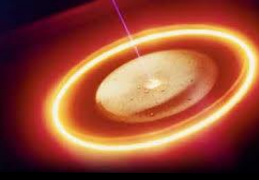


# BLOQUE I. Tecnologías de fabricación

## Tema 03. Tecnologías de materiales metálicos y cerámicos



# TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN EN MATERIALES METÁLICOS

**MATERIAL DE PARTIDA**

**MÉTODOS DE MOLDEO (COLADA)**

**CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA**

**TECNOLOGÍA PULVIMETALÚRGICA**

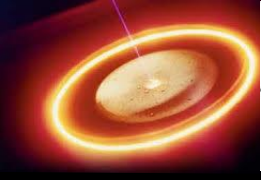
**OPERACIONES SECUNDARIAS**

**SOLDADURA**

**TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

**MECANIZADOS**

**TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**



# TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN EN MATERIALES CERÁMICOS

Operaciones previas +  
aditivos

MATERIAL DE  
PARTIDA

MOLDEO

SLIP  
CASTING

TAPE  
CASTING

MOLDEO POR  
INYECCIÓN /  
EXTRUSIÓN DE FORMAS

PRENSADO

SECADO

SINTERIZADO /  
TRATAMIENTO TÉRMICO

OPERACIONES  
SECUNDARIAS



## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

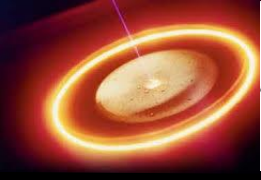
### VENTAJAS

- **Permite la fabricación de piezas complejas (con cavidades y zonas huecas)**
- **Mayor versatilidad en tamaños de las piezas**
- **Producción en grandes cantidades permitida**
- **Coste variable pero relativamente más bajo que en otras técnicas**
- **Reducción del número de componentes**

### DESVENTAJAS

- **Generalmente se obtienen propiedades inferiores a las obtenidas por**
- **Cierta anisotropía**
- **Menor precisión dimensional**
- **Cierto número de defectos de colada (segregaciones, porosidad)**
- **Calidad superficial variable (dependiendo del molde)**
- **Elevado coste inicial**





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

Conformado de metales y aleaciones mediante el vertido (colada) de material fundido en un molde con la forma de la pieza o componente que solidificará en el mismo

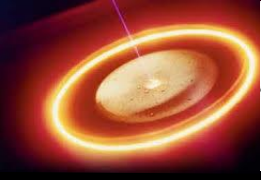
**MOLDE Y SU  
PREPARACIÓN**

**FUSIÓN DEL  
METAL**

**VERTIDO /  
COLADA**

**PROCESO DE  
SOLIDIFICACIÓN**

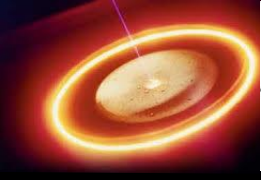
**EXTRACCIÓN DE  
LA PIEZA**



## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

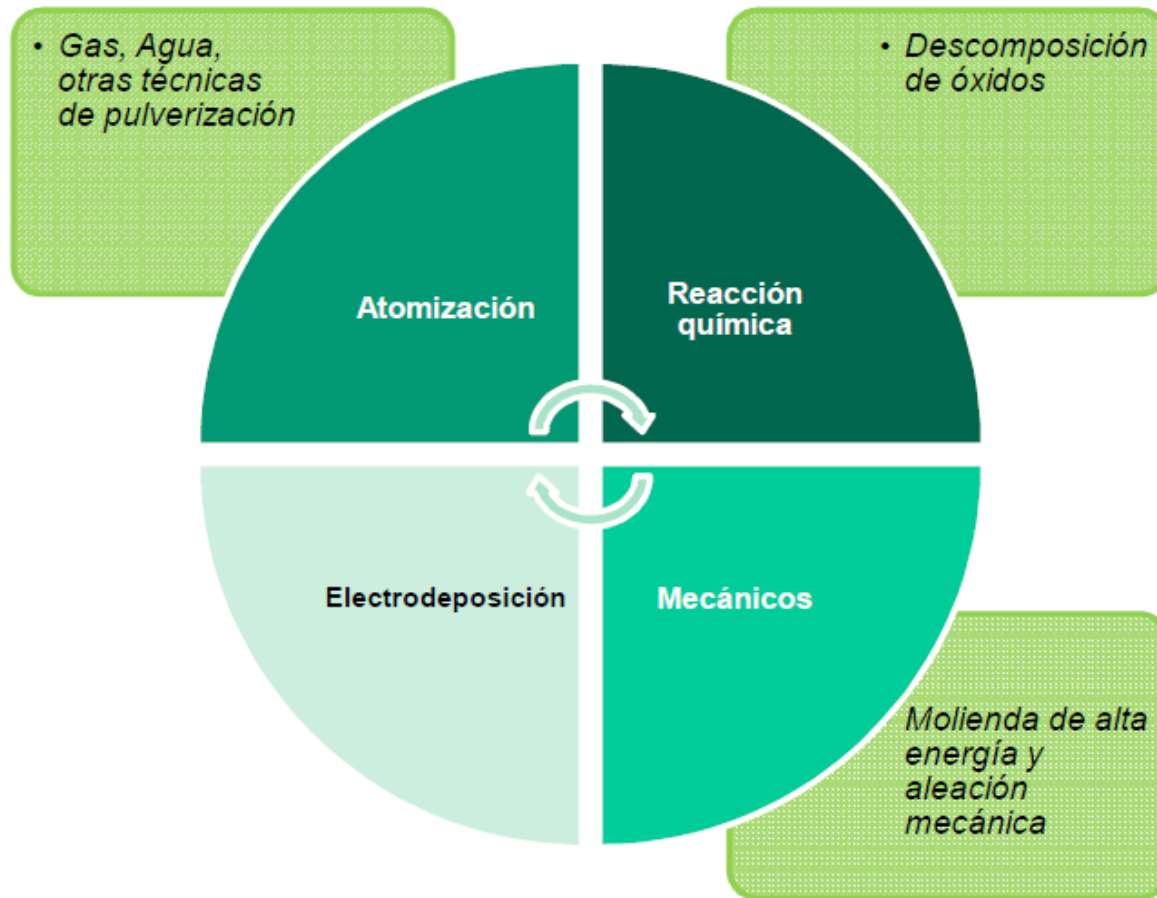
### EL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN

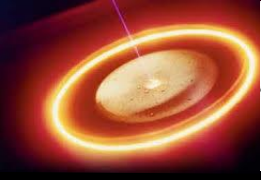




# TECNOLOGÍA DE POLVOS

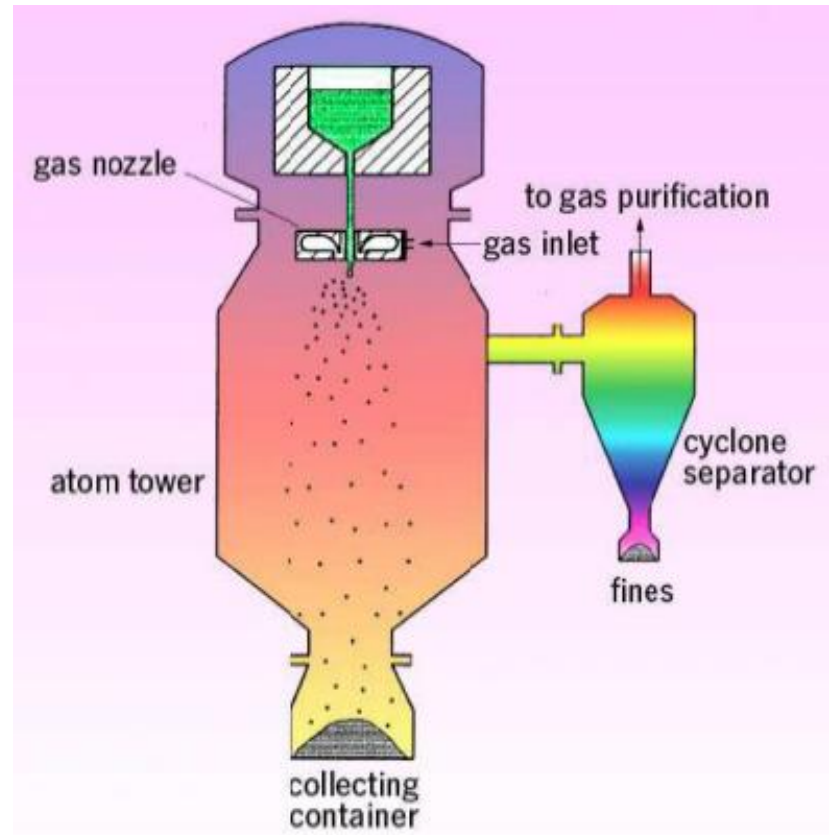
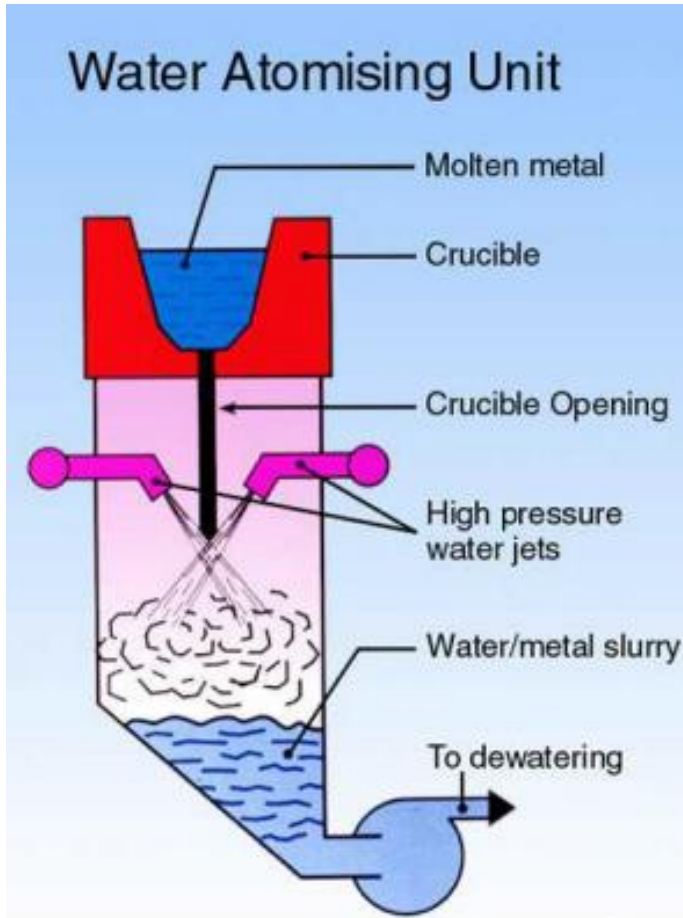
## OBTENCIÓN DEL POLVO



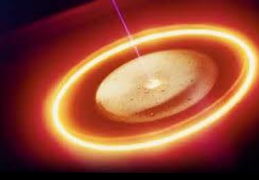


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ATOMIZACIÓN



Vertical gas atomisation (schematically)

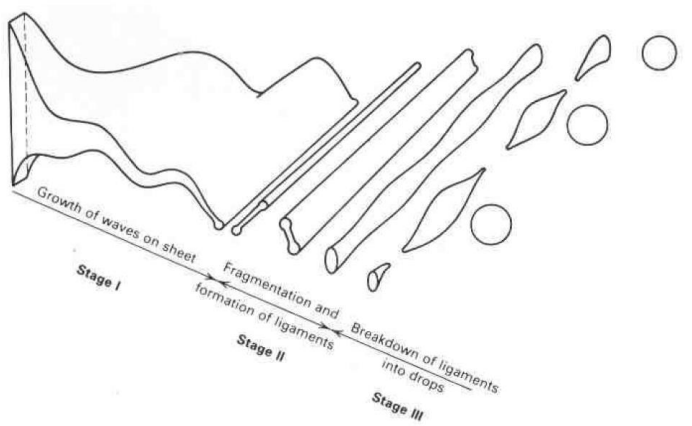


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ATOMIZACIÓN EN GAS

**ATMÓSFERA INERTE**

**MENOR VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO**



- Partículas de geometría esférica
- Menor presencia de óxidos
- Tamaño de partícula modificable

FLUJO

VISCOSIDAD

TEMPERATURA

TEMPERATURA

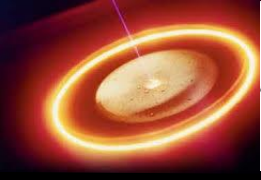
CAUDAL

TIPO

BOQUILLA DE SALIDA

VELOCIDAD





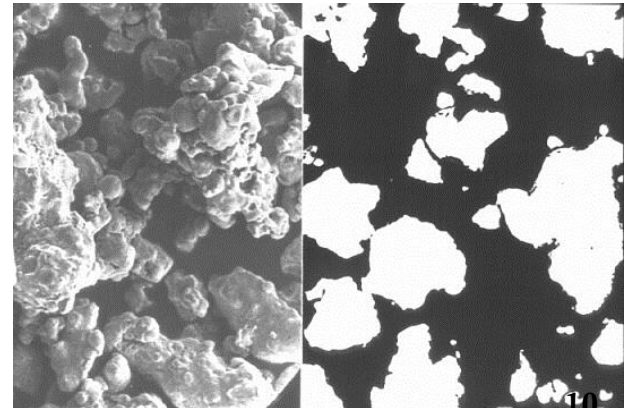
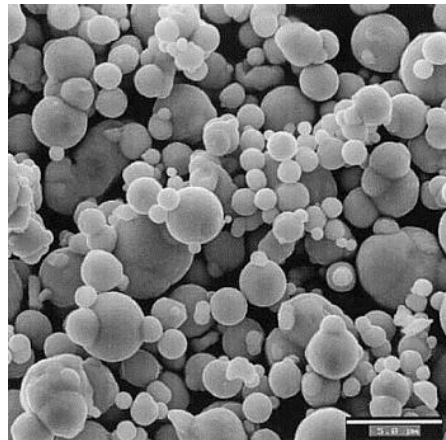
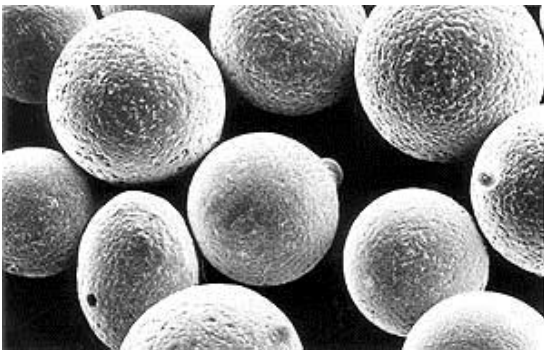
## TECNOLOGÍA DE POLVOS

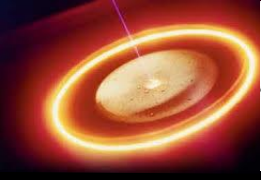
### ATOMIZACIÓN EN AGUA

#### MAYOR VELOCIDAD DE SOLIDIFICACIÓN

- Posibilidad de oxidación en el caldo
- Posibilidad de temple de las partículas
- Geometría más irregular
- Posible etapa de reducción posterior, tratamiento térmico y molienda
- Tamaño de partícula reducido, modificable:

$$d = K \frac{\ln(P)}{v \cdot \sin \alpha}$$



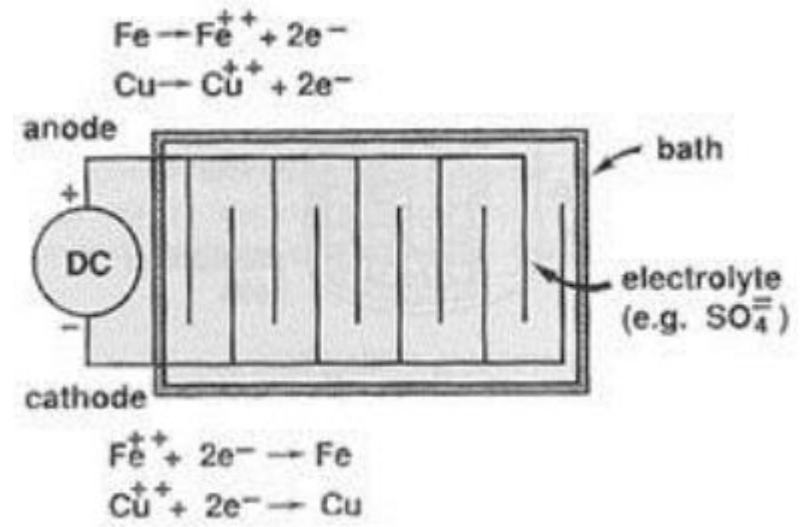
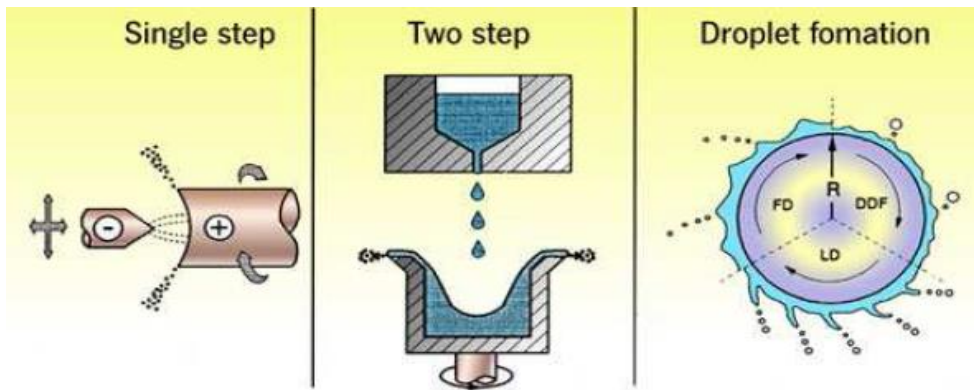


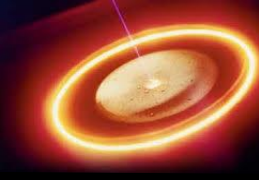
# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### ATOMIZACIÓN CENTRÍFUGA

### ELECTRODEPOSICIÓN





## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### REACCIÓN QUÍMICA

**Reducción de sólido: Óxido purificado + Gas reductor (H ó CO) → Polvo metálico**

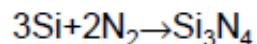
- Velocidad de proceso limitada por difusión de las especies a través del sólido
- Temperatura y velocidad de calentamiento son los parámetros más importantes a controlar

**Descomposición térmica:**

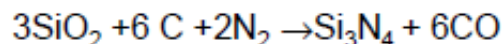
- Se parte de M-Carbonilos (Por ejemplo:  $\text{Fe} + 5 \text{CO} \rightarrow \text{Fe}[\text{CO}]_5$ )
- Descomposición térmica del compuesto en presencia de catalizador para formar el polvo metálico → Tamaño de partícula en función de la temperatura

**Otras reacciones químicas para obtener diferentes compuestos:**

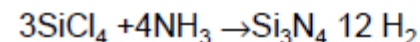
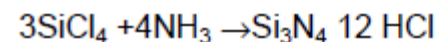
a) Nitruración de polvos de Si



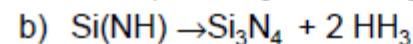
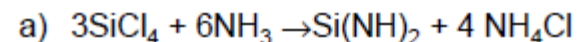
b) Reducción carbotérmica de la sílice



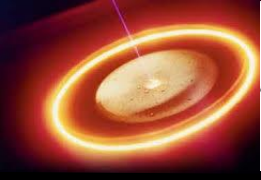
c) Reacción fase vapor



d) Precipitación y descomposición térmica







## TECNOLOGÍA DE POLVOS

### OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

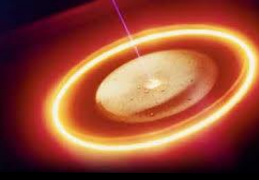
#### PROCESOS MECÁNICOS

##### OPERACIÓN PRIMARIA

- **PRINCIPALES OBJETIVOS:**
  - Modificación del tamaño de partícula
  - Cambio en la forma
  - Aleación o mezcla en estado sólido
  - Modificación de las propiedades del material

##### OPERACIÓN SECUNDARIA

- **PRINCIPALES MÉTODOS**
  - Cizalladura
  - Compresión
  - Impacto

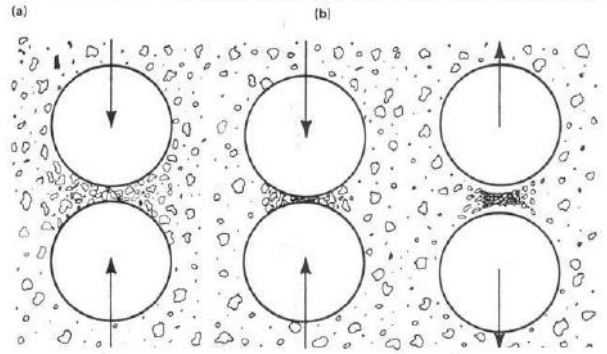
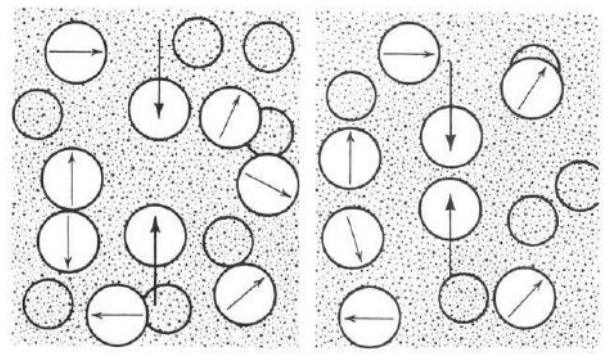


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### MOLIENDA

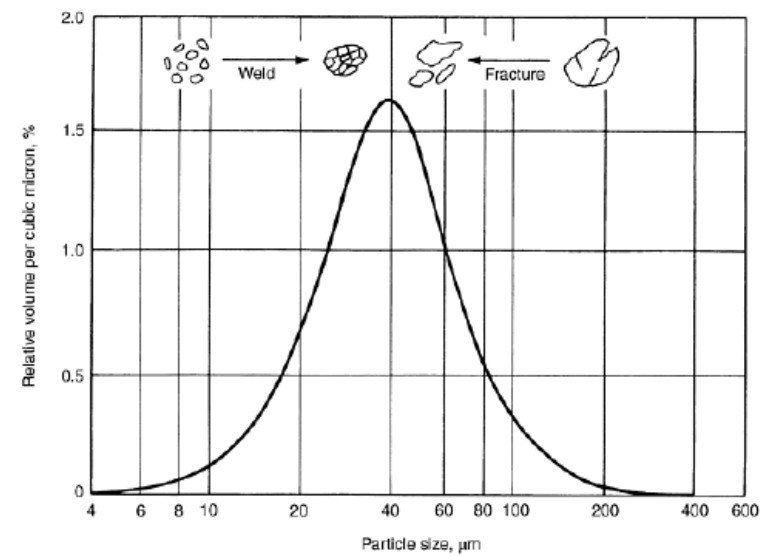
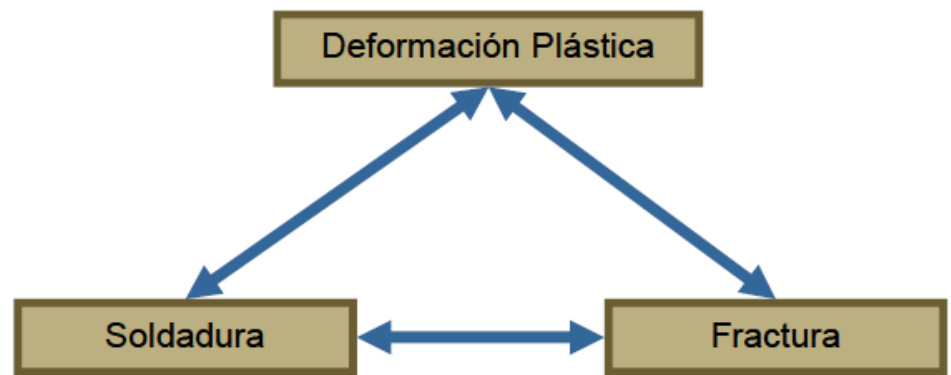
a) y b) Aproximación de las bolas

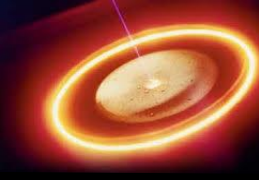


Atrapado y compactación de partículas.

Aglomeración

Abandono del aglomerado por energía elástica



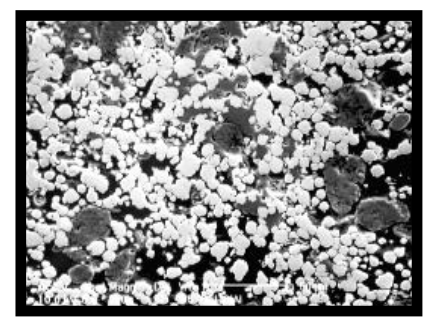
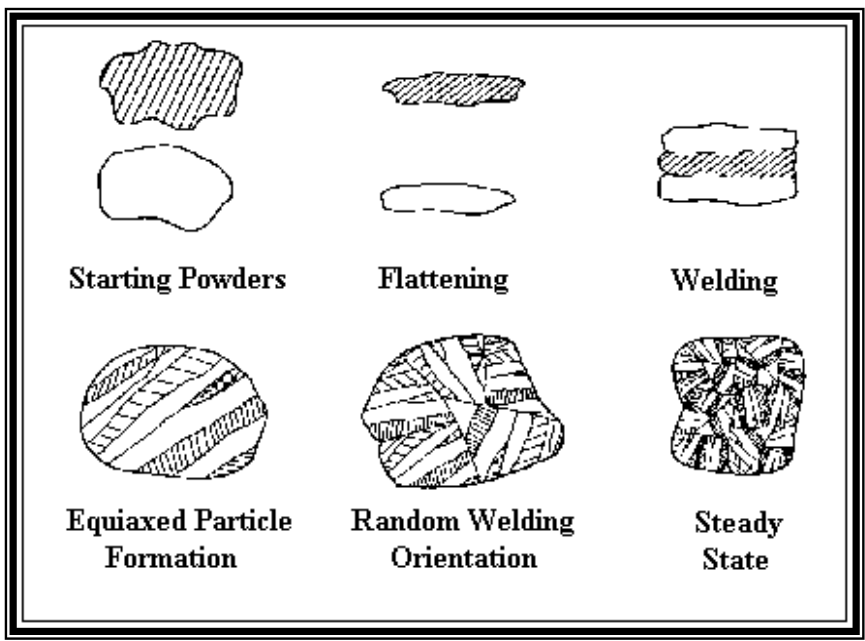


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

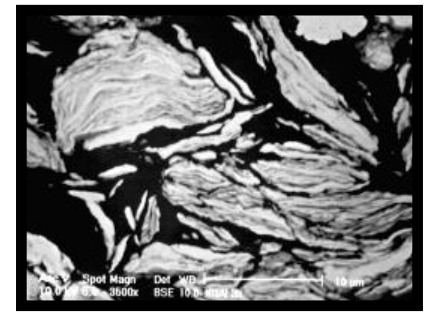
## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### ALEACIÓN MECÁNICA

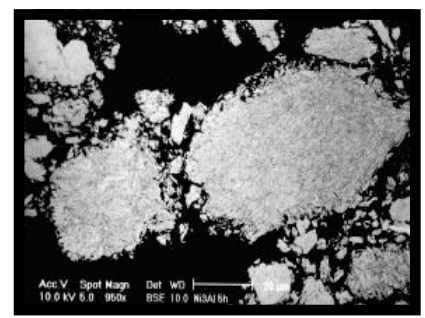
Sistemas dúctil-dúctil



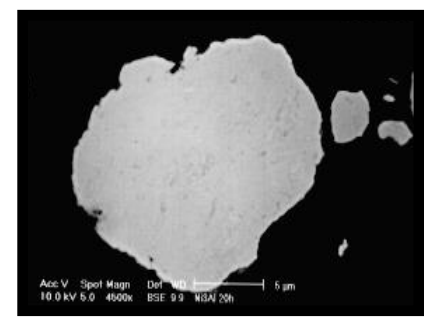
0 horas



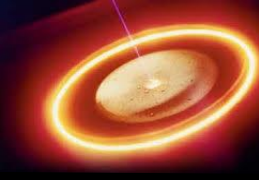
3 horas



5 horas



20 horas

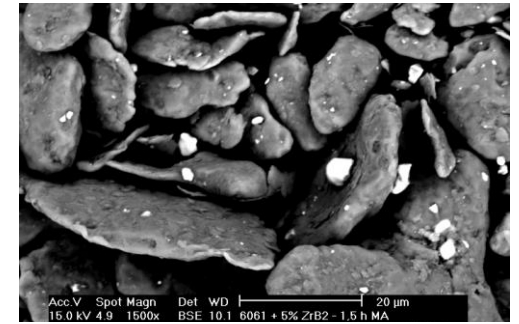


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

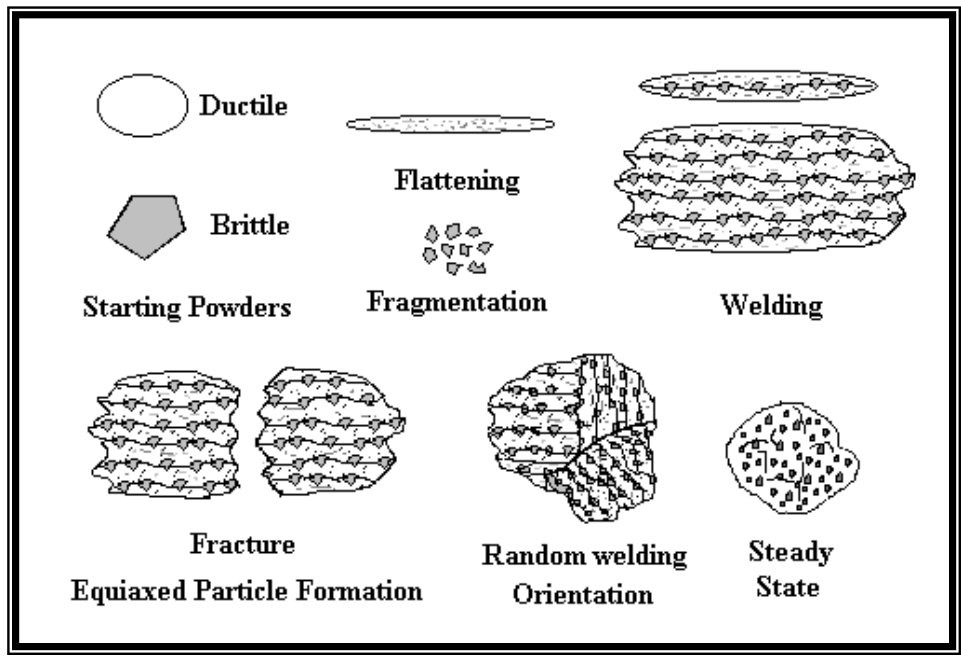
## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### ALEACIÓN MECÁNICA

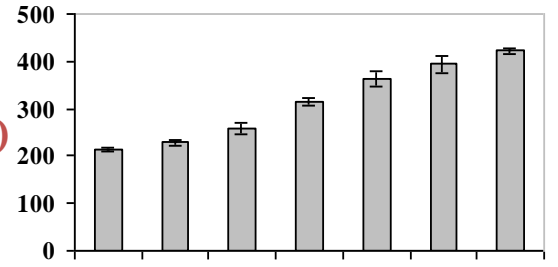
AA6061 + 5 % Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



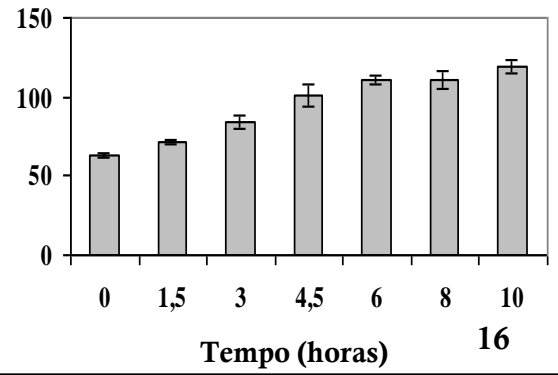
Sistemas dúctil-frágil



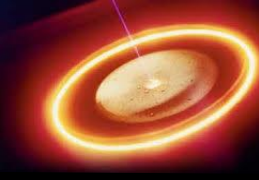
Resistencia a tracción (MPa)



Dureza (HV)







# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### ALEACIÓN MECÁNICA

AA6061 + 5 %  $\text{Si}_3\text{N}_4$

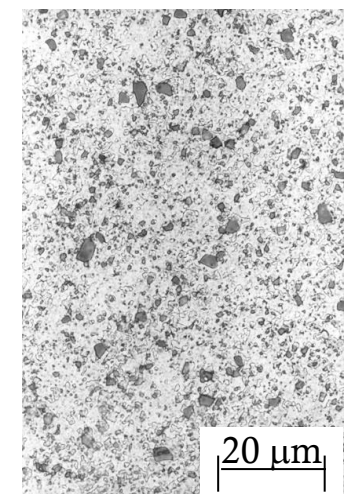
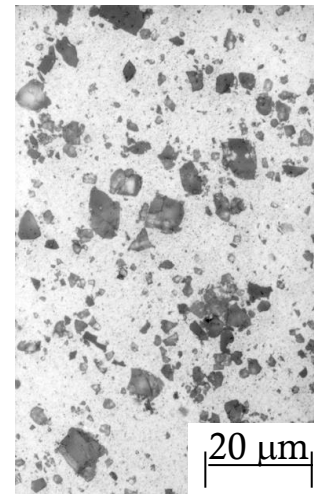
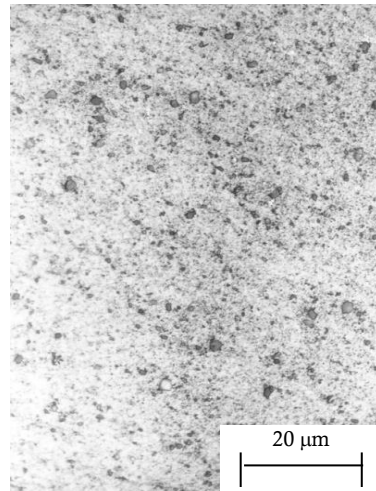
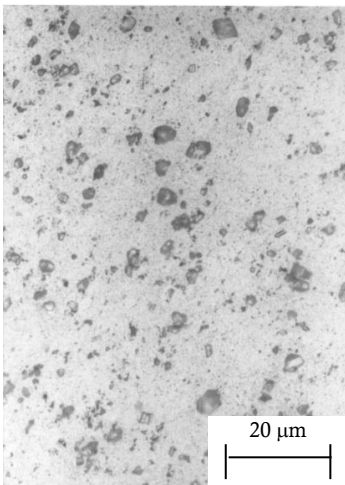
AA6061 + 15 %  $\text{AlN}$

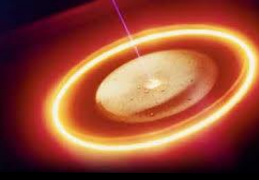
Mezcla convencional

Aleación mecánica

Mezcla convencional

Aleación mecánica





# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

### ALEACIÓN MECÁNICA

Partículas finales con igual composición →

Parámetros a controlar en el proceso

Polvo de partida

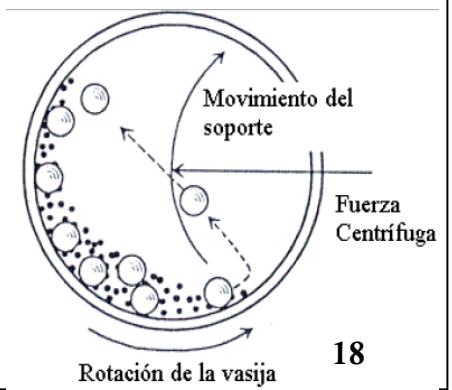
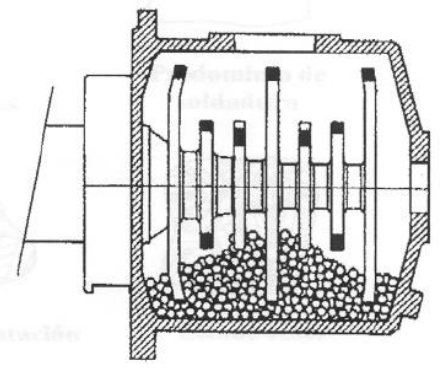
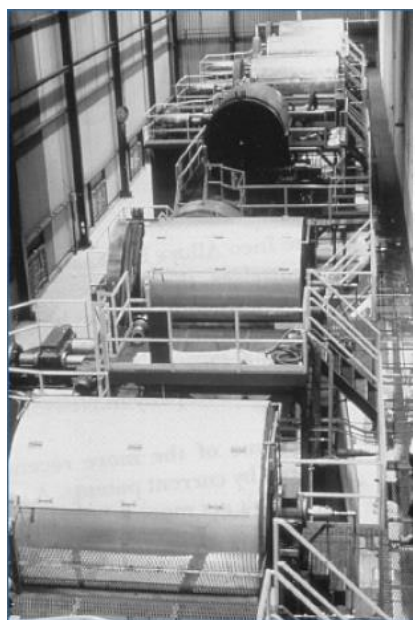
Tipo de molino y medio de molienda

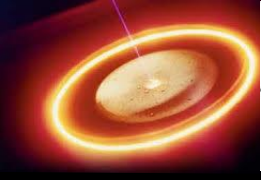
Temperatura y atmósfera

Relación masa polvo-bolas (tiempo)

Velocidad molienda

Tiempo de molienda





## TECNOLOGÍA DE POLVOS

### Parámetros importantes del polvo

#### Composición

- Composición química
- Microestructura
- Estructura química  
(superficial y en volumen)

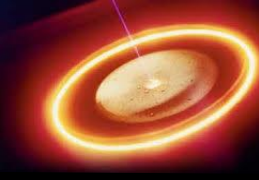
#### Geometría / Morfología

- Forma de la partícula
- Tamaño de partícula
- Distribución de tamaños
- Textura superficial
- Estructura interna  
(Porosidad)

#### Otras Propiedades

- Flujo del polvo
- Densidad aparente
- Comprensibilidad
- Resistencia de los compactos en verde
- Propiedades térmicas

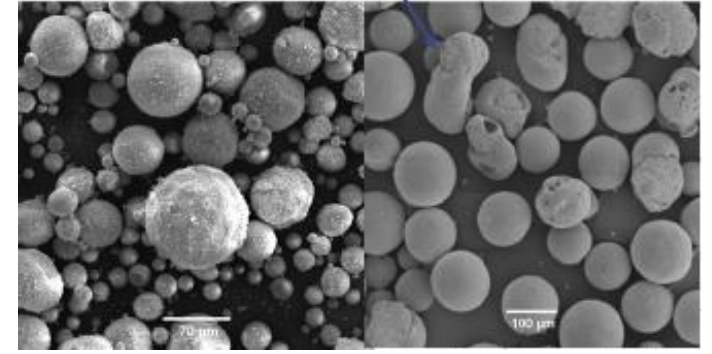
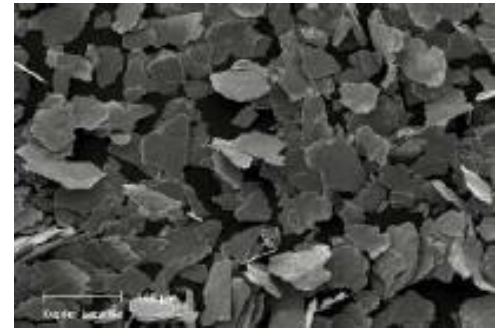
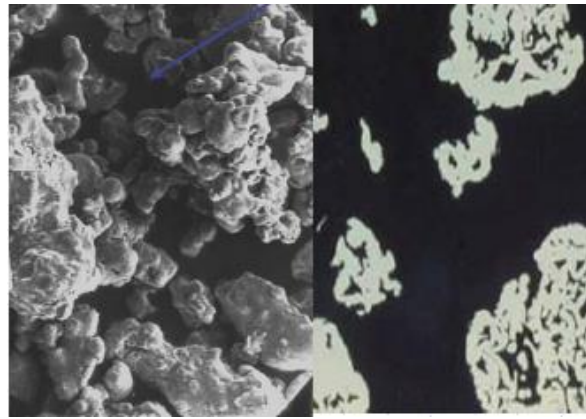




# TECNOLOGÍA DE POLVOS

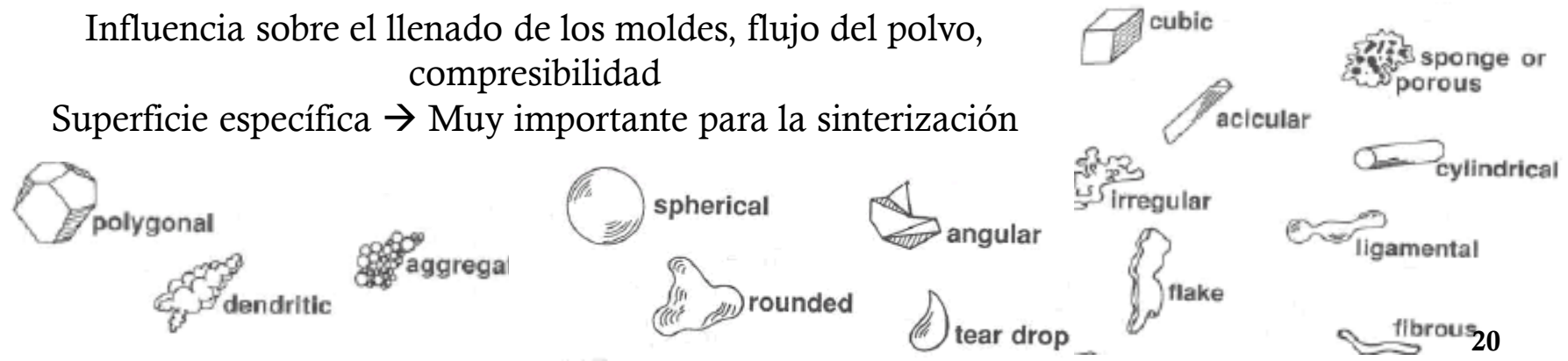
## Parámetros importantes del polvo

### Geometría / Morfología

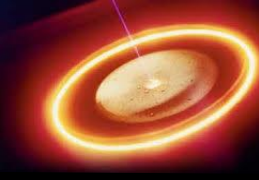


Influencia sobre el llenado de los moldes, flujo del polvo, compresibilidad

Superficie específica → Muy importante para la sinterización







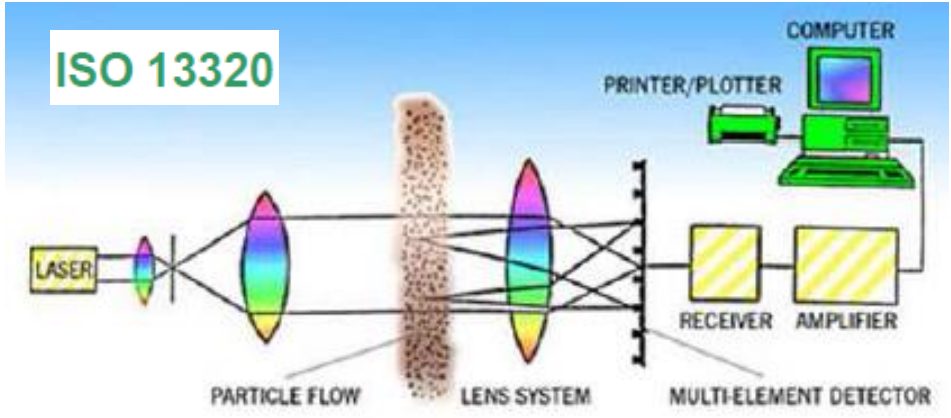
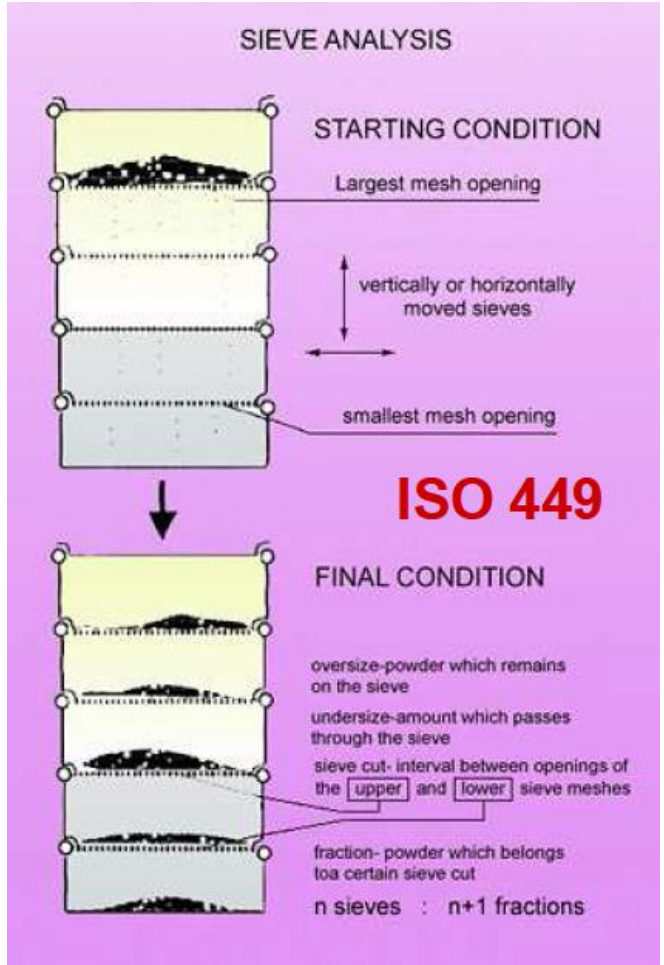
# TECNOLOGÍA DE POLVOS

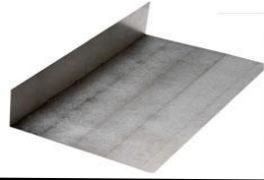
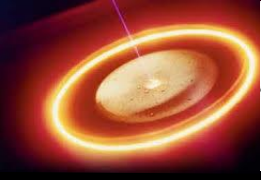
## Parámetros importantes del polvo

### Geometría / Morfología

Distribución de tamaños de partículas

Tamizado y el análisis de dispersión de haz de luz láser



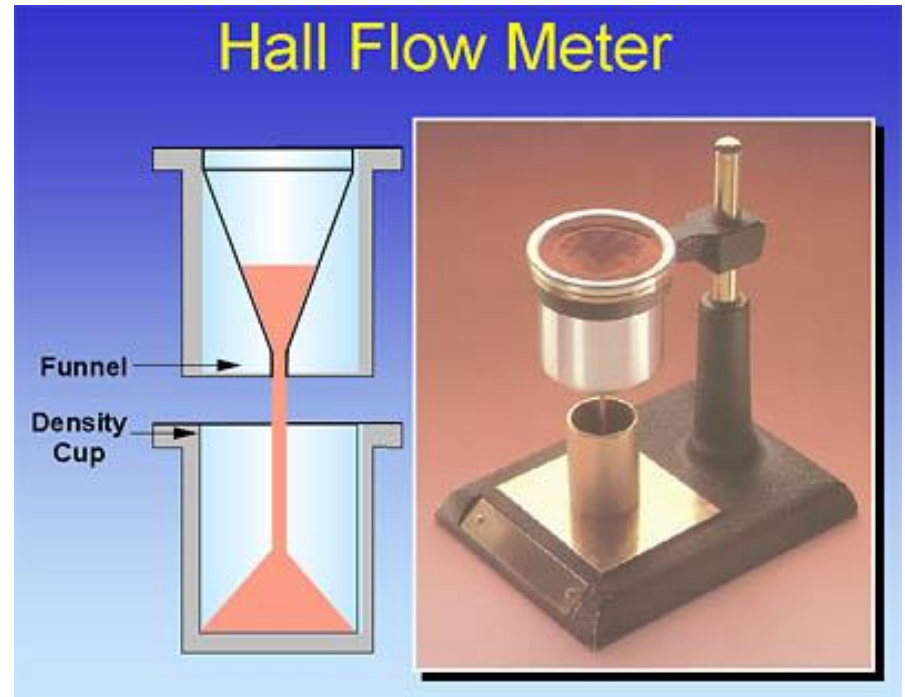
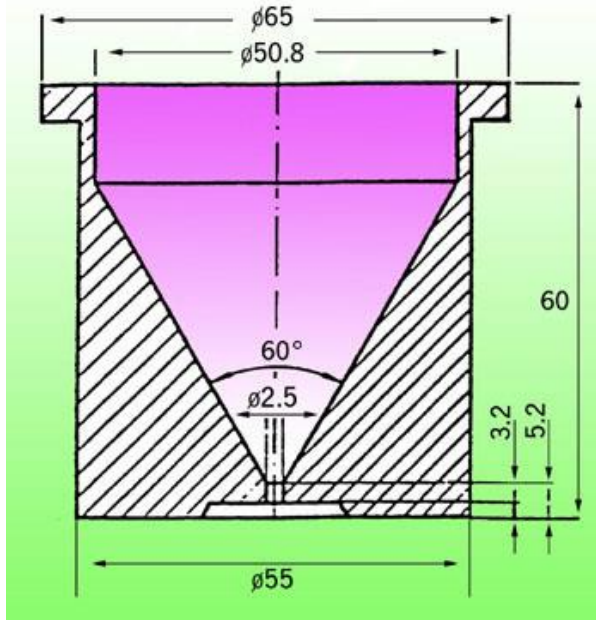


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## Parámetros importantes del polvo

### Propiedades físicas – Flujo del polvo

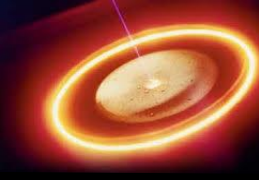
ISO 3923/3923/4490



**RUGOSIDAD  
SUPERFICIAL**

**TAMAÑO DE  
PARTÍCULA**

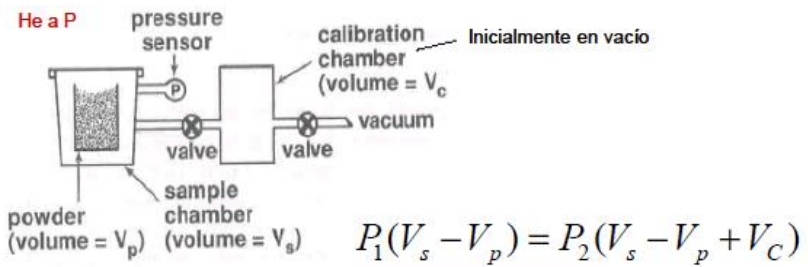
**ÁREA  
SUPERFICIAL**



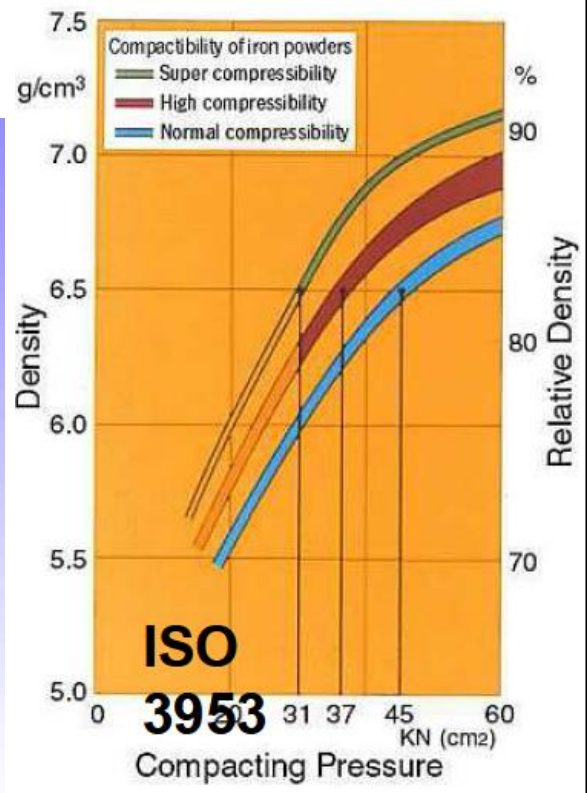
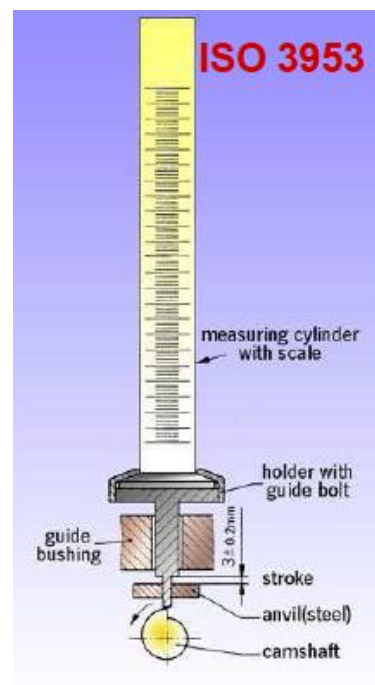
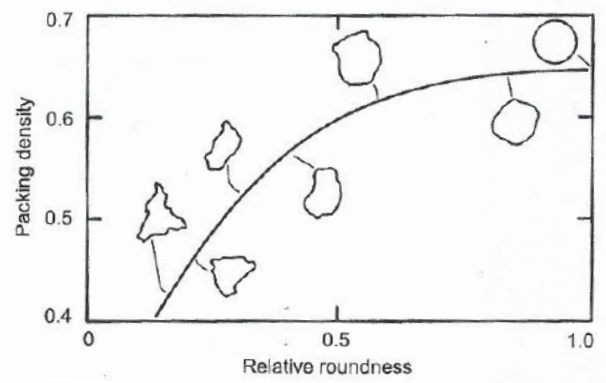
# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## Parámetros importantes del polvo

### Propiedades físicas – Densidad



PROCESO ISOTERMO



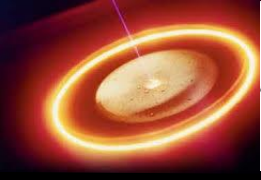
Densidad  
Aparente

Densidad de polvo  
vibrado

Densidad del  
polvo

Densidad en  
verde





# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE COMPACTACIÓN

### Compactación Uniaxial

Carga del polvo en la matriz



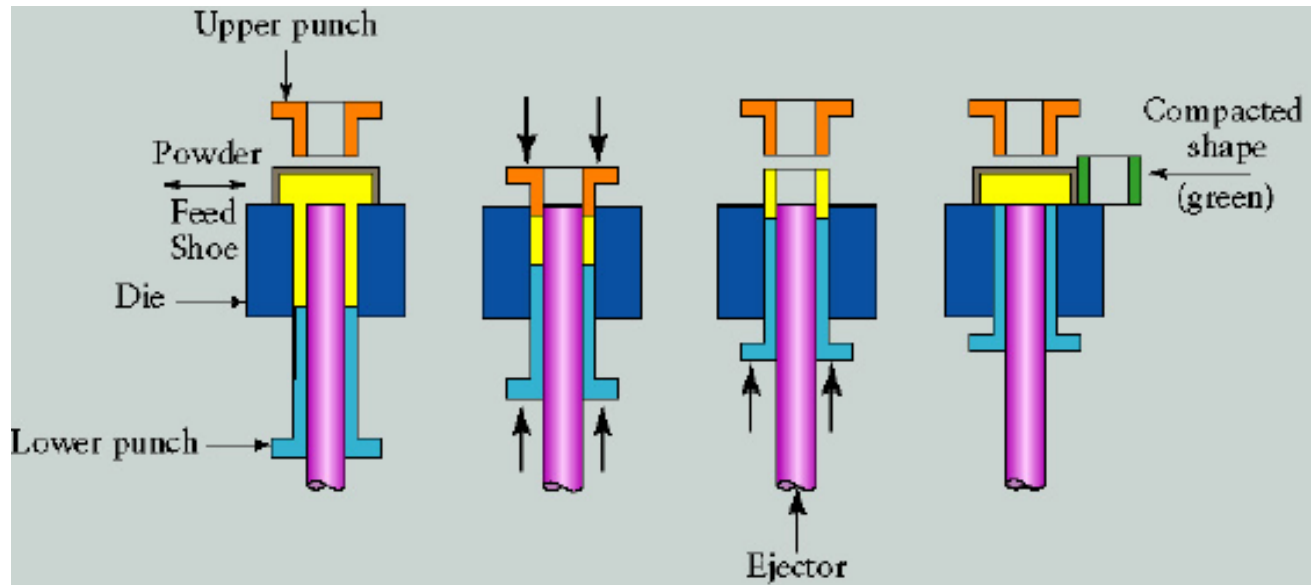
Compactación

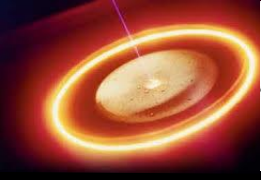


Eyección



Limpieza y recarga

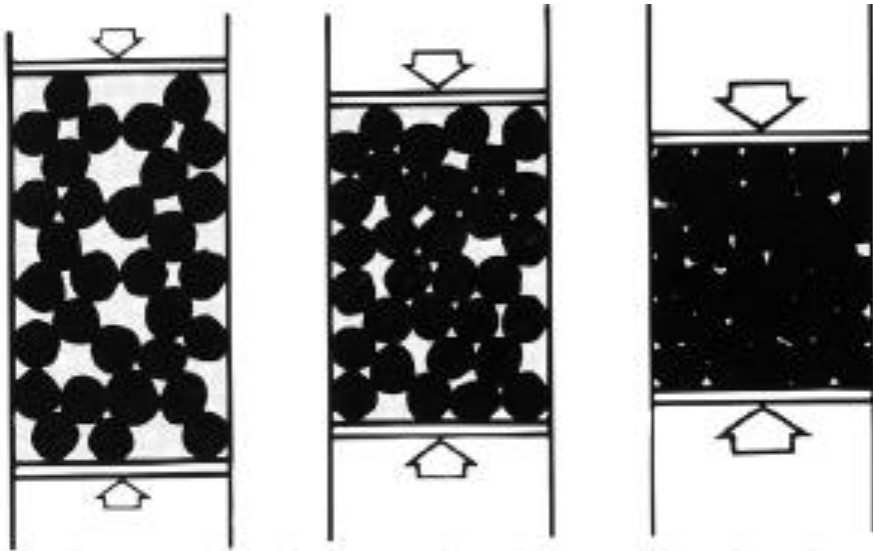




## TECNOLOGÍA DE POLVOS

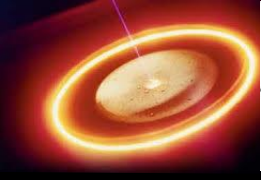
### ETAPA DE COMPACTACIÓN

#### Compactación Uniaxial



- Acercamiento de las partículas → Transferencia del polvo
- Compactación del polvo
  - Deformación elástica
  - Deformación plástica
  - Unión en frío de las partículas

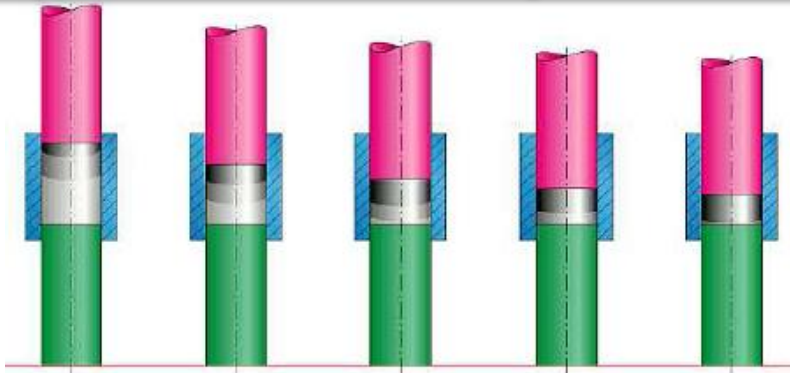
INCREMENTO DE LA PRESIÓN



# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE COMPACTACIÓN

### Compactación Uniaxial – Tipos de Prensas

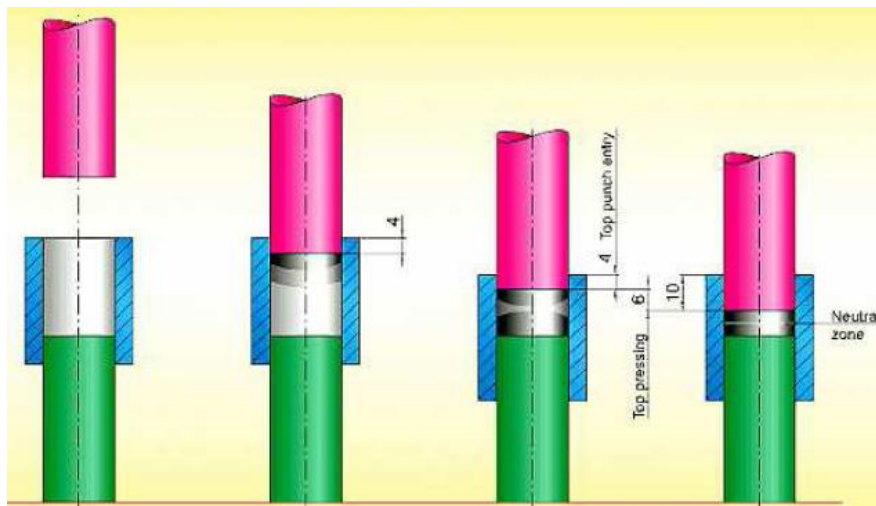


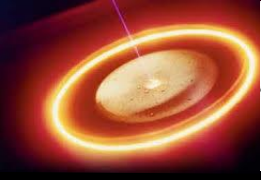
**Prensa Simple Efecto**



**Prensa Doble Efecto**

### Matriz Flotante





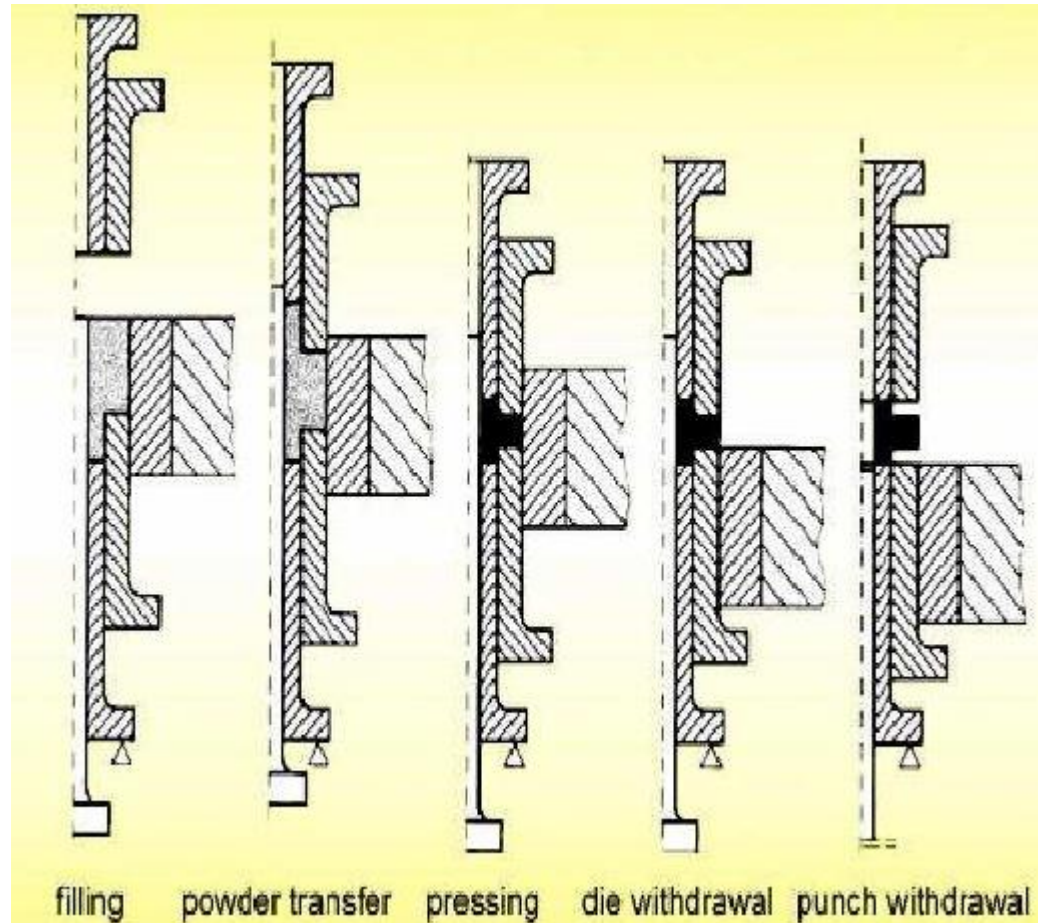
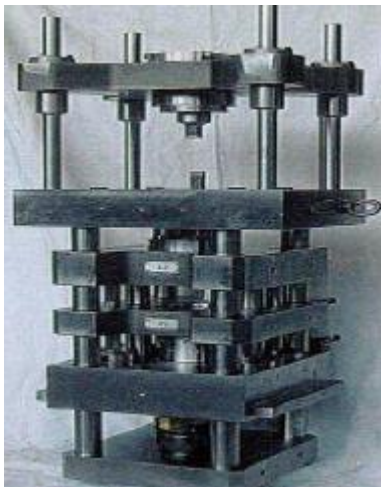
# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE COMPACTACIÓN

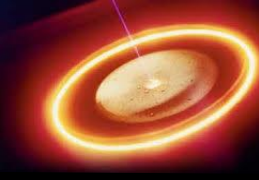
### Compactación Uniaxial – Tipos de Prensas

#### PRENSA MULTINIVEL

- Varios juegos de punzones gobernados por los diferentes platos



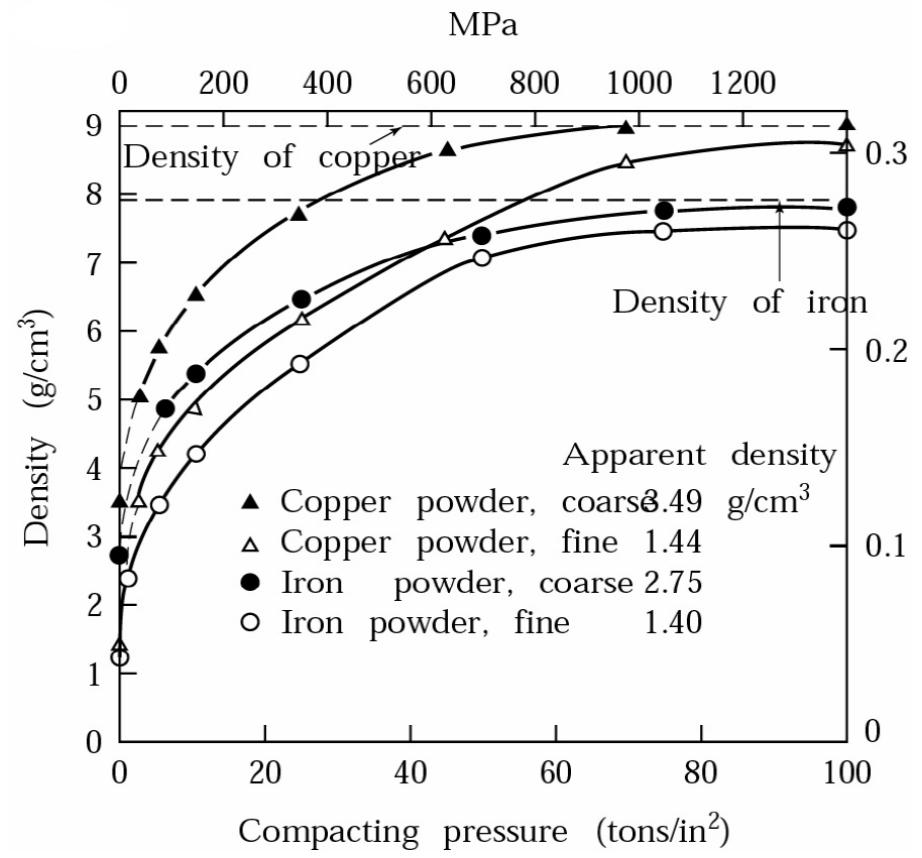




# PULVIMETALURGIA

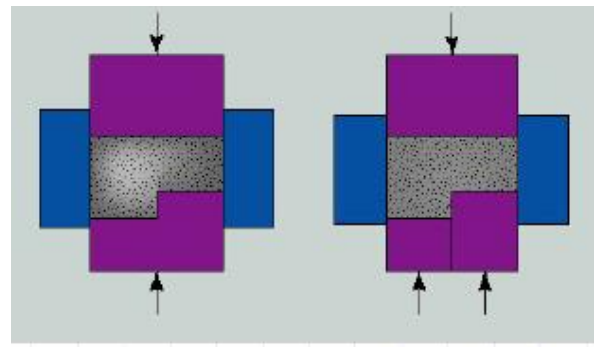
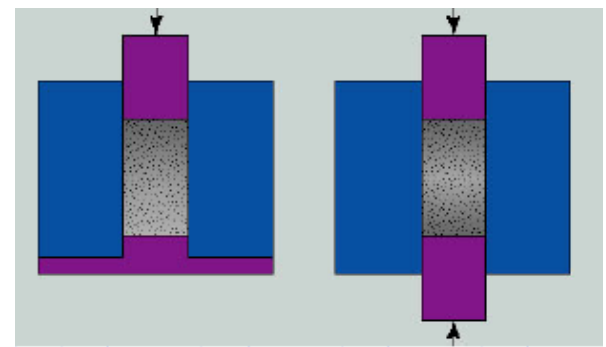
## ETAPA DE COMPACTACIÓN

### Compactación Uniaxial – Densidad en verde



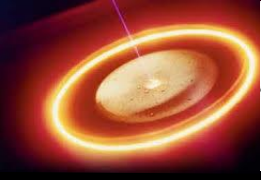
### DENSIDAD RELATIVA DEL COMPACTO EN VERDE

$$\rho = \frac{100 \cdot \left[ \frac{w_{Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \frac{w_3}{\rho_3} + \dots \right]}{\left[ \frac{w_{Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \frac{w_3}{\rho_3} + \dots \right]}$$







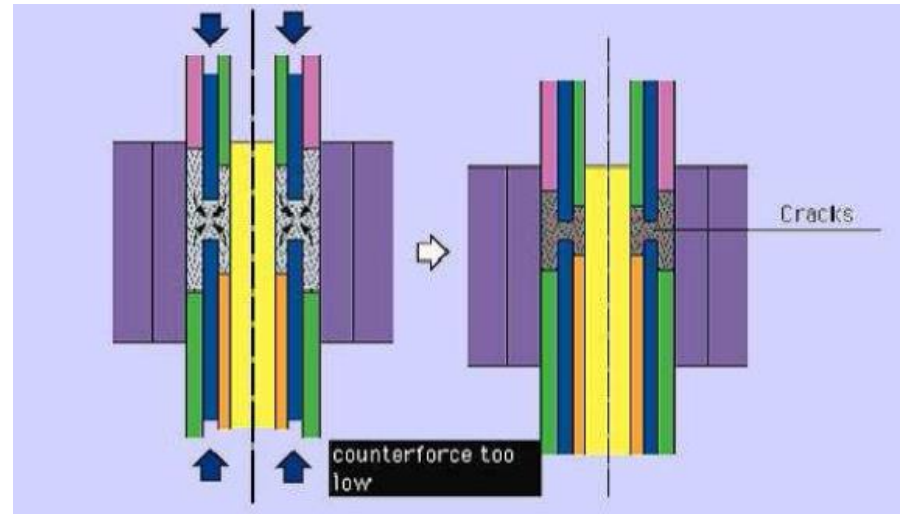
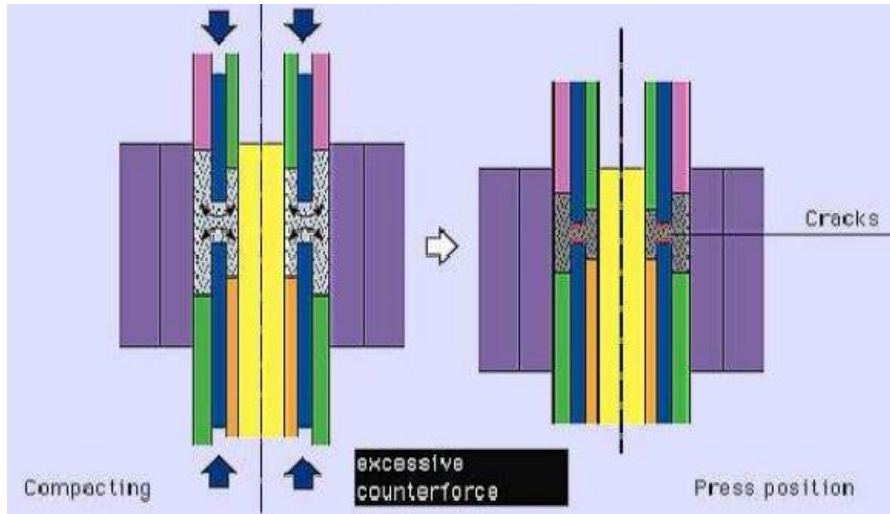


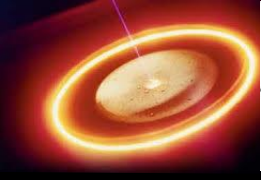
## TECNOLOGÍA DE POLVOS

### ETAPA DE COMPACTACIÓN

#### Compactación Uniaxial – Restricciones

- 5 – 6 toneladas de fuerza prensado por cada  $\text{cm}^2$  de área proyectada → Secciones de las piezas limitadas
- Dificultades para ejercer una presión homogénea en piezas muy esbeltas
- Las secciones delgadas pueden causar problemas durante el llenado → Tamaño de partícula
- Control de las presiones ejercidas por los punzones





# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE COMPACTACIÓN

### Compactación Uniaxial – Variaciones

### COMPACTACIÓN CON POLVOS PRECALENTADOS:

- Compactación uniaxial de polvos precalentados → Mejores propiedades mecánicas en verde → Posibilidad de mecanizado previo a la etapa de sinterización

1. Mezcla lista para prensar

2. Precalentamiento del polvo (130 °C).

3. Prensado con matrices calientes (150 °C).

4. Mecanizado en verde.

5. Sinterización



Menor tamaño de poro y forma redondeada

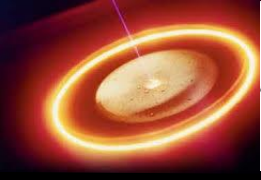
Distribución más homogénea de densidades

Mayor densidad en verde

Menor variación dimensional

Mejores propiedades en verde



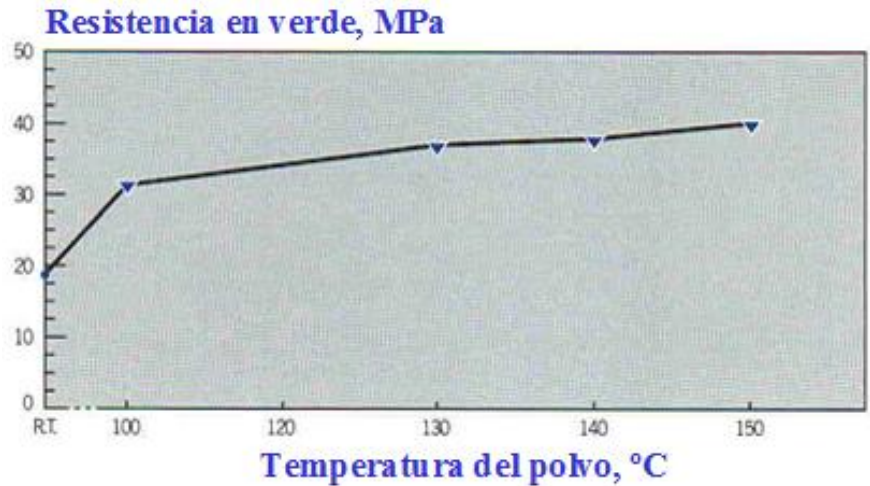
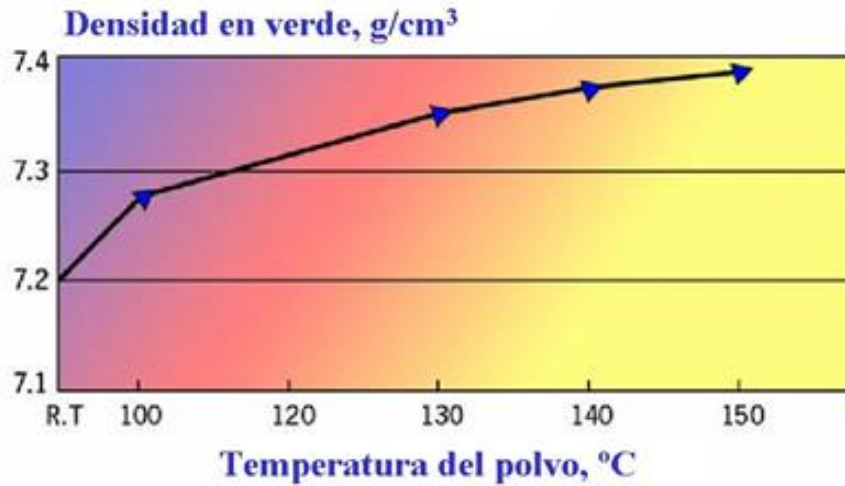


# TECNOLOGÍA DE POLVOS

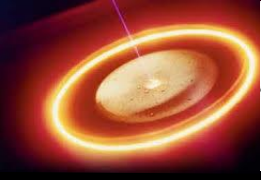
## ETAPA DE COMPACTACIÓN

### Compactación Uniaxial – Variaciones

#### COMPACTACIÓN CON POLVOS PRECALENTADOS:



Distaloy AE + 0,3 % C + 0,6 % lubricante (Presión Compactación: 700 MPa)



# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación isostática – En frío o en caliente (CIP / HIP)

SE EVITAN  
PROBLEMAS DE  
FRICCIÓN

MAYOR  
VERSATILIDAD  
EN GEOMETRÍA

MAYOR  
UNIFORMIDAD DE  
LAS PROPIEDADES

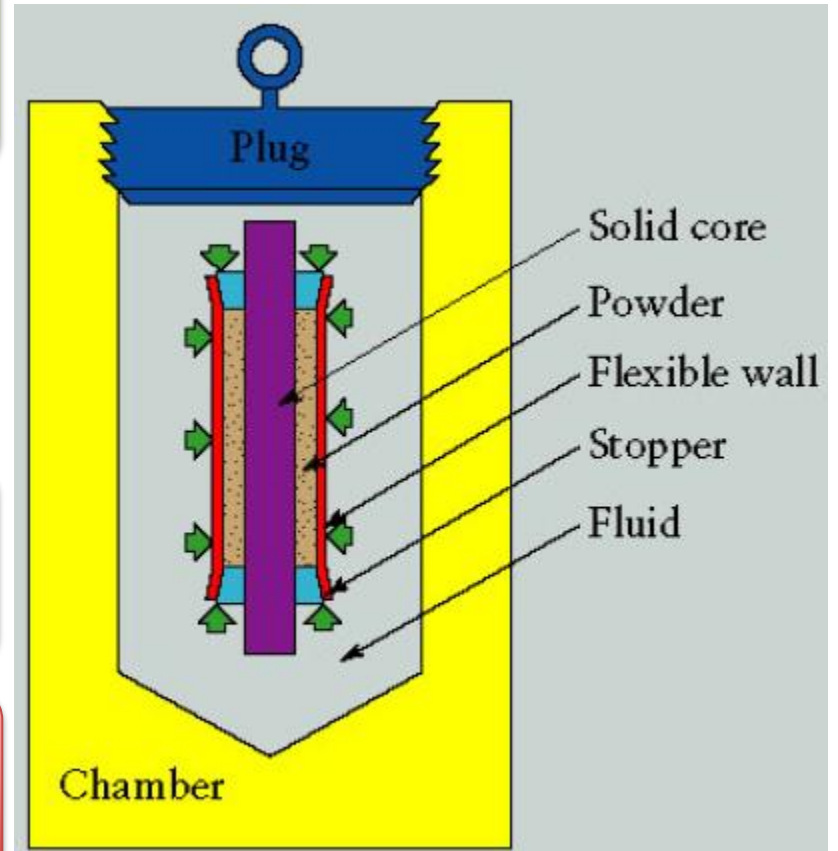
MAYORES  
DENSIDADES  
EN VERDE

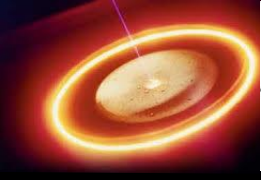
MÁS LENTO

MENOR  
TOLERANCIA  
DIMENSIONAL

PEOR  
ACABADO  
SUPERFICIAL

PROCESO  
DISCONTINUO

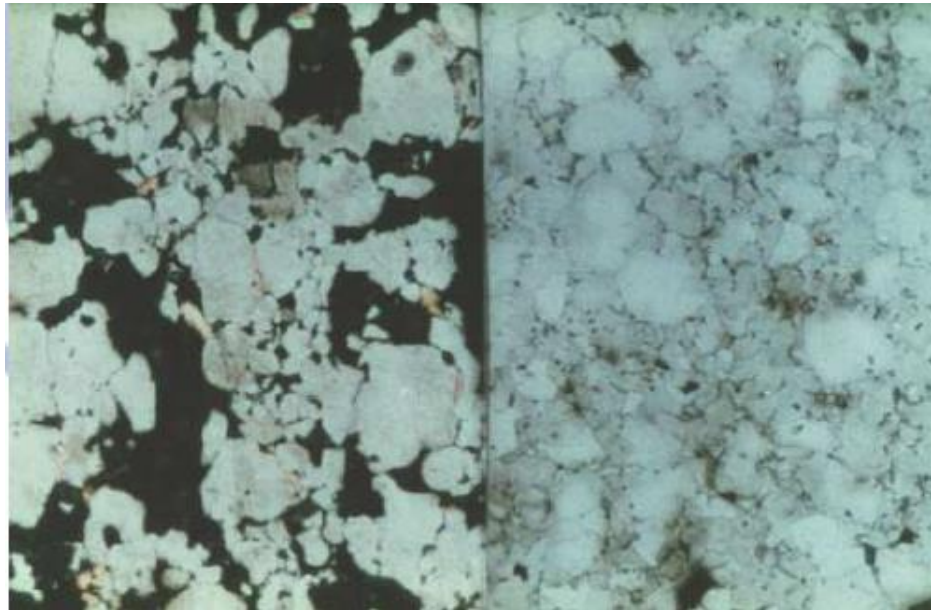


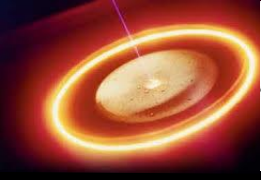


## TECNOLOGÍA DE POLVOS

### ETAPA DE SINTERIZACIÓN

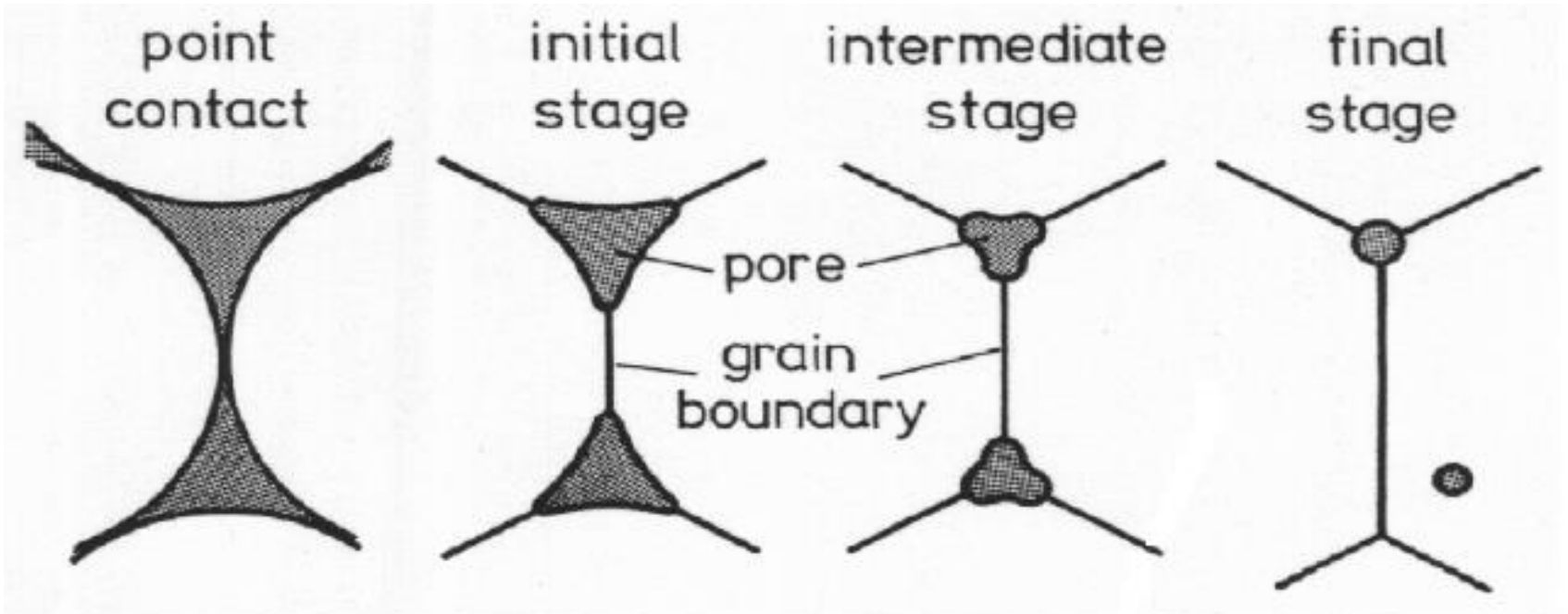
- Tratamiento térmico mediante el cual se favorece la unión entre partículas a través de fenómenos de transporte de masa lo que se traduce en una densificación mejorándose la resistencia y otras propiedades.
- El tratamiento se lleva a cabo a una temperatura menor que la temperatura de fusión del principal constituyente





# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE SINTERIZACIÓN



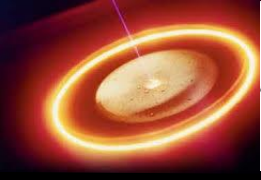
**Aproximación –  
zonas de contacto**

**Formación de  
cuellos**

**Crecimiento de  
cuellos -  
Densificación**

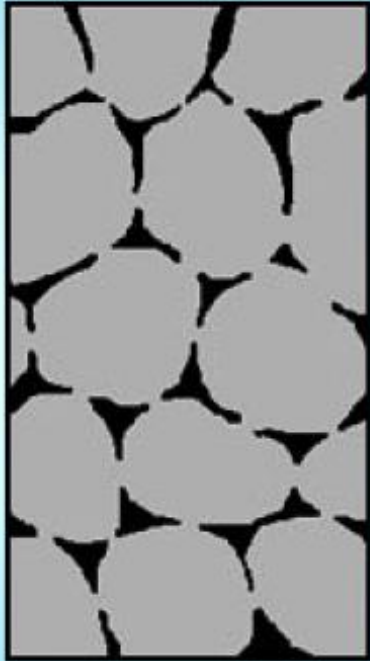
**Densificación,  
crecimiento  
redondeo de poros**



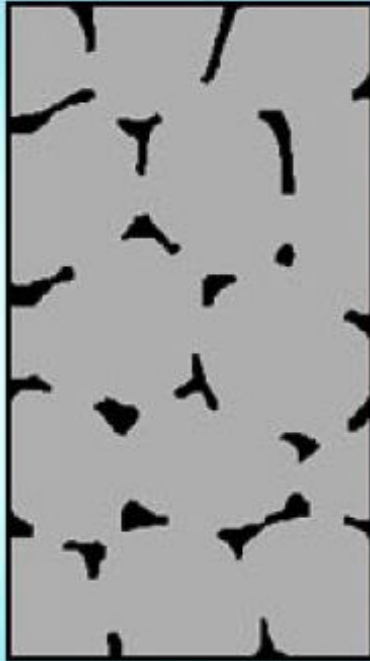


## TECNOLOGÍA DE POLVOS

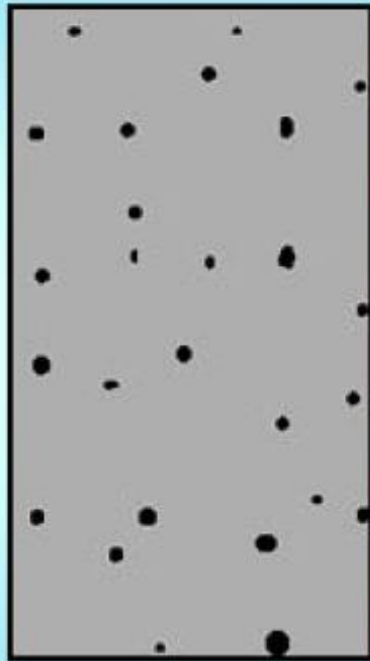
### ETAPA DE SINTERIZACIÓN



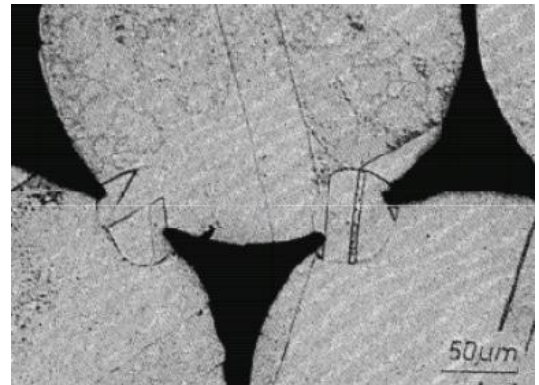
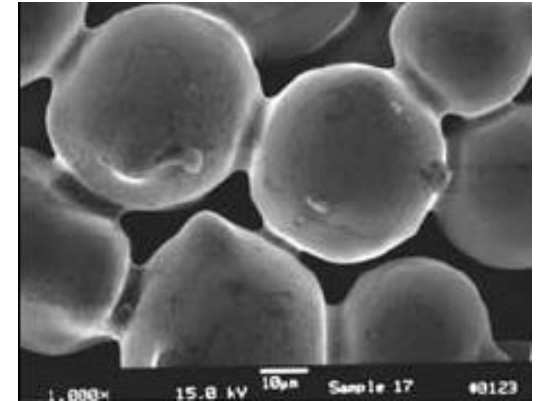
Initial stage



Intermediate stage



Final stage



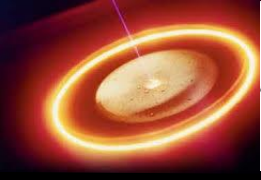
Aproximación –  
zonas de contacto

Formación de  
cuellos

Crecimiento de  
cuellos -  
Densificación

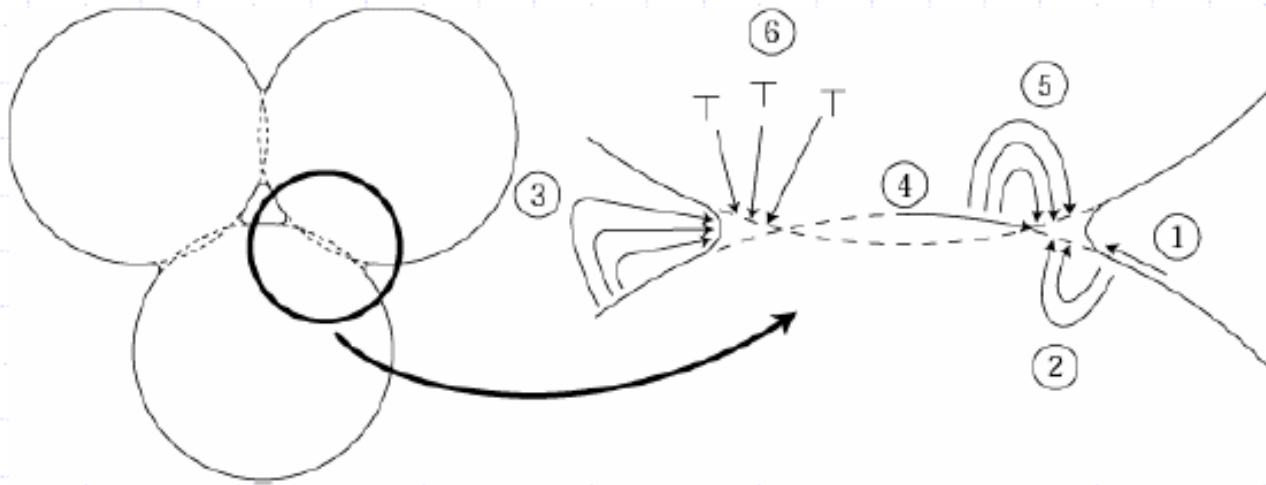
Densificación,  
crecimiento  
redondeo de poros





# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE SINTERIZACIÓN



1

**Difusión Superficial**

2

**Difusión en volumen**

3

**Difusión en fase vapor**

4

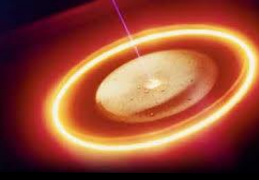
**Difusión en borde de grano**

5

**Difusión en volumen**

6

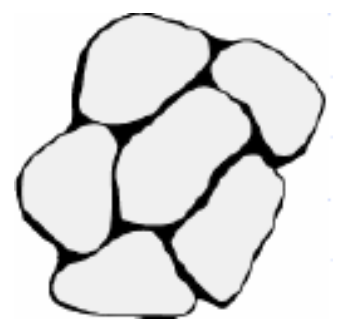
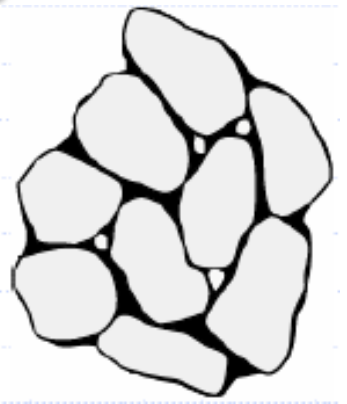
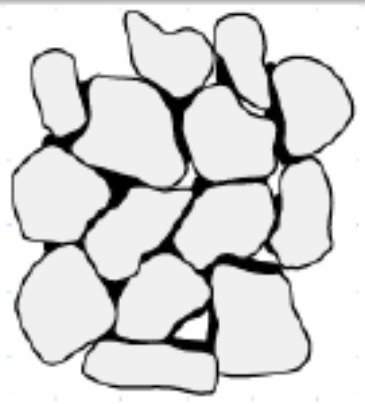
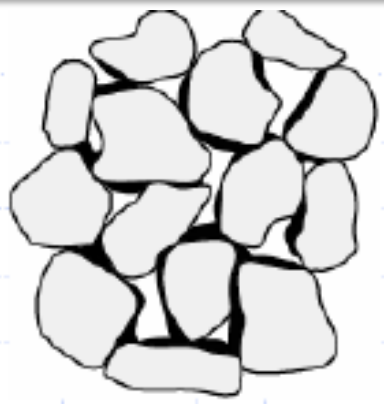
**Flujo plástico**



# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE SINTERIZACIÓN

### Sinterización en Fase Líquida (LPS)



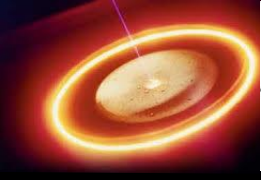
**Formación de fase líquida**

**Reorganización de las partículas (densificación)**

**Procesos de solución/precipitación (densificación)**

**Densificación final y crecimiento de grano**

Activación de la sinterización para conseguir densidades más altas  
Se favorece la difusión por disolución parcial del sólido  
Control de la porosidad secundaria  
Se requiere control de la fase líquida formada para que no se pierda la estabilidad dimensional  
Permite la obtención de materiales compuestos complejos de obtener por colada



## TECNOLOGÍA DE POLVOS

### ETAPA DE SINTERIZACIÓN

#### Parámetros del proceso de sinterización

**Temperatura**

**Tiempo**

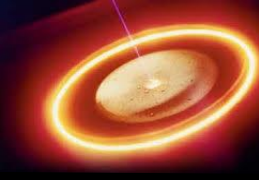
**Atmósfera**

**Composición**

**Contenido  
lubricante**

**Tamaño de  
partícula  
inicial**

**Velocidad  
calentamiento y  
enfriamiento**



# TECNOLOGÍA DE POLVOS

## ETAPA DE SINTERIZACIÓN

### Hornos empleados

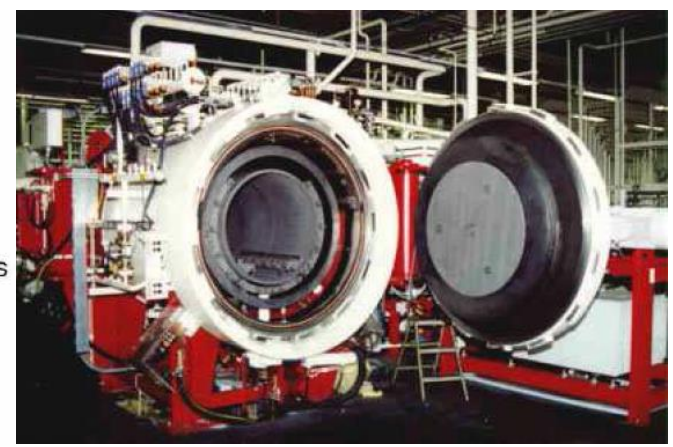
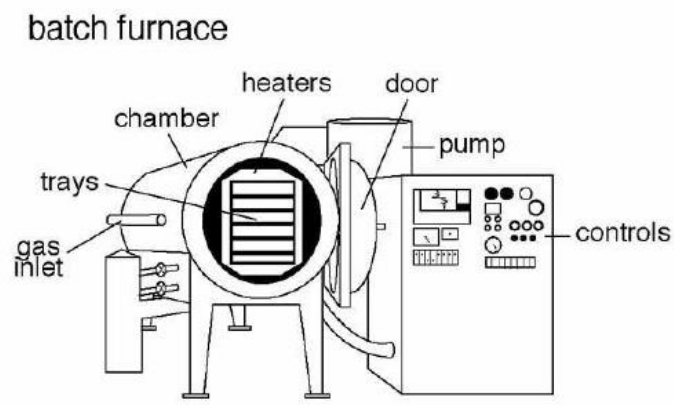
### CONTÍNUO

- Cinta
- Empujadores
- Rodillos



### DISCONTINUO

- Mufla
- Vacío

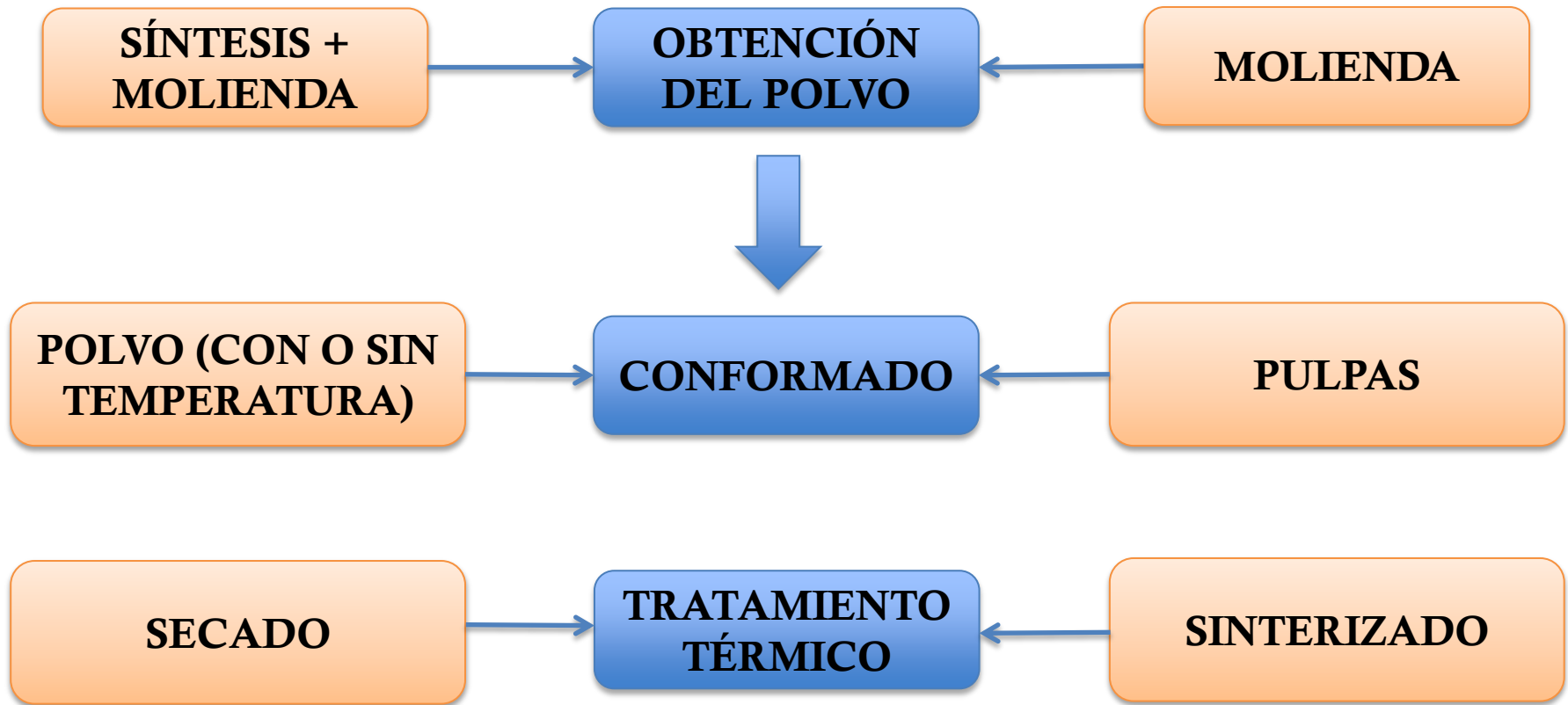






## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Esquema general





## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Diferentes alternativas empleadas en fabricación de elementos cerámicos por conformado de partículas

**COMPACTACIÓN DE POLVOS**

**TAPE CASTING**

**SLIP CASTING**

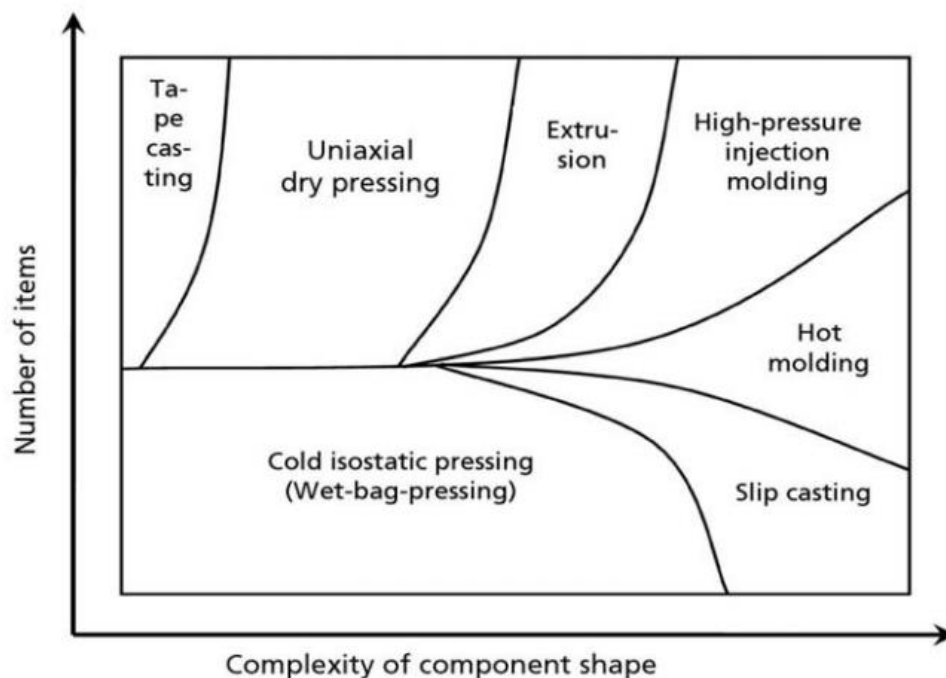
**POWDER INJECTION MOLDING**



**HIP**

**UNIAXIAL**

**CIP**

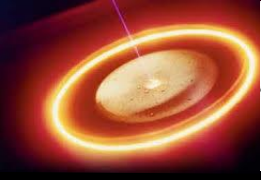




## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Alternativas

MÉTODO	FORMA DEL MATERIAL INICIAL	FORMAS DE LOS COMPUESTOS EN VERDE
Compactación en matriz	Polvo o partículas	Piezas pequeñas y sencillas
Presión isostática	Polvo o partículas	Piezas más complejas (tamaño y forma)
Slip casting	Pasta (slurry) de aglomerante (binder) y partículas	Formas complejas de pared delgada
Tape casting	Pasta (slurry) con alto contenido en aglomerante (binder) y partículas	Láminas finas
Extrusión	Polvo y binder en solución	Formas alargadas con sección uniforme
Moldeo por inyección	Mezcla de polvo y binder	Geometrías más complejas



## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Obtención del Polvo

**MOLIENDA/TRITURACIÓN**



Molienda en seco, molienda en húmedo

**INCORPORACIÓN DE  
ADITIVOS**

**LUBRICANTE**

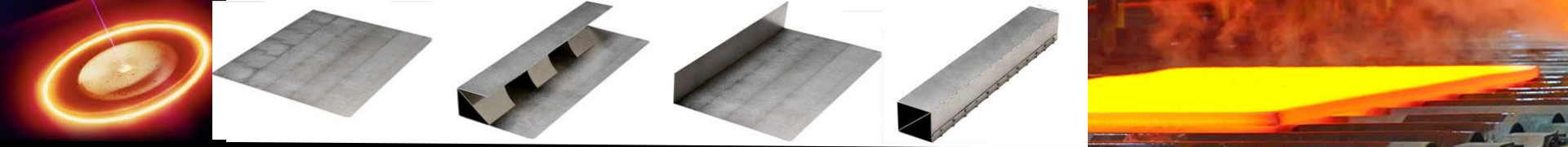
**AGLOMERANTE**

**DEFLOCULANTES**

**HUMECTANTE**

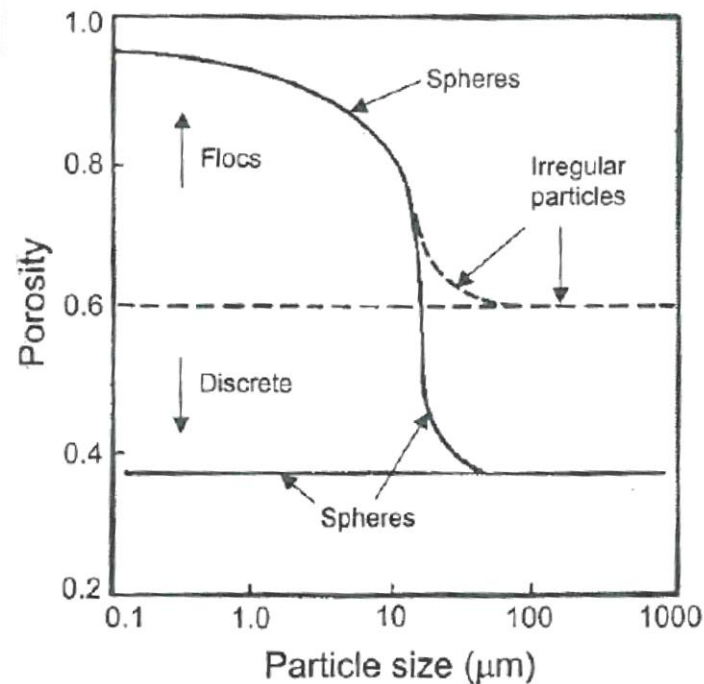
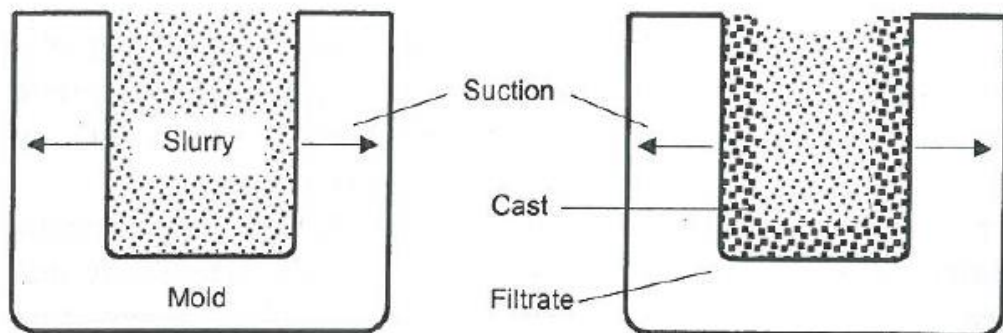
**AGENTES  
ADICIONALES**





## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Slip Casting



$$J = \frac{K \left( \frac{dp}{dx} \right)}{\eta}$$

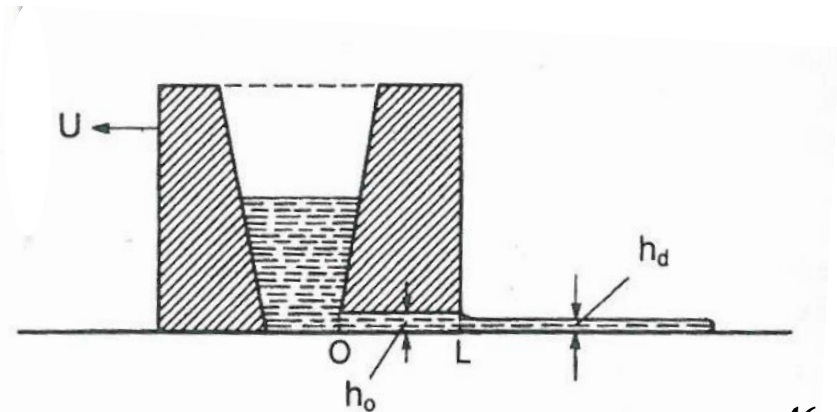
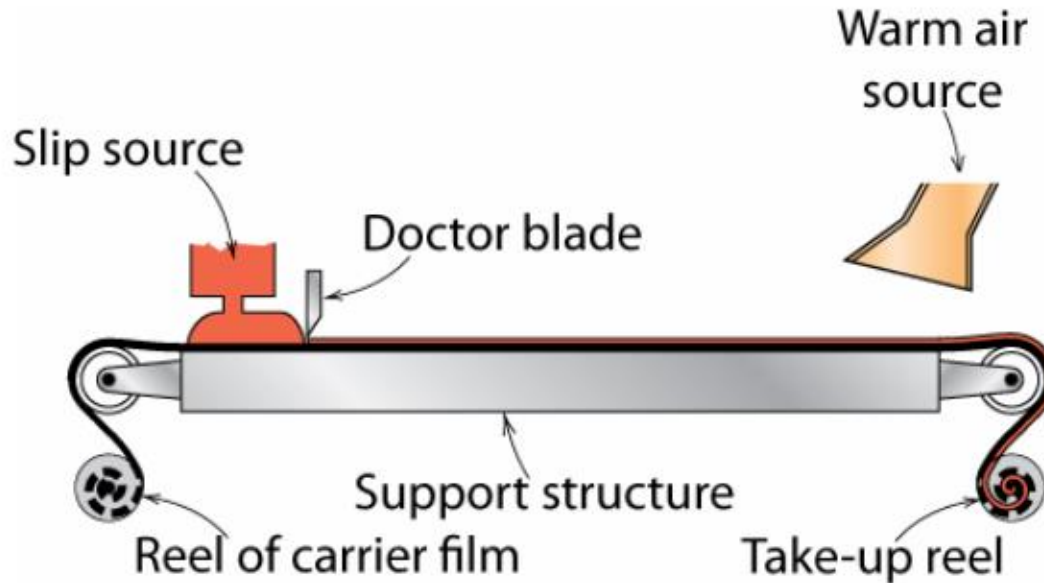
### FACTORES A TENER EN CUENTA:

- Tamaño de partícula
- Distribución del tamaño de partícula
- Material y porosidad del molde
- Viscosidad del “*slurry*”
- Dispersión de las partículas



## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Tape Casting



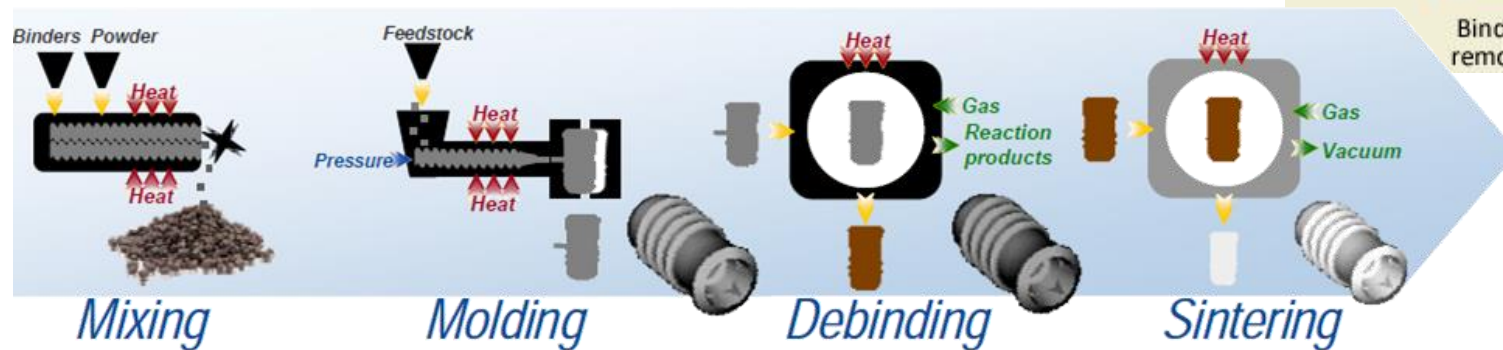
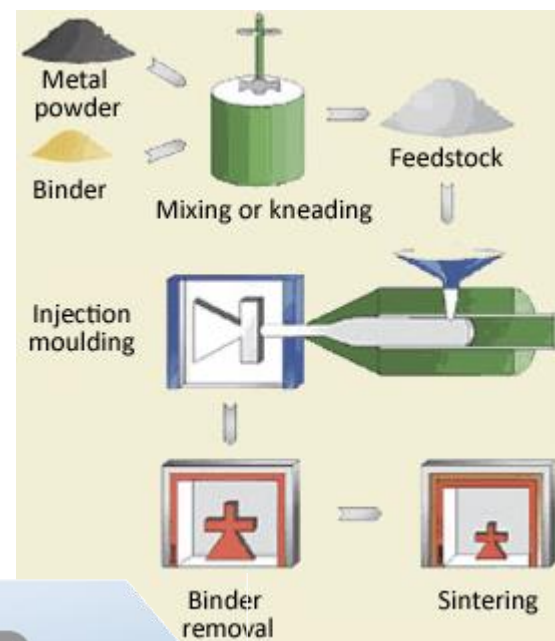
$$h_d = Cte \frac{\rho_w}{\rho_d} h \left( 1 + \frac{h^2 \Delta P}{6\nu UL} \right)$$

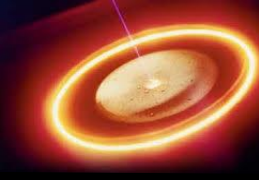


## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Powder Injection Molding (PIM)

Inyección de una mezcla de polvo (cerámico o metálico) con un binder o agente aglutinante



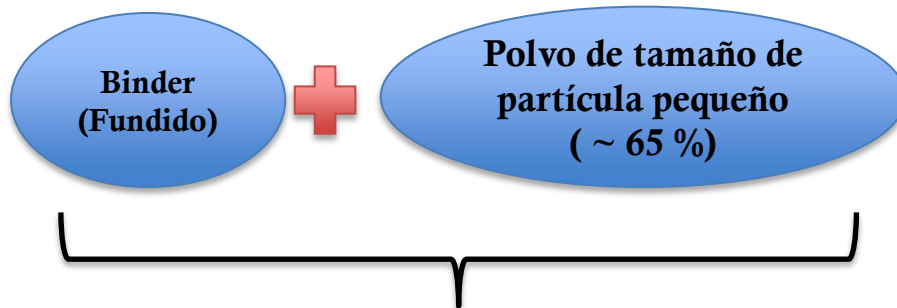


# Tecnología de polvos en materiales cerámicos

## Powder Injection Molding (PIM)

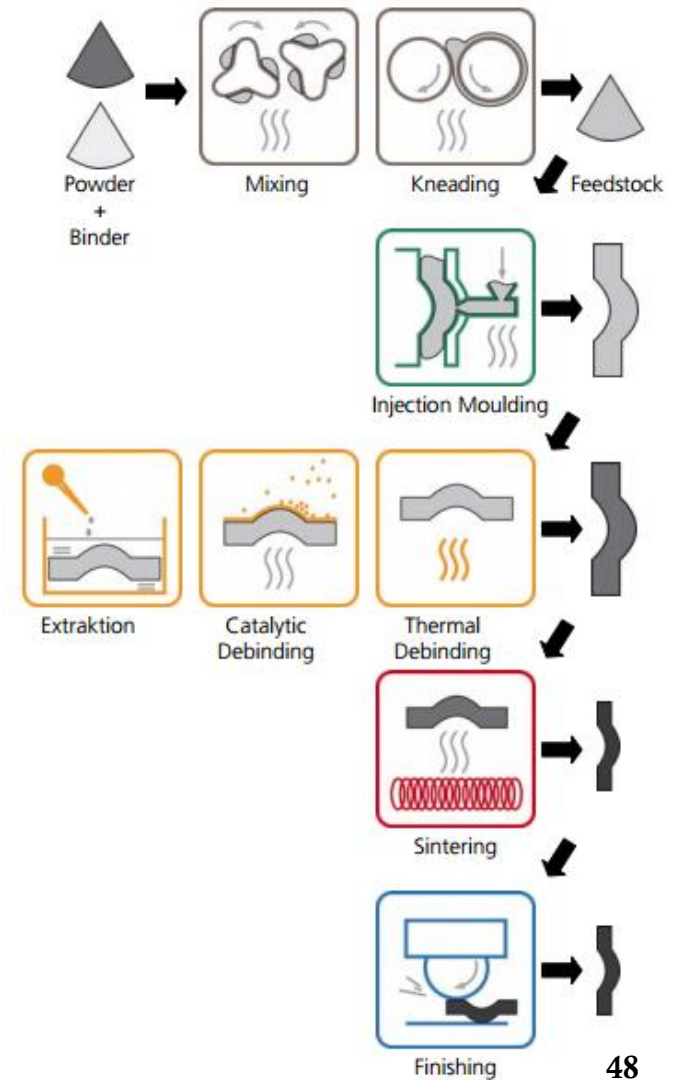
### Binder – Agente aglomerante

Mezcla de polímeros (polietileno, polietilenglicol, polimetilmetacrilato, polipropileno) , ceras (parafinas), dispersantes y surfactantes



**MATERIAL PARA ALIMENTAR EL PROCESO DE INYECCIÓN**

**NECESIDAD DE ELIMINAR EL AGENTE AGLOMERANTE DURANTE LA ETAPA DE SINTERIZACIÓN**





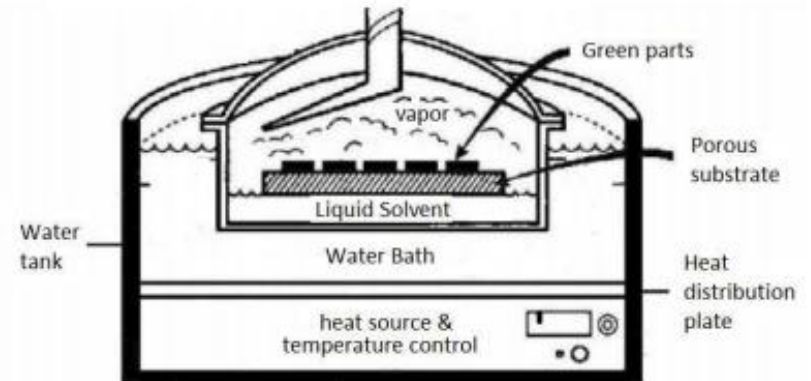


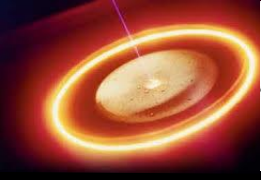
## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Powder Injection Molding (PIM)

#### Binder – Agente aglomerante

- Varias posibilidades para la eliminación (térmica, eliminación con disolventes) → Destaca la eliminación térmica → Calentamiento de la pieza a elevada temperatura bajo atmósfera controlada.
- Problemática:
  - Evitar al máximo distorsiones en la forma de la pieza
  - Posibilidad de generación de grietas si no se tienen en cuenta las condiciones de procesado (paredes de espesor uniforme, mantener presión, entre otras)
- Facilitar con la geometría la eliminación del *binder* → Orificios, refuerzos en lugar de paredes gruesas, etc.





## Tecnología de polvos en materiales cerámicos

### Prensado Isostático en Caliente (HIP)

**BUENA  
DISTRIBUCIÓN DE  
PRESIONES**

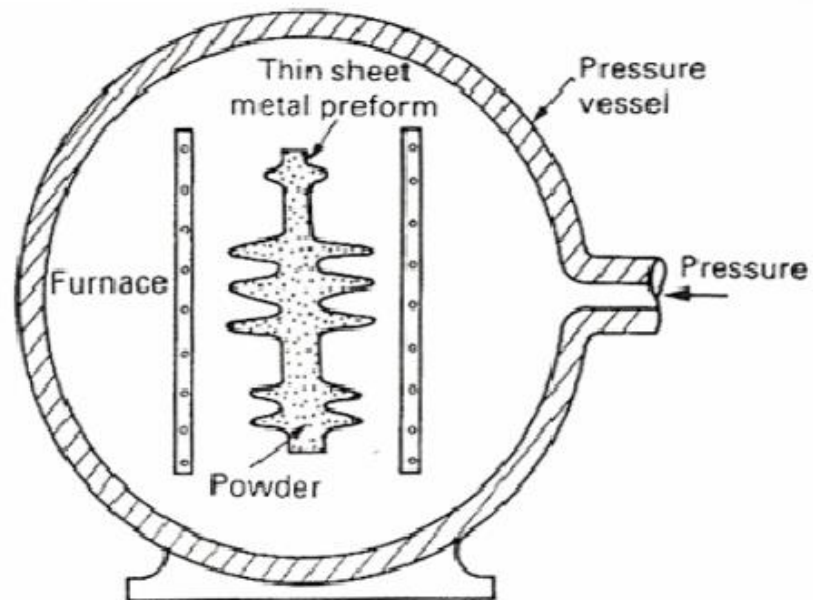
**PERMITE OBTENER  
FORMAS MÁS  
COMPLICADAS**

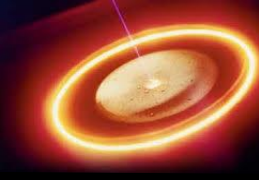
**MATERIALES CON  
UNA MAYOR  
DUREZA**

**MENOR CONTROL  
DIMENSIONAL**

**DISCONTINUIDAD  
DEL PROCESO**

**EQUIPAMIENTO  
MÁS CARO**

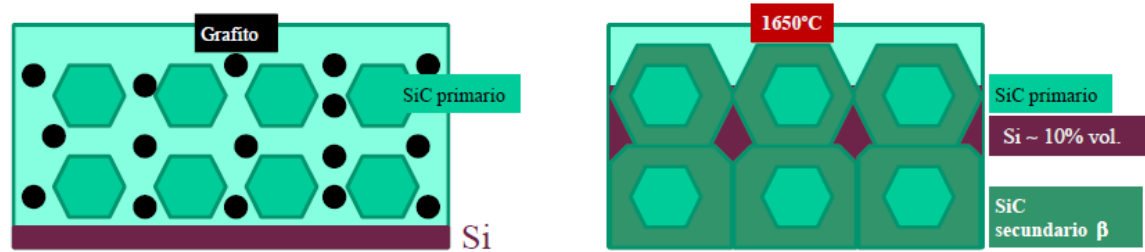




# Tecnología de polvos en materiales cerámicos

## Sinterización

**SINTERIZACIÓN POR REACCIÓN**



**SINTERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO**

- Baja sinterabilidad en muchos casos
- El coeficiente de difusión es, en general, más bajo que en metales
- Se necesitan polvos de tamaño muy pequeño → Mayor energía superficial → Aglomeración
- Temperaturas elevadas requeridas
- Atmósferas inertes
- Suelen requerir aditivos para mejorar la sinterabilidad

**SINTERIZACIÓN EN FASE LÍQUIDA**

- Cerámicas con mejor tenacidad a fractura
- Permite la sinterización a temperaturas más bajas
- Aditivos: Generalmente óxidos metálicos teniendo en cuenta que no descompongan al material a sinterizar



## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

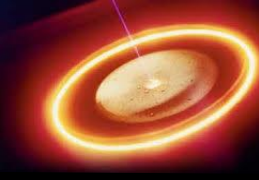
### VENTAJAS

- Permite la fabricación de piezas complejas (con cavidades y zonas huecas)
- Mayor versatilidad en tamaños de las piezas
- Producción en grandes cantidades permitida
- Coste variable pero relativamente más bajo que en otras técnicas
- Reducción del número de componentes

### DESVENTAJAS

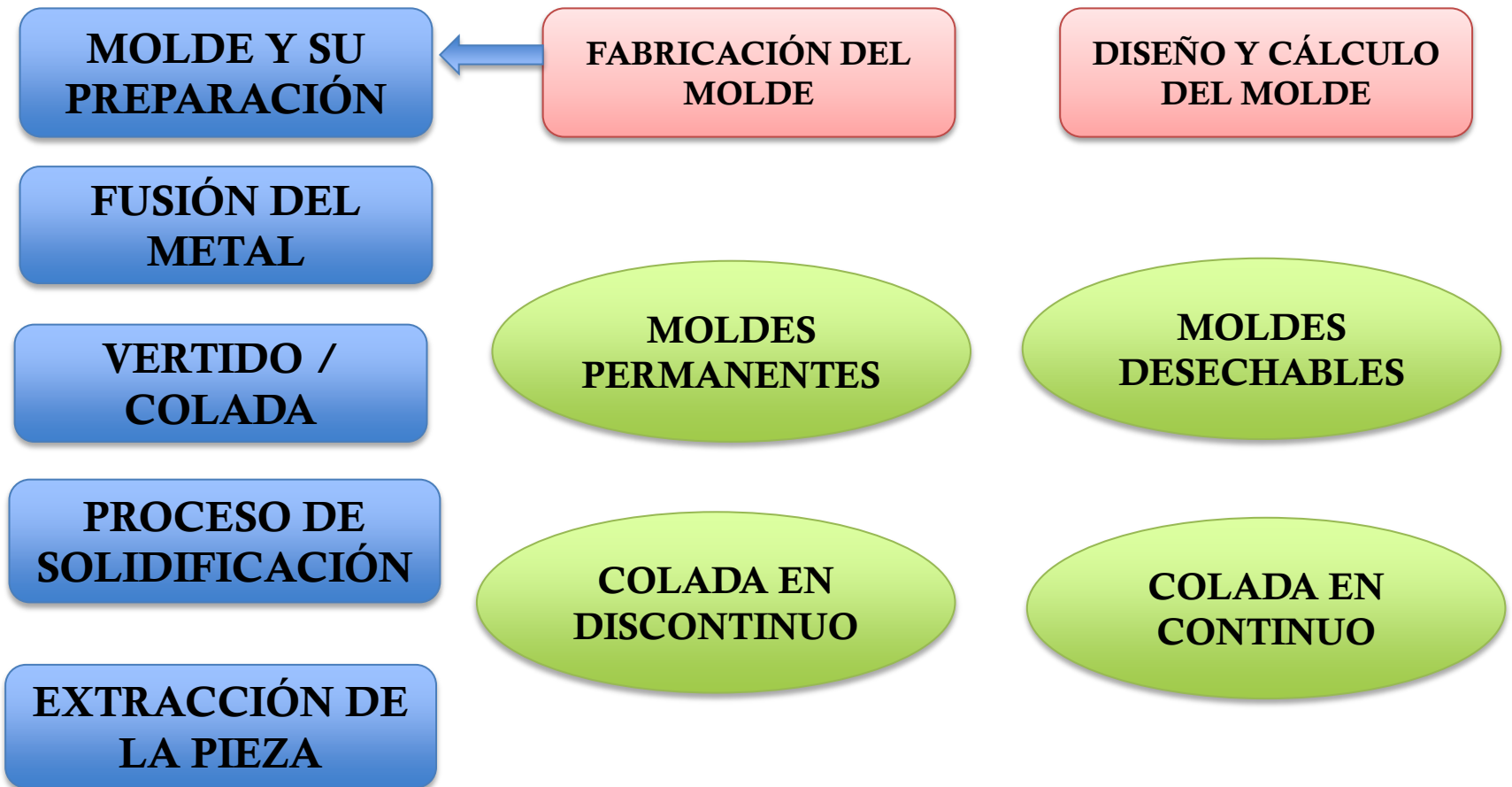
- Generalmente se obtienen propiedades inferiores a las obtenidas por
- Cierta anisotropía
- Menor precisión dimensional
- Cierta número de defectos de colada (segregaciones, porosidad)
- Calidad superficial variable (dependiendo del molde)
- Elevado coste inicial

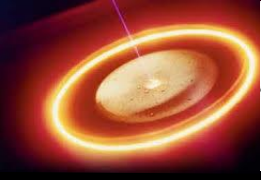




## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

Conformado de metales y aleaciones mediante el vertido (colada) de material fundido en un molde con la forma de la pieza o componente que solidificará en el mismo





# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

Conformado de metales y aleaciones mediante el vertido (colada) de material fundido en un molde con la forma de la pieza o componente que solidificará en el mismo

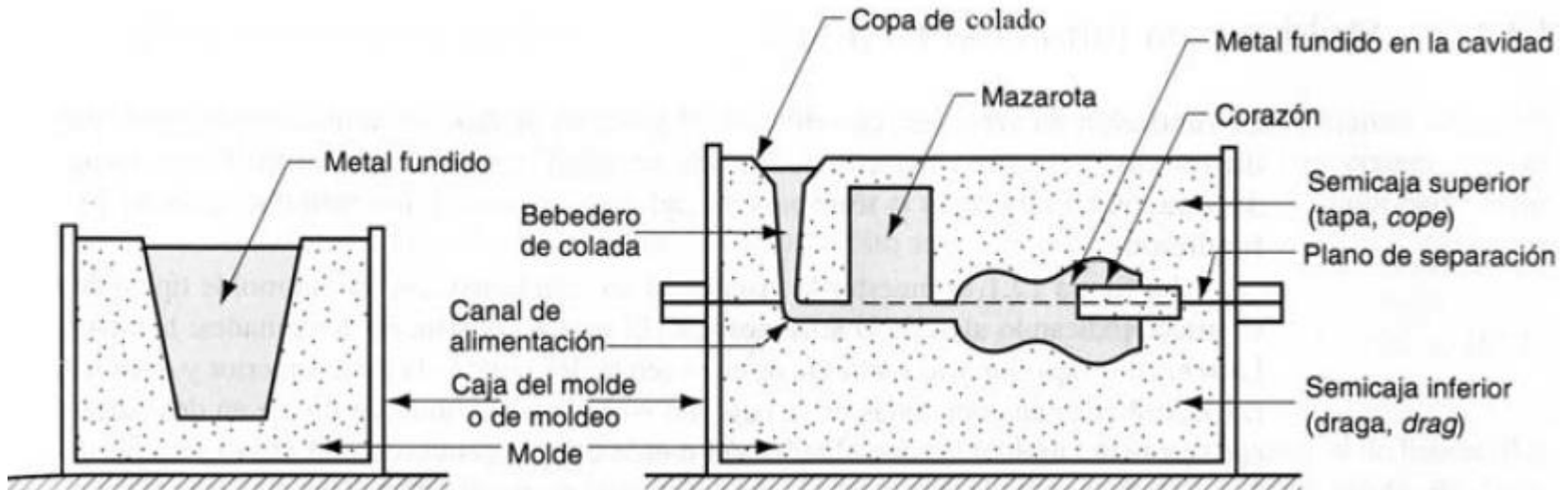
**FUSIÓN DEL METAL**

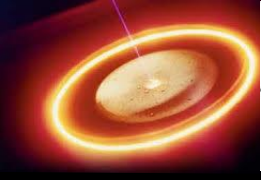
**VERTIDO / COLADA**

**PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN**

**MOLDE Y SU PREPARACIÓN**

**EXTRACCIÓN DE LA PIEZA**





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

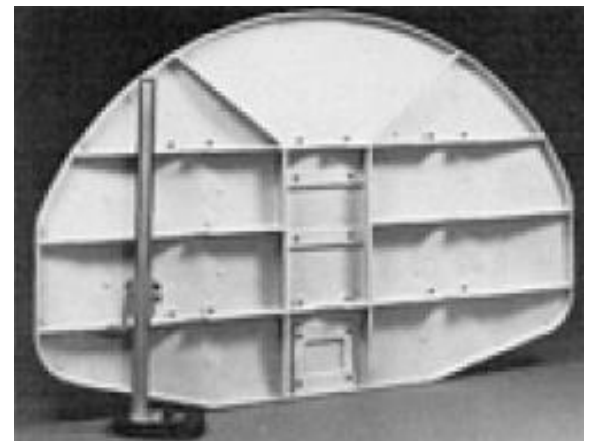
### MOLDES PERMANENTES

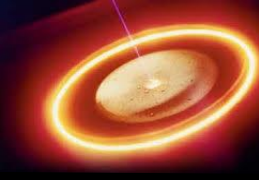
- Generalmente son moldes metálicos (acero, fundiciones) aunque también pueden ser de grafito formados por una o varias piezas
- Puede incluir una parte no permanente en núcleos o corazones realizados en arena o aglomerados
- Dan lugar a piezas con mejores tolerancias dimensionales, mejores acabados superficiales y propiedades mecánicas mejoradas.

**Elevado  
coste inicial  
del molde**

**Formas  
complejas**

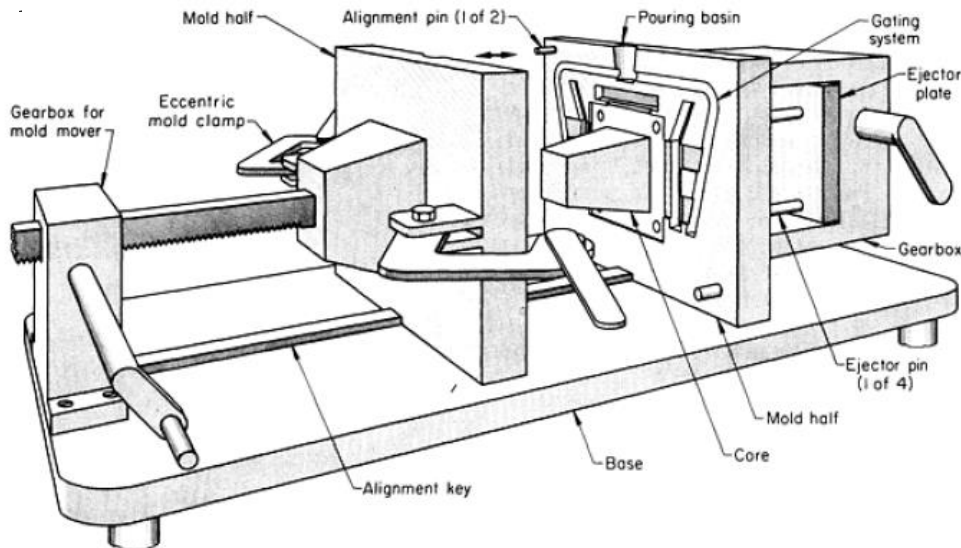
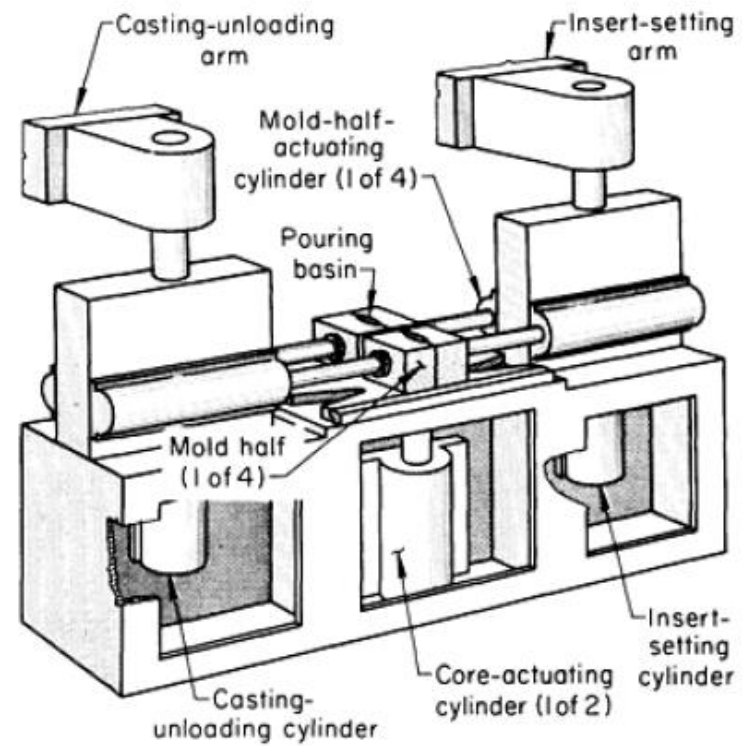
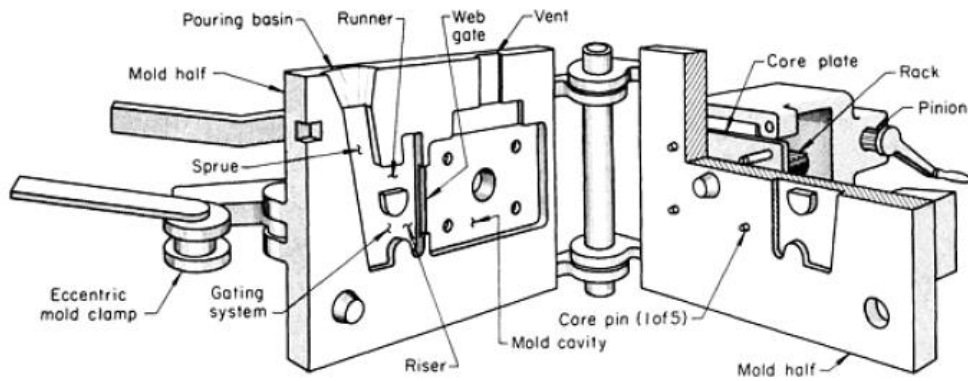
**Protección del  
material del  
molde**



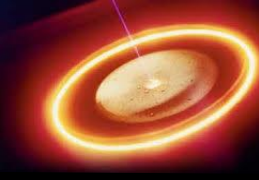


# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## MOLDES PERMANENTES - PROCESO MANUAL Y SEMIAUTOMÁTICO

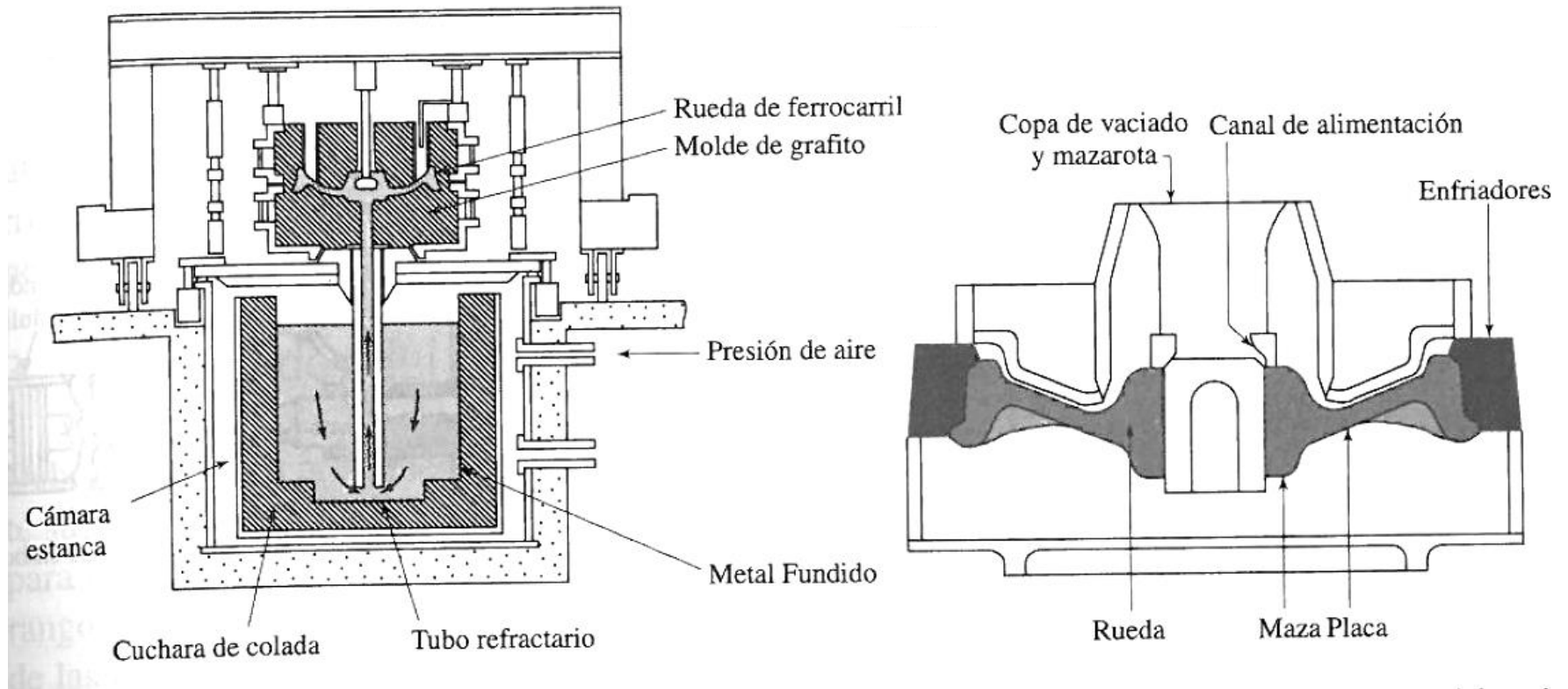


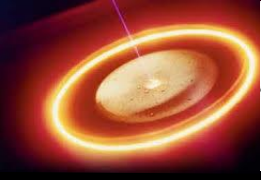




# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

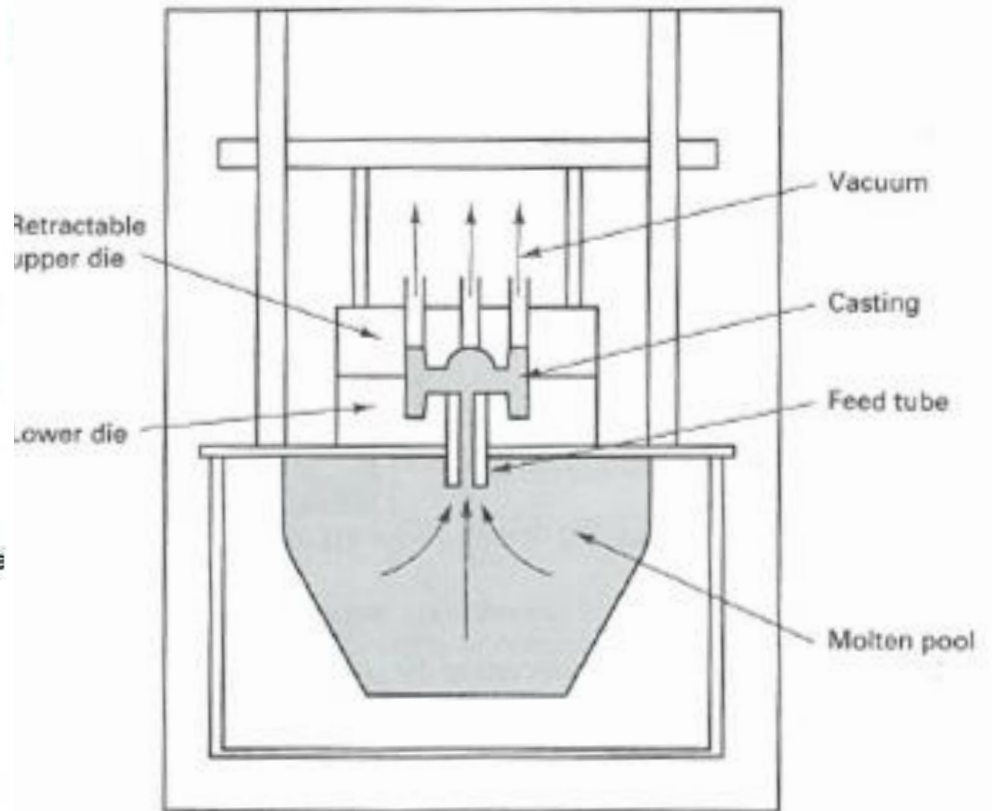
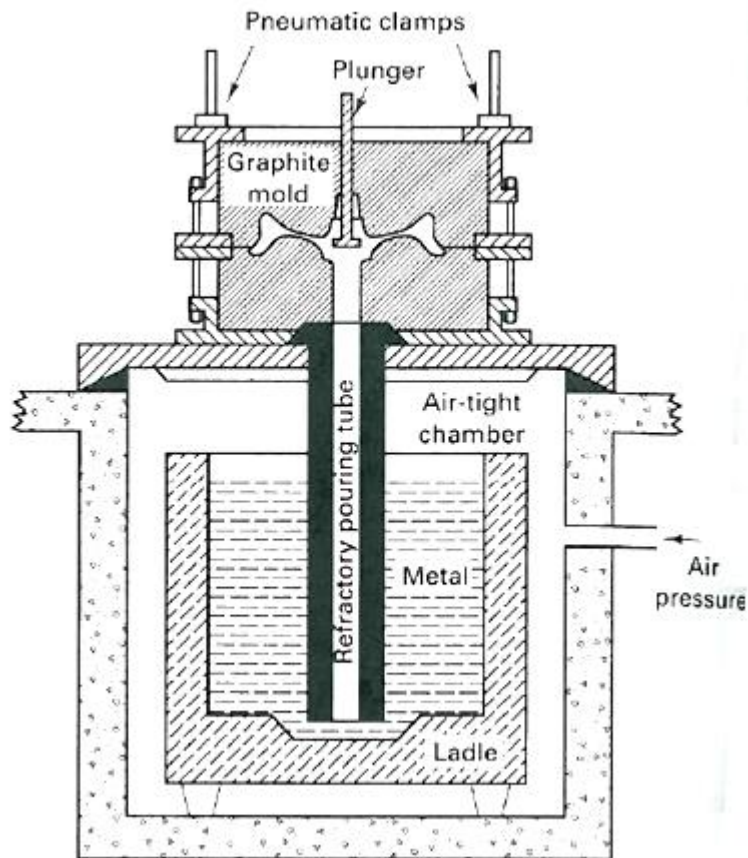
## MOLDES PERMANENTES - PROCESO AUTOMATIZADO

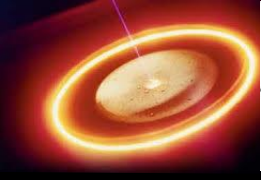




# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## MOLDES PERMANENTES - PROCESO AUTOMATIZADO





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### MOLDES PERMANENTES – FUNDICIÓN A PRESIÓN (Die Casting)

Inyección del metal fundido bajo la acción de presión para un llenado a mayor velocidad

**MATERIALES:** Muy empleado en aleaciones de aluminio, zinc, magnesio y cobre

**MOLDE:** Presión, transmisión de calor, facilidad para la extracción de la pieza

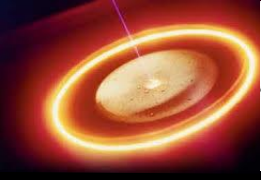
**SISTEMA DE PRESIÓN:** Controlar velocidad y aceleración para controlar el flujo durante el llenado

**CONSIDERACIONES:** Reactividad con el sistema hidráulico de presión, pérdidas de temperatura durante la inyección, eliminación del gas de los conductos. Vida limitada del molde debido al desgaste (erosión), agrietamiento

DOS SISTEMAS BÁSICOS:

**PROCESO EN  
CÁMARA FRÍA**

**PROCESO EN  
CÁMARA CALIENTE**

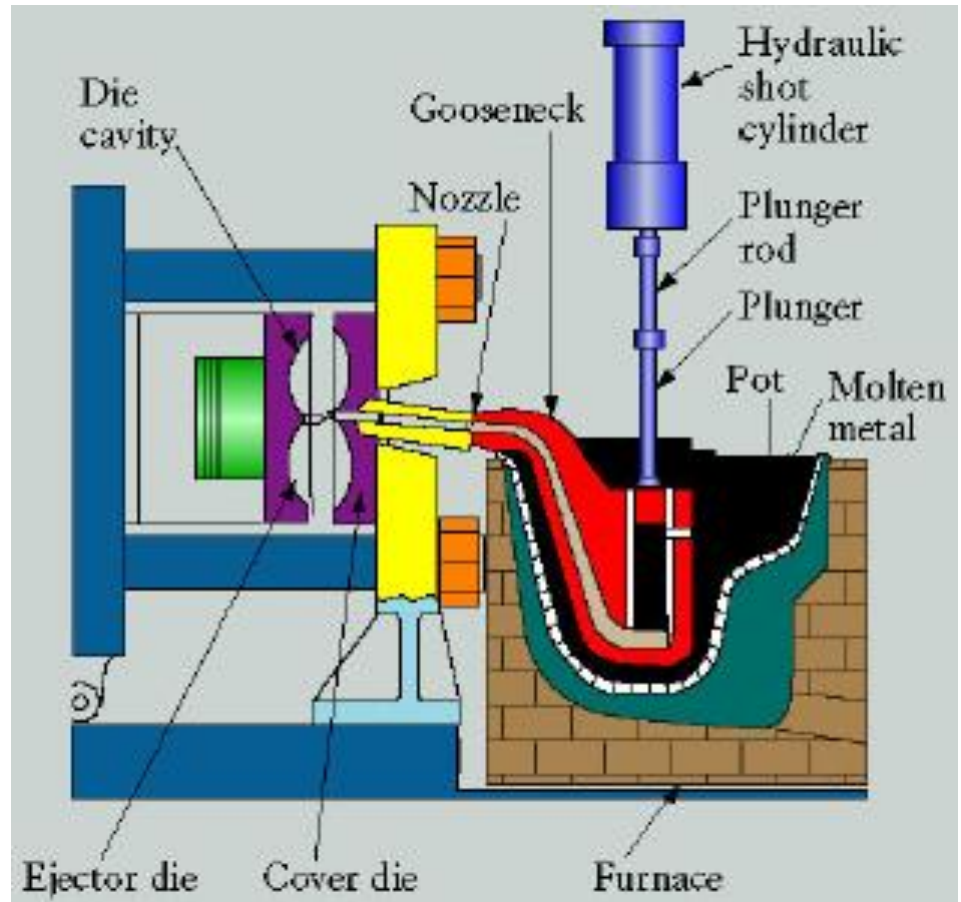


## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

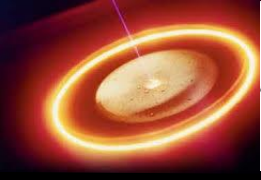
### MOLDES PERMANENTES – FUNDICIÓN A PRESIÓN (Die Casting)

#### PROCESO EN CÁMARA CALIENTE

- Presiones más bajas que las de cámara fría → (15 – 35 MPa)
- Generalmente usado en metales con menor punto de fusión (zinc, magnesio, estaño o plomo)
- Ciclos de procesamiento rápidos (200 hasta varios miles por hora) dependiendo del componente y el material



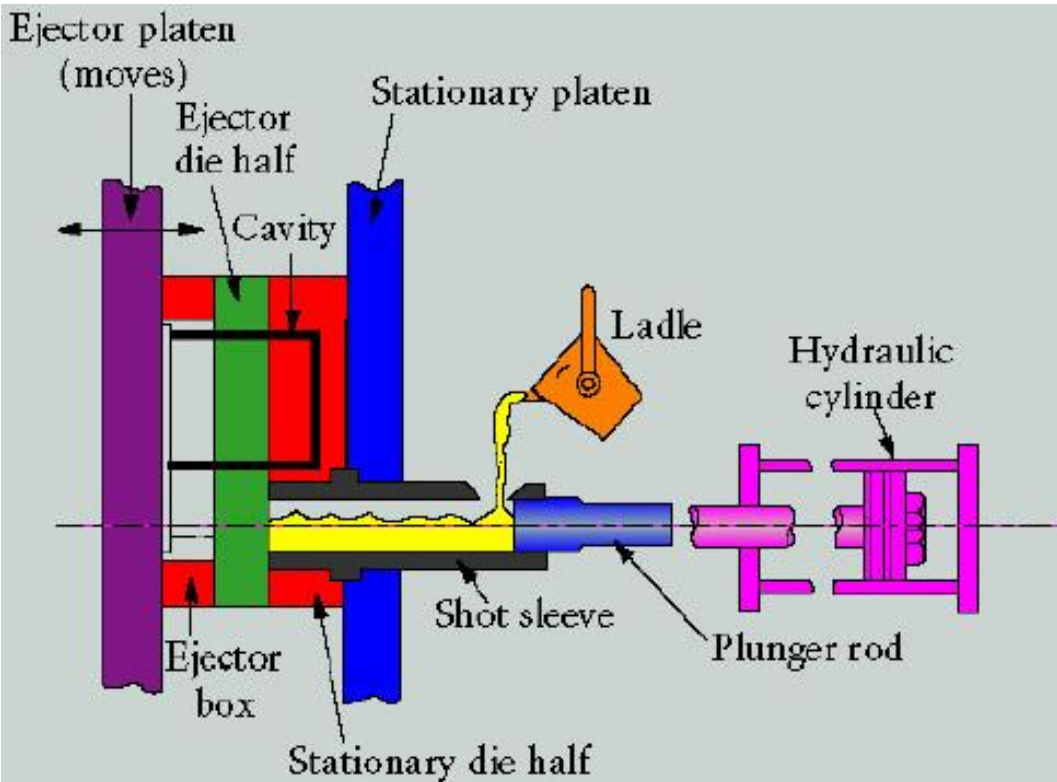




## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### MOLDES PERMANENTES – FUNDICIÓN A PRESIÓN (Die Casting)

#### PROCESO EN CÁMARA FRÍA



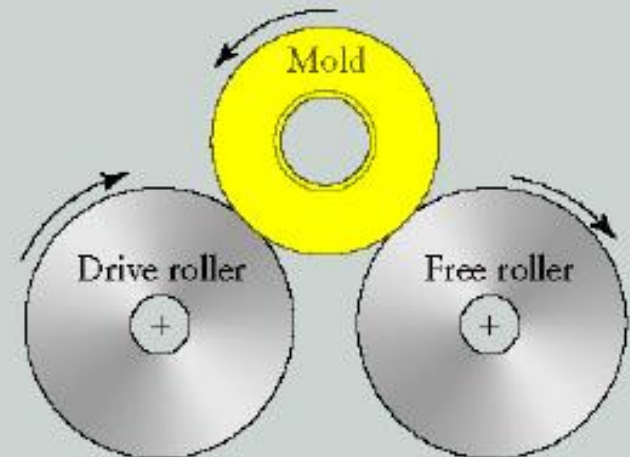
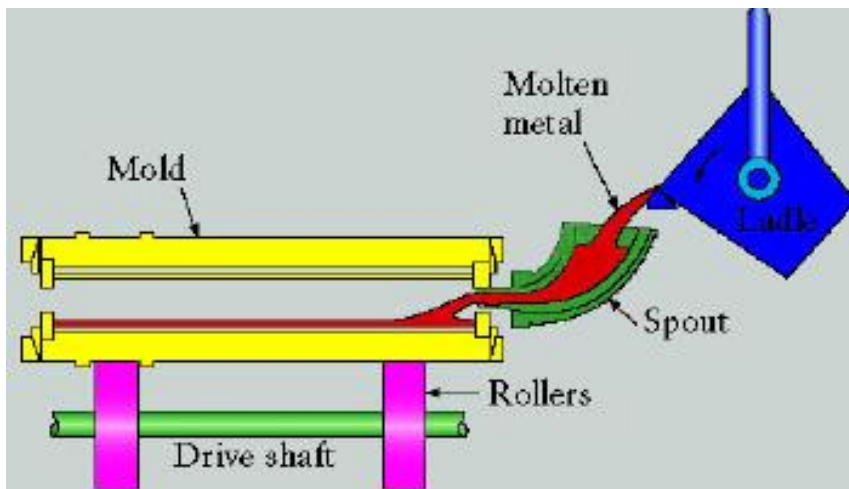
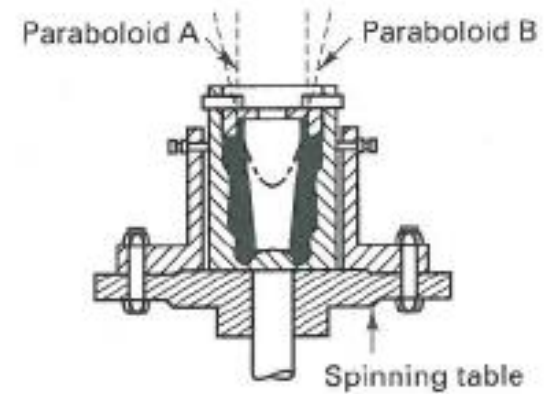
- Presiones más elevadas durante la fabricación (hasta 150 Mpa)
- Cámara de inyección no precalentada
- Generalmente se usa para aleaciones con un punto de fusión algo superior (aluminio, cobre, o incluso algunas aleaciones de magnesio)



## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### MOLDES PERMANENTES – COLADA CENTRÍFUGA

- Piezas con simetría cilíndrica → Anillos, tubos, camisas de cilindro motor
- La forma externa se puede variar mediante variaciones en el molde
- Problemas asociados a impurezas de diferente densidad
- La velocidad de giro puede variar la forma de la pieza obtenida final





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

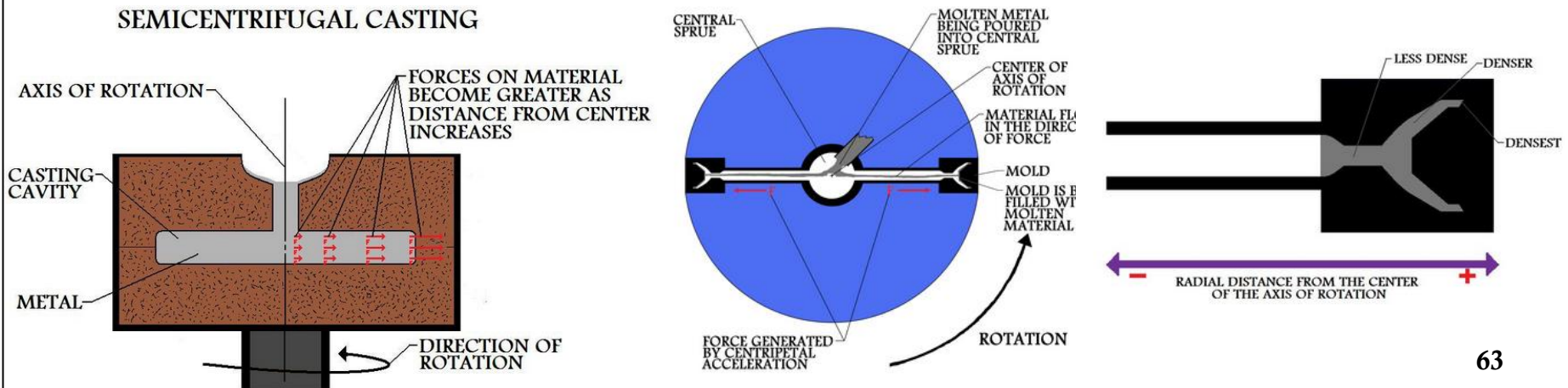
### MOLDES PERMANENTES – COLADA SEMICENTRÍFUGA / CENTRIFUGADA

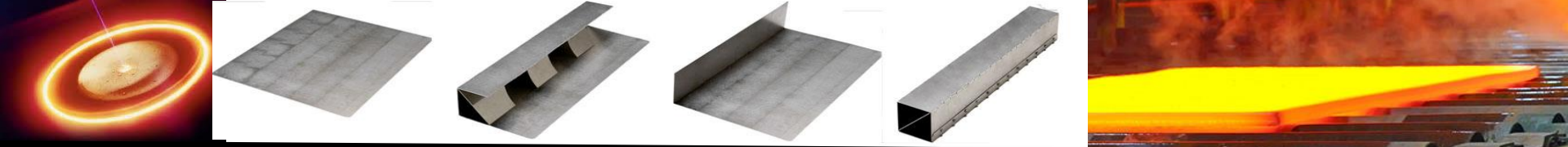
- SEMICENTRIFUGA: Piezas de fundición sólidas → Mediante rotación se rellena la cavidad

Parte central con menor calidad → Mecanizado de esa zona

- CENTRIFUGADA: La fuerza centrífuga obliga al material fundido a rellenar cavidades situadas en los extremos → no son piezas de revolución
- Se requiere menos velocidad que para la centrífuga pura

#### SEMICENTRIFUGAL CASTING





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### SQUEEZE CASTING

- Solidificación de piezas a muy alta presión (55 – 100 MPa) → Los gases se mantienen en solución, elevado contacto matriz / metal, facilidad de la alimentación
- El sistema incluye una matriz, punzón y eyector
- Mayor facilidad para tener un buen detalle acabado superficial y rellenar formas complejas
- Fácilmente automatizable

Volumen de  
fundido

Temperatura  
de utillaje

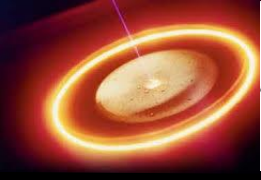
Presión  
ejercida

Temperatura  
de colada

Tiempo

Lubricación

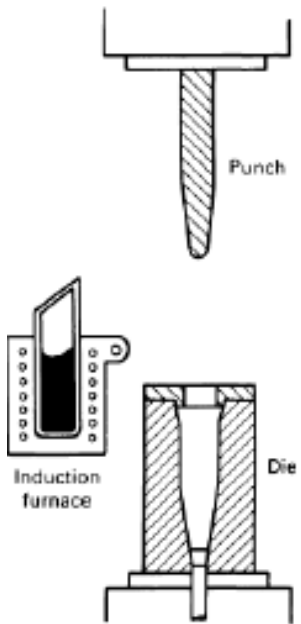




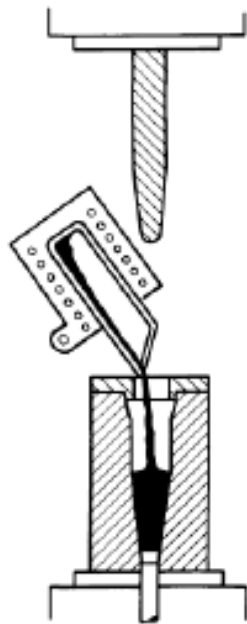
# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## SQUEEZE CASTING

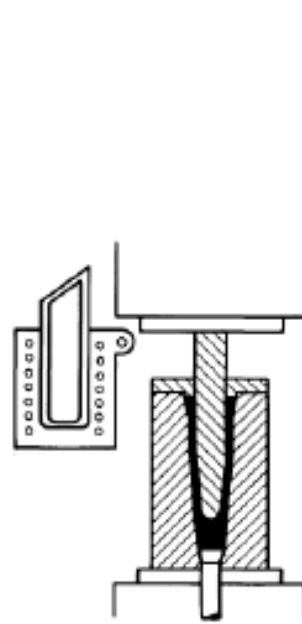
**Fusión,  
lubricación y  
precalentamiento**



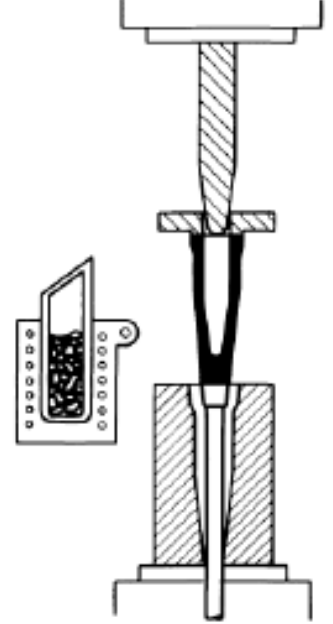
**Vertido del  
fundido en la  
matriz**

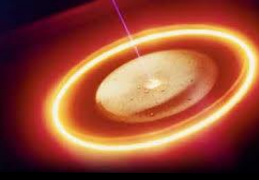


**Cierre del utillaje,  
presión y  
solidificación**



**Extracción y  
limpieza**

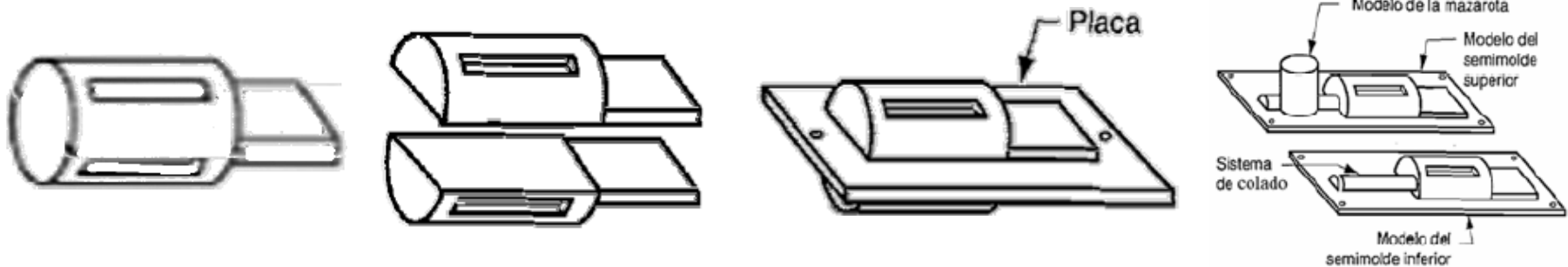




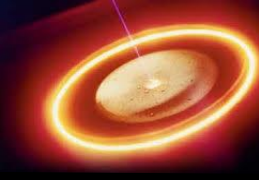
## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### MOLDE DE ARENA

- Uno de los procesos más utilizados
- Gran versatilidad → Tamaño, número de piezas, tipos de aleaciones permitidas
- Requiere de un patrón o modelo previo (plástico, metal u otro material) →  
→ Patrones sólidos o divididos

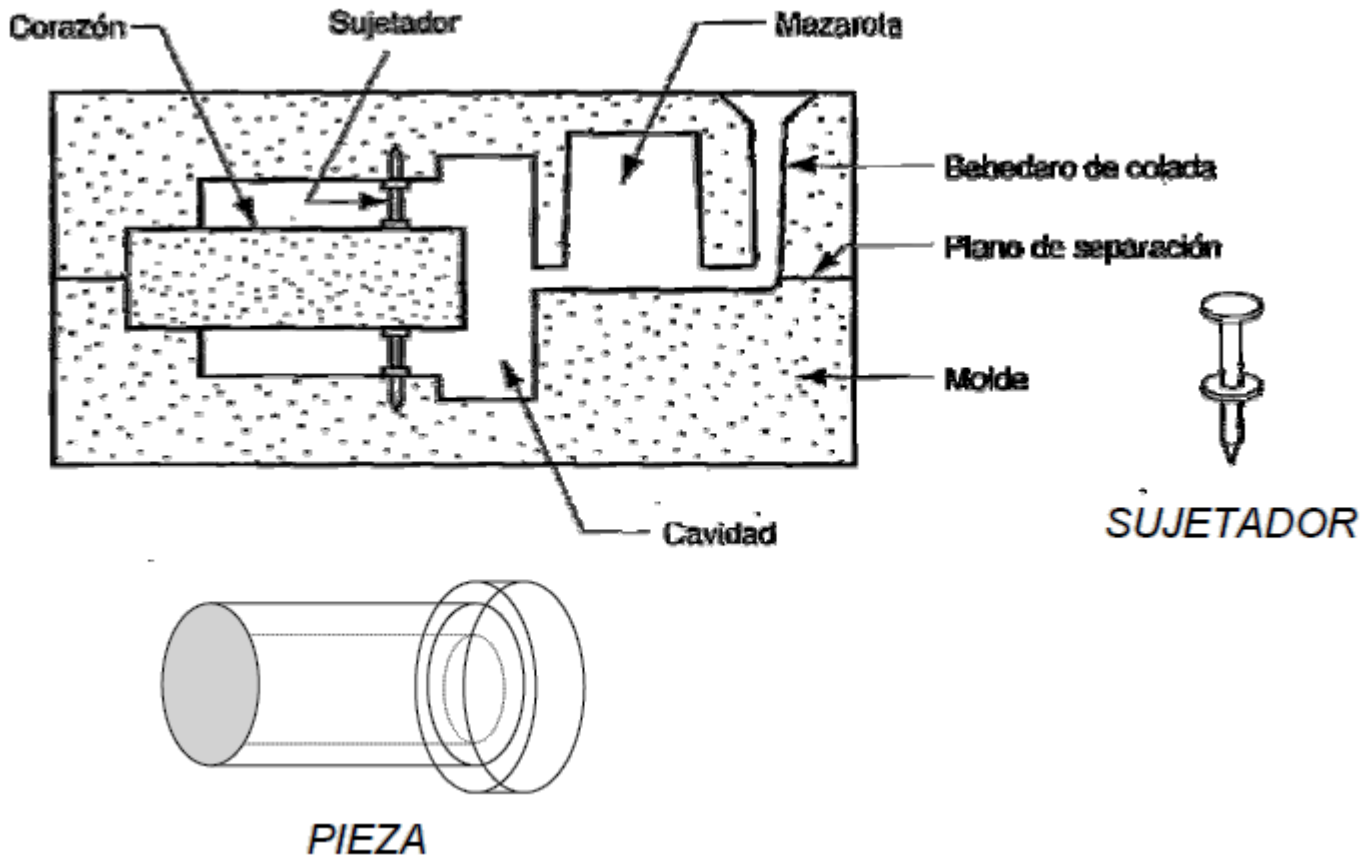


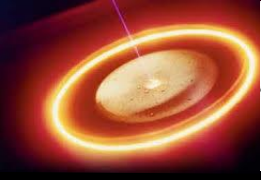
- El patrón puede requerir de un corazón o núcleo “core” si hay una cavidad interna vaciada. Pueden requerir soportes para sujetarlos (sujetadores)



# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## MOLDE DE ARENA





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### MOLDE DE ARENA - CARACTERÍSTICAS

Basados en sílice o sílice mezclada con otros minerales

**REFRACTARIA**

**TAMAÑO DE  
PARTÍCULA**

**FORMA DE  
PARTÍCULA**

**AGLUTINANTES**

**ADITIVOS**

**OTROS TIPOS DE  
COMPACTACIÓN: PRESIÓN  
NEUMÁTICA, PROYECCIÓN**

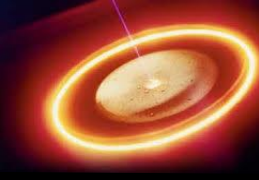
**COMPACTACIÓN  
MANUAL**

**RESISTENCIA**

**PERMEABILIDAD**

**ESTABILIDAD  
TÉRMICA**





# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## OTROS MOLDES DESECHABLES

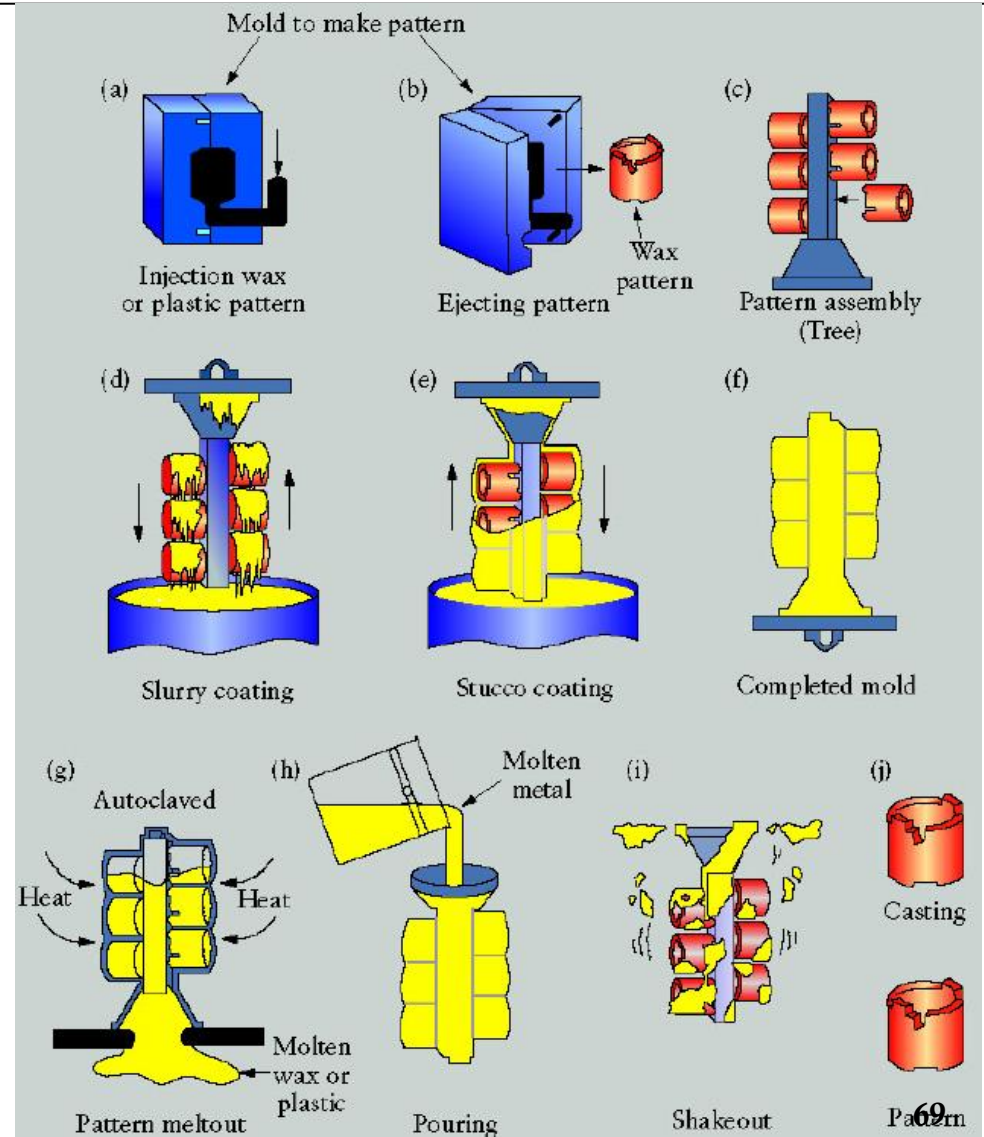
### INVESTMENT CASTING (FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO)

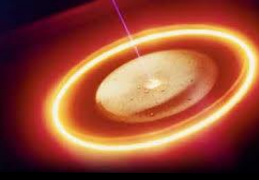
### MOLDEO A LA CERA PERDIDA

-Buenos resultados en cuanto a: calidad superficial, tolerancia dimensional y variabilidad de aleaciones y formas posibles

- Número elevado de pasos que complican el proceso → Limitaciones en coste, tiempo y tamaño de las piezas

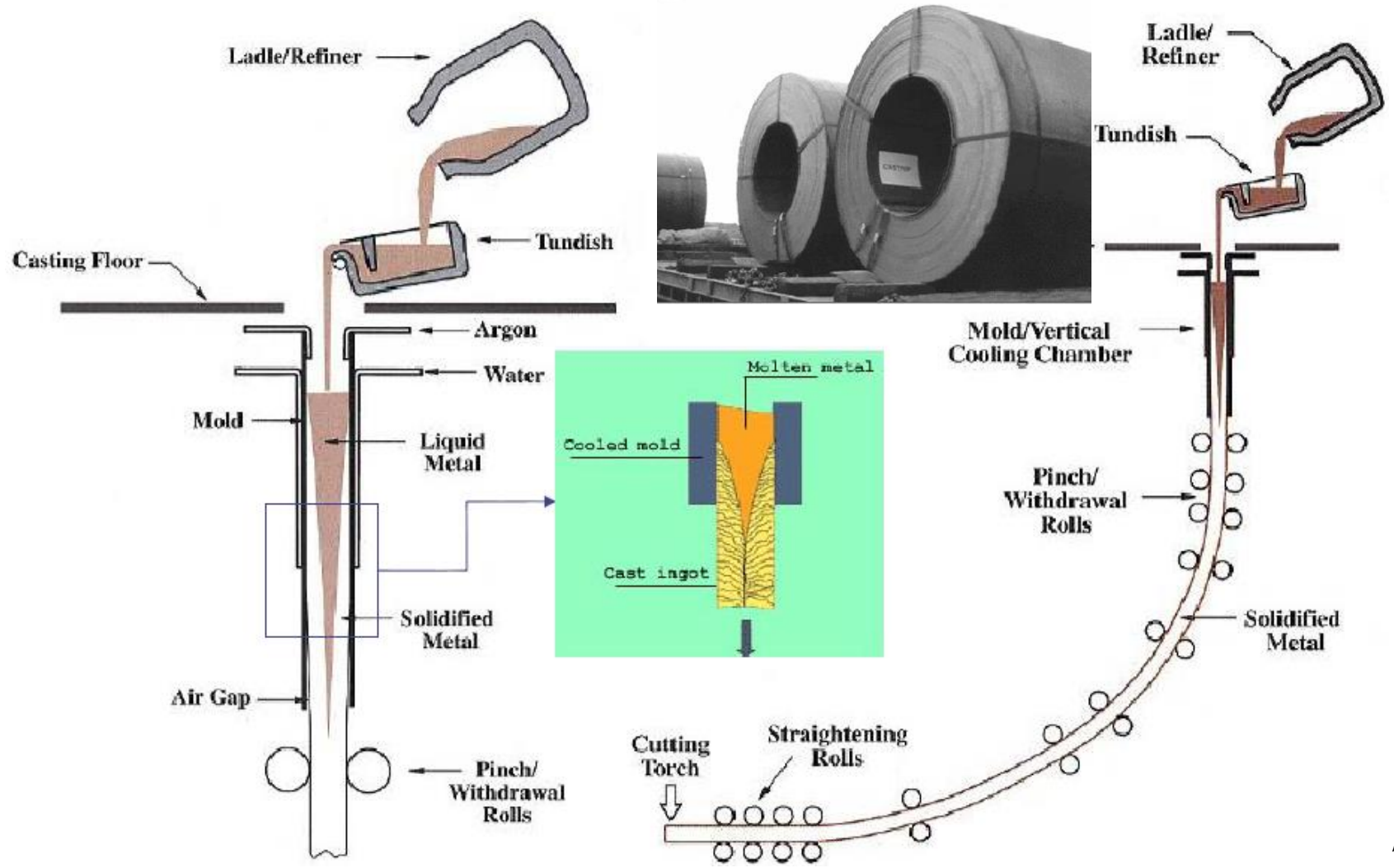
- Al emplear cera, se puede reutilizar

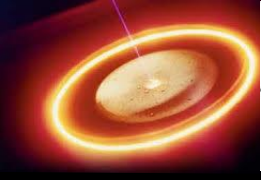




# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## PROCESO DE COLADA CONTINUA





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### EL PROCESO DE FUNDIDO

Elevar a una temperatura ( $T$ ) por encima de la temperatura de fusión ( $T_m$ ). La diferencias de temperaturas se denomina “sobrecalentamiento”

CONSUMO ENERGÉTICO:  $Q_1 + Q_2 + Q_3$

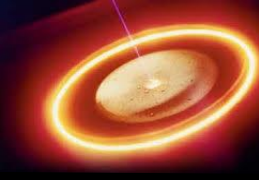
$Q_1$ : Calor específico sólido

$Q_2$ : Calor latente

$Q_3$ : Calor específico líquido

Durante el tiempo que el metal está fundido pueden producirse reacciones que den lugar a defectos en el material final:

- Reacciones con el oxígeno
- Gas disuelto en el metal fundido



# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## FLUIDEZ DEL METAL FUNDIDO

VERTIDO DEL MOLDE → FLUJO → SOLIDIFICACIÓN

## COLABILIDAD O CAPACIDAD DE FUNDICIÓN

VISCOSIDAD

TENSIÓN SUPERFICIAL

INCLUSIONES

PATRÓN DE SOLIDIFICACIÓN

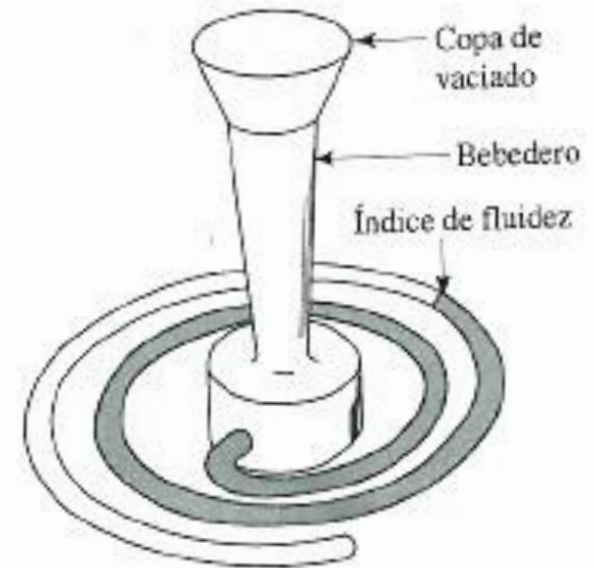


DISEÑO DEL MOLDE

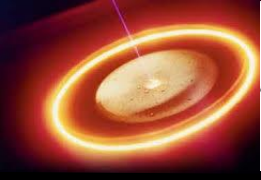
MATERIAL Y SUPERFICIE

TRANSFERENCIA DE CALOR

VELOCIDAD DE VERTIDO

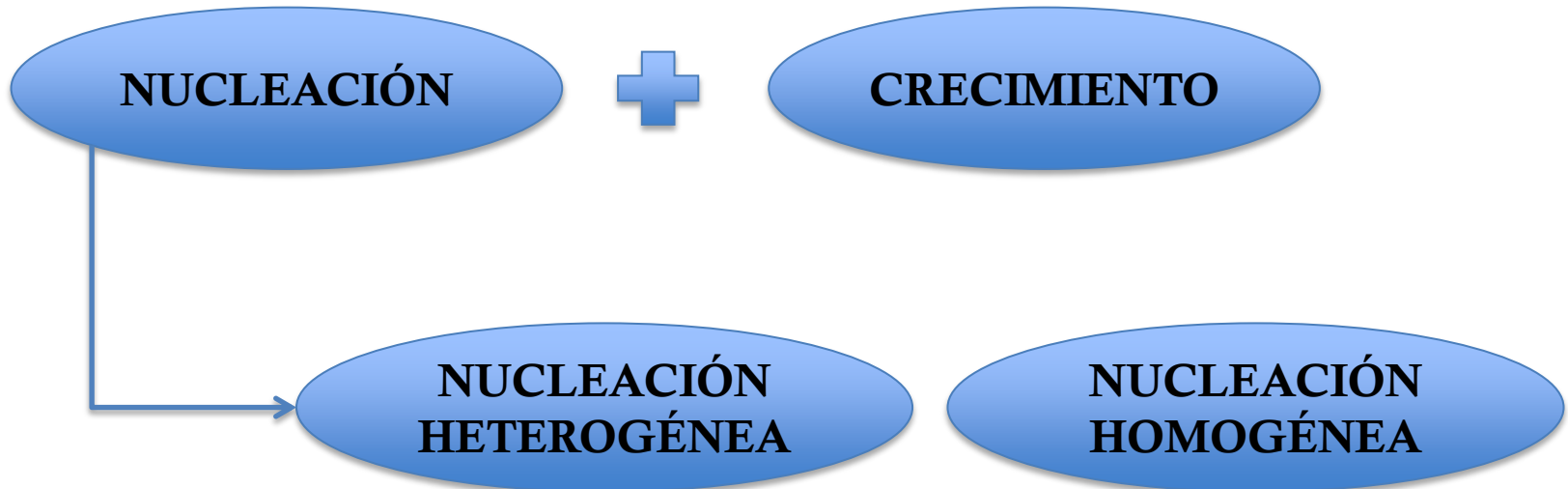


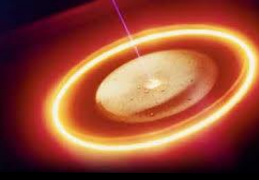




## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### EL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN

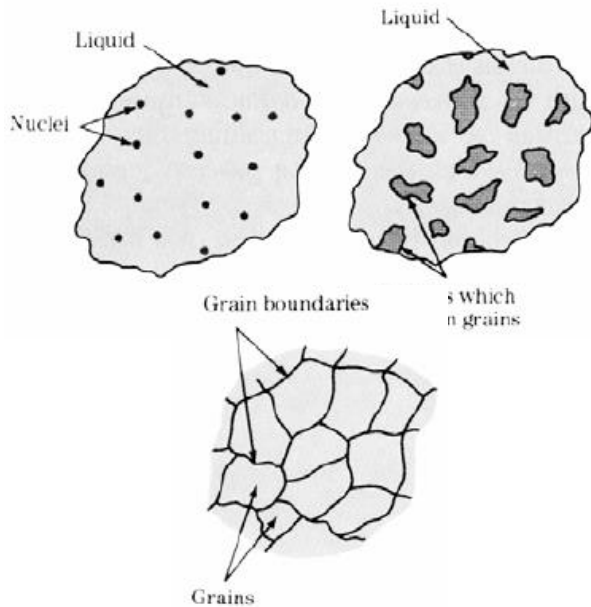




# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

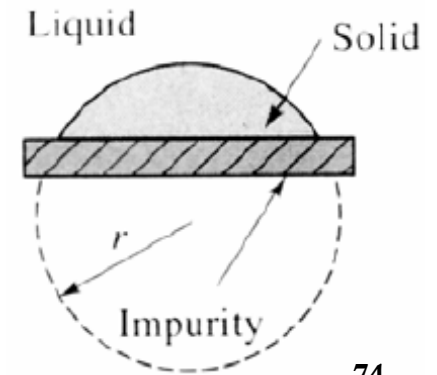
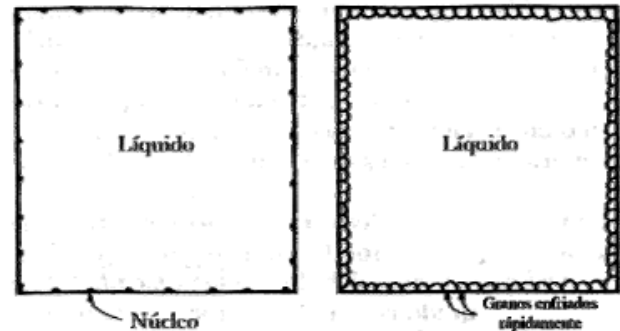
## NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA

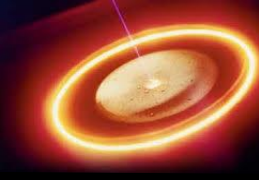
- No existen lugares preferenciales para la nucleación
- Requiere un subenfriamiento
- Subenfriamiento → Velocidad de nucleación



## NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA

- Impurezas, paredes del molde → Proporcionan lugares con una menor energía para nuclear
- Son los lugares más comunes para la nucleación
- Se requiere un menor subenfriamiento para la nucleación



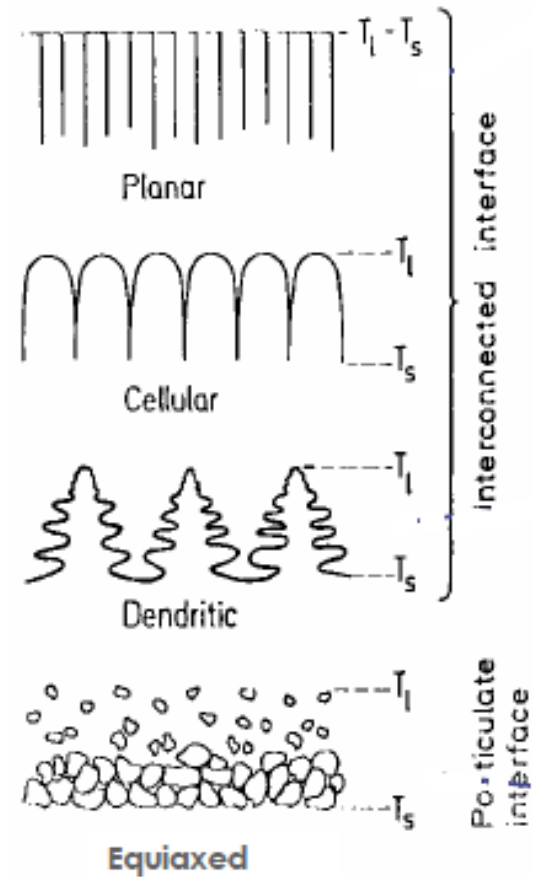
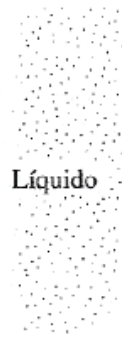
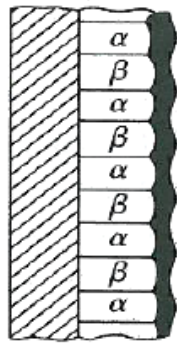
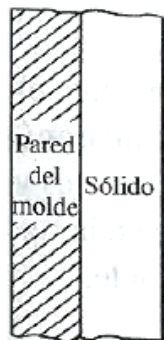
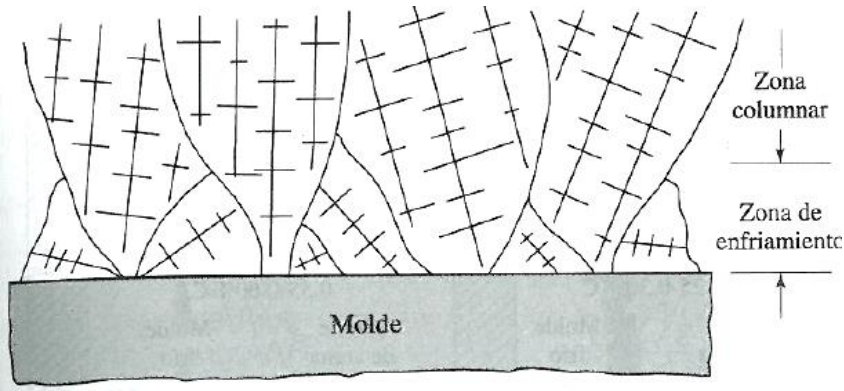


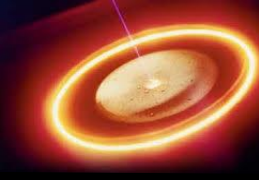
# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## CRECIMIENTO

Se produce en la dirección del flujo de calor

El frente de solidificación puede tener varias formas dependiendo del número de nucleaciones, velocidad de crecimiento, composición, etc.





# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## PARÁMETROS DE LA SOLIDIFICACIÓN

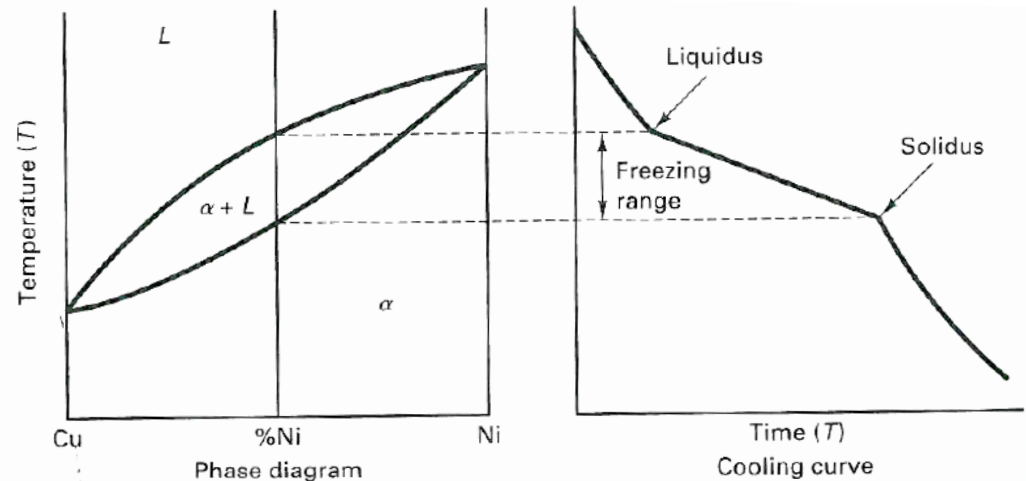
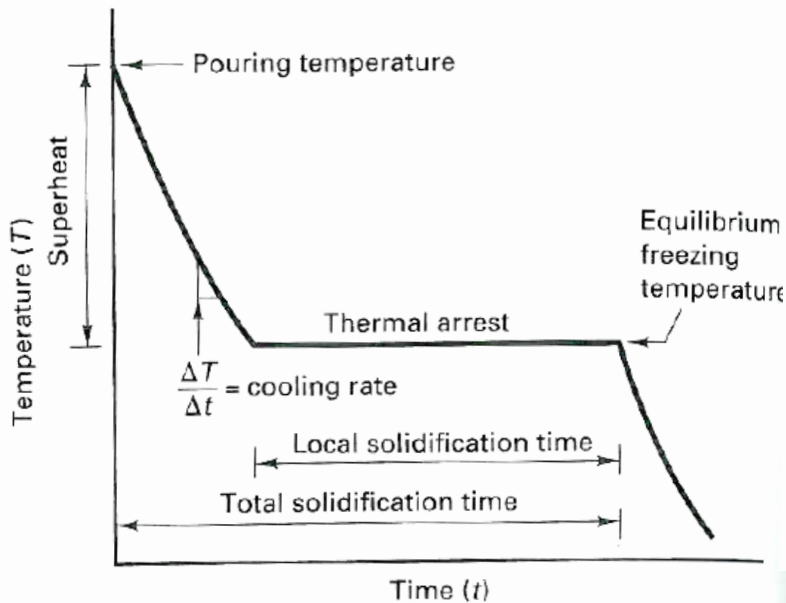
TEMPERATURA DE COLADA

TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

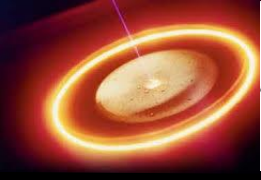
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

SOBRECALENTAMIENTO

RANGO DE SOLIDIFICACIÓN







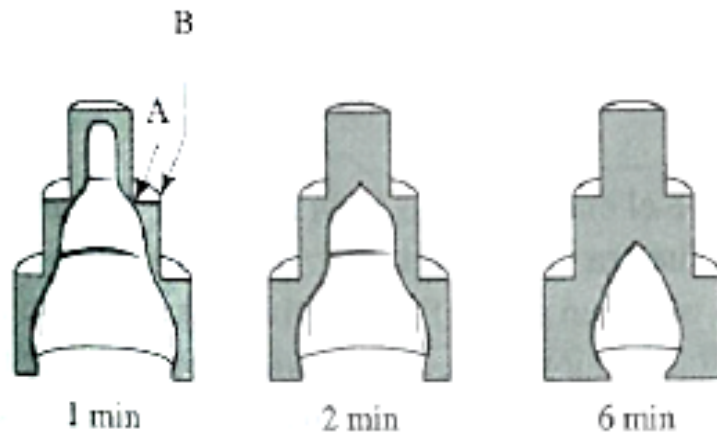
## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

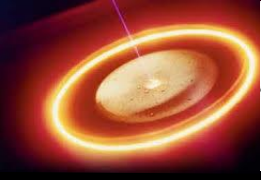
### TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

$$t_s = B \left( \frac{V}{A} \right)^n$$

B: Función del material vertido (densidad, capacidad calorífica, calor latente), molde (densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica y espesor).

- Influencia de la geometría





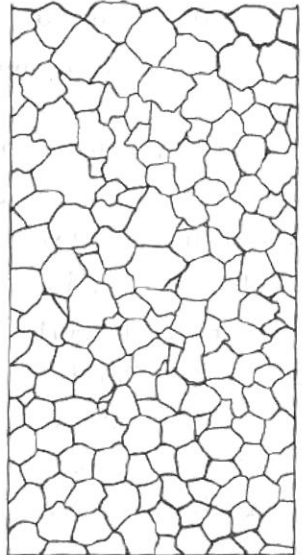
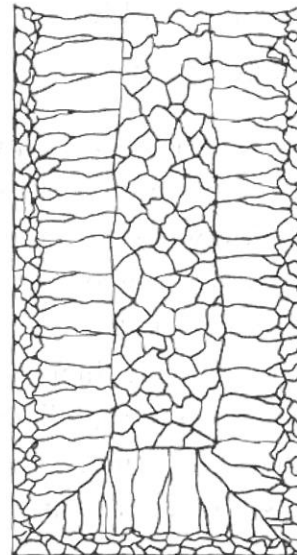
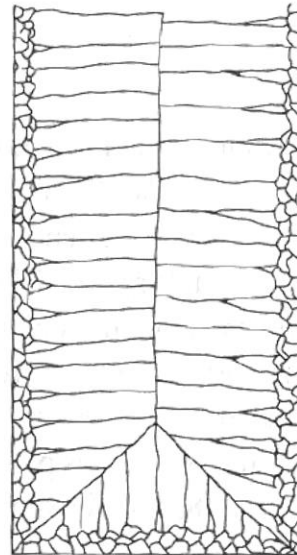
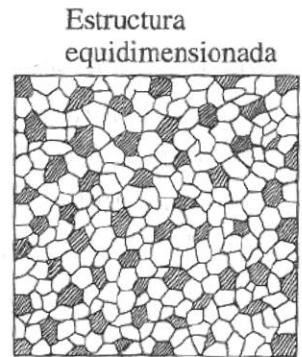
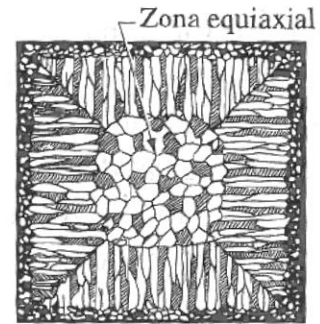
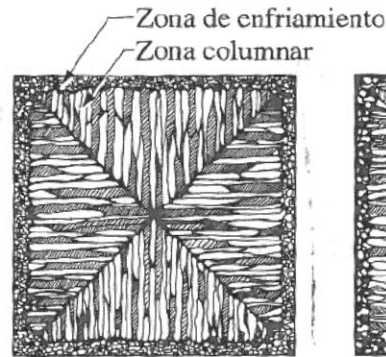
# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## MICROESTRUCTURA DE LAS PIEZAS DE COLADA

**ZONA EQUIAXIAL EXTERIOR**  
*(chill zone)*

**ZONA COLUMNAR**

**ZONA EQUIAXIAL INTERIOR**



**DIFERENCIAS EN CUANTO A ISOTROPÍA/ANISOTROPÍA**

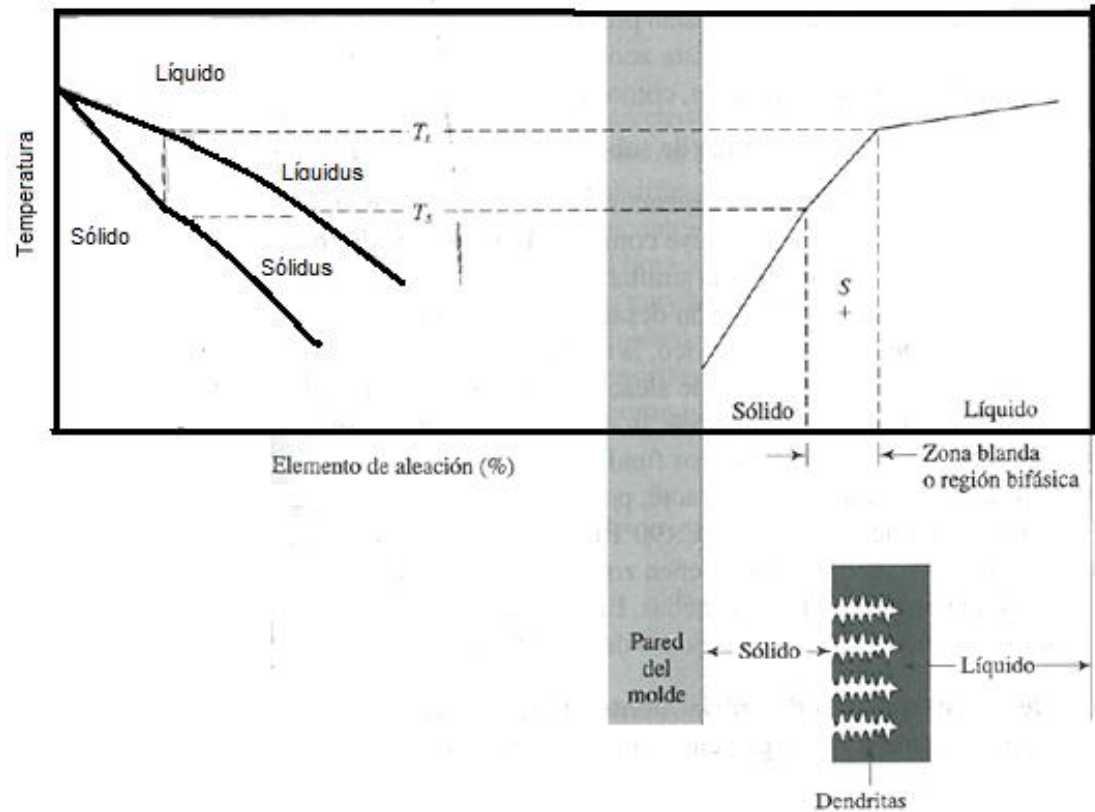


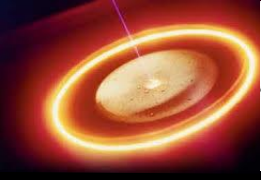
## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### Estructura en aleaciones → Dendritas

Rango de temperaturas de solidificación  $T_1 - T_s$

Cinética de la interfaz líquido-sólido → Relación  $G/R$  (gradiente térmico y rapidez de movimiento de la interfaz líquido-sólido) →  $G \sim 10^2$  a  $10^3$  k/m ;  $R \sim 10^{-3}$  -  $10^{-4}$





## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### DEFECTOS EN COLADA

Tienen dos consecuencias principales:

CONSIDERACIONES ESTÉTICAS y REDUCCIÓN DE PROPIEDADES

Existen multitud de ejemplos de defectos generalmente agrupados en categorías:

CAVIDADES

DISCONTINUIDADES

SUPERFICIE  
DEFECTUOSA

FALLOS  
DIMENSIONALES

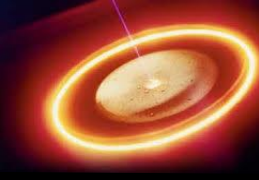
INCLUSIONES

SUPERFICIE  
DEFECTUOSA

FUNDICIÓN  
INCOMPLETA

PROYECCIONES  
METÁLICAS





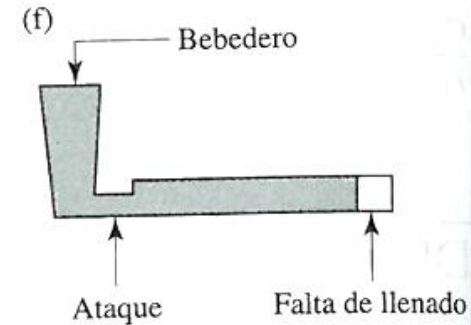
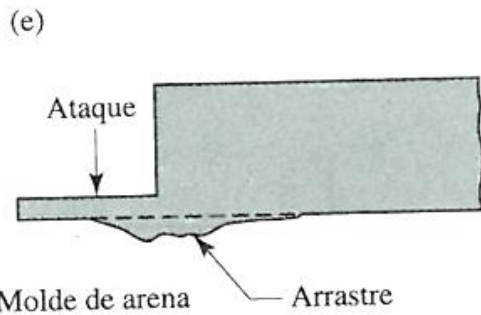
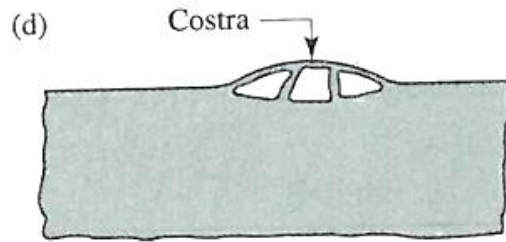
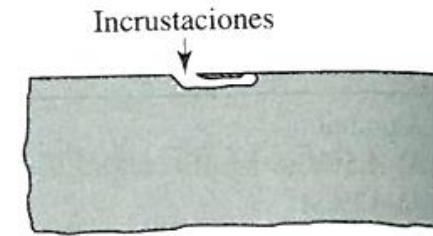
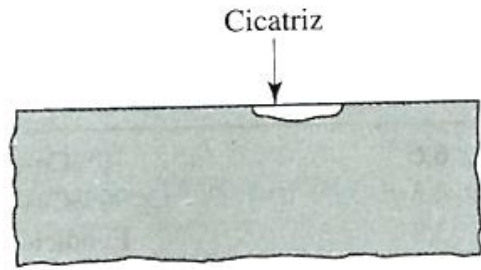
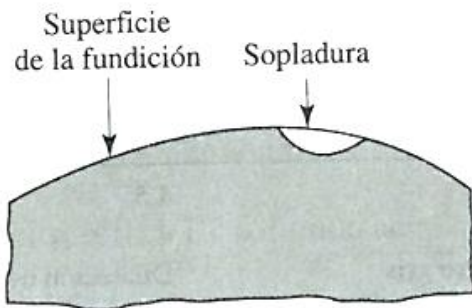
# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

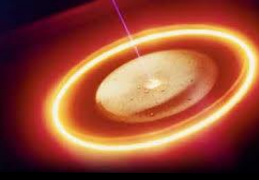
## DEFECTOS EN COLADA

Tienen dos consecuencias principales:

### CONSIDERACIONES ESTÉTICAS y REDUCCIÓN DE PROPIEDADES

Existen multitud de ejemplos de defectos generalmente agrupados en categorías:





# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## CONTRACCIÓN

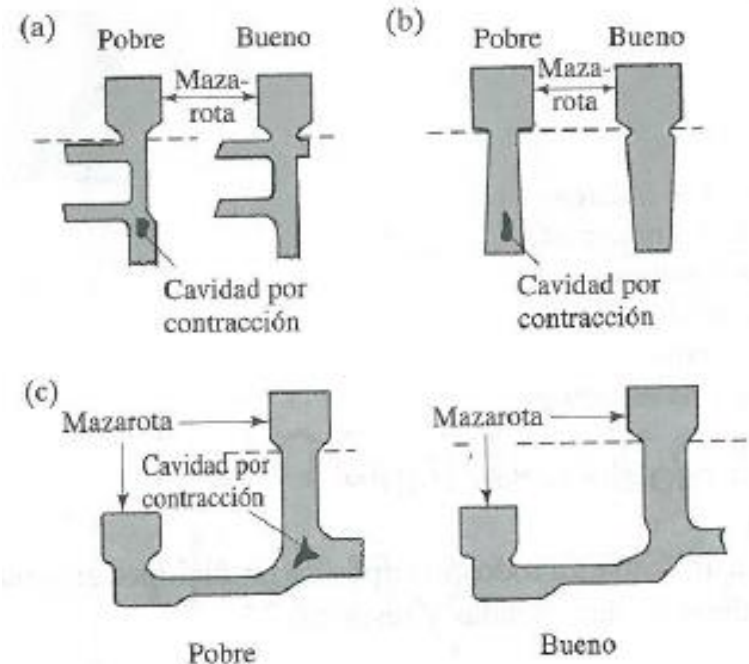
Contracción previa a la solidificación

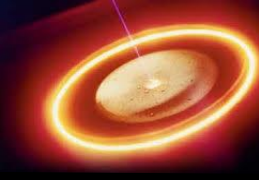
Contracción durante el cambio de fase

Contracción durante la etapa de enfriamiento

Metal or alloy	Volumetric solidification contraction (%)
Aluminum	6.6
Al-4.5%Cu	6.3
Al-12%Si	3.8
Carbon steel	2.5-3
1% carbon steel	4
Copper	4.9

Metal or alloy	Volumetric solidification contraction (%)
70%Cu-30%Zn	4.5
90%Cu-10%Al	4
Gray iron	Expansion to 2.5
Magnesium	4.2
White iron	4-5.5
Zinc	6.5





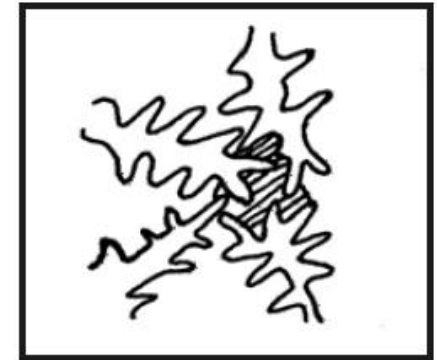
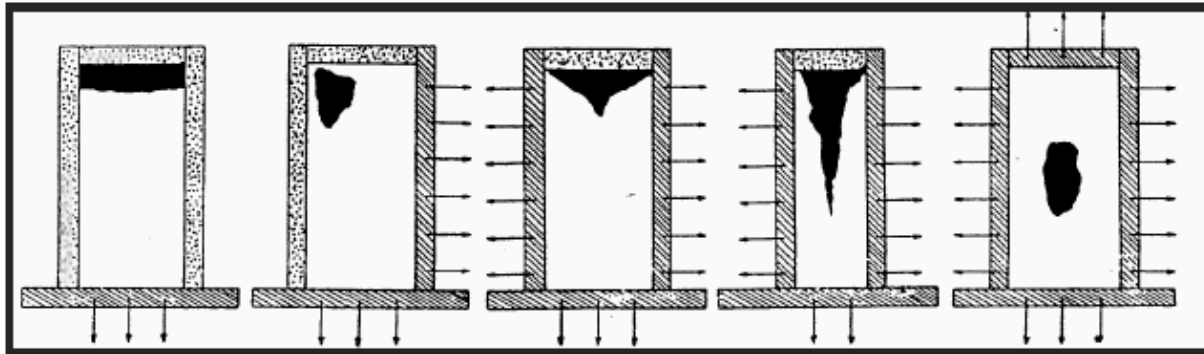
# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## Defectos en colada

Por efectos de la contracción → RECHUPES

- MACRORRECHUPE
- MICRORRECHUPE

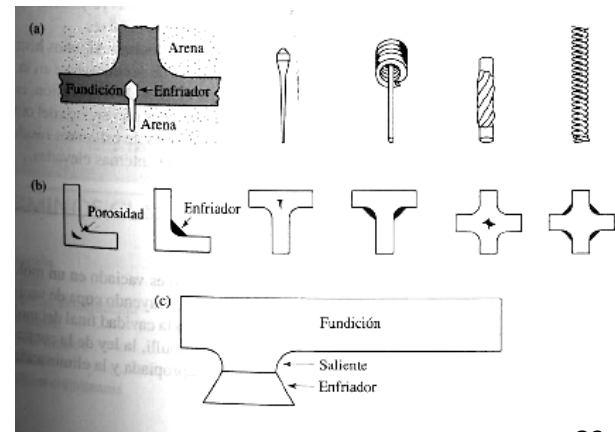
Cavidad por contracción

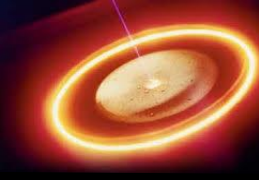


Utilización de enfriadores externos e internos en moldes de arena

Modificaciones del material del molde

Presión isostática en caliente

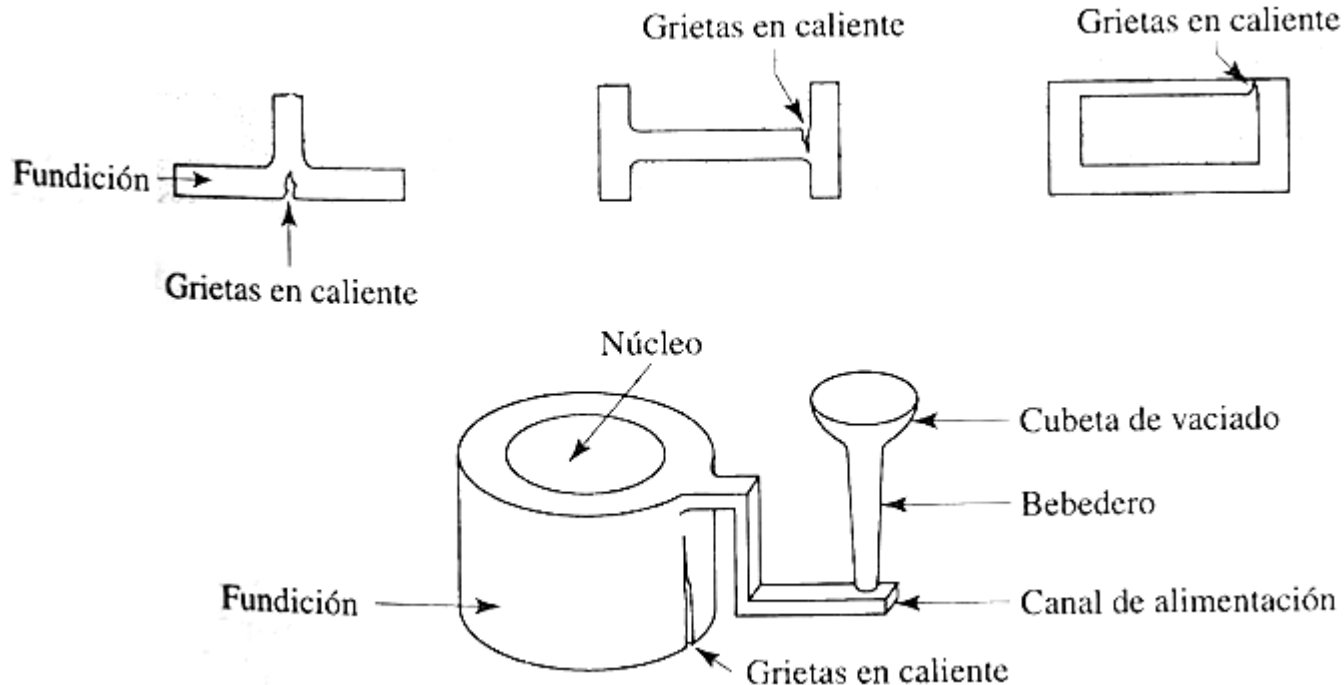




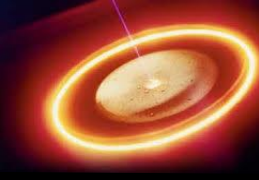
## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### Defectos en colada – Agrietamiento en caliente

La pieza no puede contraer libremente durante el enfriamiento → Tensiones → Agrietamiento → Posible solución: Control del enfriamiento en secciones críticas







# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## Defectos en colada

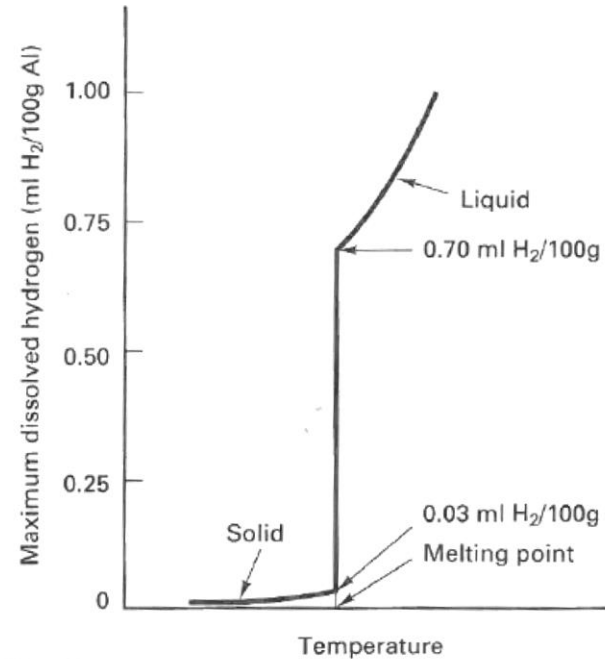
**POROSIDAD**

**GASES DISUELTOS EN EL METAL**

**GASES PRODUCTO REACCIÓN**

**ACUMULACIÓN DE GASES EN ZONAS DE POROSIDAD**

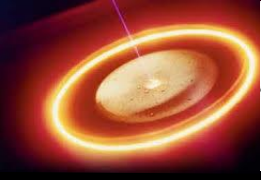
Se debe principalmente a la presencia de gases (incluido aire) o a contracciones



Colada del material en vacío

Empleo de gases inertes (lavados o purgas)

Reacción del gas para crear impurezas a eliminar



## TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

### Defectos en colada - Segregación

**MICROSEGREGACIÓN**

**SEGREGACIÓN  
COMÚN**

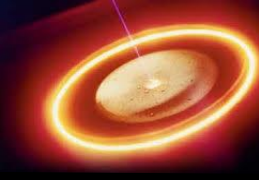
**SEGREGACIÓN  
INVERSA**

**SEGREGACIÓN  
POR GRAVEDAD**

**M  
A  
C  
R  
O**

**Diferencias en la composición entre  
diferentes zonas de la aleación metálica**

- Diferencias entre la superficie y núcleo de las propias dendritas
- Elementos de aleación menor punto de fusión en la zona central
- Menor concentración de elementos de aleación en la zona central
- Diferencias en la concentración de elementos de aleación según su densidad



# TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

## Defectos en colada - Segregación

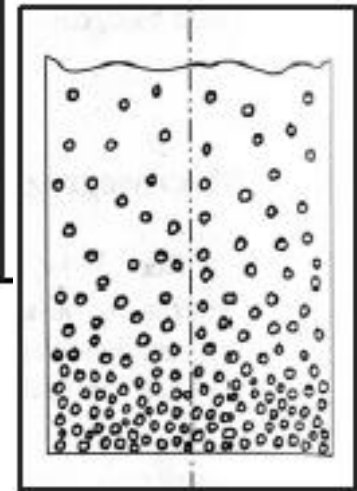
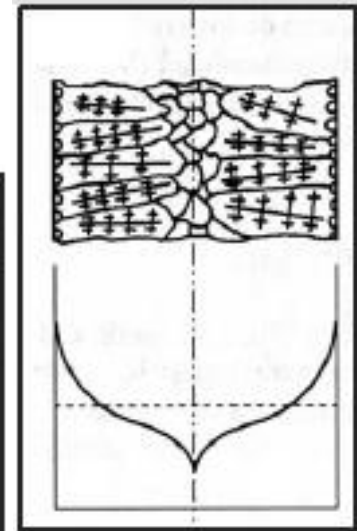
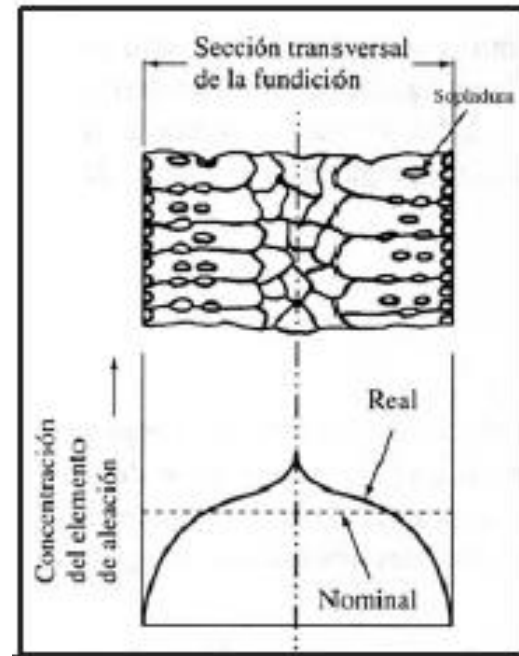
MICROSEGREGACIÓN

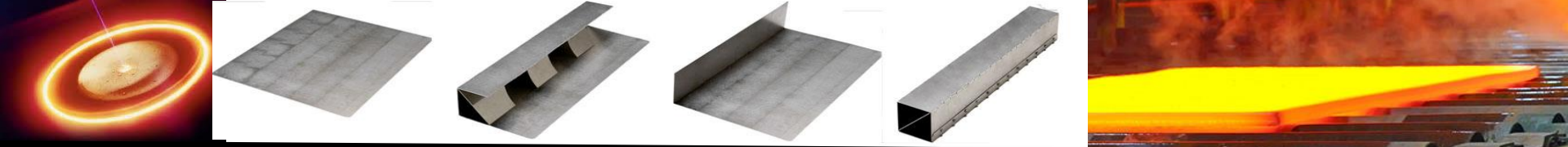
SEGREGACIÓN COMÚN

SEGREGACIÓN INVERSA

SEGREGACIÓN POR GRAVEDAD

M  
A  
C  
R  
O





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

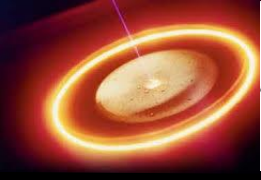
### VENTAJAS

- La velocidad del proceso suele ser elevada
- Las operaciones pueden automatizarse de manera secuencial
- Las pérdidas de material son bajas
- Propiedades físicas del material generalmente mejoradas

### DESVENTAJAS

- Existen limitaciones en cuanto a las formas que se pueden obtener
- El acabado superficial puede no ser siempre el idóneo
- Dependiendo del material y de la forma pueden requerir potencias elevadas





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

Empleo de fuerzas mediante el empleo de diferentes tipos de herramientas y utillajes para deformar plásticamente metales partiendo de una geometría sencilla inicial.

Atendiendo a diferentes criterios:

**Láminas delgadas**

**Deformación masiva  
o en volumen**

**Operaciones  
primarias**

**Operaciones  
secundarias**

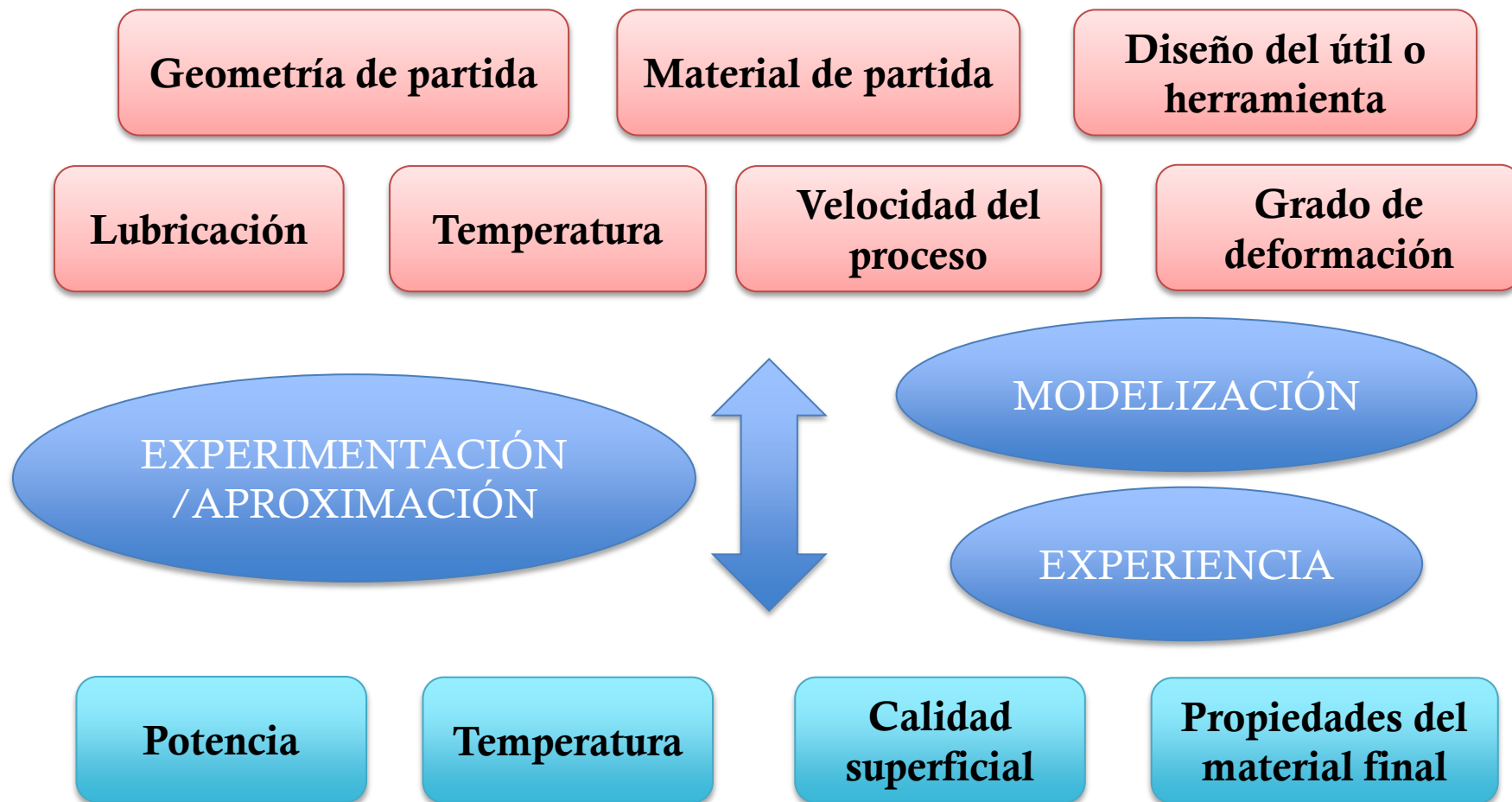
**Conformado en  
frío**

**Conformado en  
caliente**



## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### VARIABLES DEL PROCESO



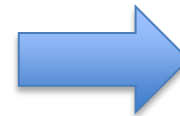


# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

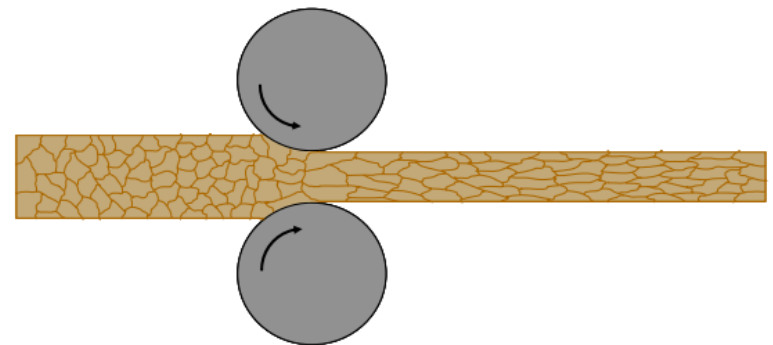
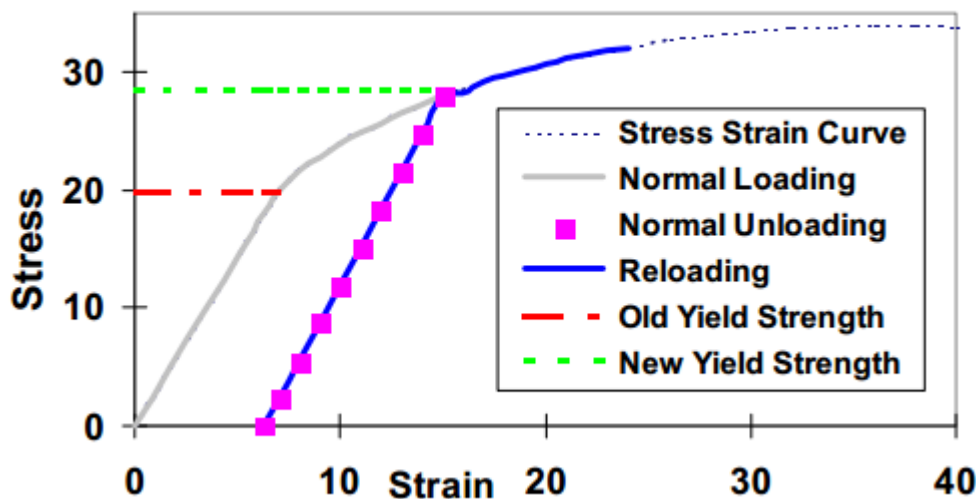
## ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

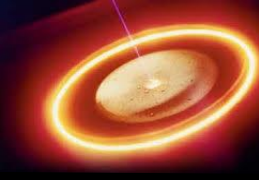
La deformación plástica en frío ocasiona un incremento en la dureza y la resistencia:

- Incremento de la densidad de dislocaciones
- Coalescencia e interferencia de dislocaciones
- Bloqueo del movimiento de las dislocaciones en las fronteras de grano



Incremento de las tensiones necesarias para generar más deformación plástica





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

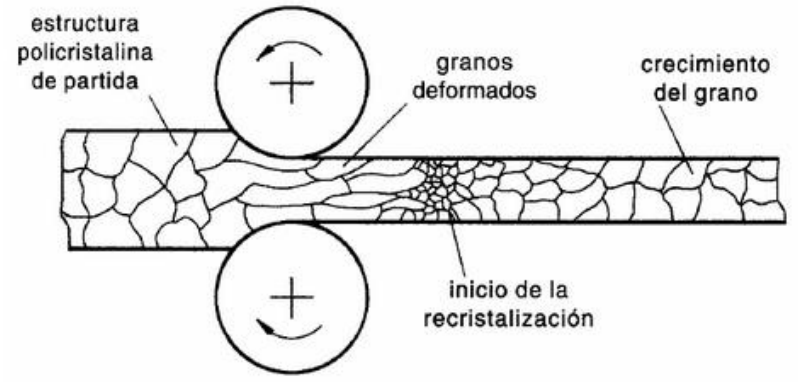
## RECRISTALIZACIÓN

Se reduce la energía interna mediante la creación de nuevos cristales → Requiere incrementar la temperatura

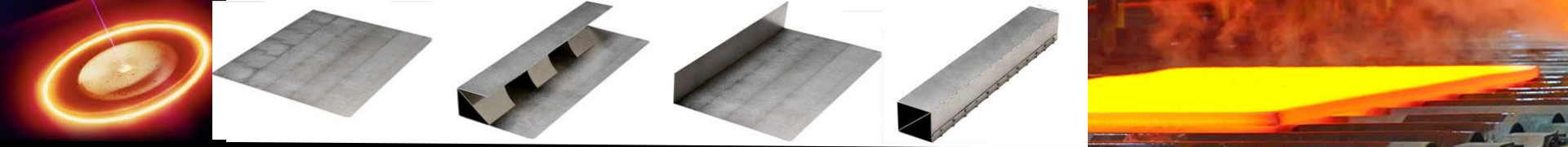
**TEMPERATURA**

La temperatura necesaria varía con el tipo de aleación  
El efecto de diferentes temperaturas depende del grado de deformación previo  
Existe una temperatura mínima a partir de la cual no ocurre la recristalización

**TIEMPO**







# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## TEMPERATURA EN EL PROCESO

**Conformado en Frío**

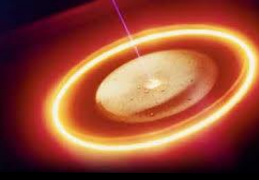
**Conformado  
intermedio/templado  
(Warm Working)**

**Conformado en Caliente**

PROCESO	$T/T_m$
Cold Working	<0,3
Warm Working	0,3-0,5
Hot Working	>0,6

## PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL CONFORMADO EN FRÍO

- Energéticamente más económico
- Mejor calidad superficial
- Resistencia, fatiga y resistencia al desgaste mejorados
- Menores problemas de contaminación
- Direccionalidad en las propiedades
- Requieren de mayores
- Mayores fuerzas requeridas para el procesado
- Ductilidad reducida en los materiales finales
- Se pueden producir tensiones residuales tras el procesado
- Importancia de la calidad superficial inicial



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## TEMPERATURA EN EL PROCESO

**Conformado en Frío**

**Conformado intermedio/templado (Warm Working)**

**Conformado en Caliente**

PROCESO	$T/T_m$
Cold Working	<0,3
Warm Working	0,3-0,5
Hot Working	>0,6

Propiedades y requerimientos	Conformado en frío	Conformado en caliente
<b>Material de partida</b>		
Limpieza del material de partida	+	-
Ductilidad del material de trabajo	-	+
Dificultad del proceso	-	+
<b>Equipo</b>		
Posibilidad de conformado en un paso	-	+
Requerimientos de fuerza y energía	+	-
Facilidad de reproducción	+	-
<b>Pieza obtenida</b>		
Calidad superficial	+	-
Tolerancias	+	-
Propiedades mecánicas (resistencia)	+	-
Anisotropía en la pieza de trabajo	+	-
Posibilidad de defectos internos y externos	-	+
Necesidad de tratamientos posteriores	+	-



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## CONFORMADOS MASIVOS O EN VOLUMEN

El material de partida puede ser un tocho, lingote, placa en la que la relación superficie-volumen cambia considerablemente

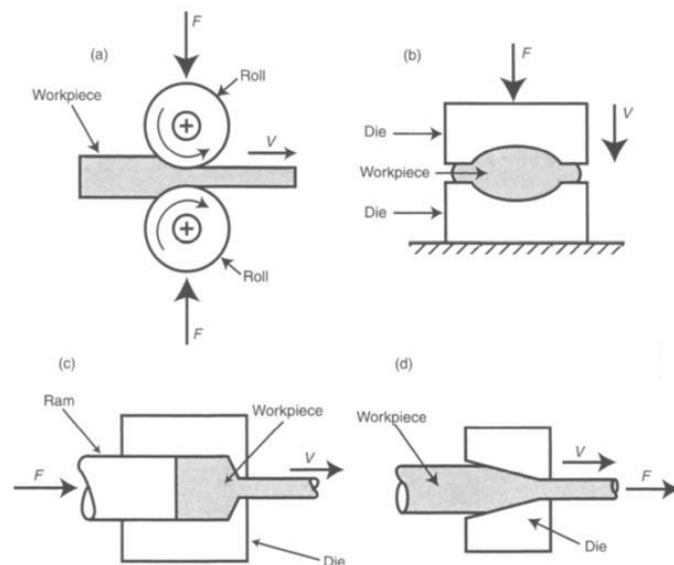
La deformación plástica suele ser mucho menor que la deformación elástica por lo que la recuperación es muy baja

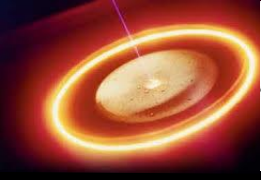
Laminado

Extrusión

Trefilado

Forja

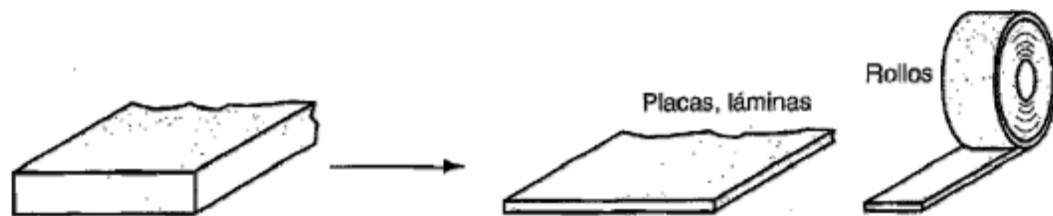




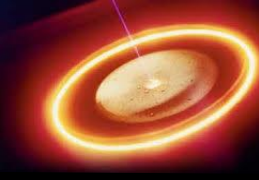
## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### LAMINACIÓN

- Fuerzas de compresión entre dos rodillos que reducen el espesor del material
- Deformación plástica muy elevada → Laminación en caliente





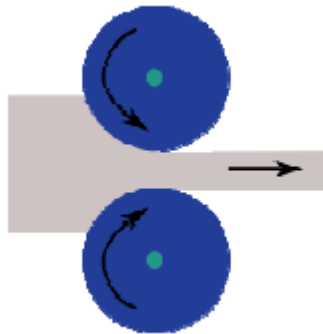


# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

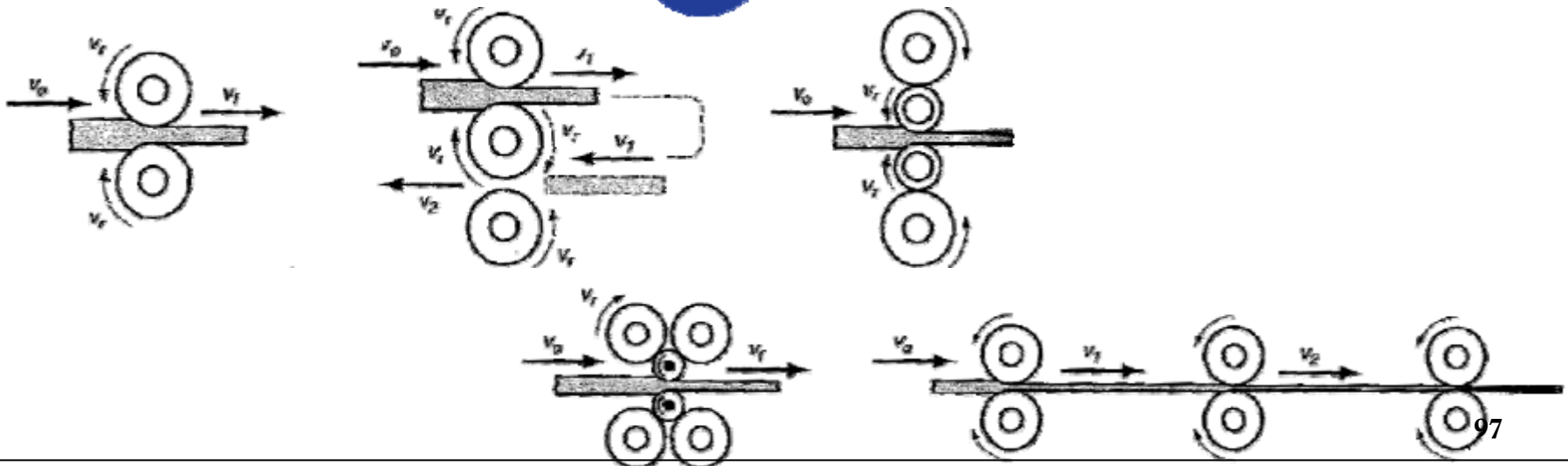
## LAMINADOS PLANOS

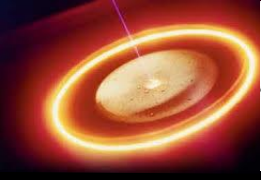
- Fuerzas de compresión entre dos rodillos que reducen el espesor del material
- Deformación plástica muy elevada → Laminación en caliente

REDUCCIÓN DE ESPESOR



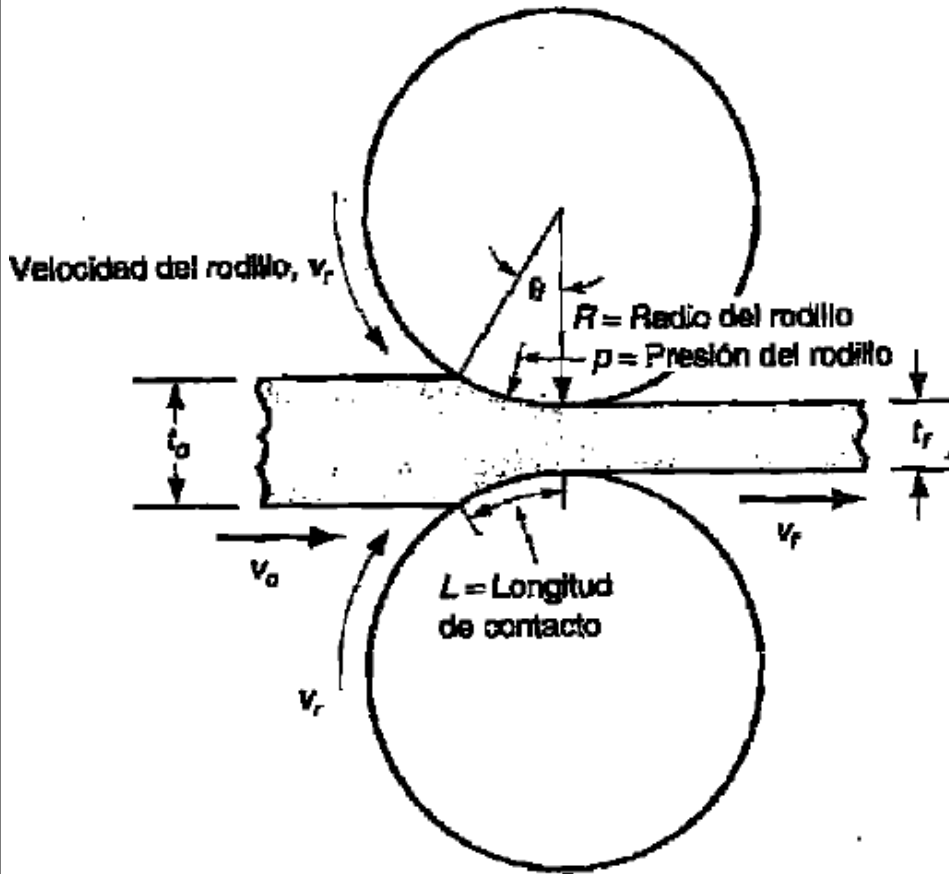
ENSANCHAMIENTO





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## LAMINADOS PLANOS



### Relación entre las velocidades

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f$$

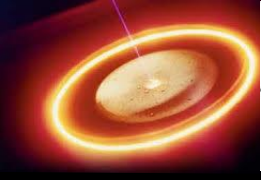
### Fuerzas de fricción

- Fuerza sobre los rodillos multiplicada por el coeficiente de fricción
- Mayor en la zona de entrada → Avance del material en el proceso

### Máxima reducción (d)

$$d_{m\acute{a}x} = \mu^2 R$$

$\mu$  : Depende del material del rodillo, del material de trabajo, temperatura, lubricación.



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## LAMINADOS PLANOS

Sección de contacto entre rodillo y material

$$S = L \cdot w$$

Fuerza de laminación

$$F = Y_f w L$$

$Y_f$  : Tensión de fluencia obtenida a partir de la deformación real – El coeficiente de fricción puede tenerse en cuenta

Longitud de contacto proyectada

$$L = \sqrt{R(t_0 - t_f)}$$

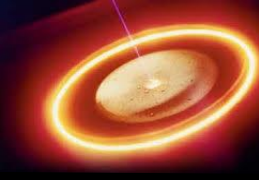
Par torsor

$$T = 0,5 F L$$

Potencia P

$$P = (2\pi N)FL$$

$$F = Y_f w L$$



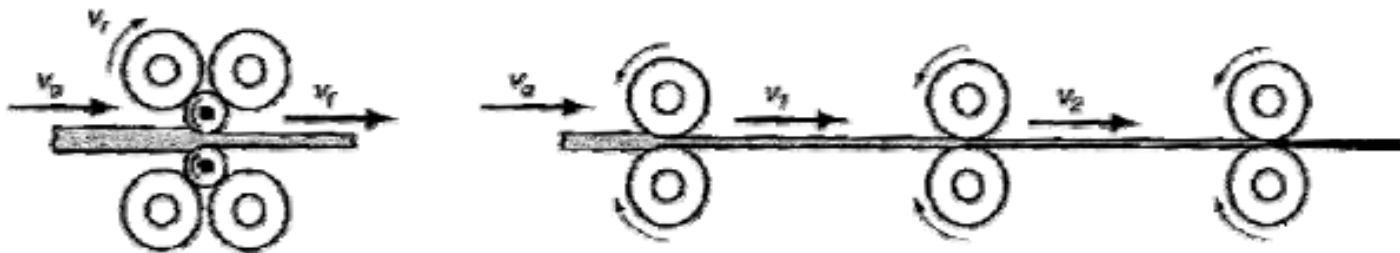
## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### LAMINADOS PLANOS

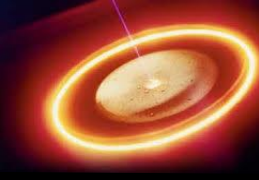
**En algunos casos pueden ser excesivas las fuerzas de laminación causando distorsiones en rodillos**

- Reducción de la fricción
- Reducción del área de contacto
- Incremento de la temperatura
- Aplicación de tracción simultánea sobre el material
- Reducción del espesor rebajado por etapa

**Empleo de trenes de laminación en continuo para reducción progresiva del espesor y aumento de la productividad de la línea**



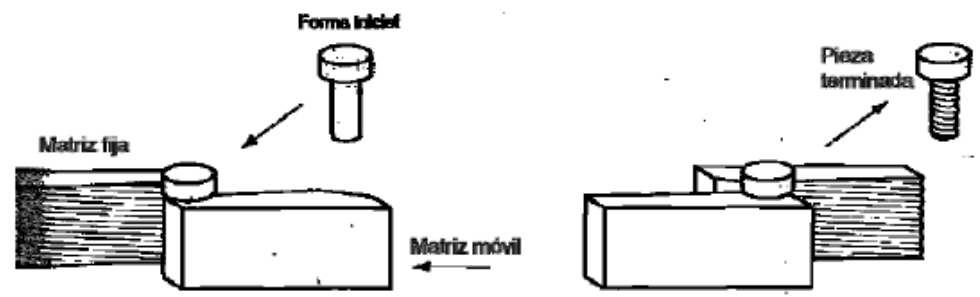
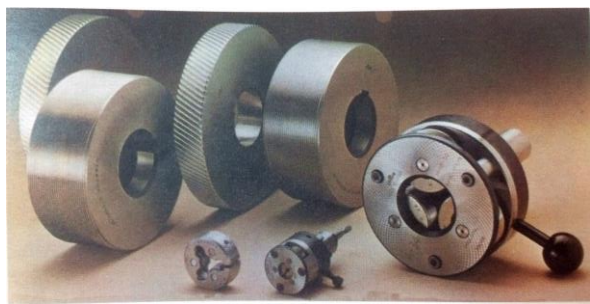




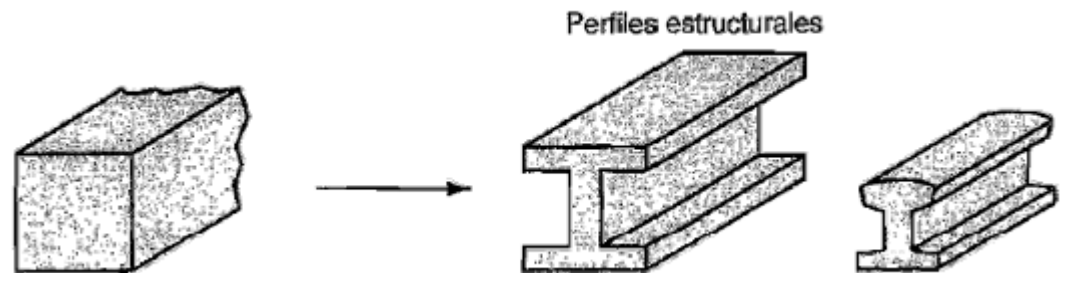
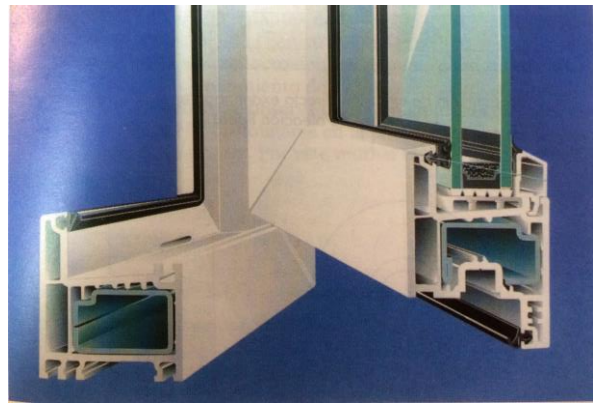
# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## OTROS PROCESOS DE LAMINADOS

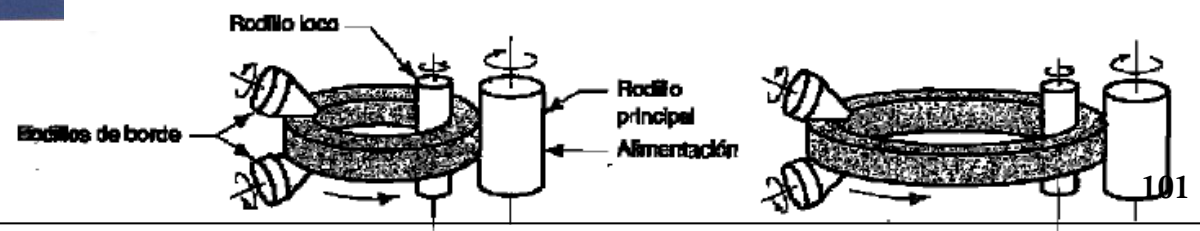
### DE ROSCAS



### DE PERFILES



### DE ANILLOS





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## FORJA

Aplicación de una fuerza de compresión entre dos matrices → Diferentes tipos de mecanismos para ejercer la presión (impacto, gradual)

**EN FRÍO**

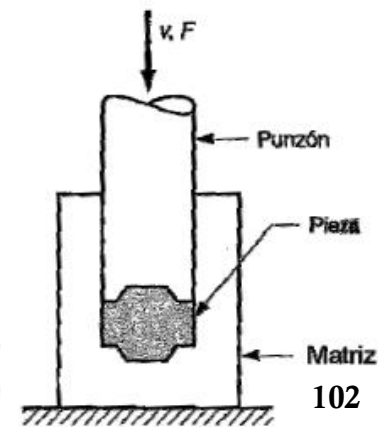
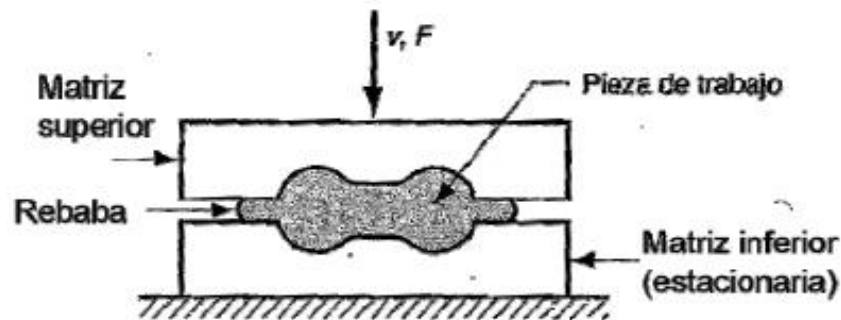
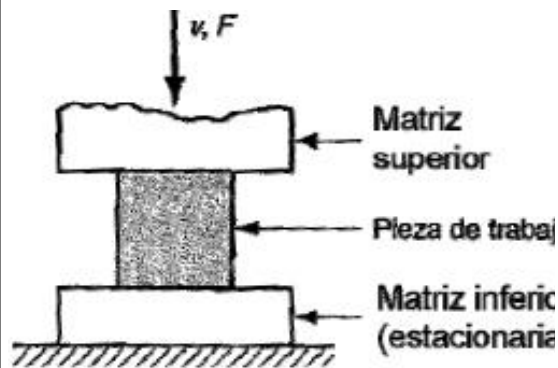
**TIBIO  
(INTERMEDIO)**

**EN CALIENTE**

**MATRIZ ABIERTA**

**MATRIZ DE  
ESTAMPACIÓN**

**MATRIZ CERRADA  
SIN REBABA**

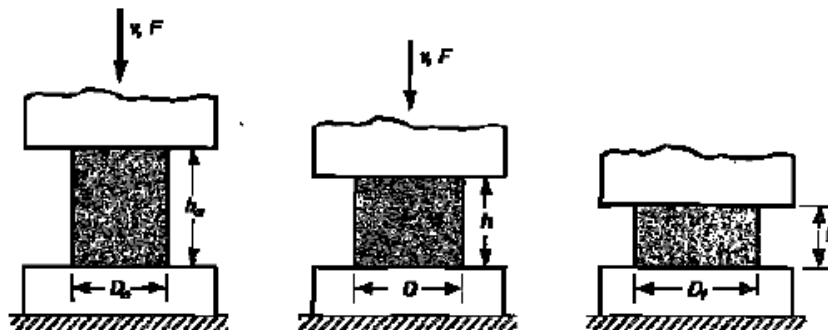




# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

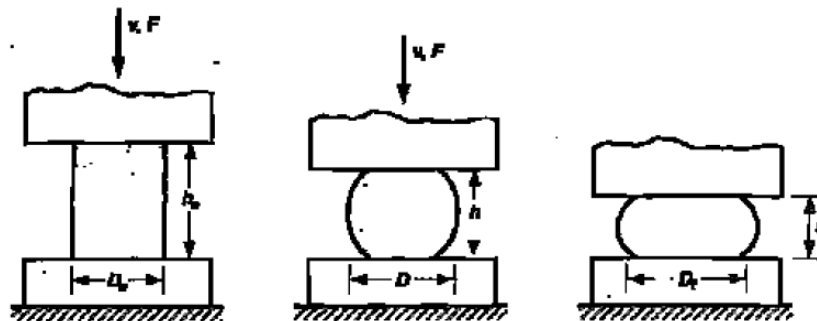
## FORJA – EN MATRIZ ABIERTA

CASO IDEAL



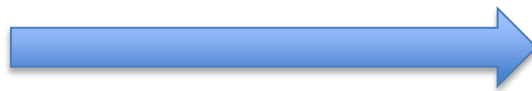
$$F = Y_f \cdot A$$

ABARRILAMIENTO



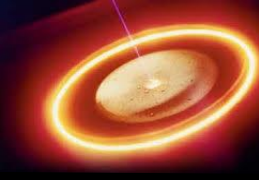
CASO REAL

$$F = Y_f \cdot A$$



$$F = K_f \cdot Y_f \cdot A$$

$$K_f = 1 + (0,4 \cdot \mu \cdot D) / h$$



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## FORJA – ESTAMPACIÓN

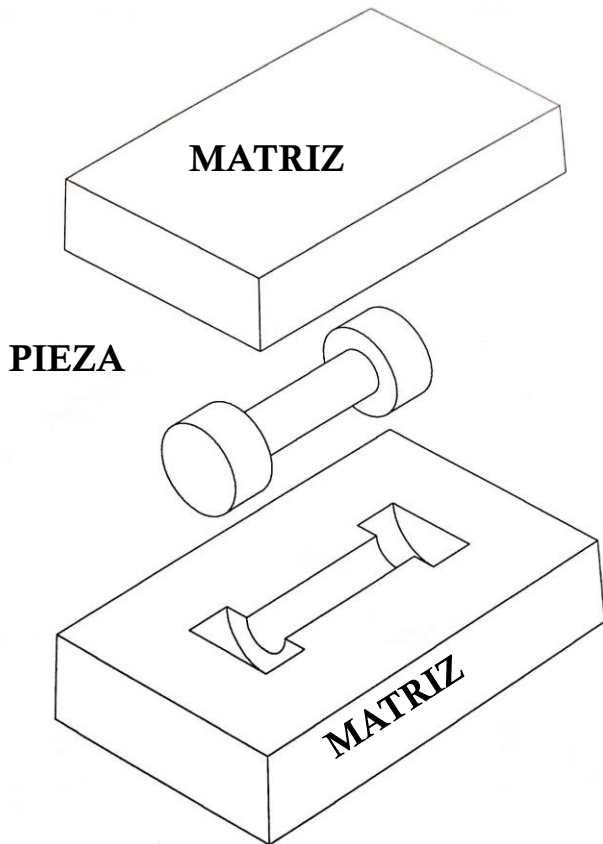
Se elimina la generación de porosidad y defectos de rechupe

Si la laminación es en caliente → Diseño teniendo en cuenta la contracción durante el enfriamiento  
Ocasiona menores pérdidas de material que el mecanizado

Mayor resistencia mecánica y una orientación de los granos más favorable

La velocidad de producción es más alta que en otros procesos

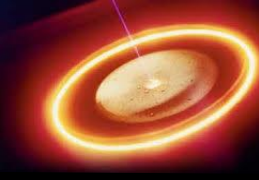
MAYOR DIFICULTAD PARA CALCULAR LA FUERZA NECESARIA → Formación de rebabas



$$F = K_f \cdot Y_f \cdot A$$

Forma de la <u>pieza</u>	$K_f$
Forjado <u>de estampación</u>	
Formas simples con rebaba	6.0
Formas complejas con rebaba	8.0
Formas muy complejas con rebaba	10.0
Forjado sin rebaba	
Acuñado (superficies superior e inferior)	6.0
Formas complejas	8.0





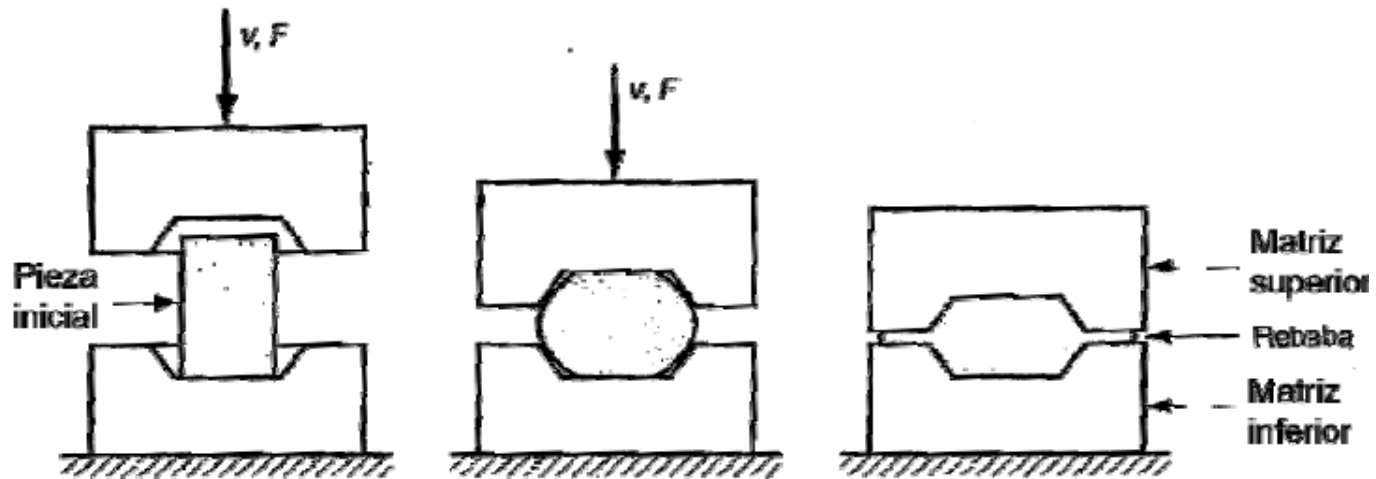
## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### FORJA – ESTAMPACIÓN

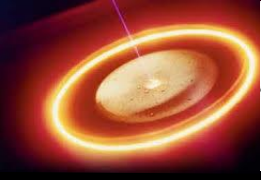
#### REBABAS:

La presencia de rebabas requiere una operación posterior para eliminarlas  
Su reducción puede realizarse mediante:

- Reducción del material de partida → **PRECAUCIÓN**
- Diseñar el molde para que las rebabas estén en zonas controladas y facilitar la operación posterior

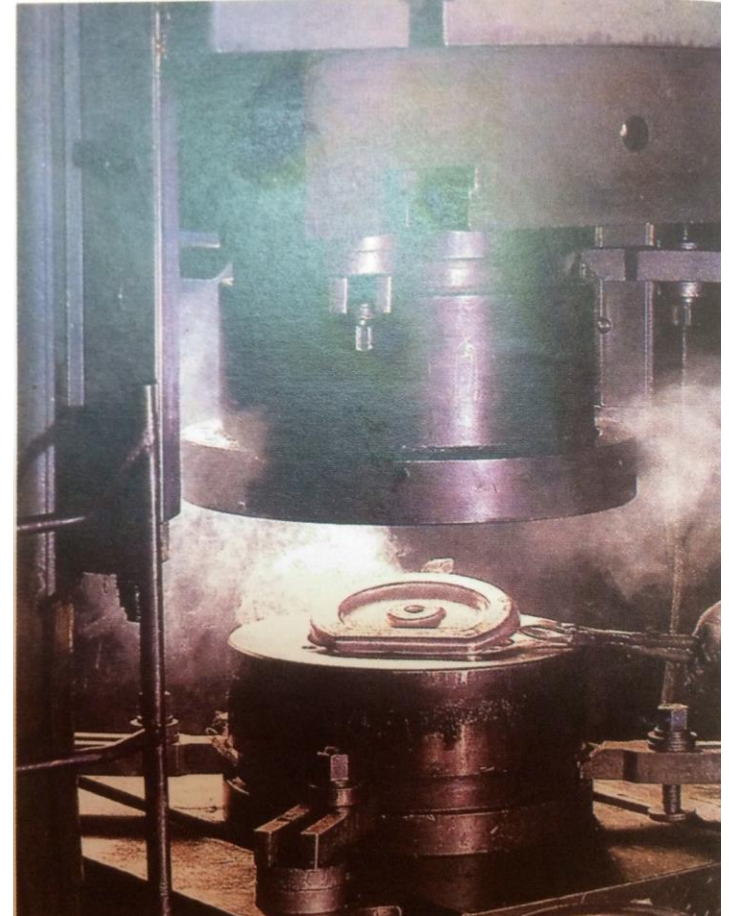
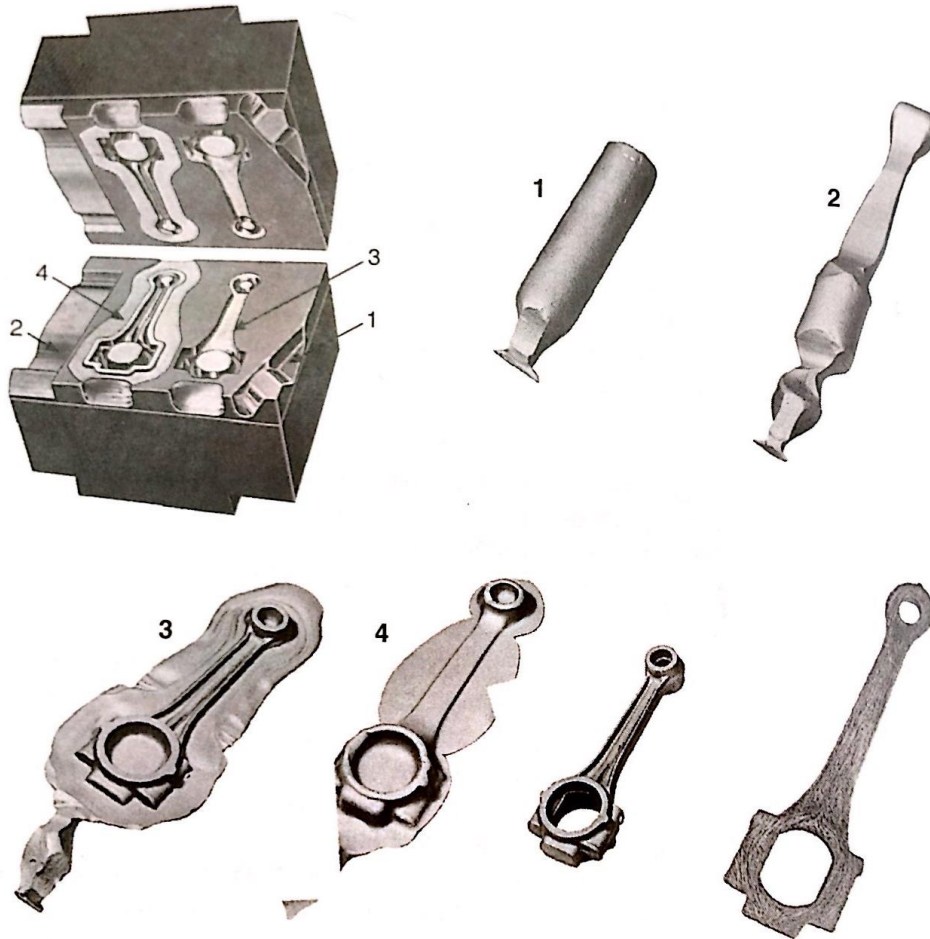


Al comenzar a crearse la rebaba → Fricción que evita la salida del material de la cavidad del molde → Rellena los detalles de la geometría

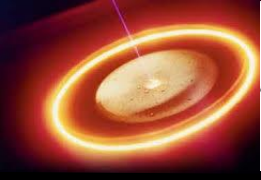


# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## FORJA – ESTAMPACIÓN



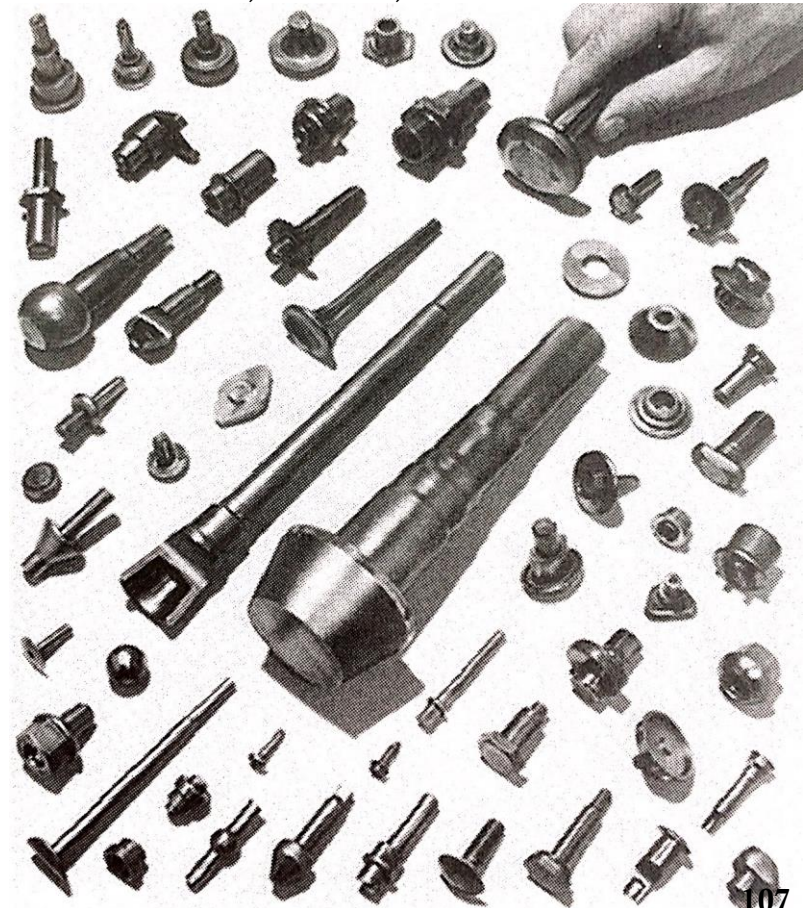
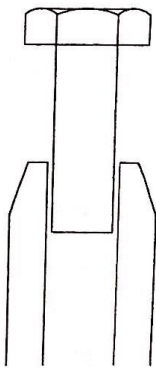
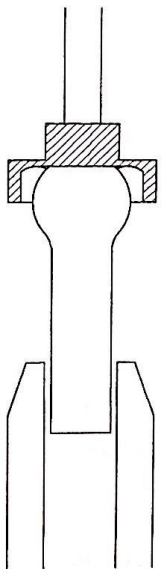
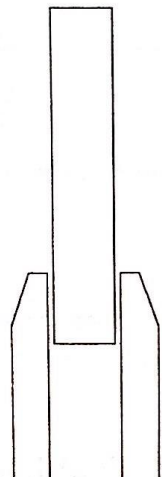
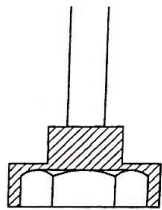
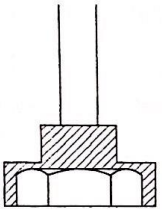


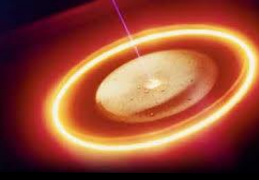


## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### RECALCADO

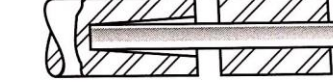
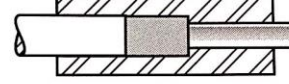
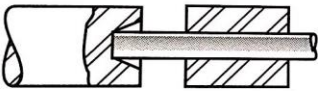
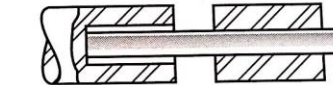
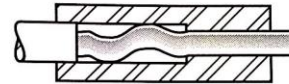
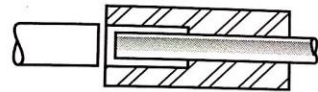
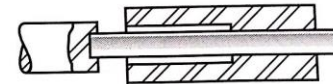
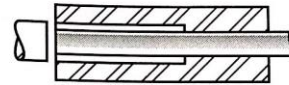
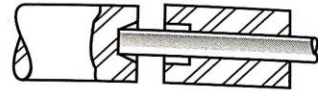
Se utiliza este término para las operaciones de forja dónde sólo se deforma un parte del material o elemento → Cabezas de tornillos, clavos, remaches





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

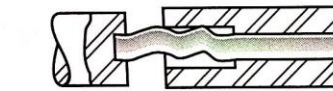
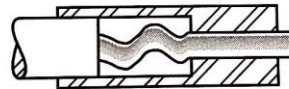
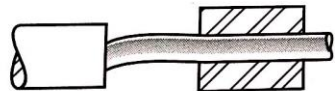
## RECALCADO



Applications of rule 1

Applications of rule 2

Applications of rule 3



Violation of rule 1

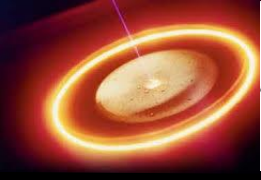
Violation of rule 2

Violation of rule 3

## ASPECTOS IMPORTANTES DE DISEÑO:

- Limitación de la longitud de material sin soporte (generalmente 3 veces el diámetro de la barra)
- La longitud a deformar puede ser mayor que 3 veces el diámetro si el cambio en diámetro no excede de 1,5 veces el diámetro inicial
- Para materiales cumpliendo la norma anterior, la longitud de barra sin soporte debe ser inferior al diámetro





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### PRENSAS

#### MECÁNICAS

- Basadas en mecanismos biela-manivela
- Mayor velocidad
- Aptas para elevadas fuerzas pero no elevadas capacidades de trabajo

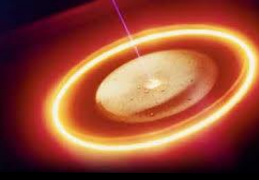
#### HIDRÁULICAS

- Empleo de sistemas hidráulicos para ejercer la fuerza
- Más lentas
- Grandes esfuerzos durante todo el recorrido
- Alta capacidad de trabajo

#### NEUMÁTICAS

- Energía suministrada por aire comprimido
- Capacidad para aplicar menores esfuerzos
- Menor coste

$$F = Y_f \cdot A$$



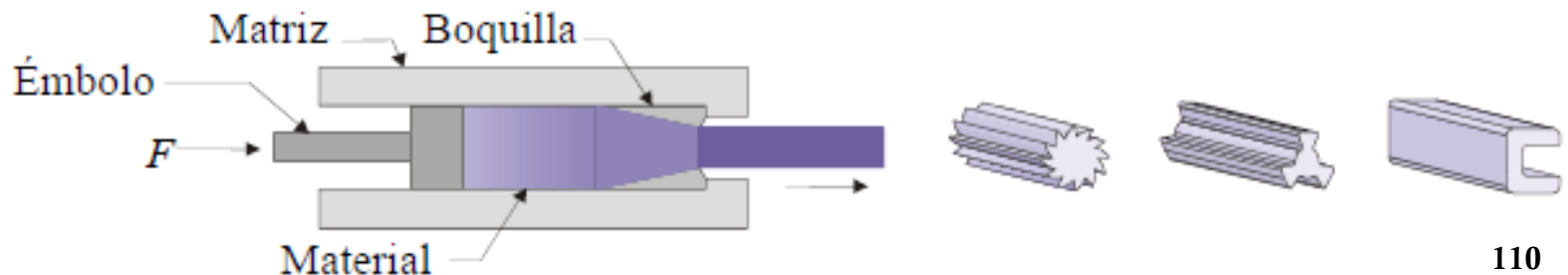
## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

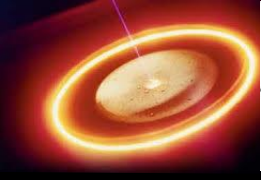
### EXTRUSIÓN

El metal fluye por compresión a través de un orificio con una sección de geometría variable con una consiguiente reducción en la sección → Flujo plástico a través de la sección

#### SECCIÓN CONSTANTE

- Los metales (y sus aleaciones) más comunes en extrusión son: plomo, cobre, aluminio, magnesio
- La adición de lubricantes apropiados para altas temperaturas permite la extrusión de metales con mejores propiedades mecánicas y mayores temperaturas de trabajo





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## EXTRUSIÓN

EN FRÍO

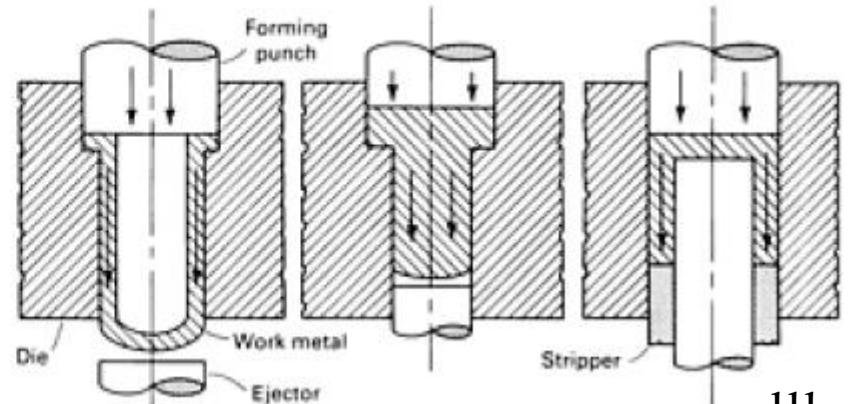
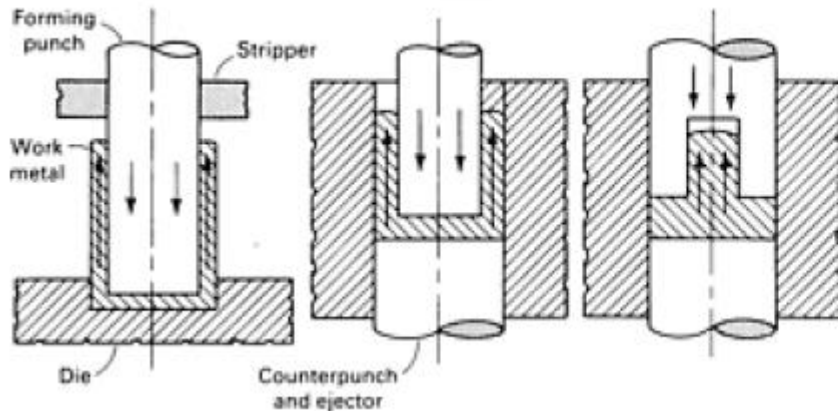
EN CALIENTE

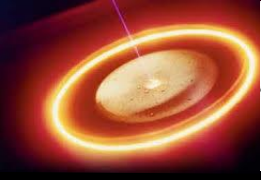
CONTINUO

DISCONTINUO

INVERSA

DIRECTA





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### EXTRUSIÓN

**ALTAS  
PRESIONES  
SOTENIDAS**

**TEMPERATURAS  
PARA REDUCIR  
TENSIÓN DE  
FLUENCIA**

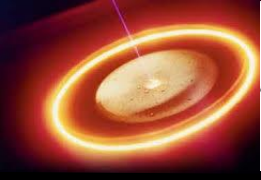


**ELEVADO DESGASTE  
(TEMPERATURA Y  
MATERIAL DE  
PARTIDA)**

**MATERIALES QUE  
SOPORTEN LAS  
TEMPERATURAS**

**VIDRIO FUNDIDO COMO LUBRICANTE**





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### EXTRUSIÓN – MATRIZ DE EXTRUSIÓN

#### MATRIZ

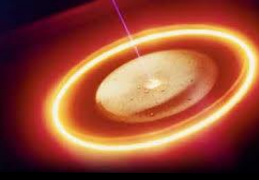
Es la propia boquilla con la sección de la pieza que se quiere extruir. Sufre un elevado desgaste → Es necesario cambiarla periódicamente. Aceros aleados (C, Cr, W)

#### CONTRA-MATRIZ

Ayuda a soportar las presiones que sufre la matriz propiamente dicha. Menor desgaste, menor necesidad de reemplazo. Aceros de menor calidad

#### PORTA MATRIZ

Su función es simplemente fijar el resto de componentes al cabezal fijo



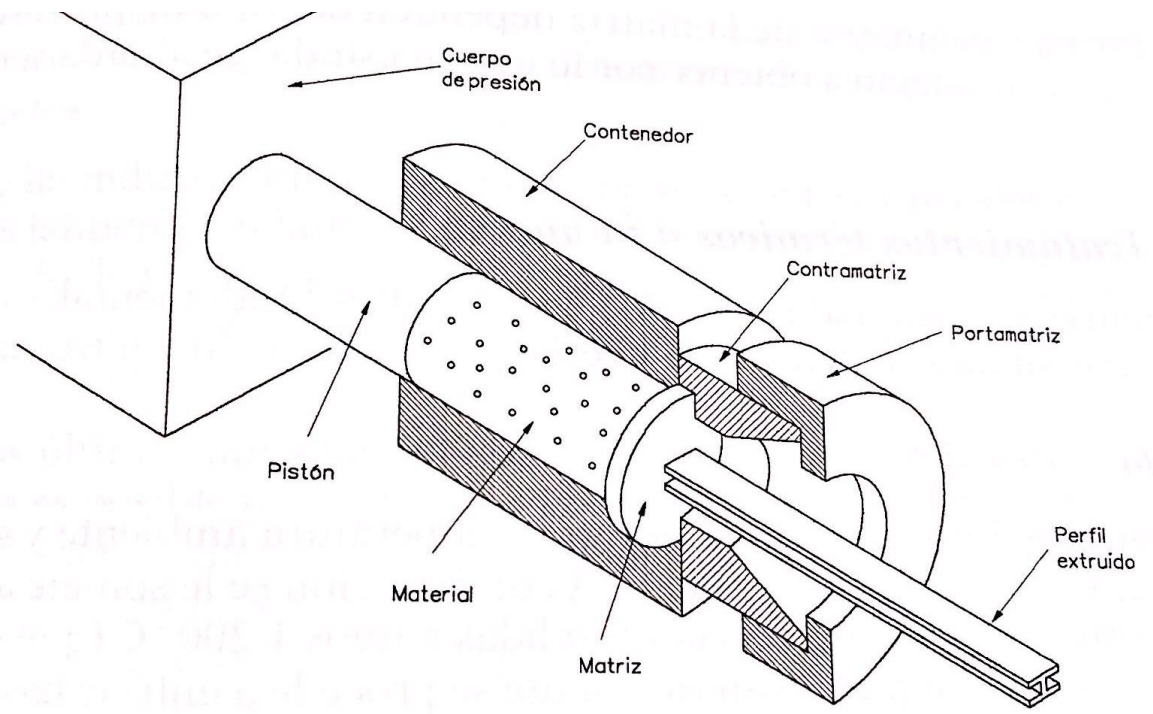
# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

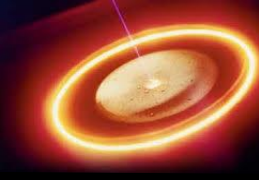
## EXTRUSIÓN – MATRIZ DE EXTRUSIÓN

**MATRIZ**

**CONTRA-MATRIZ**

**PORTA MATRIZ**





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## EXTRUSIÓN

$$r = \frac{A_0}{A_f}$$

Relación de Extrusión

Matriz

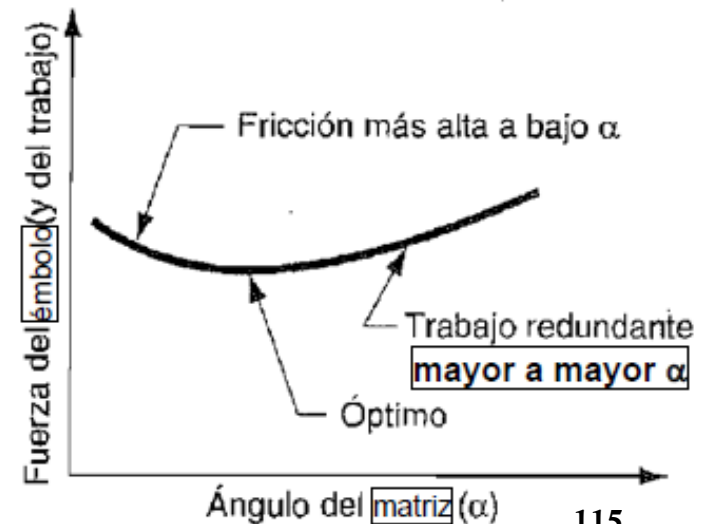
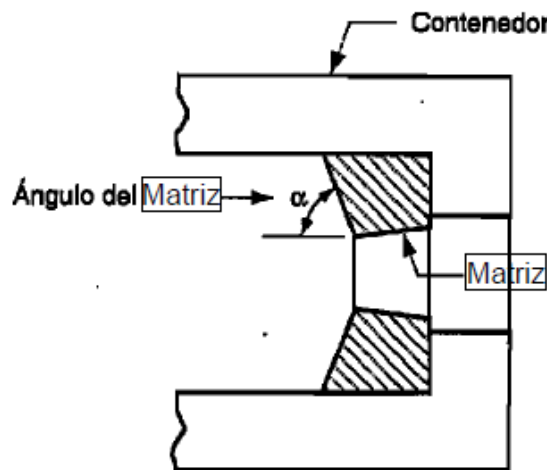
Ángulo de entrada

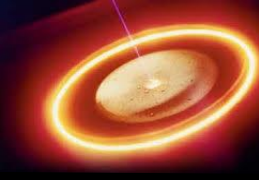
Radio de Entrada

Longitud del canal

Forma

Material	Relación de extrusión
Aleaciones duras y aceros	20:1
Aleaciones ligeras y aluminio	60:1
Aleaciones muy ligeras	100:1
Aluminio en prensa de tamaño considerable	100:1

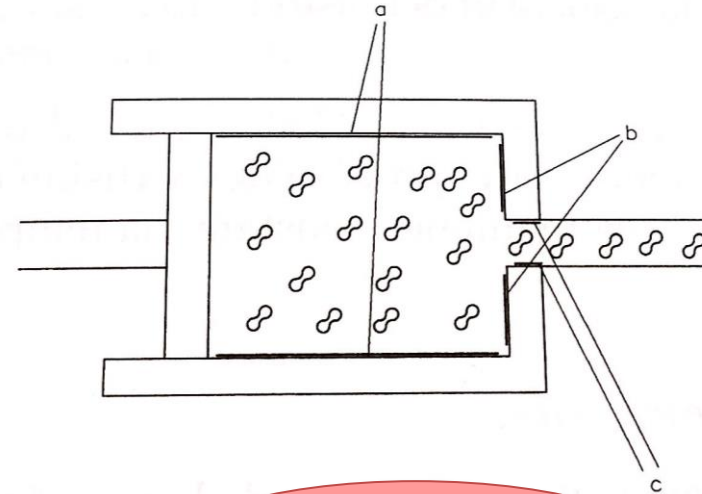
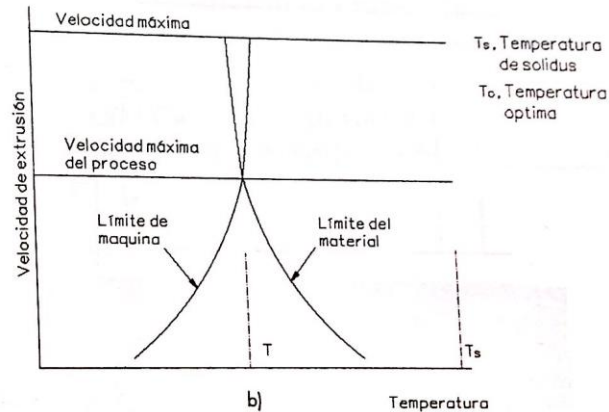
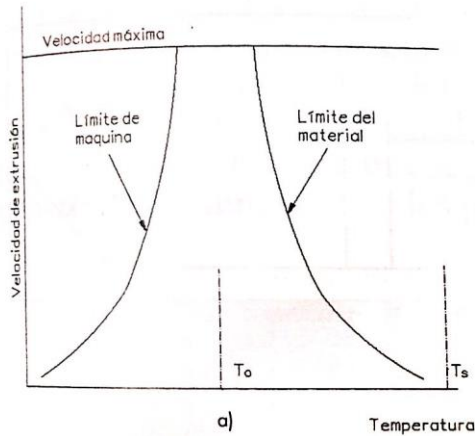




# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## EXTRUSIÓN

### Velocidad de Extrusión



### Temperatura

### Deformación en el frente de matriz

### Rozamiento

Deformación en el frente de matriz

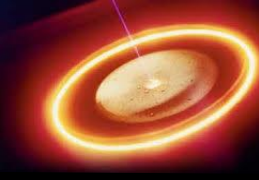
Rozamiento entre tocho y contenedor

Cizallamiento en la zona muerta

Conducción de calor al utillaje

Conducción al producto extruido





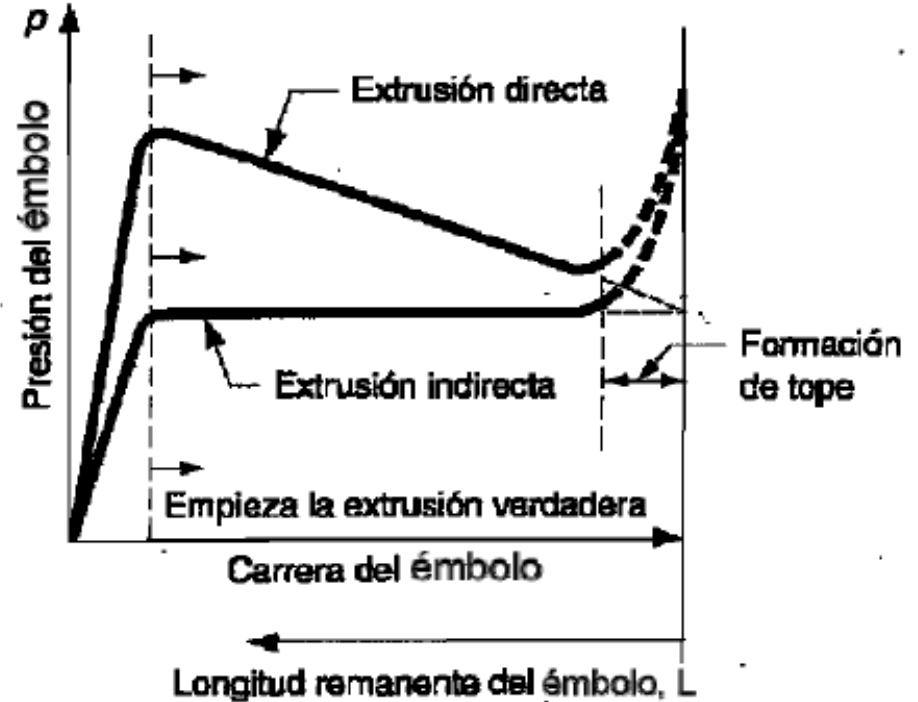
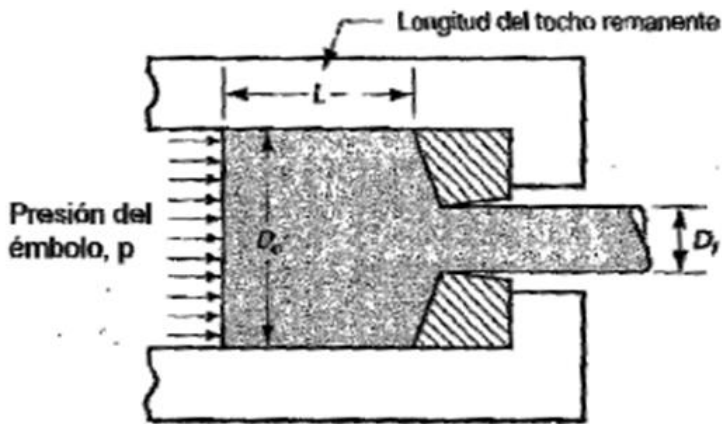
# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## EXTRUSIÓN

Caso ideal:

$$\epsilon = \ln r_x$$

$$p = \bar{Y}_f \ln r_x$$



Corrección al caso ideal:

$$\epsilon_x = a + b \ln r_x \quad p = \bar{Y}_f \epsilon_x$$

Presión en extrusión directa con fricción en la interfase:

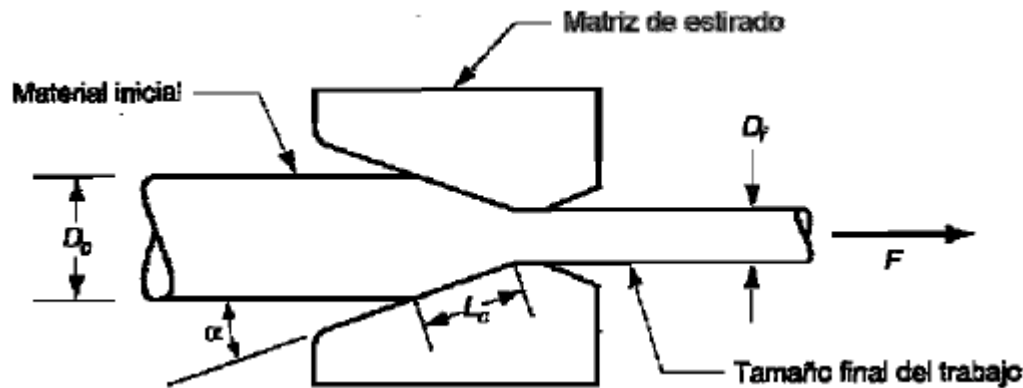
$$p = \bar{Y}_f \left( \epsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right)$$



## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### ESTIRADO - TREFILADO

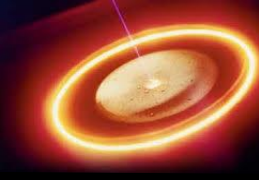
Operación para reducir la sección transversal de un material metálico al tirar del mismo a través de una abertura en una matriz



Generalmente se utiliza el término ESTIRADO para barras de mayor diámetro, mientras que se emplea TREFILADO para alambres de menor diámetro

TREFILADO: Puede realizarse en un proceso “continuo”, con alambres de gran longitud (pueden pasar por varias matrices durante el proceso)

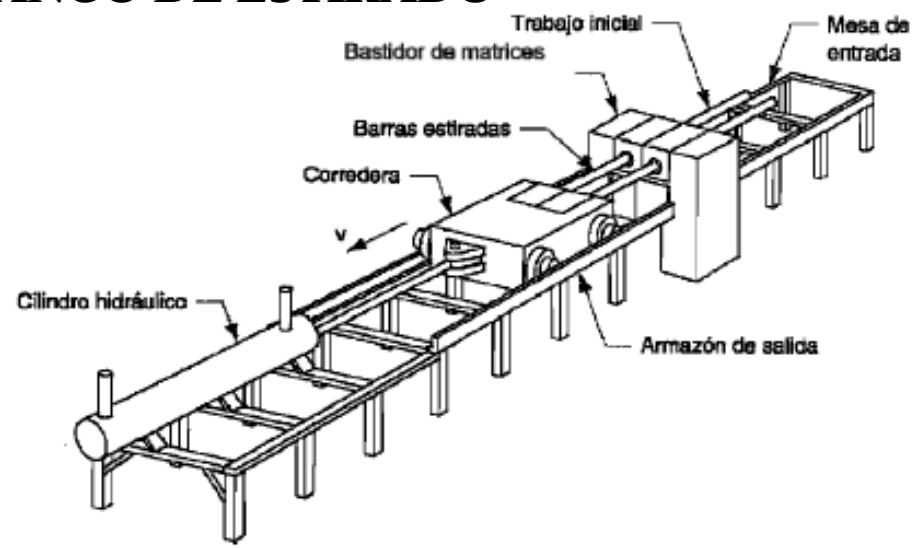
ESTIRADO: El mayor diámetro limita la longitud por lo que el proceso es más discontinuo



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

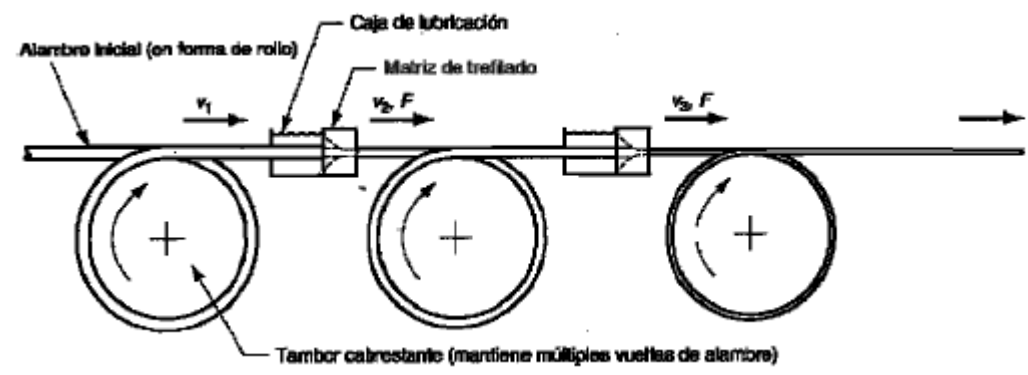
## ESTIRADO - TREFILADO

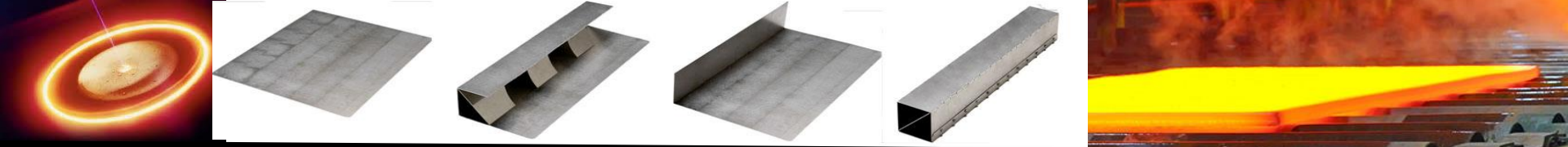
### BANCO DE ESTIRADO



Sus principales ventajas están relacionadas con: Buena tolerancia dimensional, buen acabado superficial, propiedades mecánicas mejoradas, capacidad de adaptación a líneas de fabricación en masa o lotes, buena velocidad de estirado (p. ej: 50 m/s para alambre muy fino)

### TREFILADO CONTINUO





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

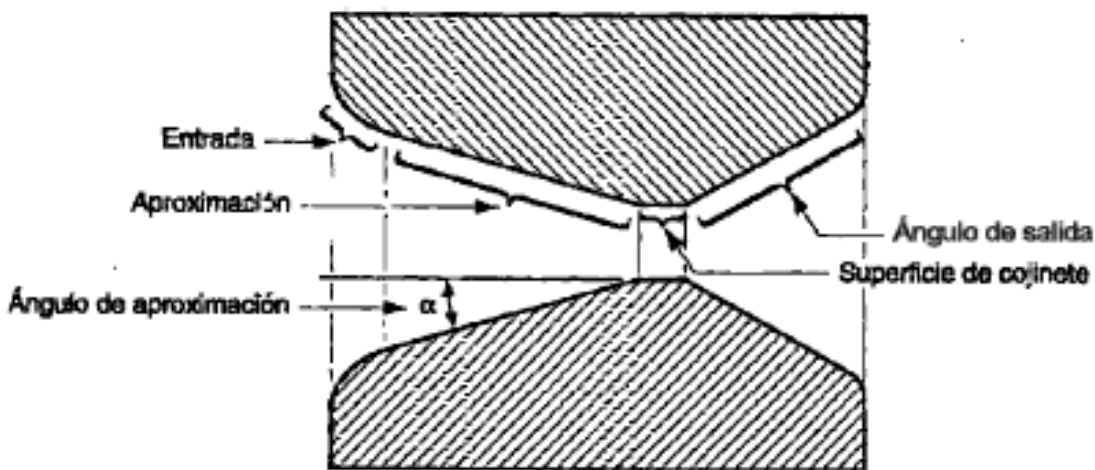
### ESTIRADO - TREFILADO

#### EL MATERIAL DE PARTIDA

Generalmente lleva previamente tratamientos de:

- Recocido
- Limpieza (Baños químicos, limpieza abrasiva), puede incluir prelubricación
- Afilado

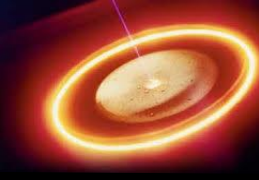
#### LA MATRIZ



Suele estar fabricada en aceros de herramientas o metal duro (carburos cementados)

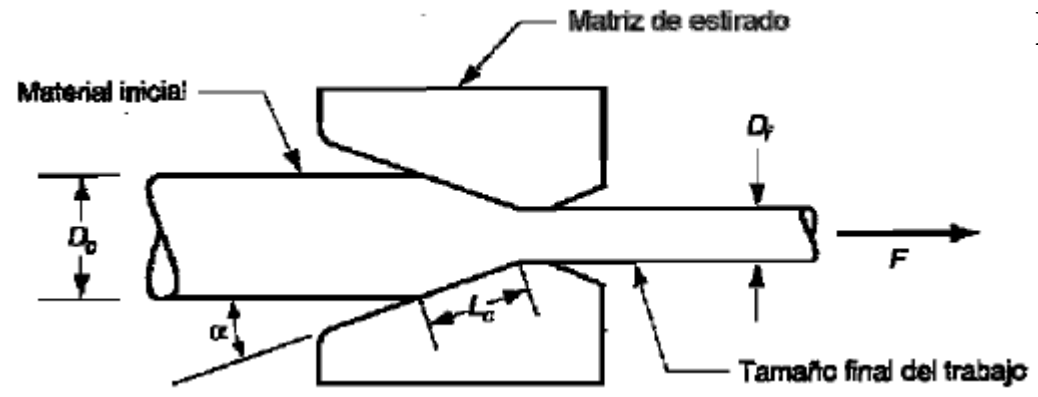
En trefilado de alambres de mayor velocidad de fabricación, pueden incluir insertos de diamante





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## ESTIRADO - TREFILADO



Reducción de área

$$r = (A_0 - A_f) / A_0$$

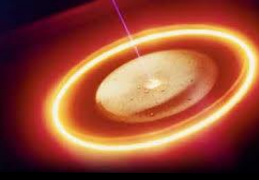
Reducción de diámetro

$$d = D_0 - D_f$$

## CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS (en ausencia de fricción)

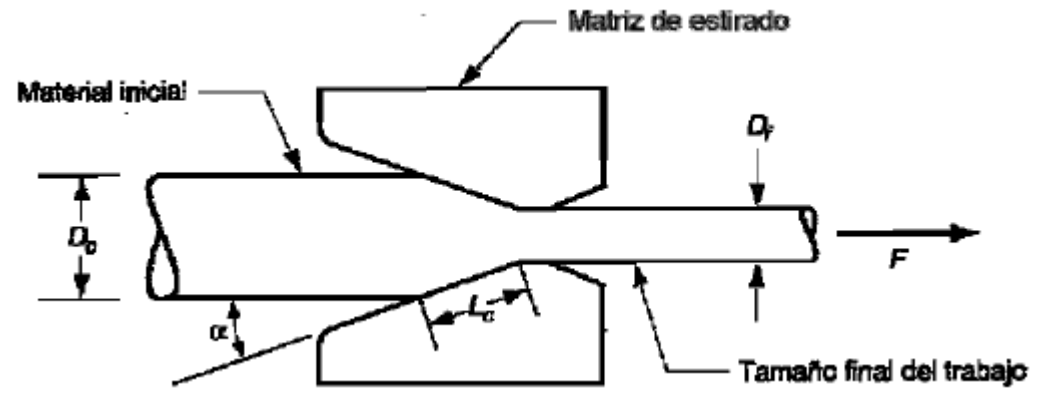
Deformación:  $\epsilon_x = \ln (A_0 / A_f) = \ln (1 / (1 - r))$

Tensión:  $p = \bar{Y}_f \epsilon_x = \bar{Y}_f \ln \frac{A_0}{A_f}$



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## ESTIRADO - TREFILADO



### FRICCIÓN

- Reducción de área
- Ángulo de la matriz
- Coefficiente de fricción

### CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS (teniendo en cuenta la fricción)

Fricción → La tensión real es mayor que la calculada sin el efecto de la fricción

### Ecuación de Schey para la tensión verdadera

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f}$$

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c}$$

$$D = \frac{D_o + D_f}{2}$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \sin \alpha}$$



## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### ESTIRADO - TREFILADO

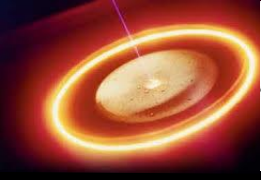
#### Número de etapas

La tensión de trefilado no debe exceder la de fluencia  $\rightarrow$  limitación en la reducción de área realizada en una sola pasada

$\rightarrow$  Deducir para un material perfectamente plástico ( $Y_f = Y$ ). Resultado: 0.632

Generalmente, en la práctica, las reducciones posibles son ligeramente inferiores:

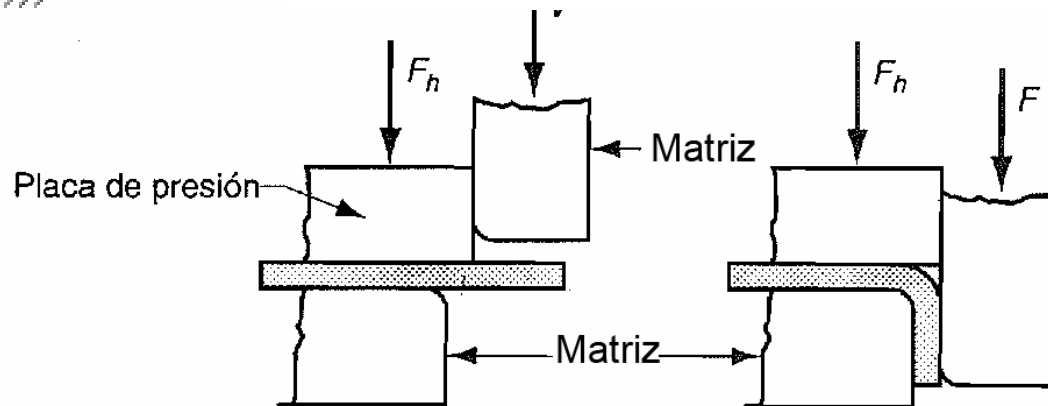
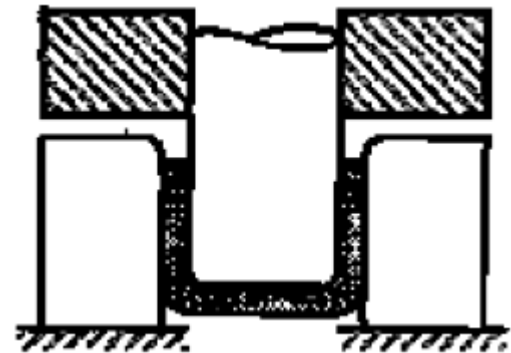
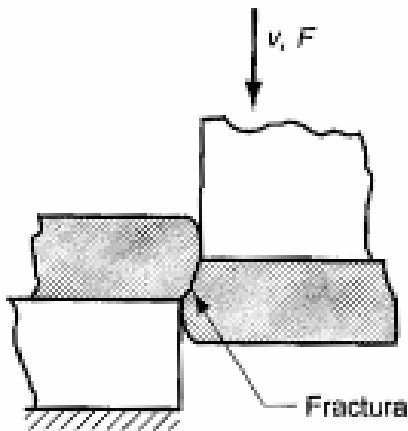
- Barras (ESTIRADO): 0.5
- Alambres (TREFILADO): 0.3



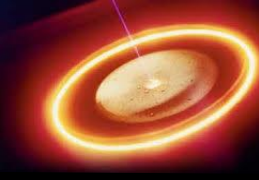
# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## CONFORMADOS EN LÁMINA

Generalmente se realizan tres operaciones básicas: Corte, plegado y embutición



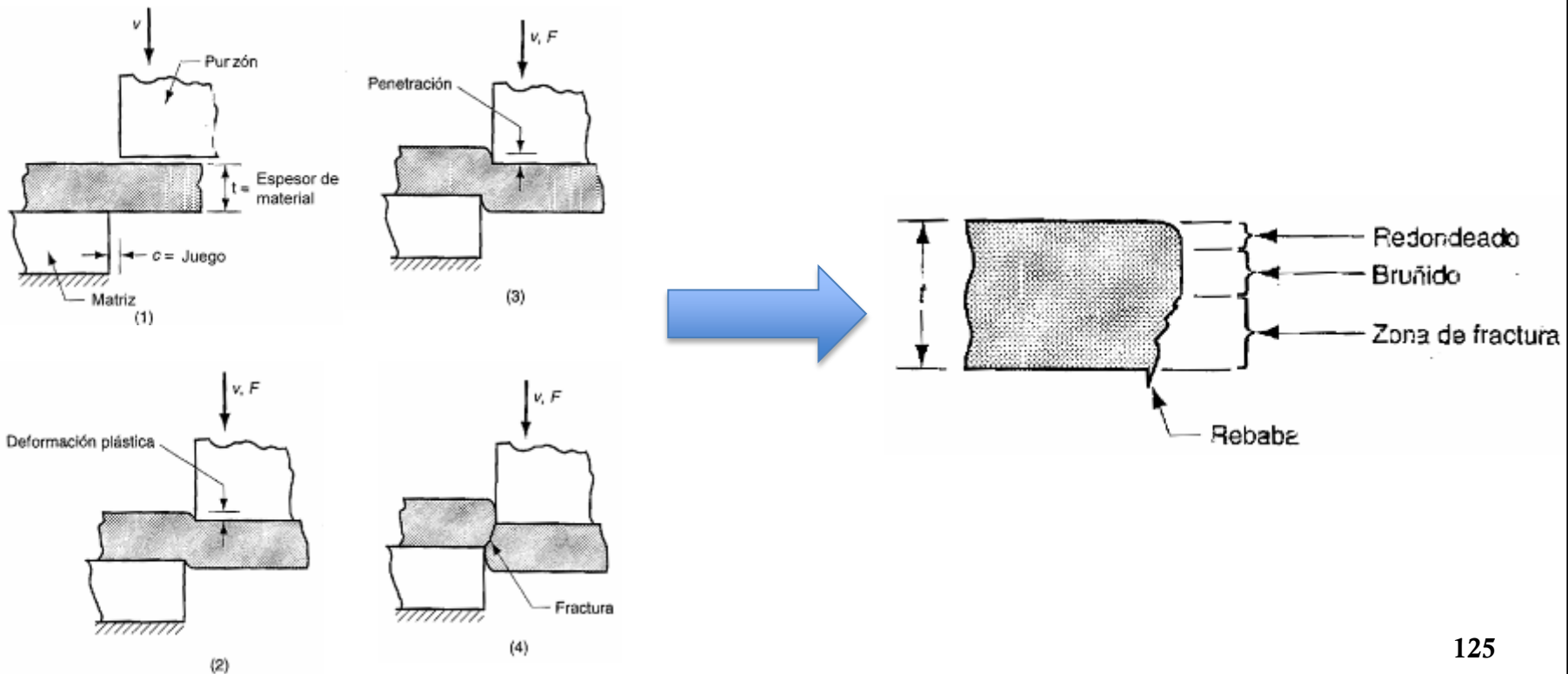




# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## CORTE

El corte de la lámina se produce por cizalladura entre dos bordes afilados de corte → El borde tiene una serie de peculiaridades (zonas con diferente geometría y calidad del corte)





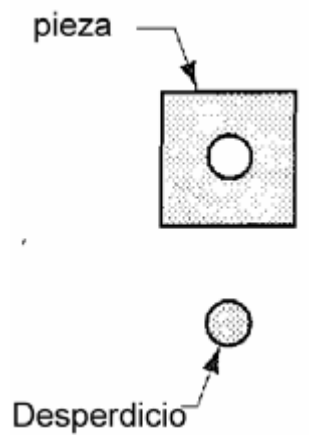
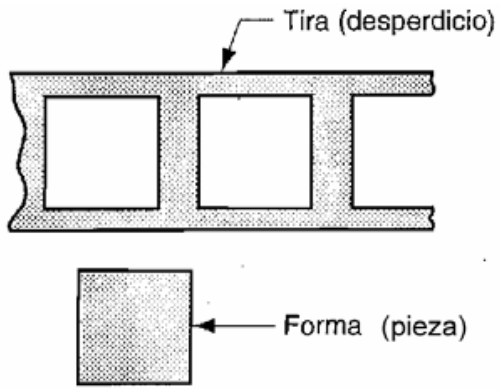
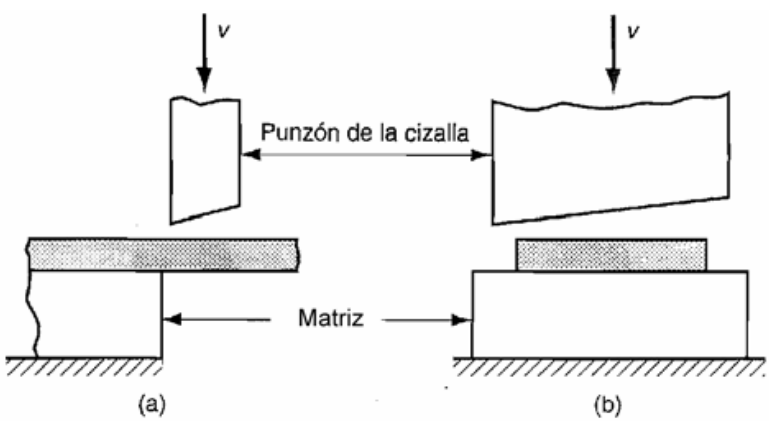
# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## CORTE

### CIZALLADO

### TROQUELADO Ó PUNZONADO

### PERFORADO





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## CORTE

### PARÁMETROS DEL CORTE

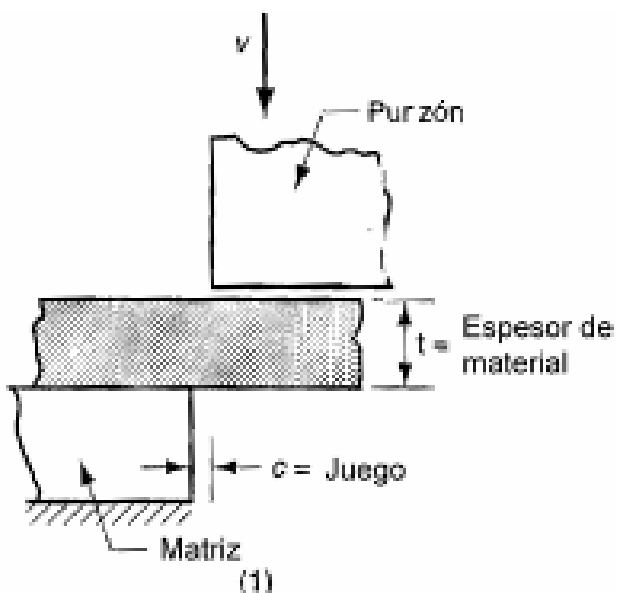
ESPESOR

TIPO DE MATERIAL

LONGITUD

ESPESOR

JUEGO



- El juego recomendado varía con el tipo de material
- Juegos típicos: 4 – 8 % del espesor de la lámina
- Juegos muy pequeños: Doble bruñido, mayor fuerza de corte
- Juego muy grande: Rebaba excesiva
- Para bordes muy rectos se suele reducir el juego (alrededor del 1 %)



## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### CORTE

#### PARÁMETROS DEL CORTE

- En el punzonado/troquelado, el diámetro del punzón debe ser inferior al de la matriz

#### FUERZA DE CORTE

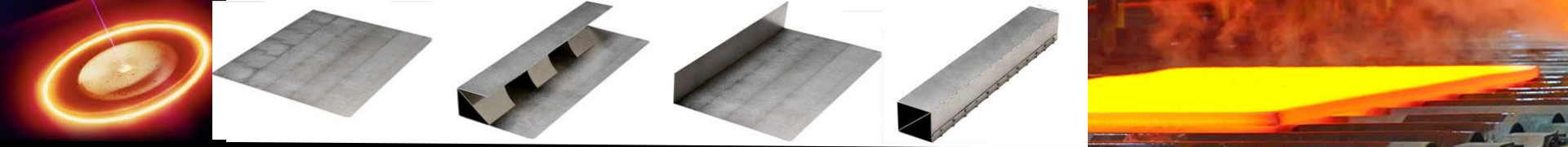
$F = \tau \cdot \text{superficie cizallada}$  (válido para cizallado, punzonado y perforado)  $\rightarrow \tau$  es la resistencia a cortadura de la lámina  $\rightarrow$  Si no se conoce se puede aproximar como  $0.5 \cdot \sigma_{ult}$

#### TRABAJO DE CORTE

Será el producto de la fuerza por la distancia recorrida  $\rightarrow A = F \cdot e$

Se suele incluir un factor “X” (0.5 – 0.8) puesto que la fuerza no suele ser constante a lo largo de todo el recorrido



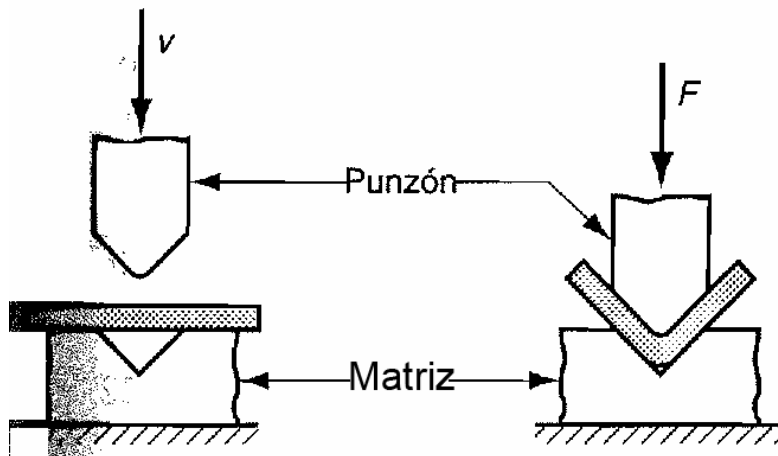


## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

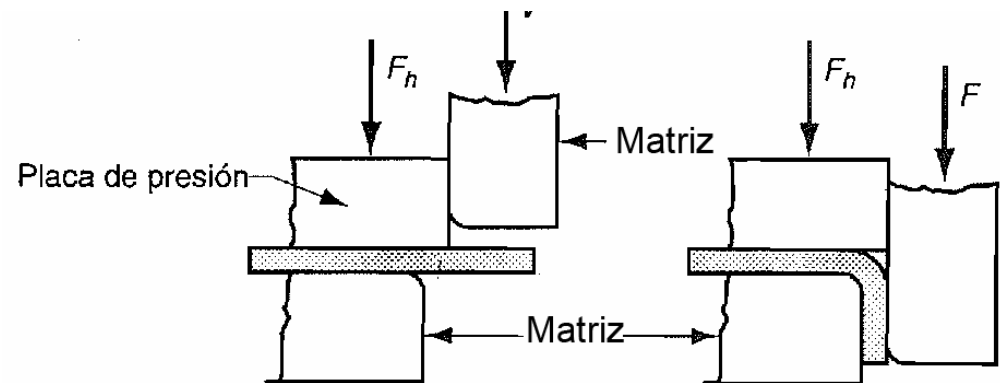
### PLEGADO

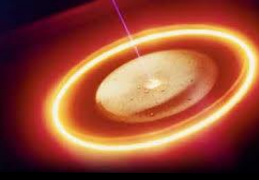
- Consiste en la deformación permanente de un metal alrededor de un eje recto
- El metal sufre compresión en un plano y tracción en otro, existiendo un plano neutral intermedio.
- Se considera que no se produce variación en el espesor de la lámina metálica

### PLEGADO EN V



### PLEGADO DE BORDES





# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## PLEGADO

### PARÁMETROS DEL PLEGADO

**Ángulo de doblado:** Es el ángulo medido desde la línea del plano inicial hacia el plegado realizado

**Radio de plegado:** Se mide en la parte interna y es determinado por el radio de la herramienta para el plegado para el plegado

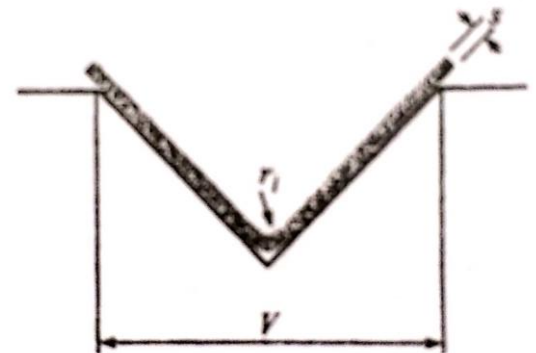
Debe ser lo mayor posible, según sus condiciones de operación, para evitar concentración de tensiones

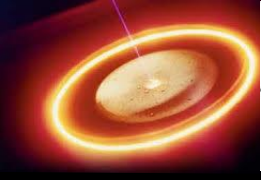
$$r_{\min} = s(mm) \left( 0.0085 \cdot \frac{\sigma_{ult} (kg/mm^2)}{\epsilon_{rotura} (-)} \right)$$

Debe ser suficientemente pequeño como para asegurar la deformación plástica e irreversible

$$r_{\max} = \frac{E \cdot s}{2 \cdot Y_f}$$

**Ancho y espesor de la lámina plegada (L, s)**





## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### PLEGADO

#### PARÁMETROS DEL PLEGADO

Fuerza de plegado

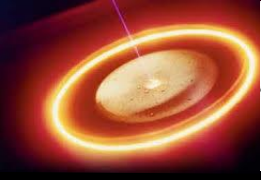
$$F_{\max} = k \frac{\sigma_{ult} L S^2}{w}$$

Donde k varía con el tipo de plegado y material

Plegado en V: 1,2 – 1,35

Plegado por doblado: 0,7 – 0,8

**Trabajo de plegado:** Simplemente se multiplica por el recorrido del macho que lleva a cabo el plegado. Se añade un factor correcto análogo al de corte.



## CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

### EMBUTICIÓN

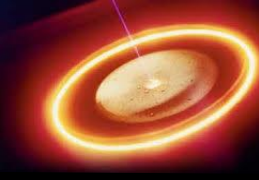
Se forma un cuerpo hueco mediante estirado de una chapa plana cortada a medida.  
Para ello se emplea una matriz o estampa

Estirado en  
paso único

Estirado en  
pasos sucesivos

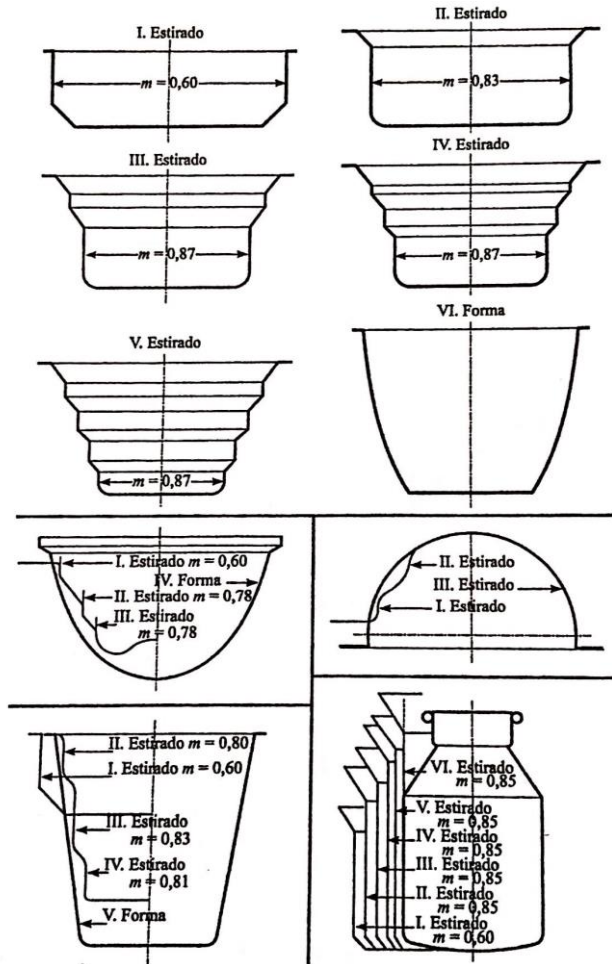






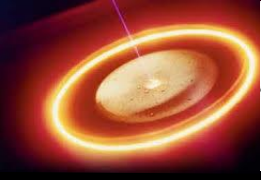
# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## EMBUTICIÓN



La embutición de geometrías más complejas es recomendada mediante pasos sucesivos

El cálculo de la geometría inicial de la chapa que se requiere en el proceso de embutición se puede realizar mediante herramientas gráficas o analíticas. En ambos casos se parte de la base de la conservación del área lateral de la chapa



# CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

## EMBUTICIÓN

### MÁXIMA RELACIÓN DE EMBUTICIÓN

FRICCIÓN

RESISTENCIA DEL MATERIAL

DIMENSIONES Y ESPESOR DE LA CHAPA

PRESIÓN DEL PORTACHAPAS

Relación de embutición en estirado único:  $\beta_0 = D/d$

$$\beta_{0_{\max}} = 2,15 \text{ a } 2(\text{fácil a normal embutible}) - 0,001 \frac{d}{s}$$

### FUERZA DE EMBUTICIÓN

Donde:

$\beta^*$  es la relación de embutición en el máximo de fuerzas

$K_{fm}$ : Resistencia media a la deformación en el máximo de fuerzas

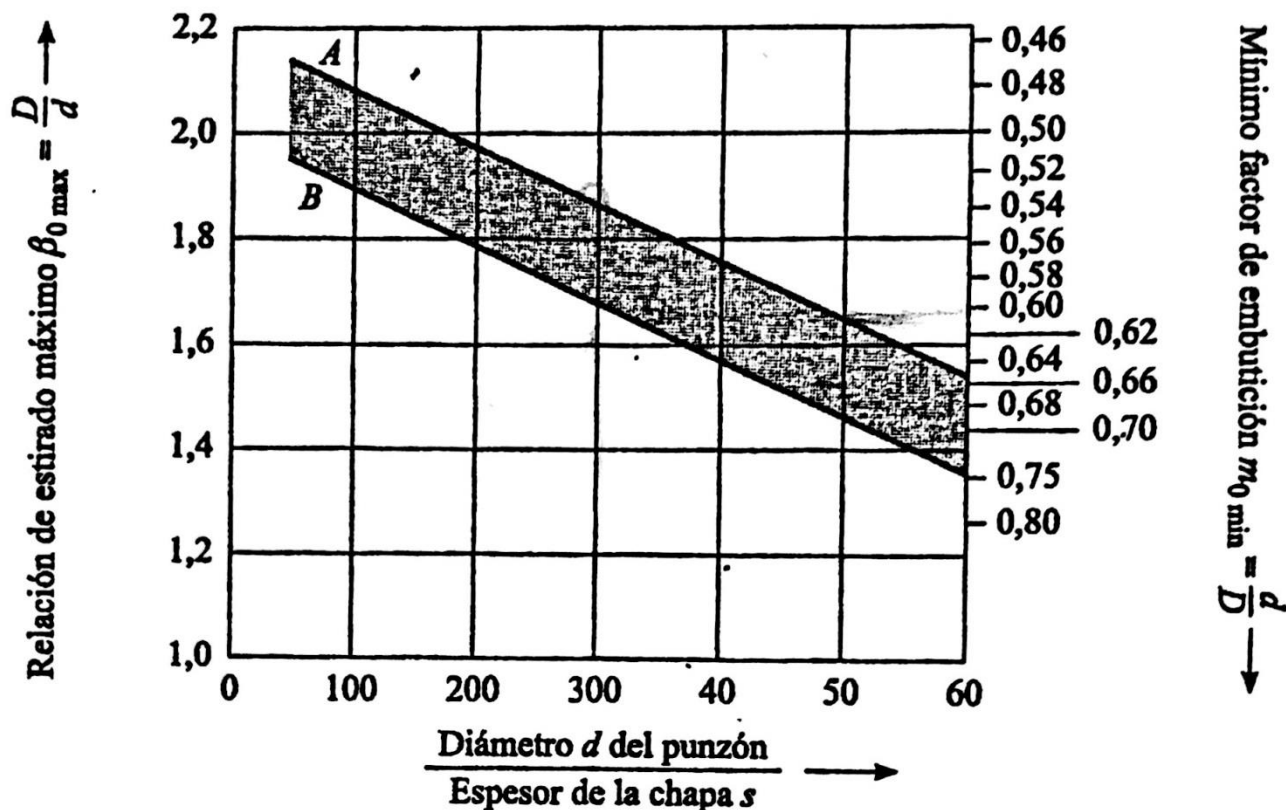
$$P_z = \pi ds \frac{K_{fm}}{\eta_f} \ln \beta^*$$

$$F_z = n \cdot \sigma_{ut} \cdot A$$

Donde n se determina mediante expresiones analíticas o gráficas según material y geometría



- A) Buena capacidad de embutición (chapa especial para embutición profunda).  
 B) Normal capacidad de embutición (chapa normal de uso general).



$d = \varnothing$  de punzón

$D = \varnothing$  del corte a medida

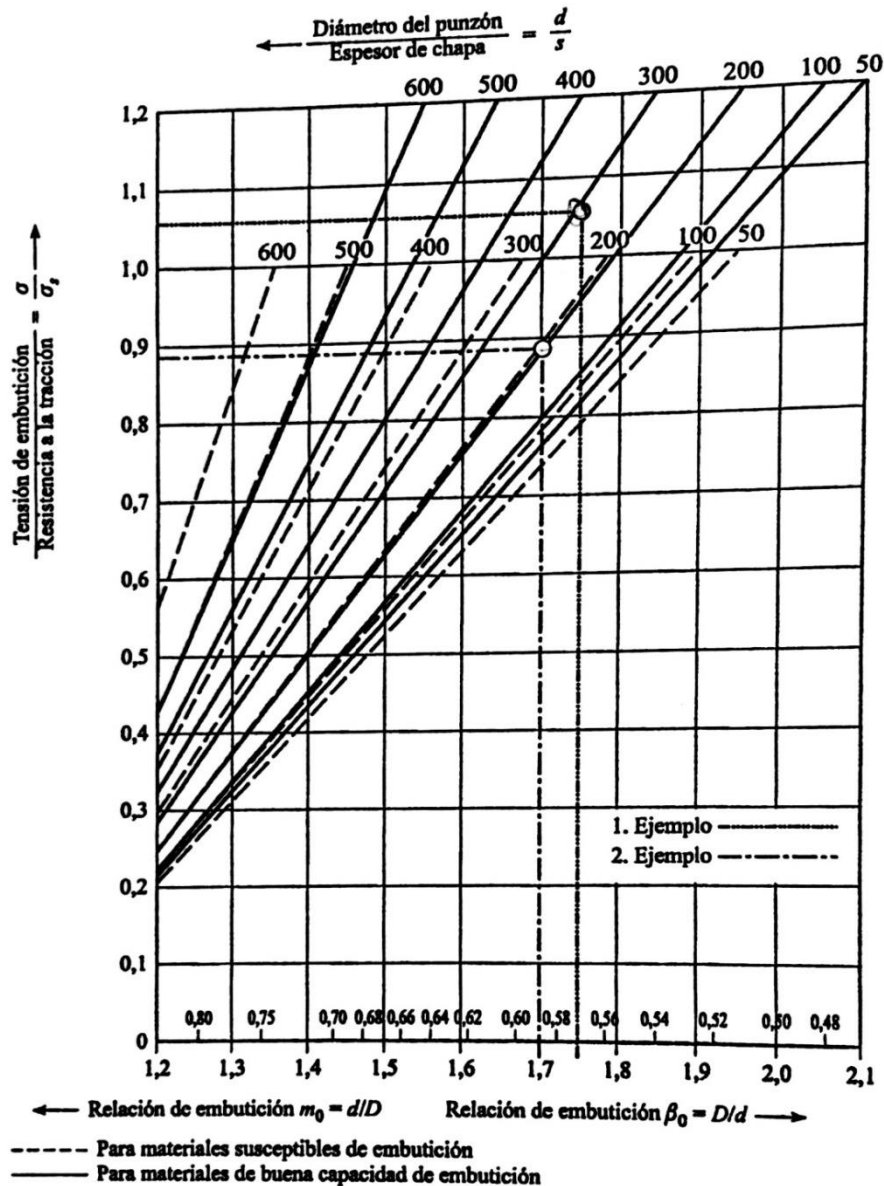
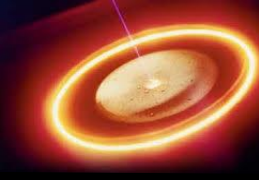
$s =$  Espesor de chapa

A = Material de buena embutición

B = Material de capacidad normal de embutición

A) 
$$\beta_{0\max} = 2,15 - 0,001 \frac{d}{s}$$

B) 
$$\beta_{0\max} = 2 - 0,0011 \frac{d}{s} \quad 135$$



**Buena capacidad de embutición**

$$n = \frac{1,2}{1,15 - 0,001 \frac{d}{s}} (\beta_0 - 1)$$

**Susceptible de embutición normal**

$$n = \frac{1,0}{1,0 - 0,001 \frac{d}{s}} (\beta_0 - 1)$$