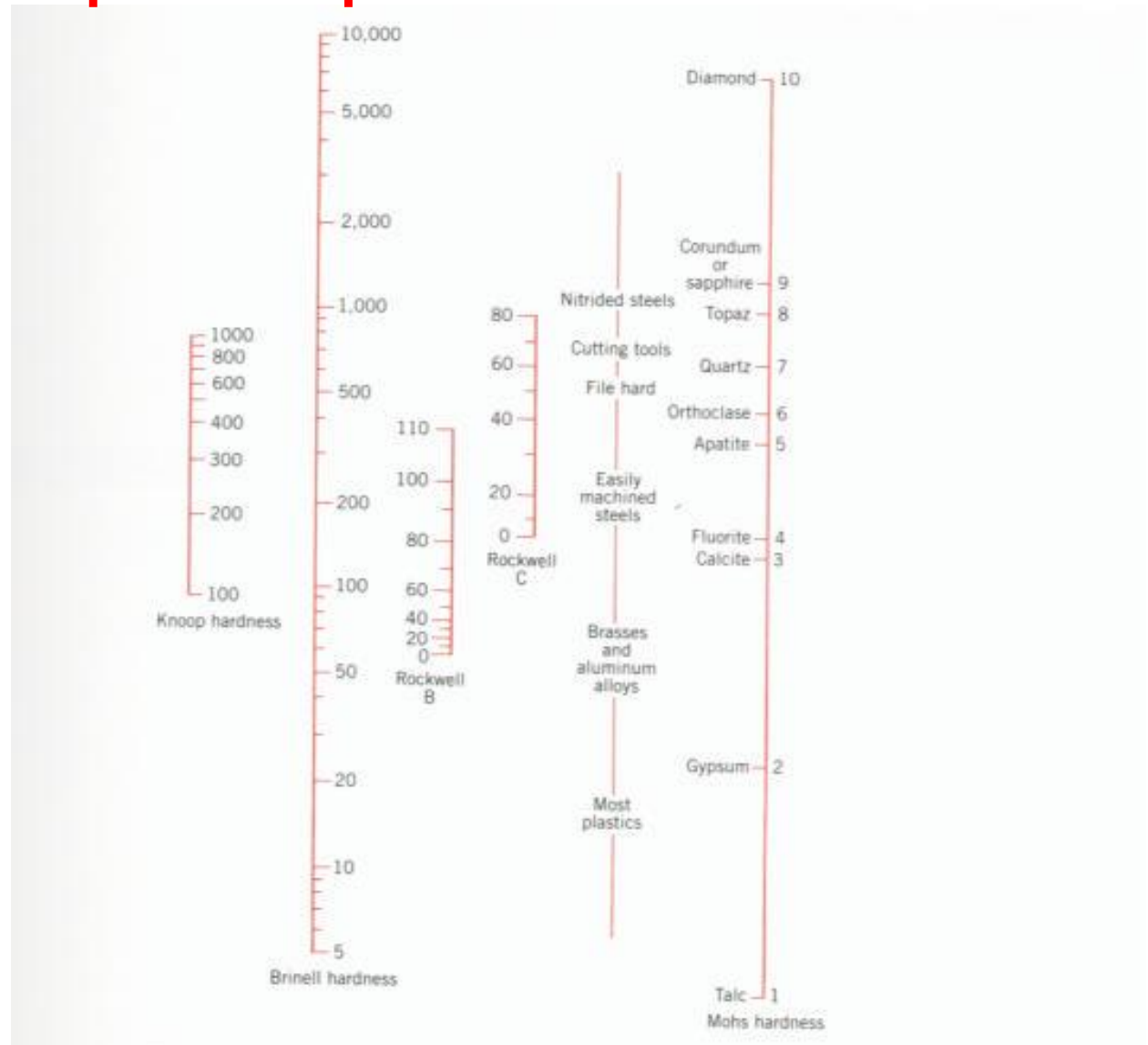
TABLA 5.2. Ensayos de dureza

<i>Forma del penetrador</i>					
<i>Ensayo</i>	<i>Penetrador</i>	<i>Vista lateral</i>	<i>Vista en planta</i>	<i>Carga</i>	<i>Fórmula del número de dureza</i>
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			P	$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$\text{VHN} = \frac{1,72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$\text{KHN} = \frac{14,2P}{l^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	} 100-500f
B } F } G }	Esfera de acero de 1/16 pulg.			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$	
E	Esfera de acero de 1/8 pulg.			100 kg $R_E =$	} 130-500f

Relaciones entre las diferentes escalas de dureza, pueden apreciarse

La escala de Mohs es la siguiente:

1. Talco
2. Yeso
3. Calcita
4. Fluorita
5. Apatito
6. Feldespato
7. Cuarzo
8. Berilo
9. Corindón
10. Diamante



Crecimiento de grano

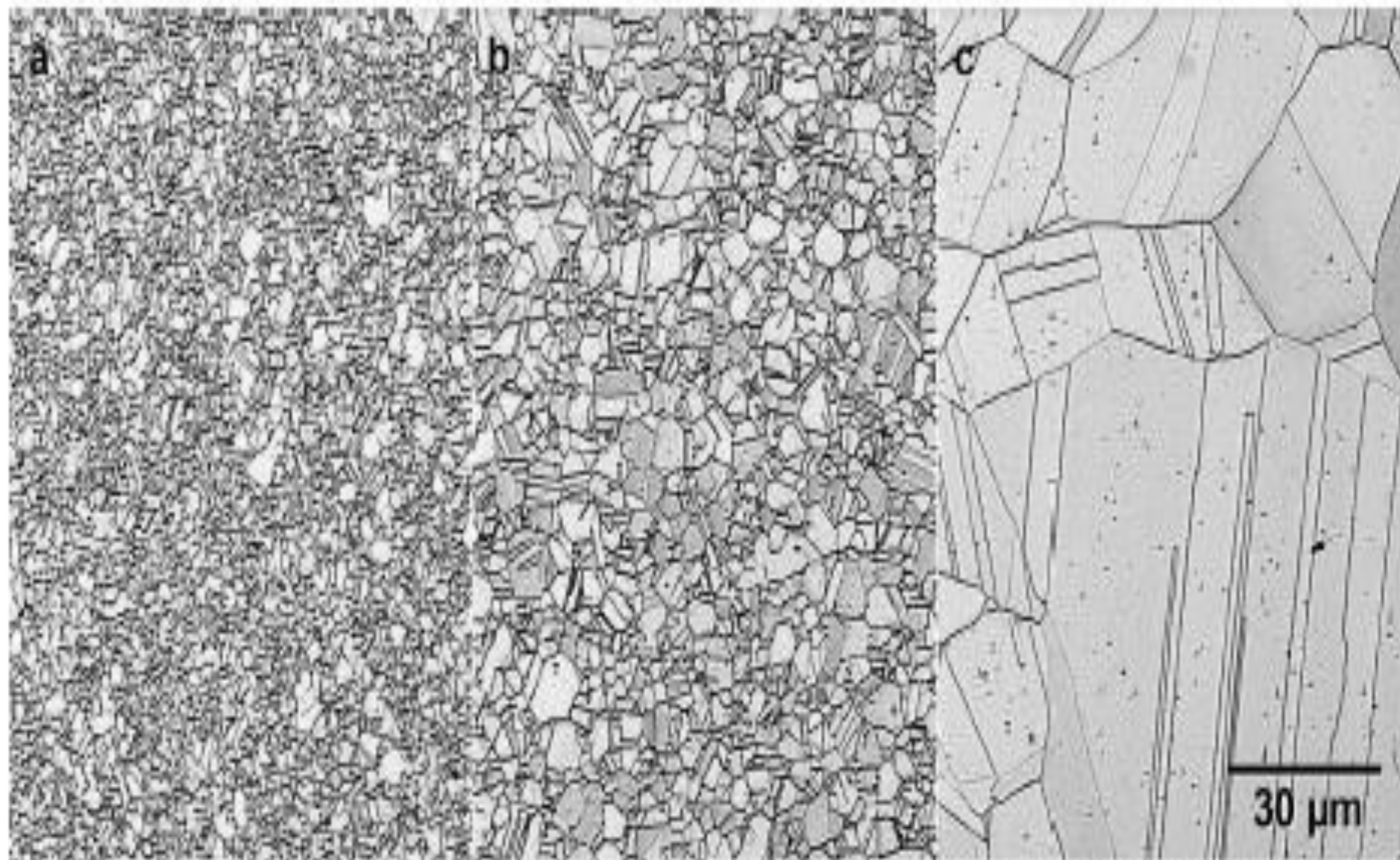
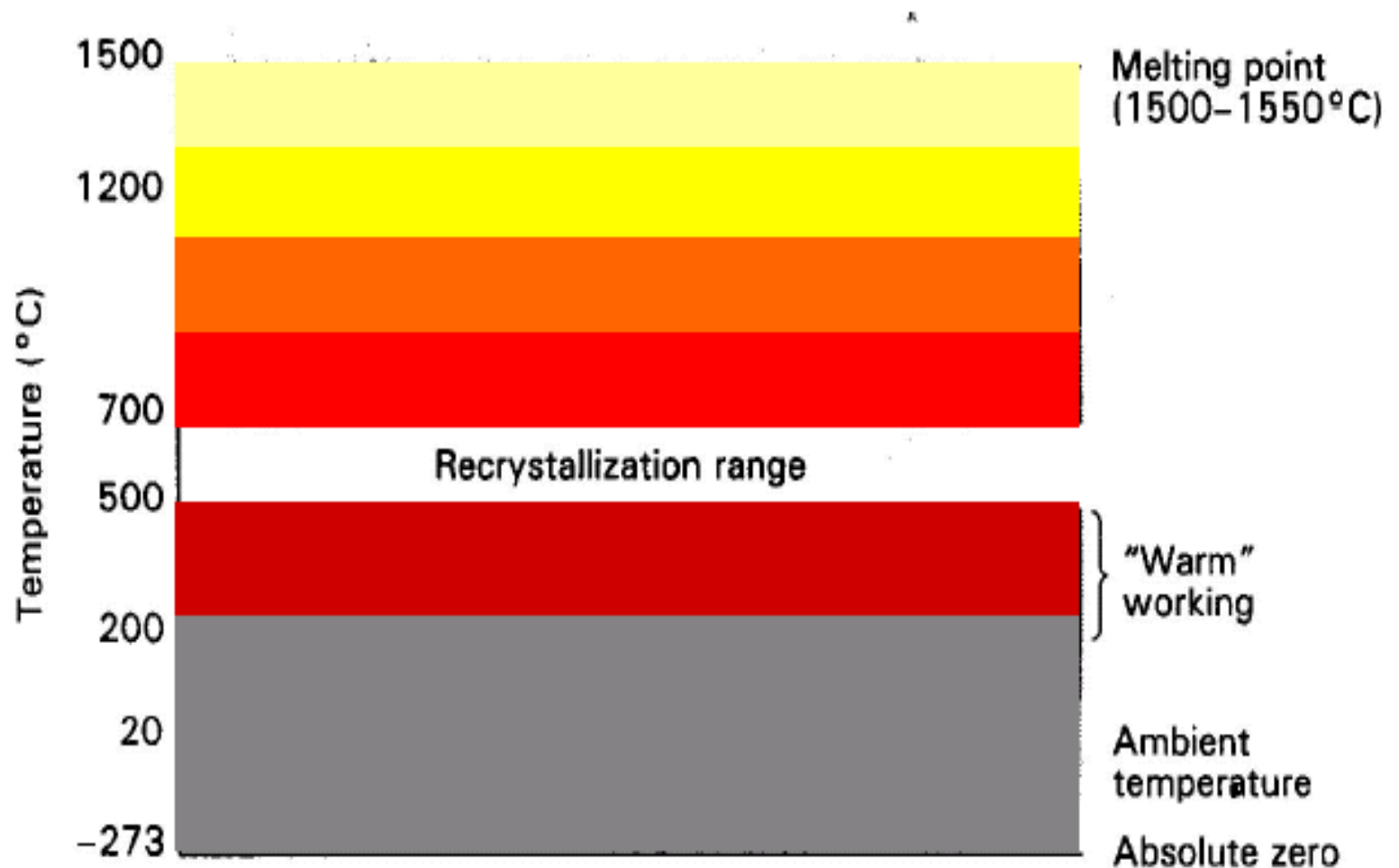


Figure 1 Microstructure of C26000 alloy after annealing: a) 1 hour at 450°C, b) 1 hour at 550°C, c) 2 hours at 750°C.

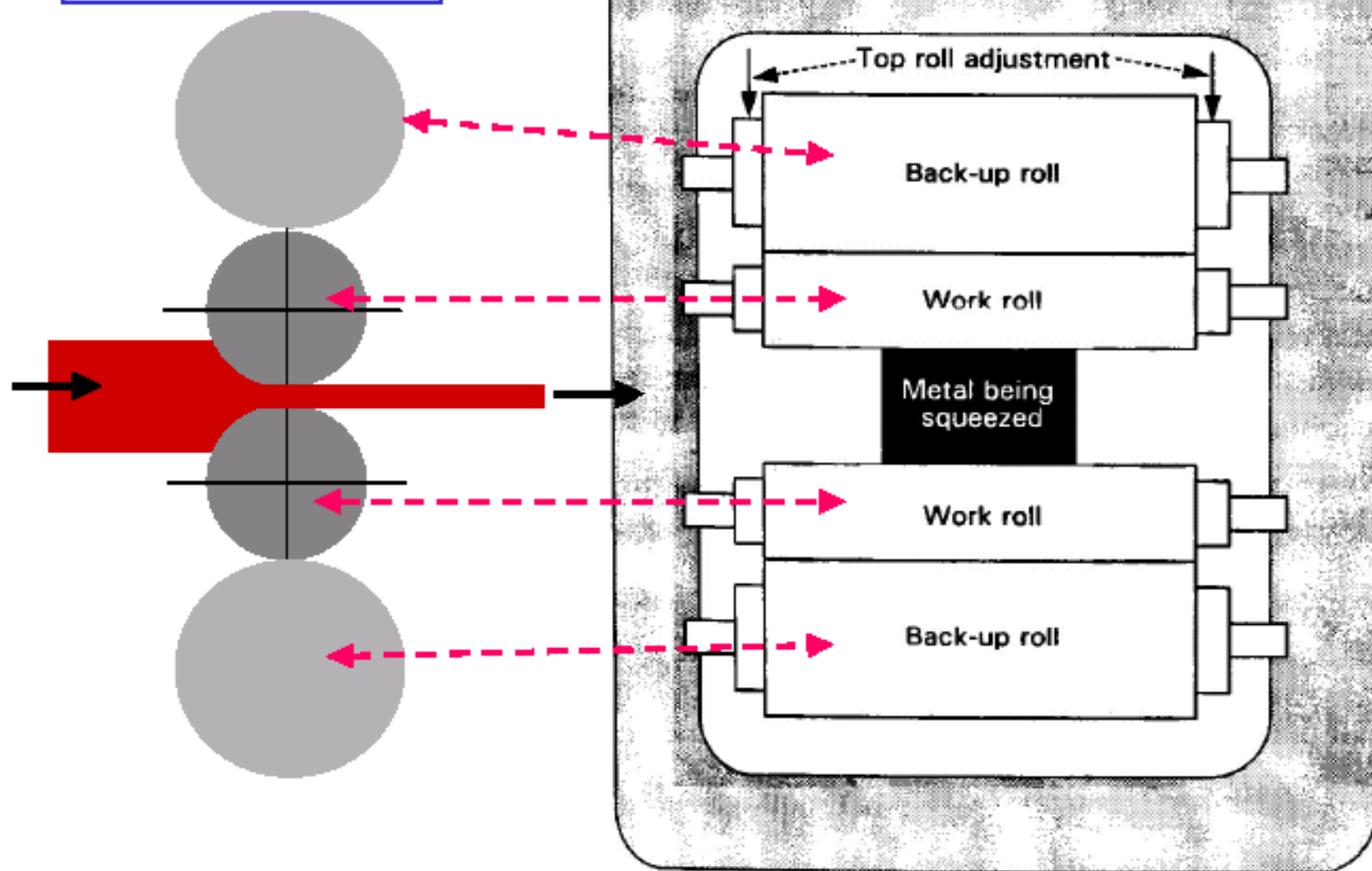
Temperatura de recristalización en el proceso de laminado



Temperature relationship between hot, cold and warm working of steels.

Rolling terminology

4 – high stand



Stand details

Load cell

Top backup
roll chock

Top work
roll chock

Bottom work
roll chock

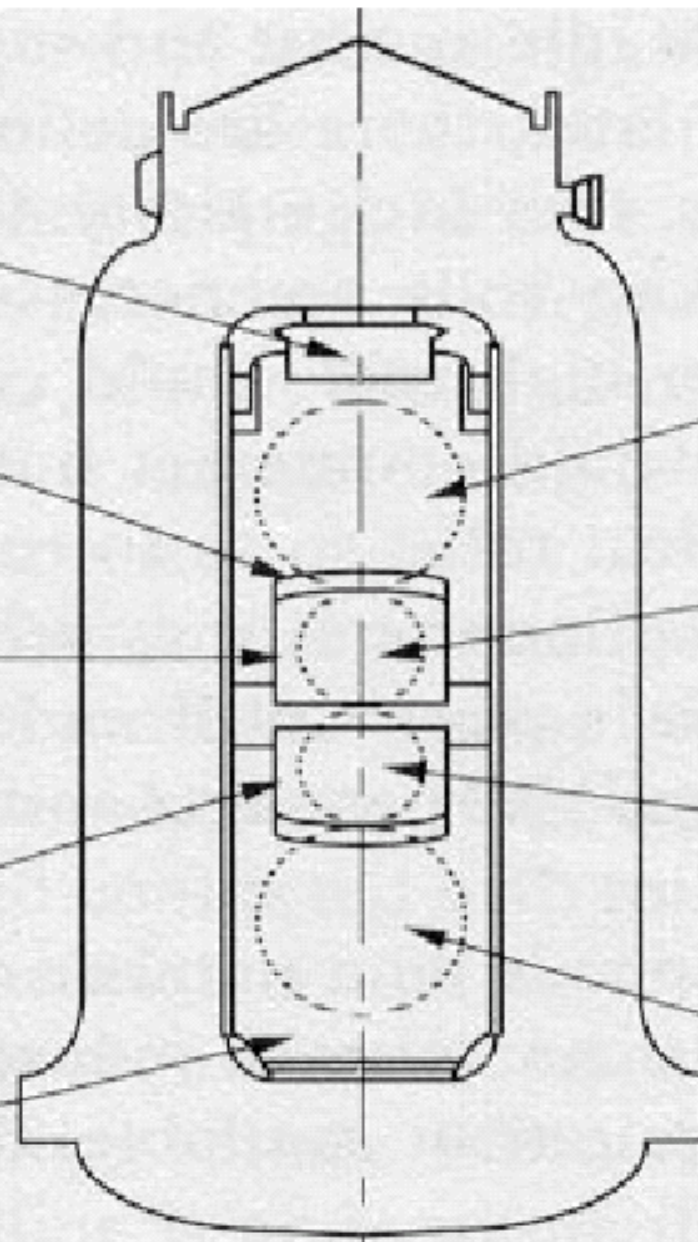
Bottom backup
roll chock

Top backup
roll

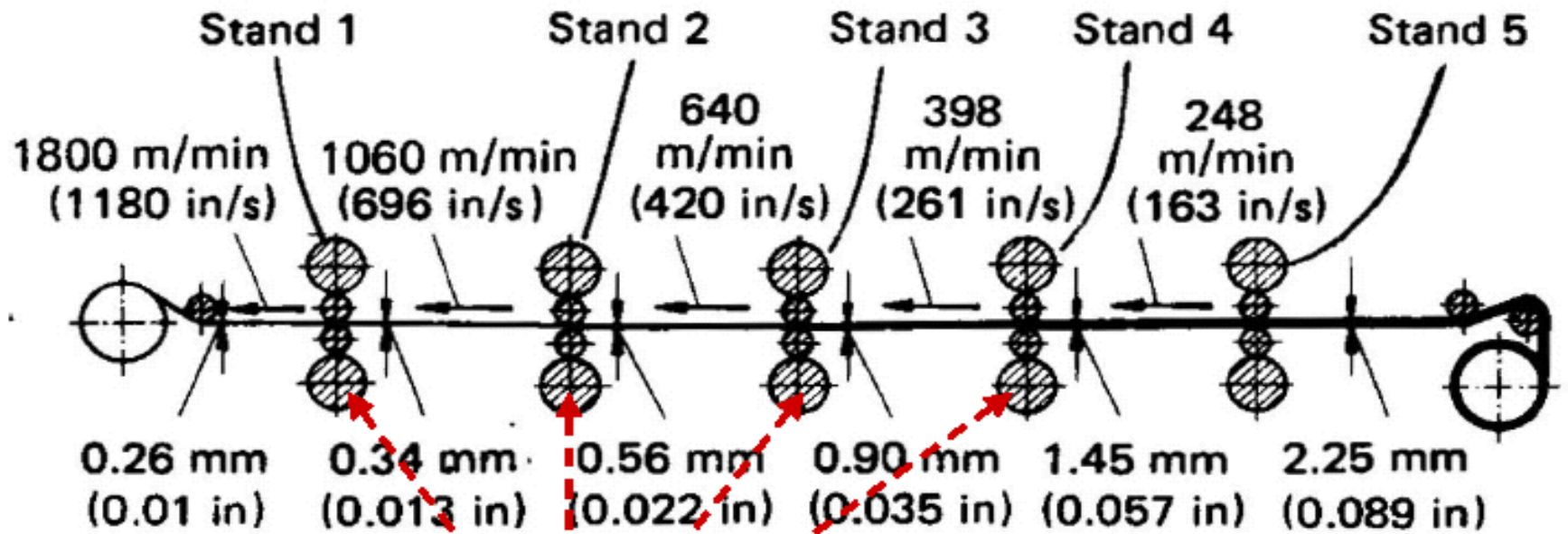
Top work
roll

Bottom work
roll

Bottom backup
roll

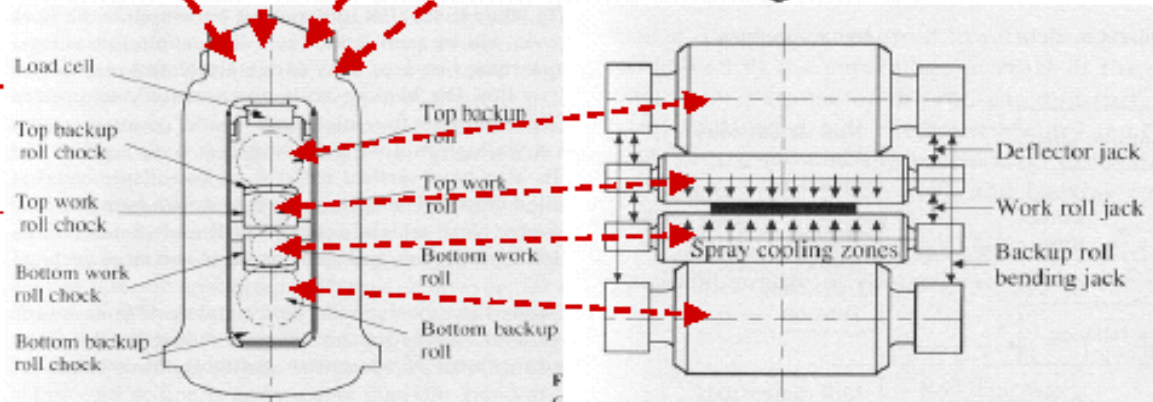


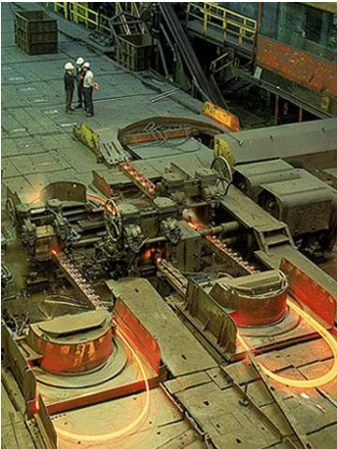
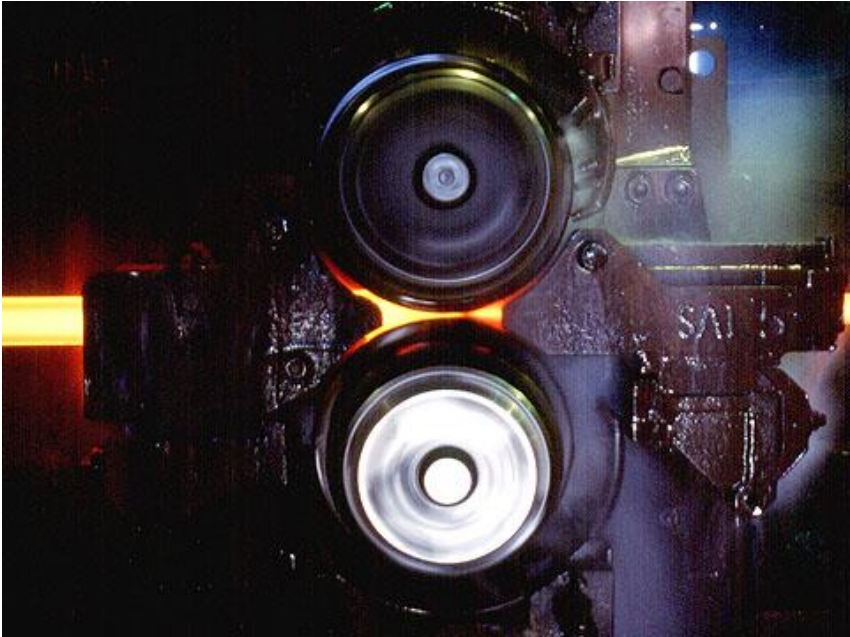
Rolling is always done in a series of steps, usually with a tandem mill.



Schematic of a tandem cold-rolling mill.

Four high mill:
one stand

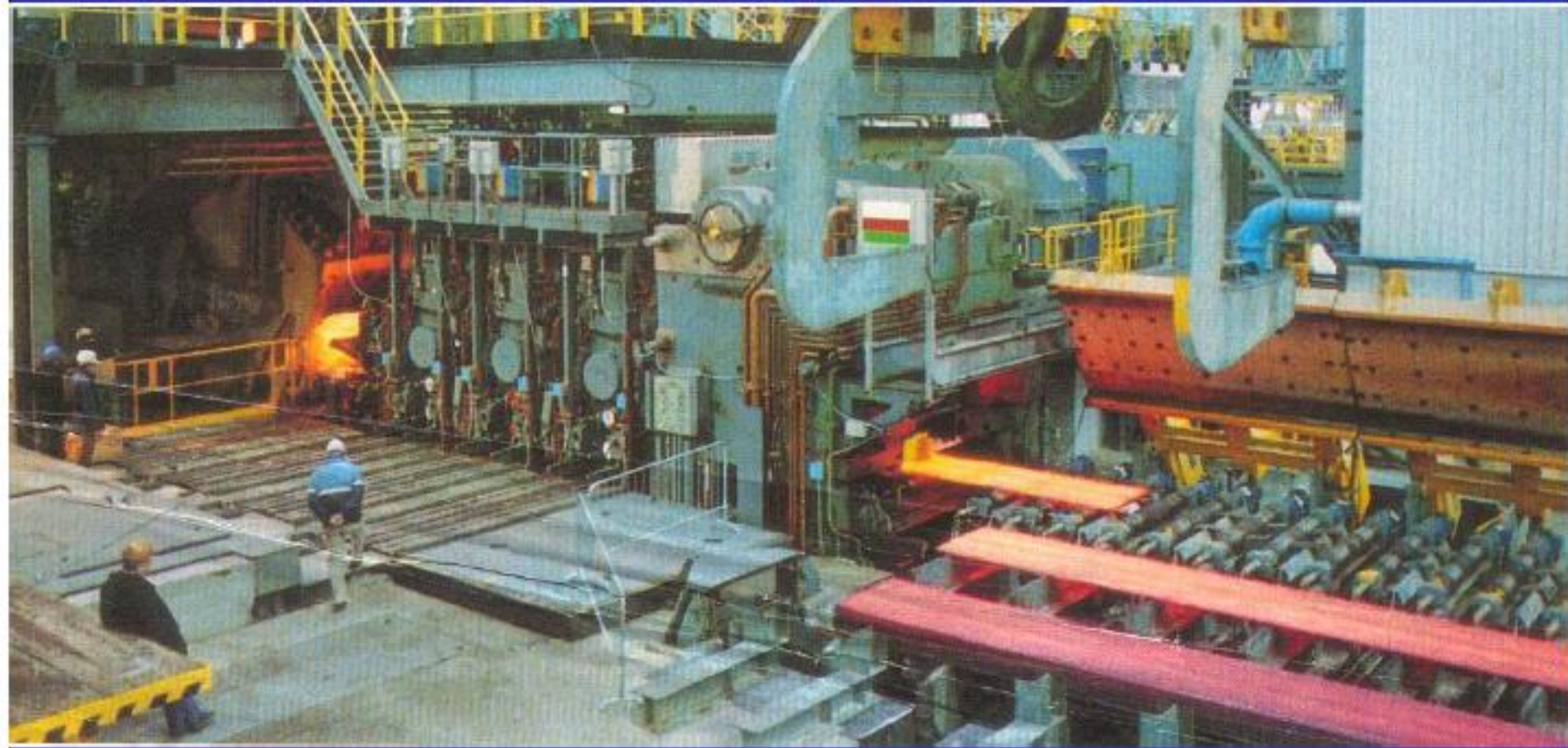




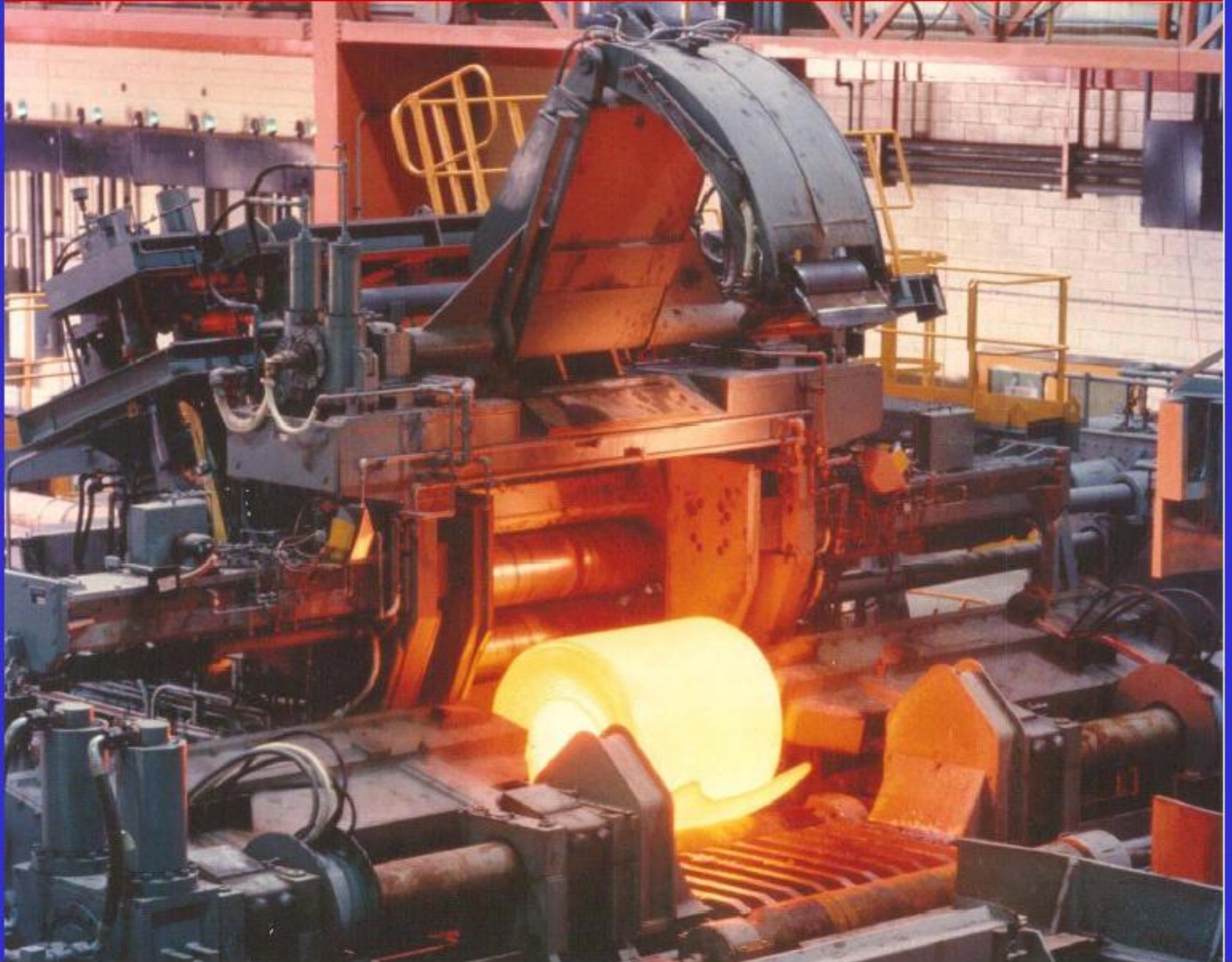
LAMINADO EN CALIENTE



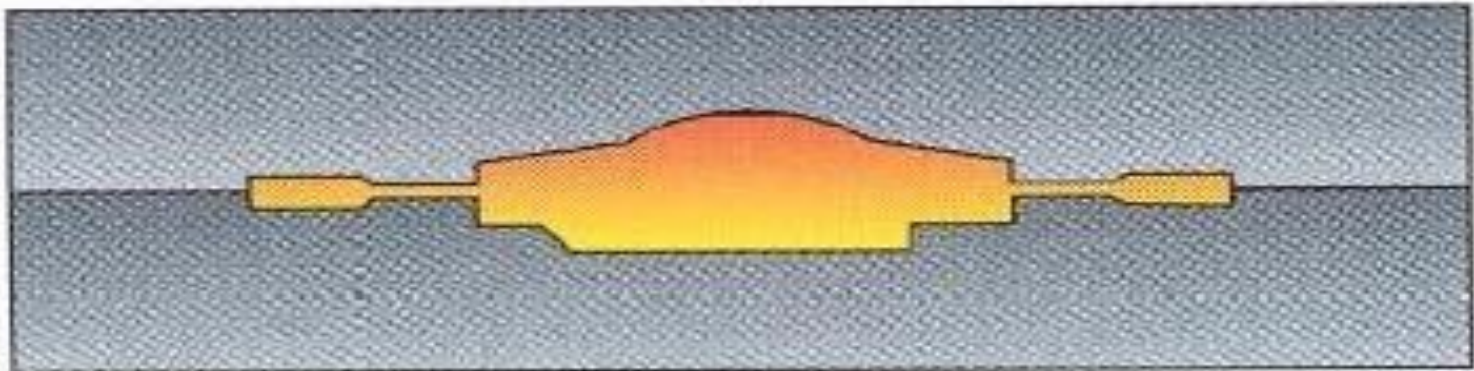
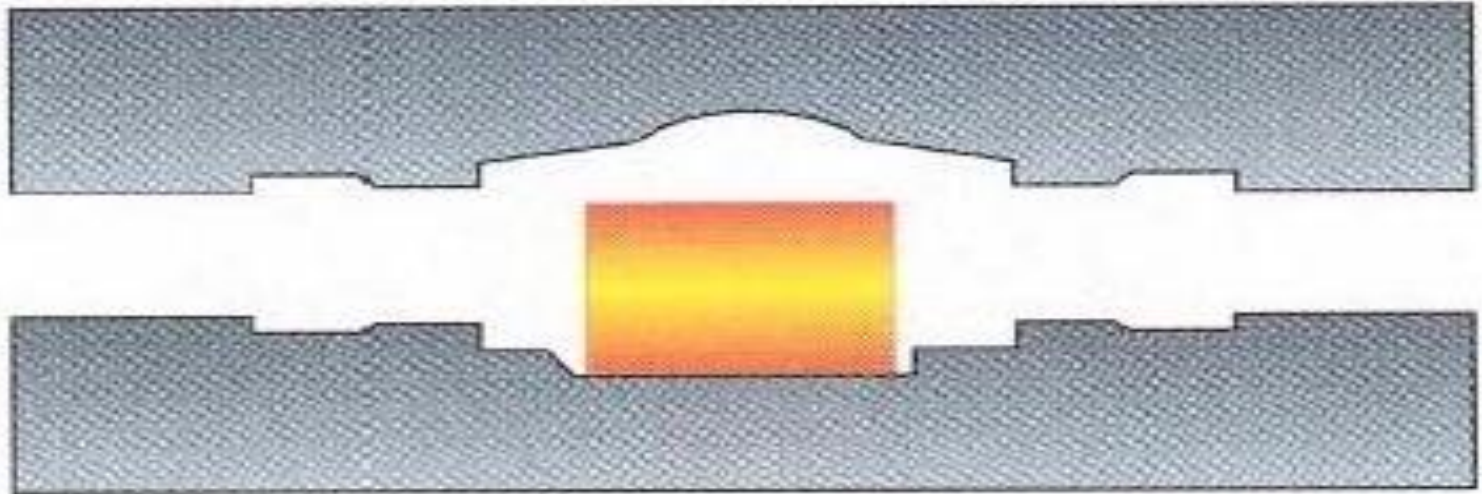
PRODUCCIÓN DE PLANCHONES DE ACERO



Steel hot coil box; patented by Stelco

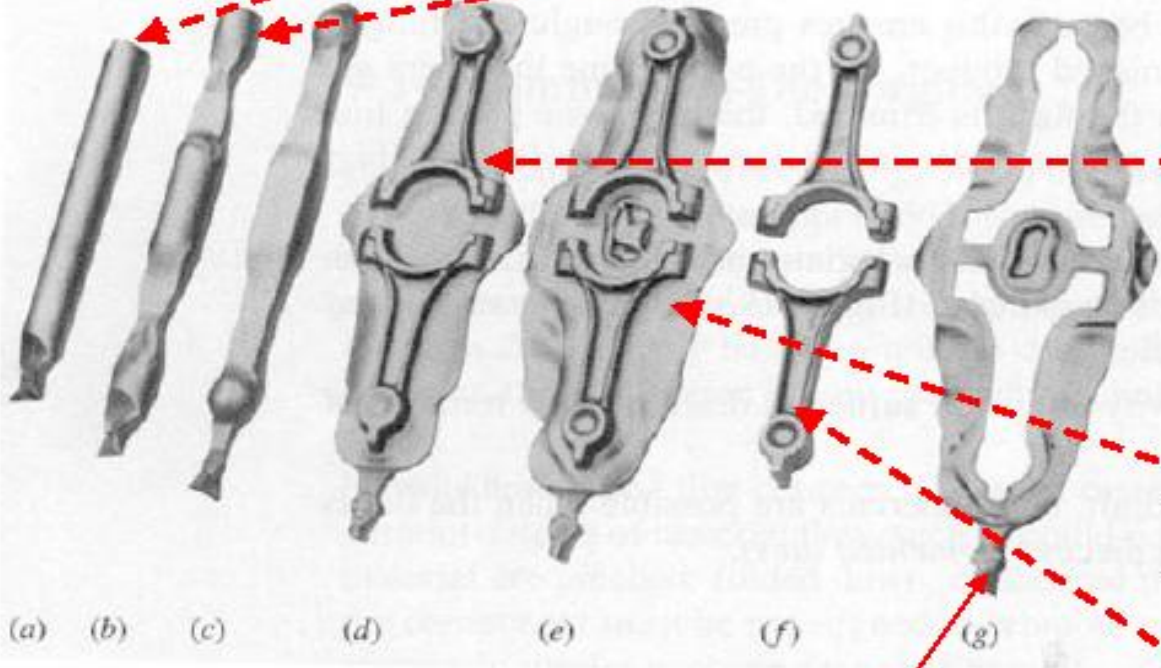
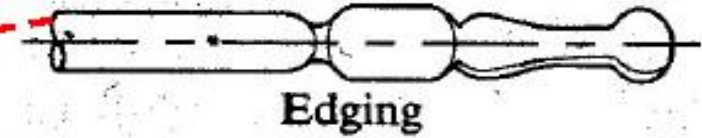
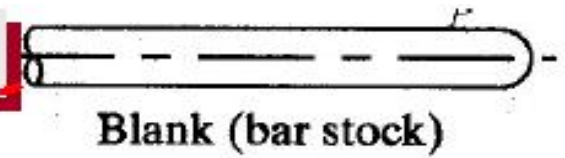


Forja de matriz cerrada

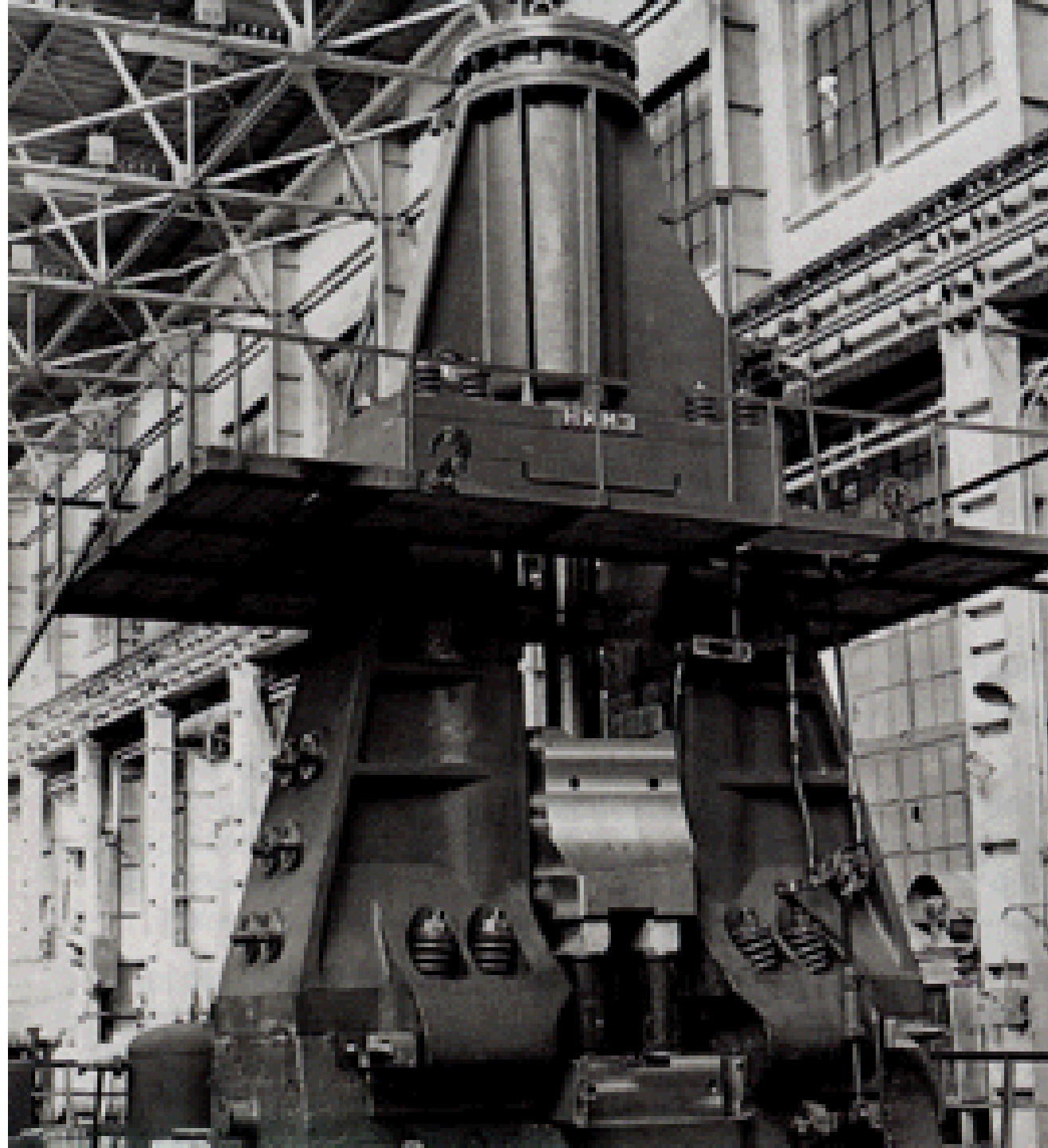


Ejemplo de forja cerrada

Matriz multiple



rebarba



Conventional Deep-Drawing

Pp 416 - 423

