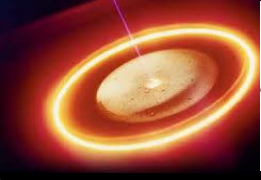




BLOQUE I. Tecnologías de fabricación

Tema 02. 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

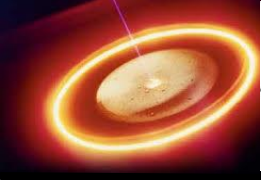
OPERACIONES SECUNDARIAS

SOLDADURA

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

MECANIZADOS

TRATAMIENTOS SUPERFICIALES



TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN EN MATERIALES CERÁMICOS

Operaciones previas +
aditivos

MATERIAL DE
PARTIDA

MOLDEO

SLIP
CASTING

TAPE
CASTING

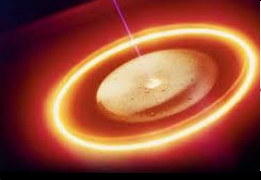
MOLDEO POR
INYECCIÓN /
EXTRUSIÓN DE FORMAS

PRENSADO

SECADO

SINTERIZADO /
TRATAMIENTO TÉRMICO

OPERACIONES
SECUNDARIAS



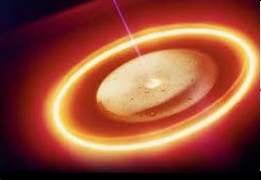
TECNOLOGÍA DE POLVOS

VENTAJAS

- Empleo en metales con elevado punto de fusión y baja ductilidad
- Elimina la pérdida de material
- Buen control dimensional
- Se puede emplear en un amplio rango de aleaciones
- Técnica eficiente en términos de coste y energía

DESVENTAJAS

- Mayores costes iniciales que otras técnicas
- Presencia de porosidad residual
- Menor ductilidad
- Propiedades mecánicas ligeramente inferiores
- Existen ciertas limitaciones en la complejidad de la geometría de la pieza



TECNOLOGÍA DE POLVOS

Obtención de piezas/elementos metálicos/cerámicos a partir de polvo metálico/cerámico



POLVO

PUREZA

MORFOLOGÍA

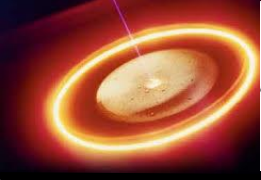
TAMAÑO

MÉTODO DE
OBTENCIÓN

COMPOSICIÓN



COSTE



TECNOLOGÍA DE POLVOS

**OBTENCIÓN DEL
POLVO**

**MEZCLA /
ALEACIÓN**

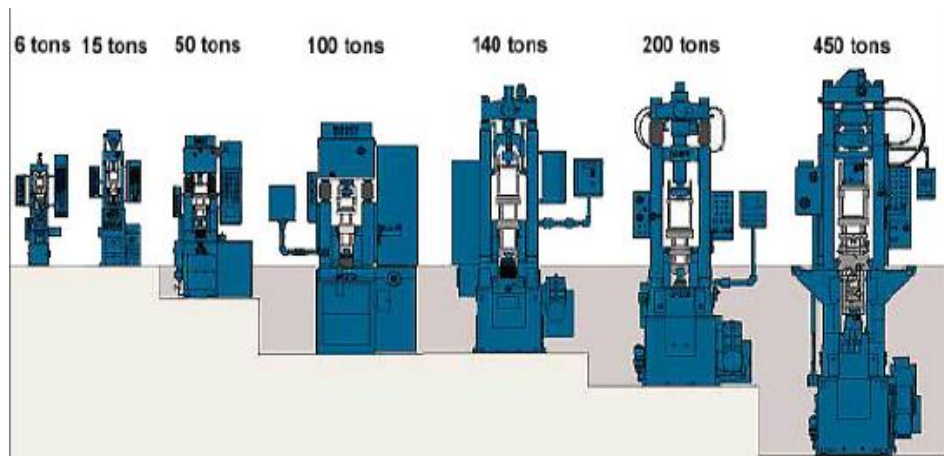


**COMPACTACIÓN
DEL POLVO****

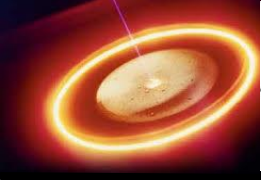


SINTERIZACIÓN

**OPERACIONES
SECUNDARIAS**

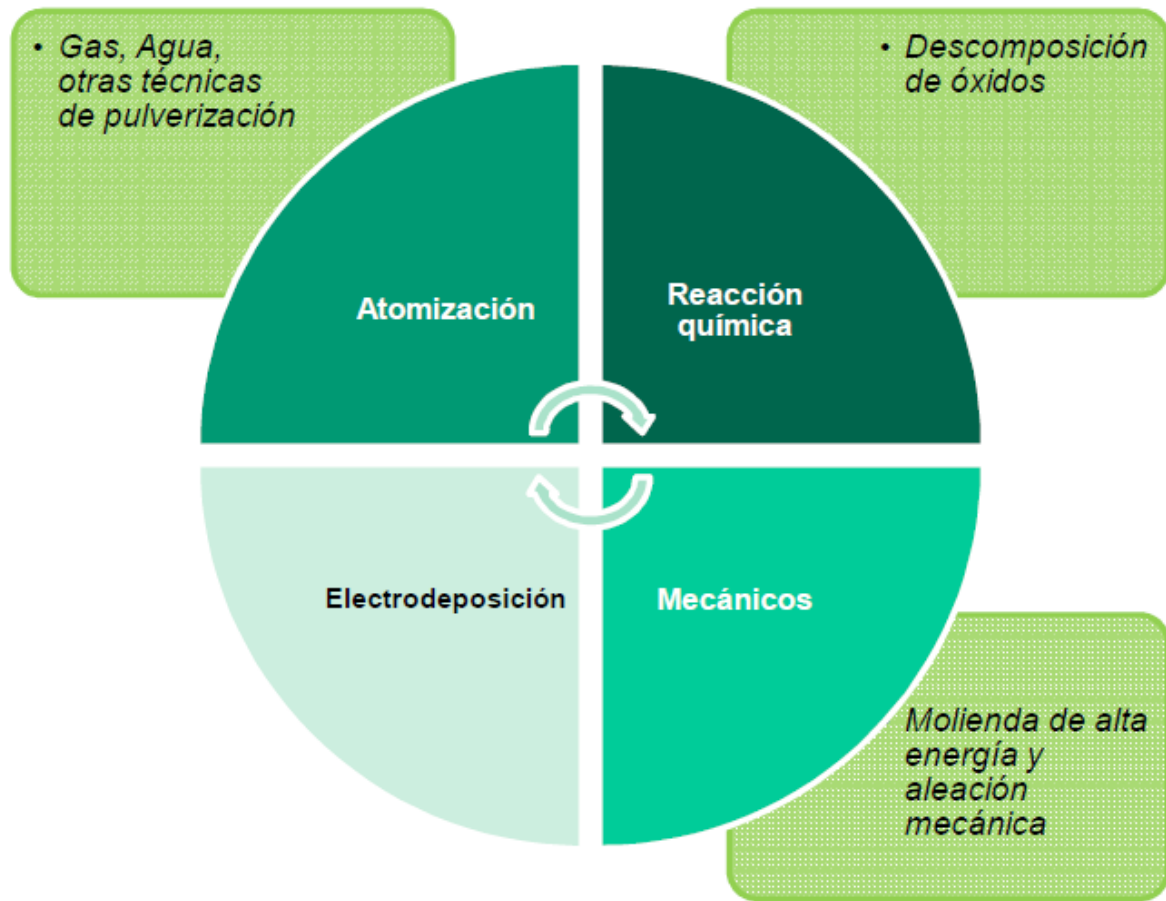


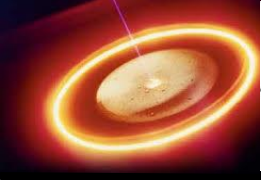
**Determinados procesos menos habituales requieren piezas muy porosas carentes de una etapa de compactación habitual



TECNOLOGÍA DE POLVOS

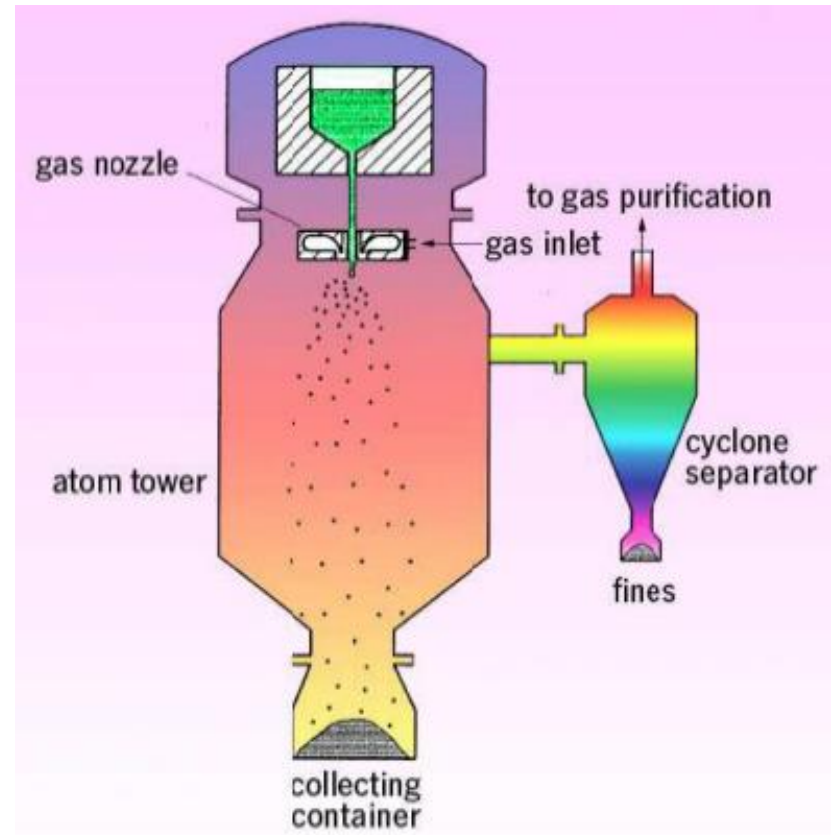
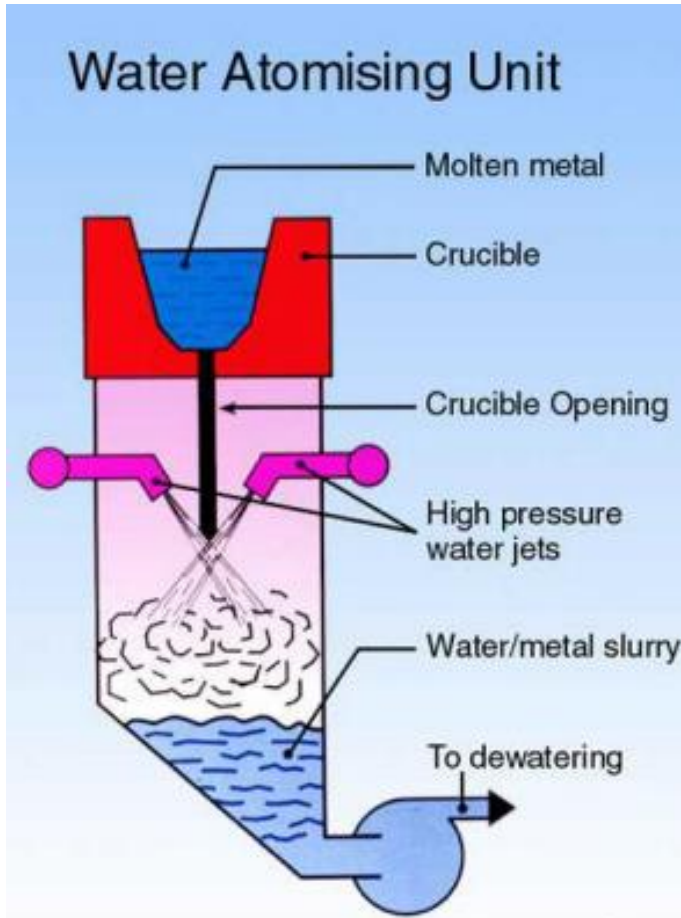
OBTENCIÓN DEL POLVO

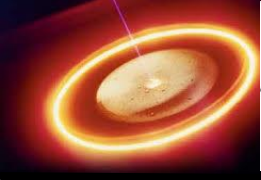




TECNOLOGÍA DE POLVOS

ATOMIZACIÓN



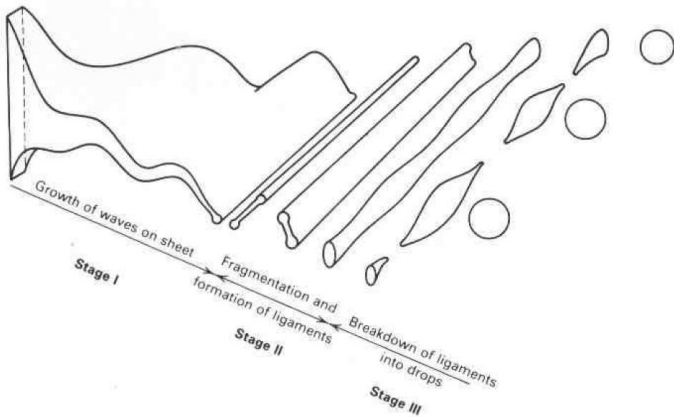


TECNOLOGÍA DE POLVOS

ATOMIZACIÓN EN GAS

ATMÓSFERA INERTE

MENOR VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO



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

FLUJO

VISCOSIDAD

TEMPERATURA

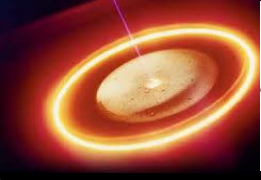
TEMPERATURA

CAUDAL

TIPO

BOQUILLA DE SALIDA

VELOCIDAD



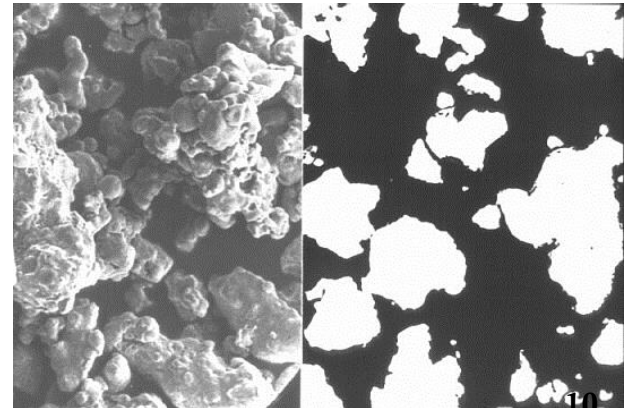
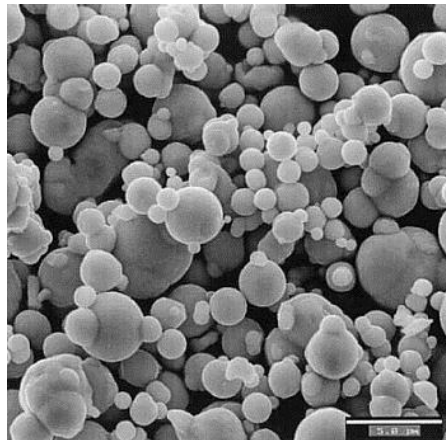
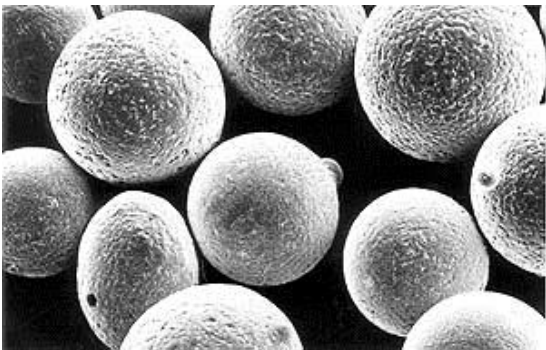
TECNOLOGÍA DE POLVOS

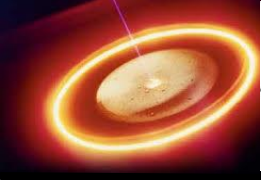
ATOMIZACIÓN EN AGUA

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:

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



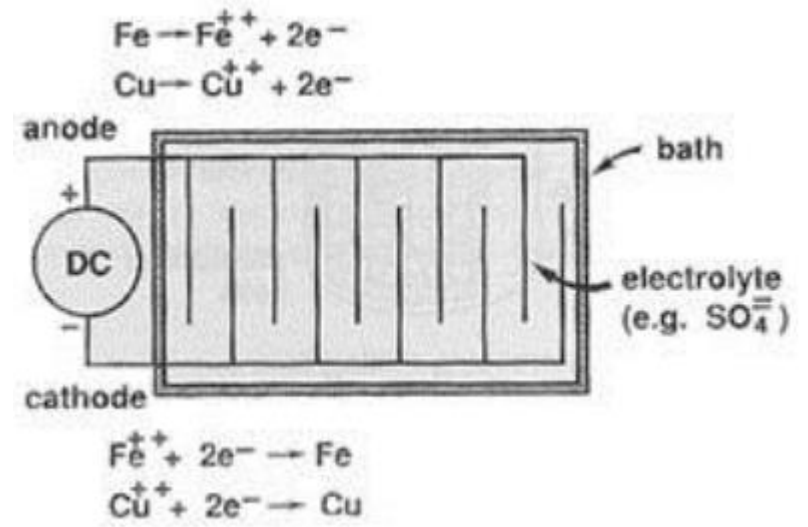
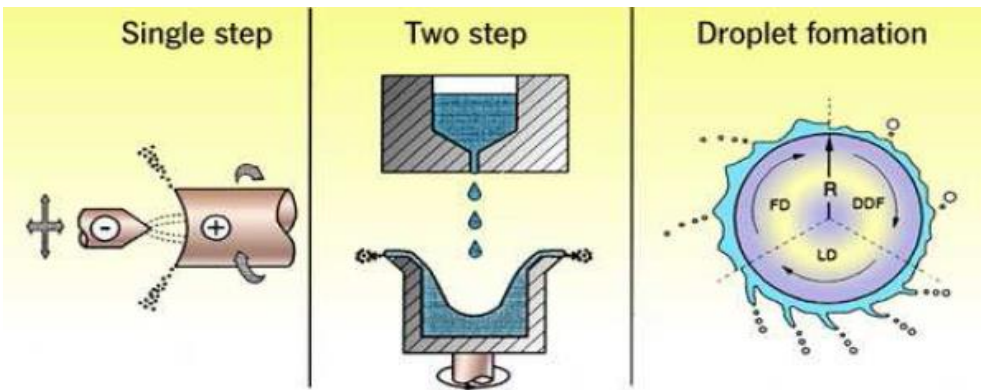


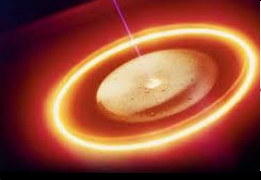
TECNOLOGÍA DE POLVOS

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

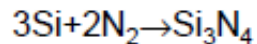
- Velocidad de proceso limitada por difusión de las especies a través del sólido
- Temperatura y velocidad de calentamiento son los parámetros más importantes a controlar

Descomposición térmica:

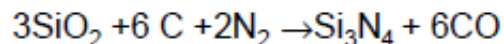
- Se parte de M-Carbonilos (Por ejemplo: $\text{Fe} + 5 \text{CO} \rightarrow \text{Fe}[\text{CO}]_5$)
- Descomposición térmica del compuesto en presencia de catalizador para formar el polvo metálico → Tamaño de partícula en función de la temperatura

Otras reacciones químicas para obtener diferentes compuestos:

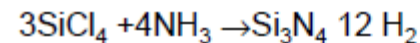
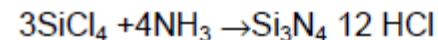
a) Nitruración de polvos de Si



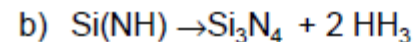
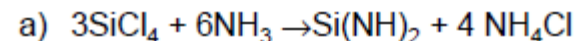
b) Reducción carbotérmica de la sílice

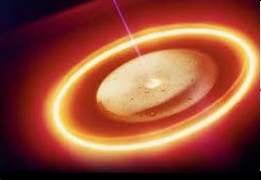


c) Reacción fase vapor



d) Precipitación y descomposición térmica





TECNOLOGÍA DE POLVOS

OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

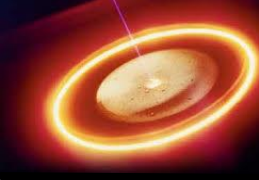
PROCESOS MECÁNICOS

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

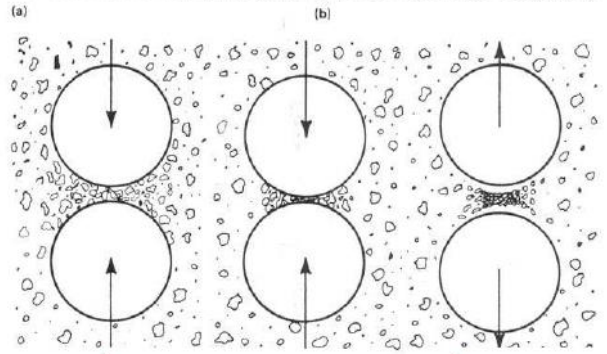
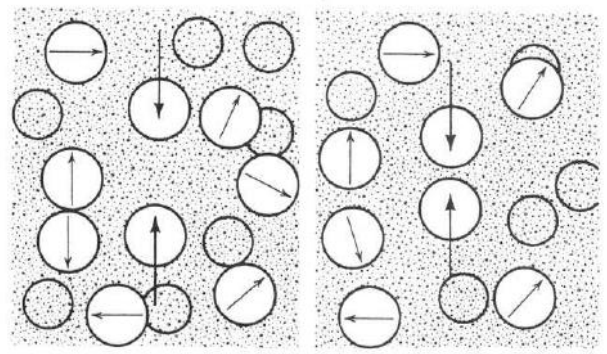


TECNOLOGÍA DE POLVOS

OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

MOLIENDA

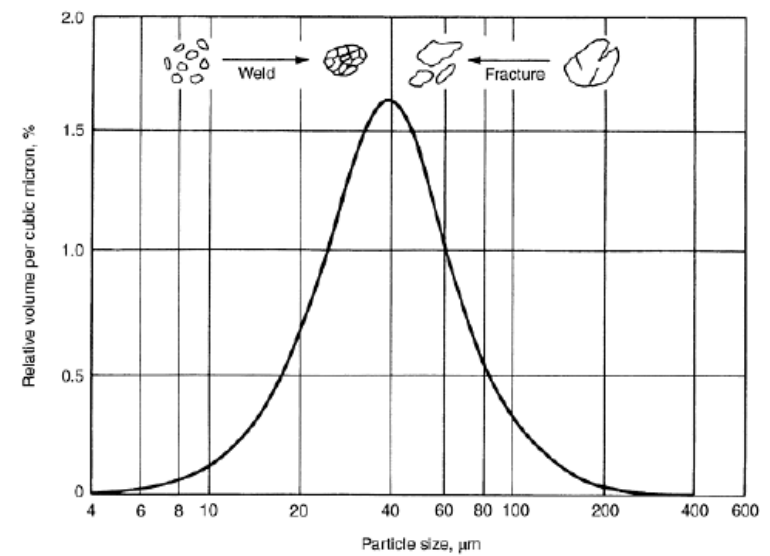
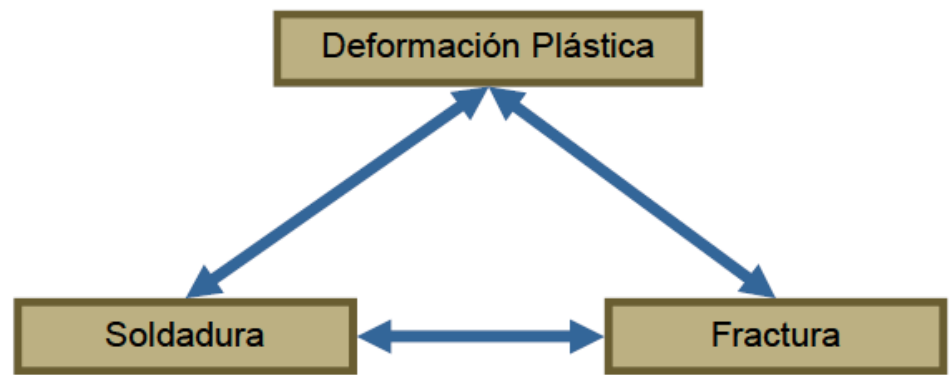
a) y b) Aproximación de las bolas

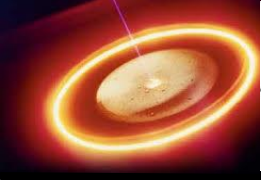


Atrapado y compactación de partículas.

Aglomeración

Abandono del aglomerado por energía elástica



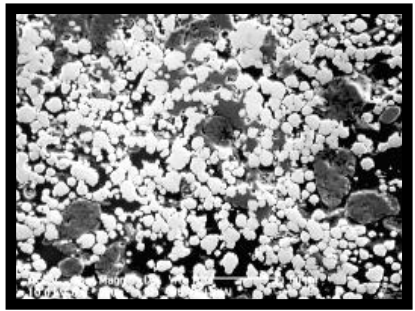
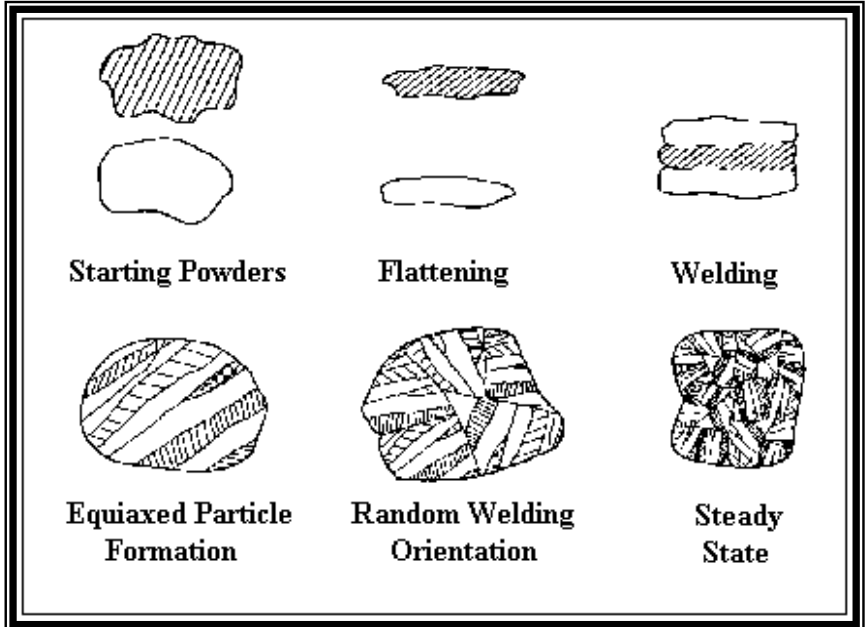


TECNOLOGÍA DE POLVOS

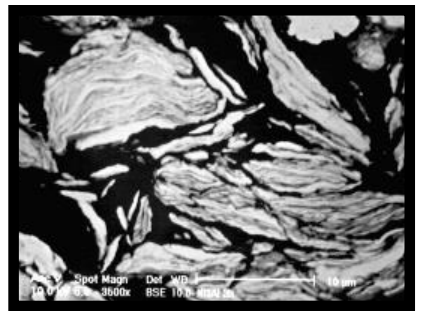
OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

ALEACIÓN MECÁNICA

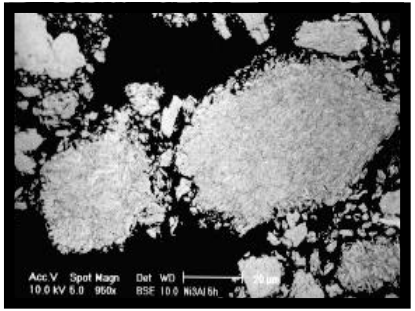
Sistemas dúctil-dúctil



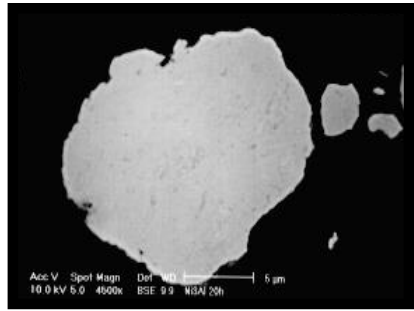
0 horas



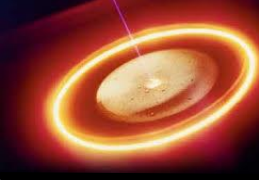
3 horas



5 horas



20 horas

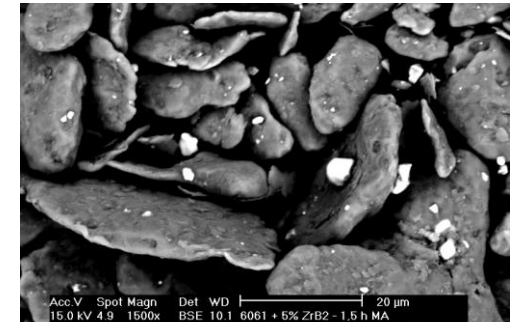


TECNOLOGÍA DE POLVOS

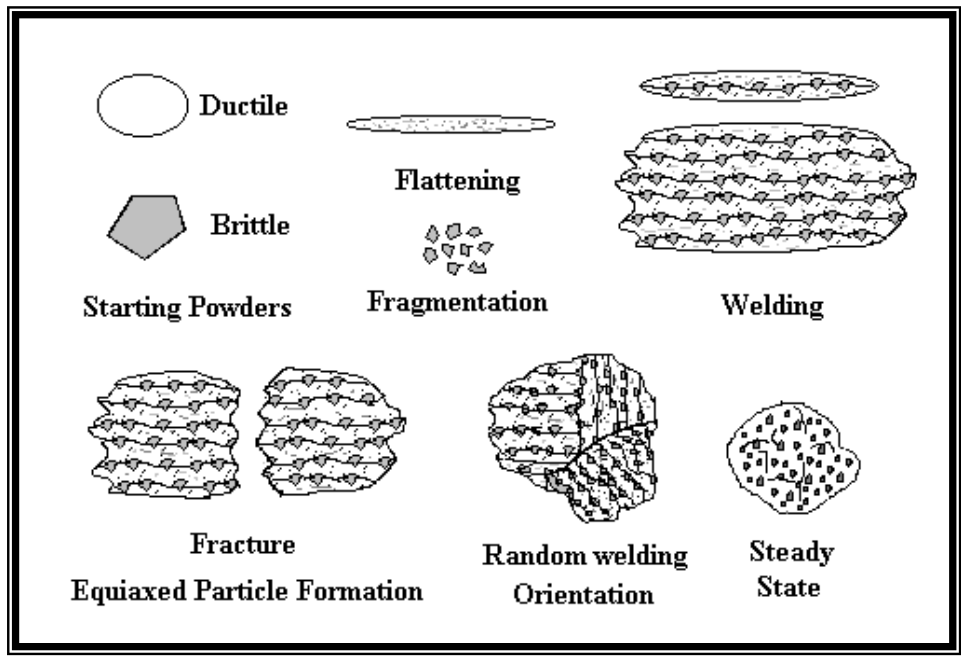
OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

ALEACIÓN MECÁNICA

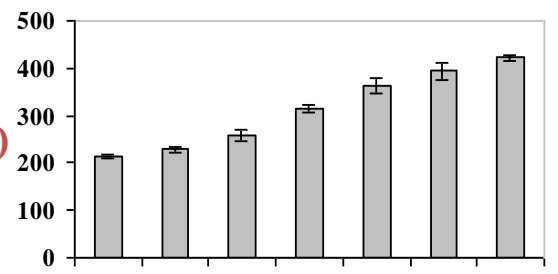
AA6061 + 5 % Si₃N₄



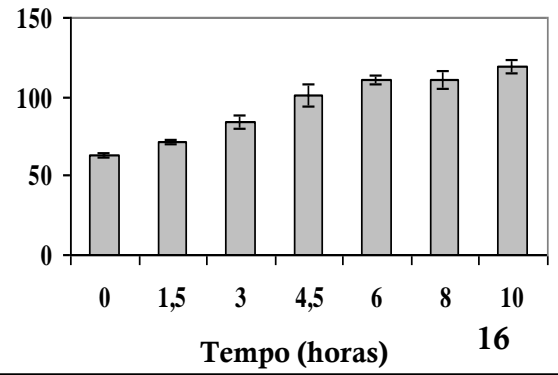
Sistemas dúctil-frágil

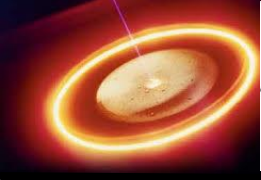


Resistencia a tracción (MPa)



Dureza (HV)





TECNOLOGÍA DE POLVOS

OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE POLVO

ALEACIÓN MECÁNICA

AA6061 + 5 % Si_3N_4

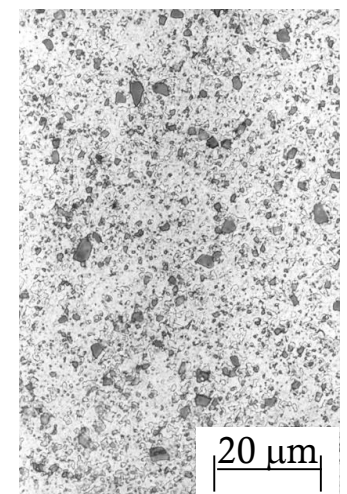
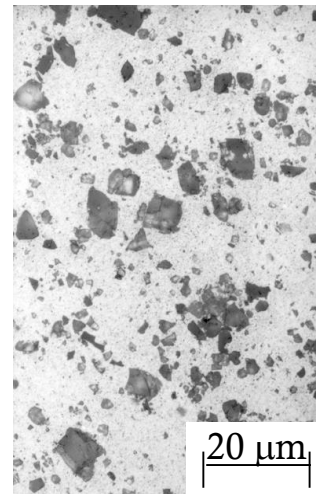
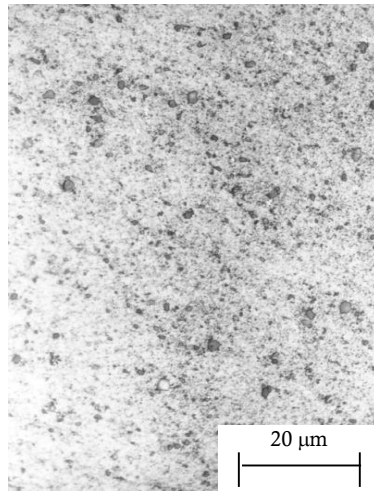
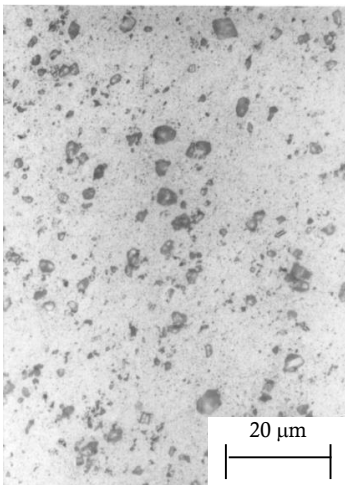
AA6061 + 15 % AlN

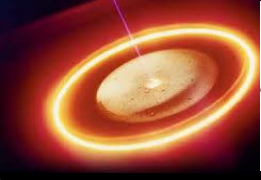
Mezcla convencional

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

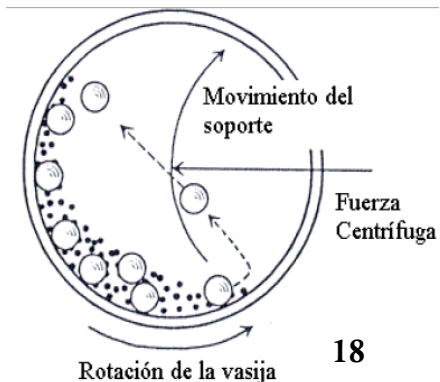
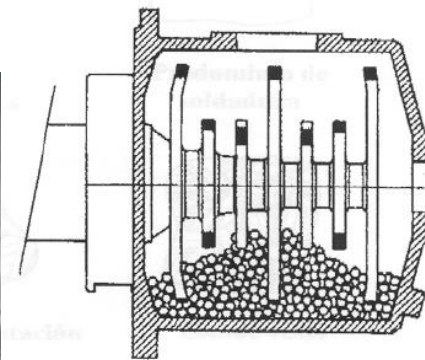
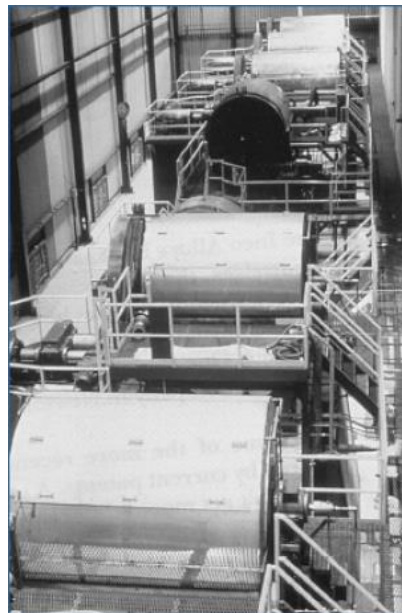
Tipo de molino y medio de molienda

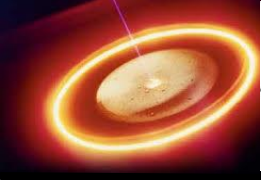
Temperatura y atmósfera

Relación masa polvo-bolas (tiempo)

Velocidad molienda

Tiempo de molienda





TECNOLOGÍA DE POLVOS

Parámetros importantes del polvo

Composición

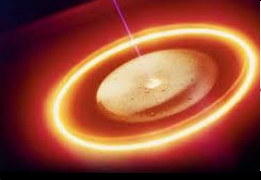
- Composición química
- Microestructura
- Estructura química
(superficial y en volumen)

Geometría / Morfología

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

Otras Propiedades

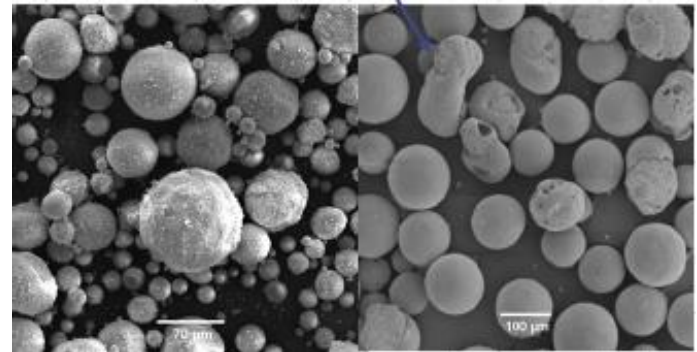
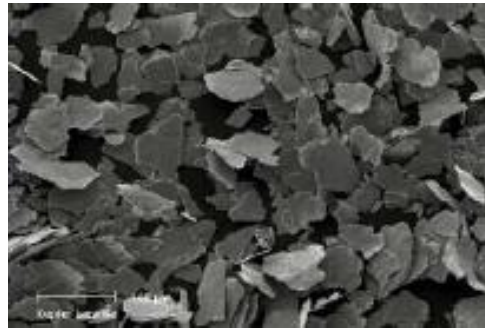
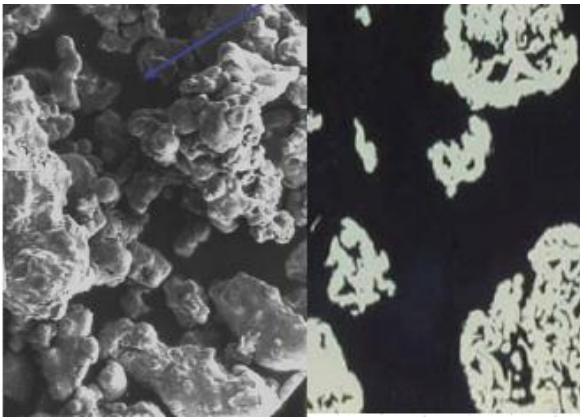
- Flujo del polvo
- Densidad aparente
- Comprensibilidad
- Resistencia de los compactos en verde
- Propiedades térmicas



TECNOLOGÍA DE POLVOS

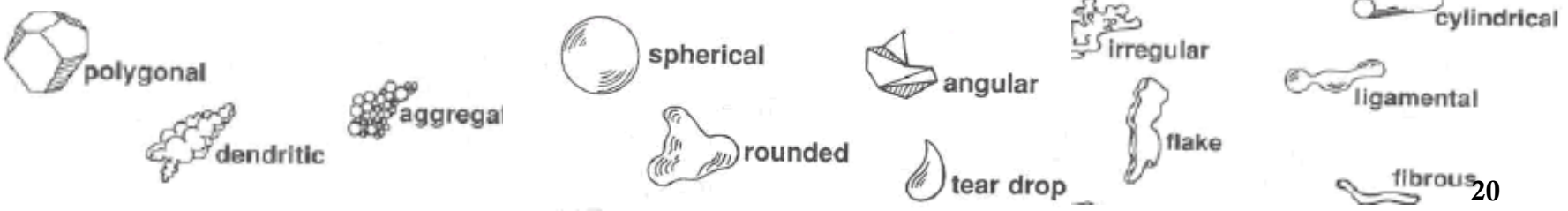
Parámetros importantes del polvo

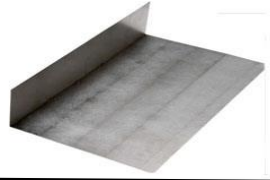
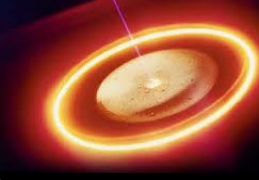
Geometría / Morfología



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

Superficie específica → Muy importante para la sinterización





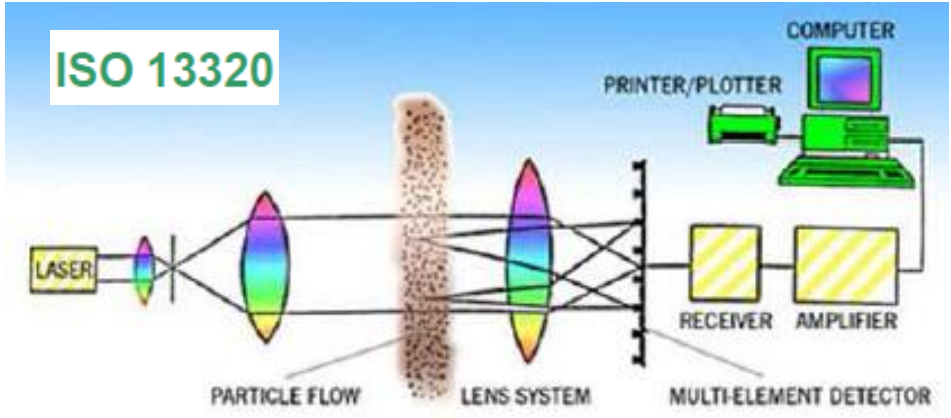
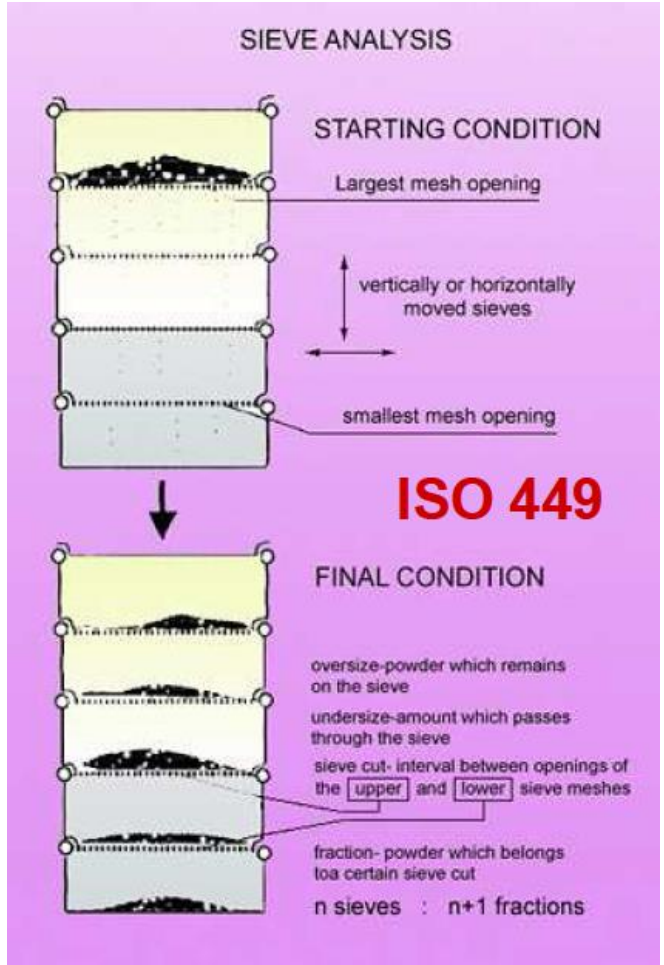
TECNOLOGÍA DE POLVOS

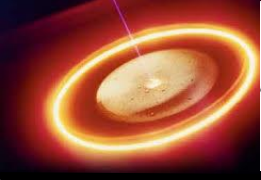
Parámetros importantes del polvo

Geometría / Morfología

Distribución de tamaños de partículas

Tamizado y el análisis de dispersión de haz de luz láser



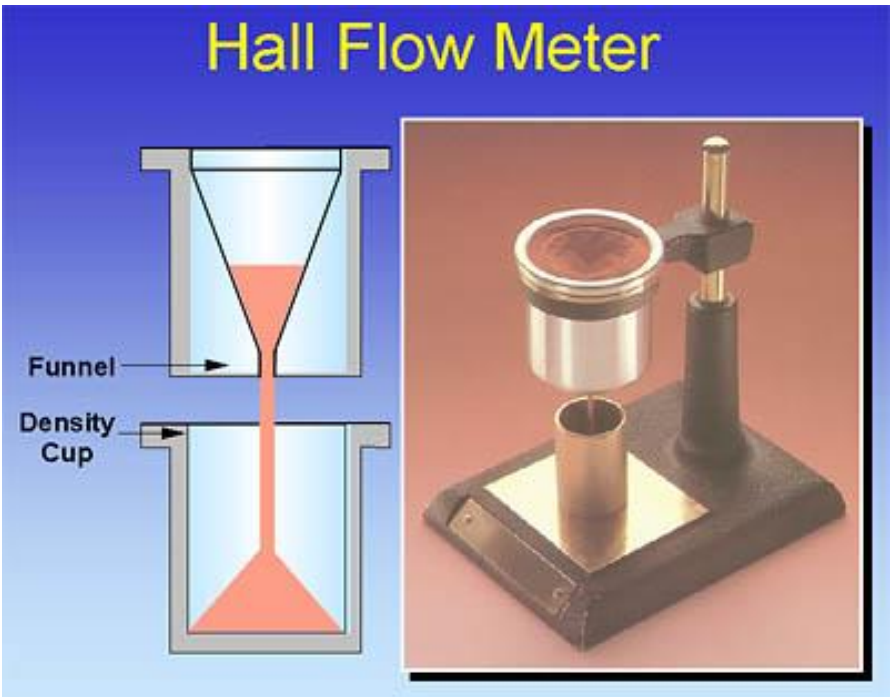
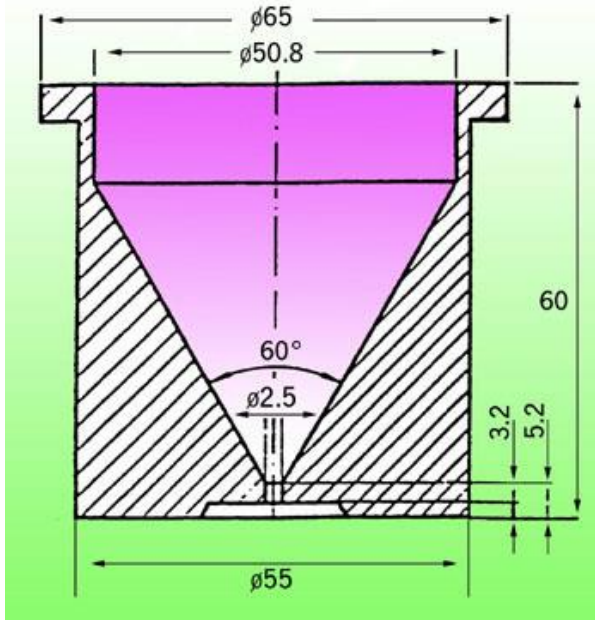


TECNOLOGÍA DE POLVOS

Parámetros importantes del polvo

Propiedades físicas – Flujo del polvo

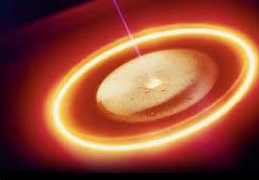
ISO 3923/3923/4490



**RUGOSIDAD
SUPERFICIAL**

**TAMAÑO DE
PARTÍCULA**

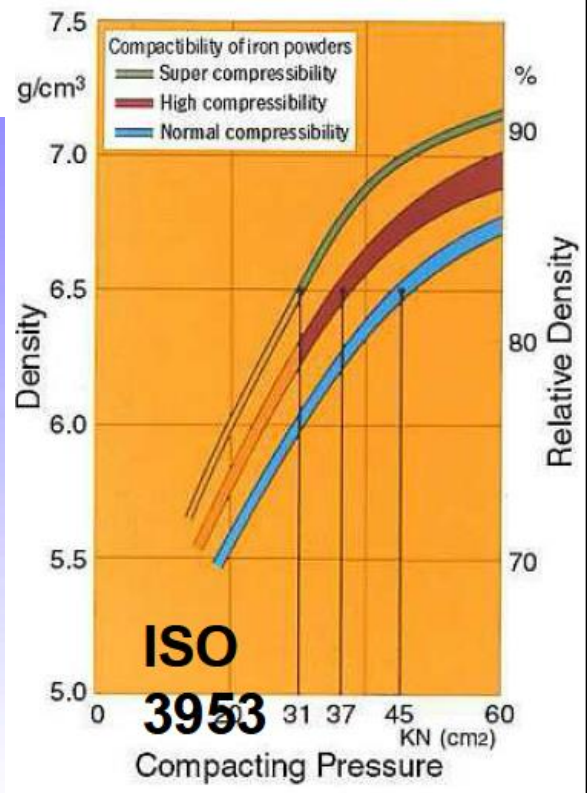
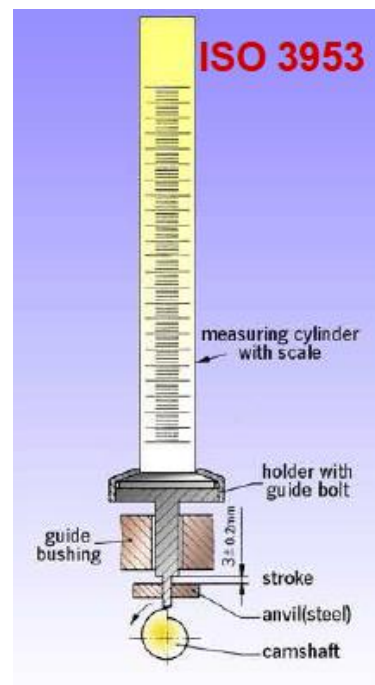
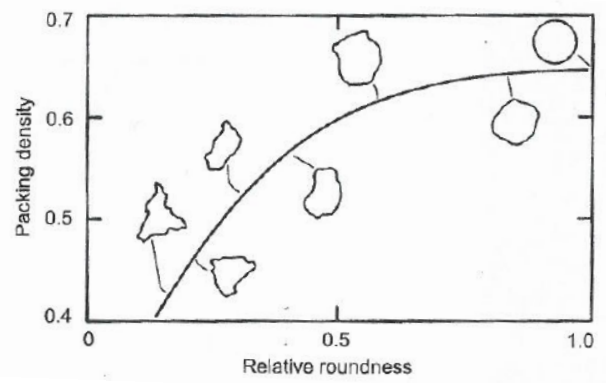
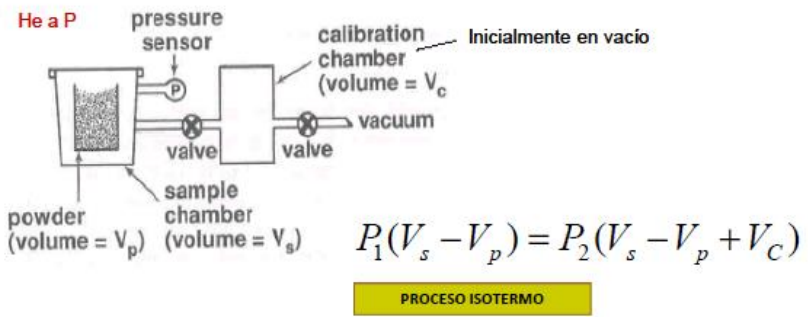
**ÁREA
SUPERFICIAL**



TECNOLOGÍA DE POLVOS

Parámetros importantes del polvo

Propiedades físicas – Densidad

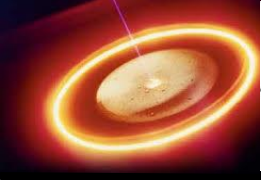


Densidad
Aparente

Densidad de polvo
vibrado

Densidad del
polvo

Densidad en
verde



TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación Uniaxial

Carga del polvo en la matriz



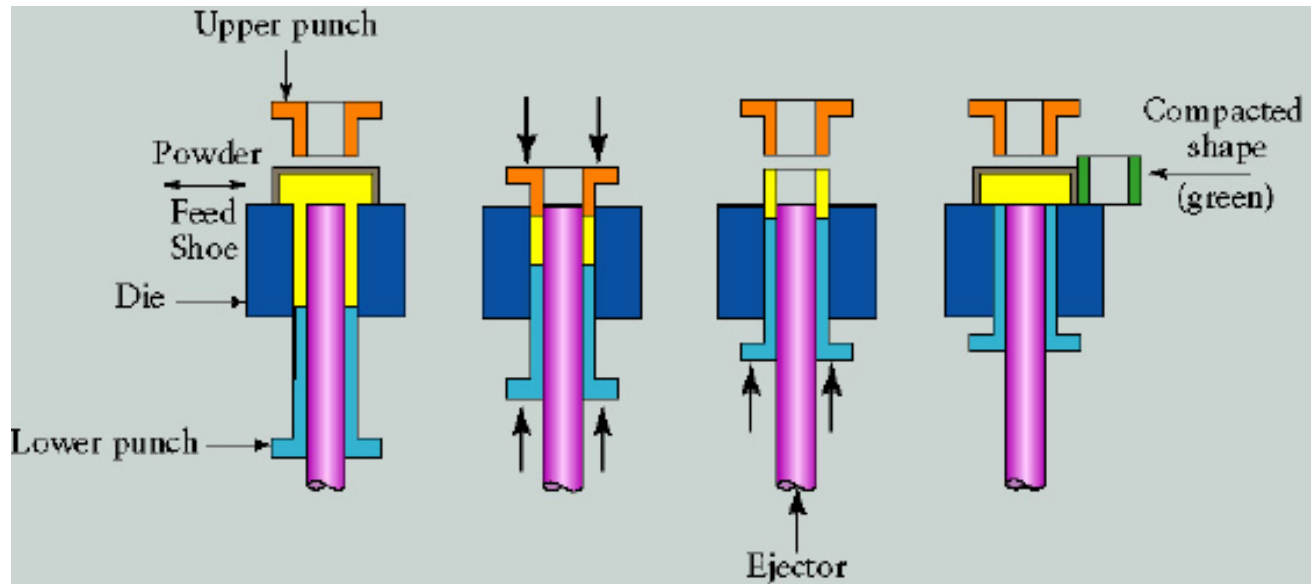
Compactación

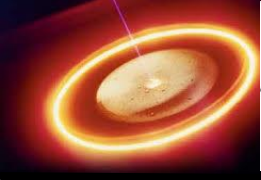


Eyección



Limpieza y recarga

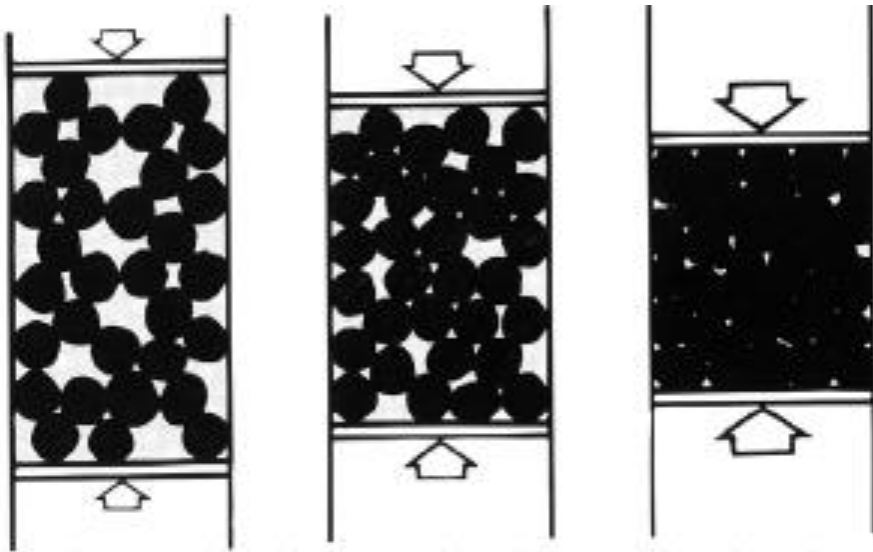




TECNOLOGÍA DE POLVOS

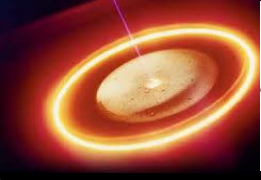
ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación Uniaxial



INCREMENTO DE LA PRESIÓN

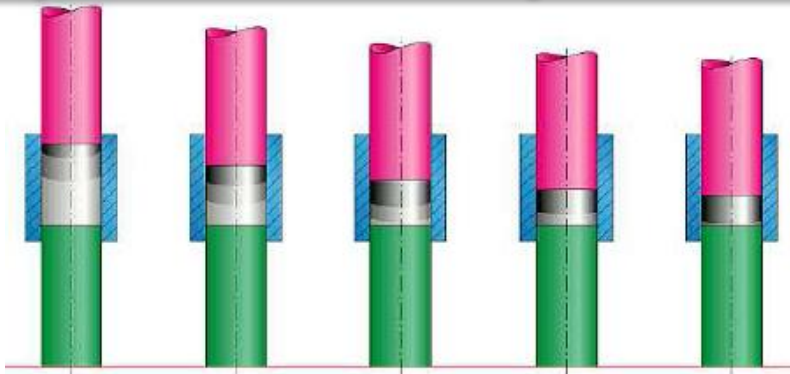
- Acercamiento de las partículas → Transferencia del polvo
- Compactación del polvo
 - Deformación elástica
 - Deformación plástica
 - Unión en frío de las partículas



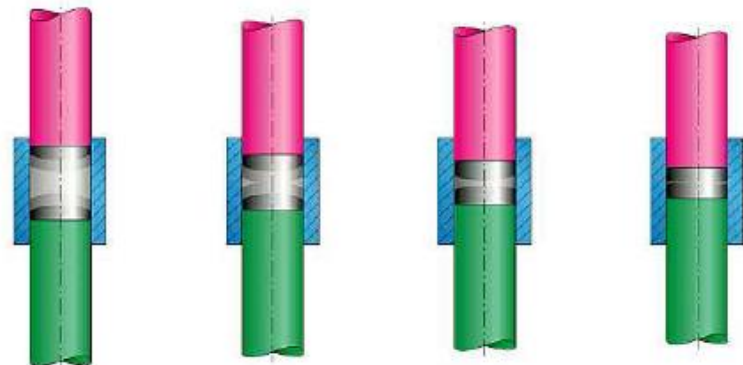
TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación Uniaxial – Tipos de Prensas

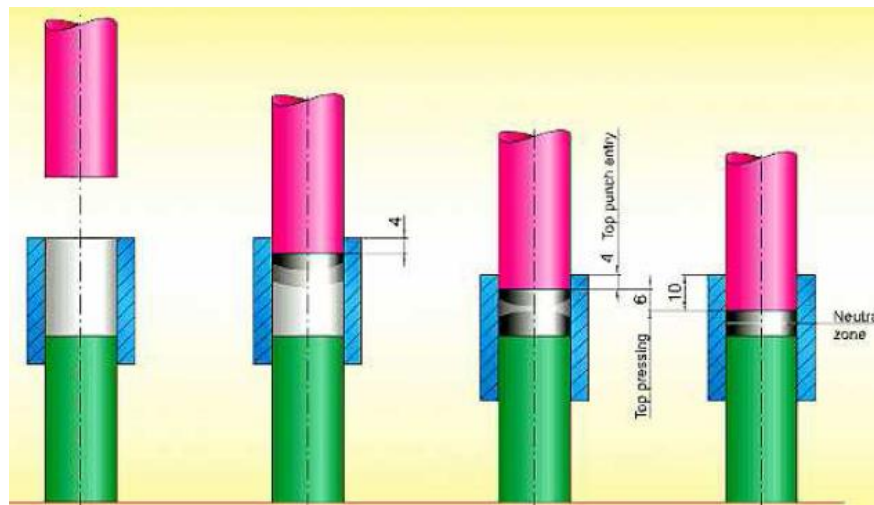


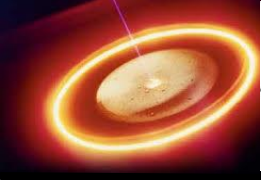
Prensa Simple Efecto



Prensa Doble Efecto

Matriz Flotante





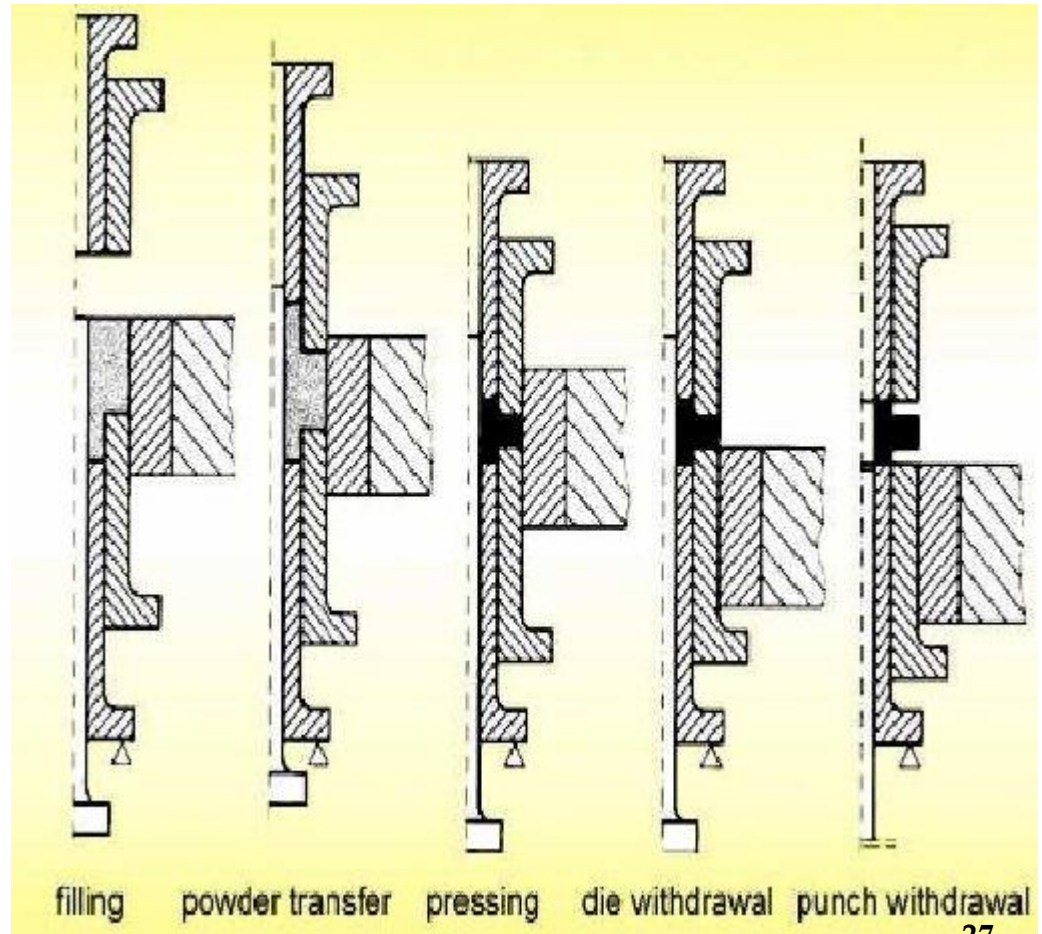
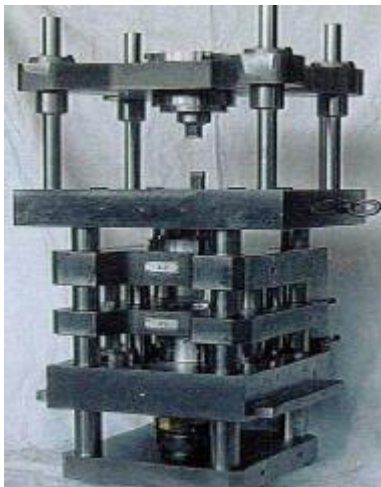
TECNOLOGÍA DE POLVOS

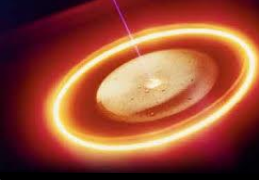
ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación Uniaxial – Tipos de Prensas

PRENSA MULTINIVEL

- Varios juegos de punzones gobernados por los diferentes platos

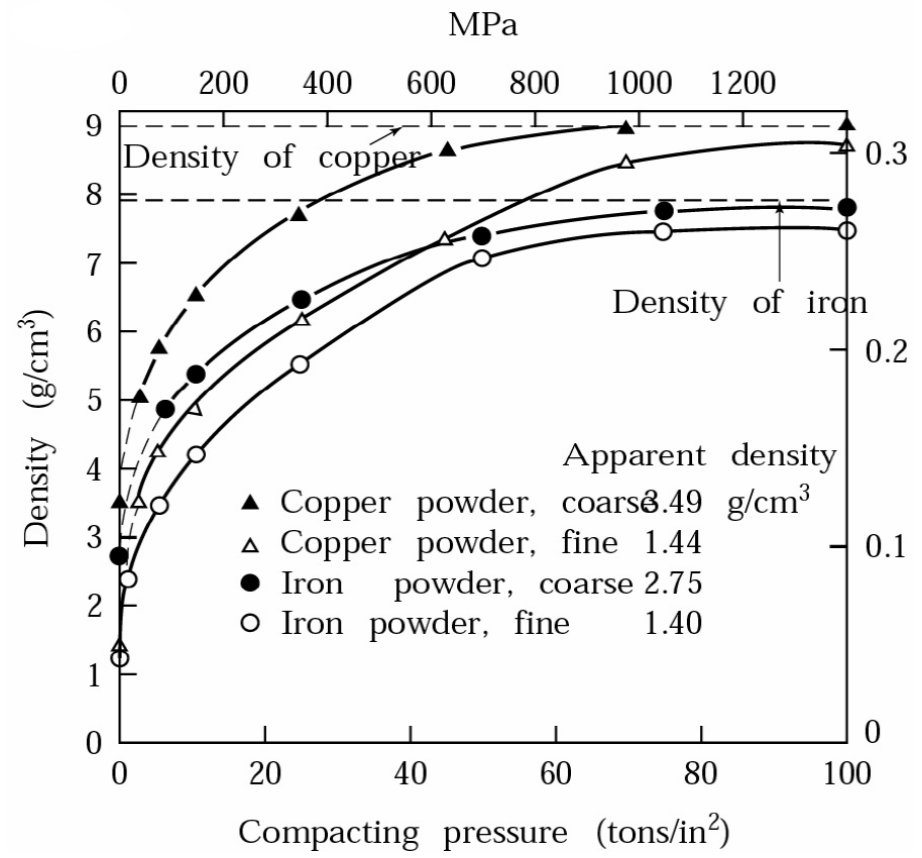




PULVIMETALURGIA

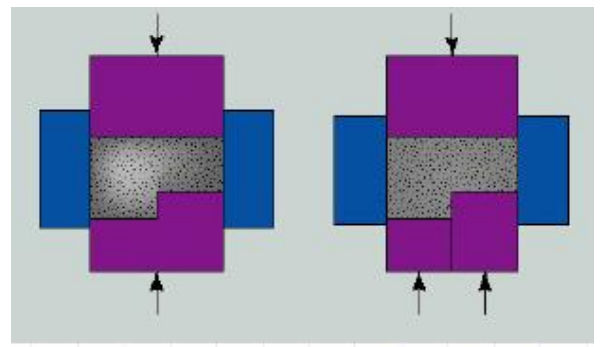
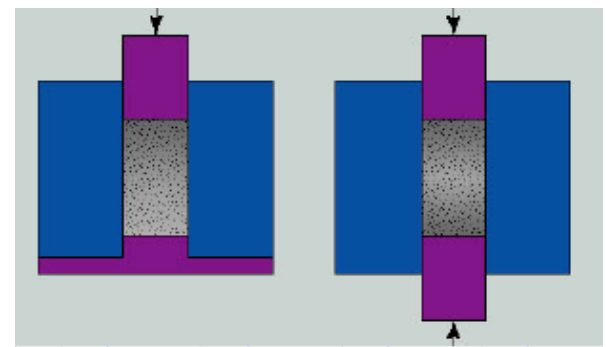
ETAPA DE COMPACTACIÓN

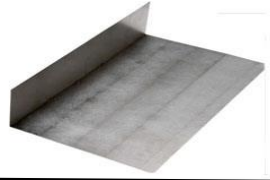
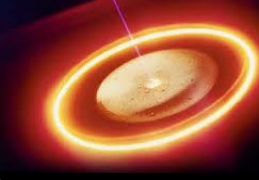
Compactación Uniaxial – Densidad en verde



DENSIDAD RELATIVA DEL COMPACTO EN VERDE

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

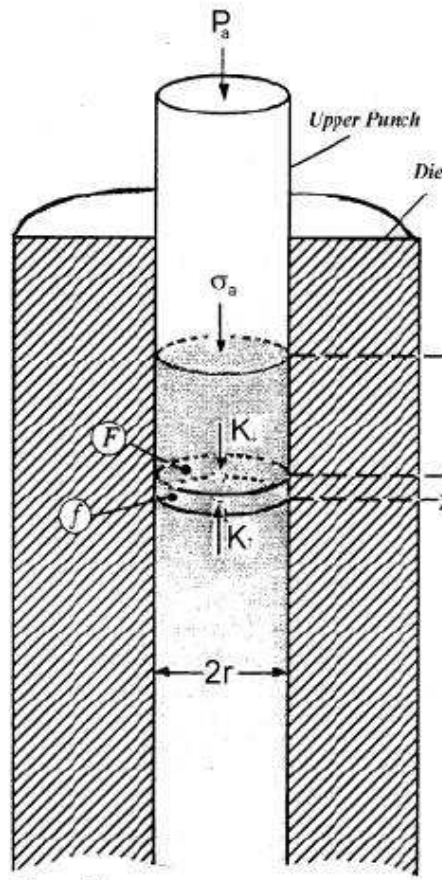




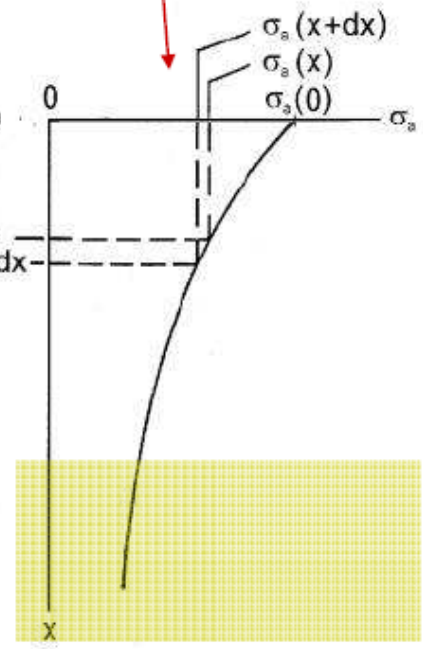
TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación Uniaxial – Densidad en verde

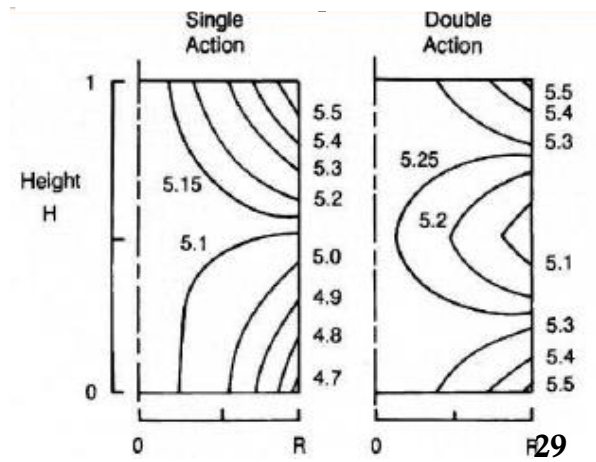
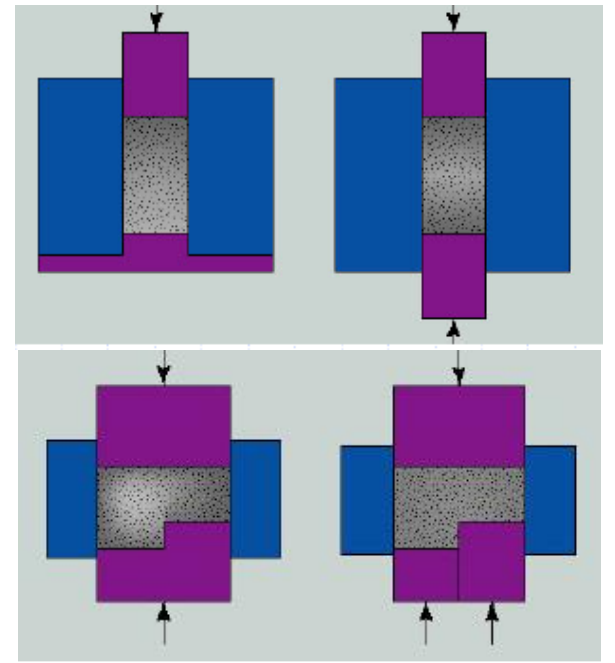


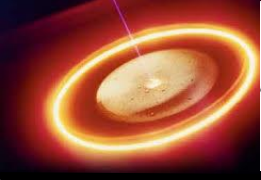
$$\sigma_a(x) = \sigma_a(0)e^{\frac{-2\mu x}{r}}$$



$$F = \pi r^2 Pa$$

$$f = 2\pi r dx$$



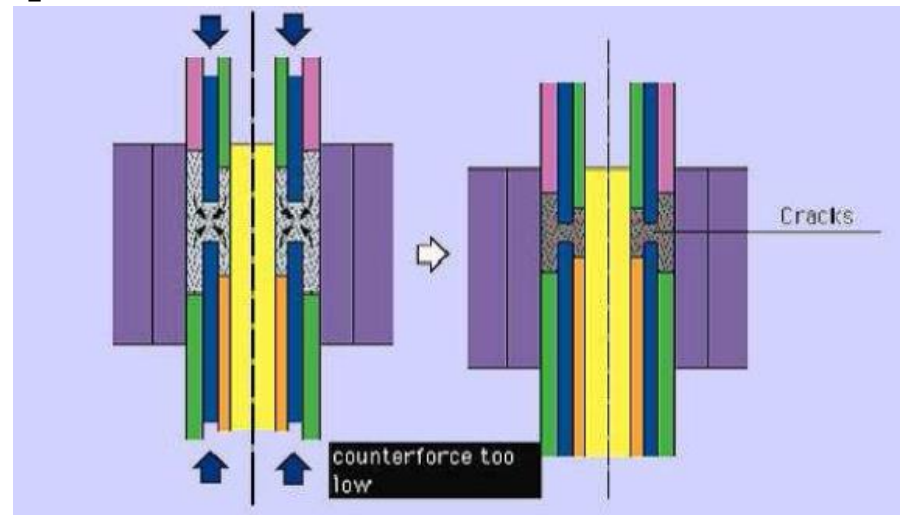
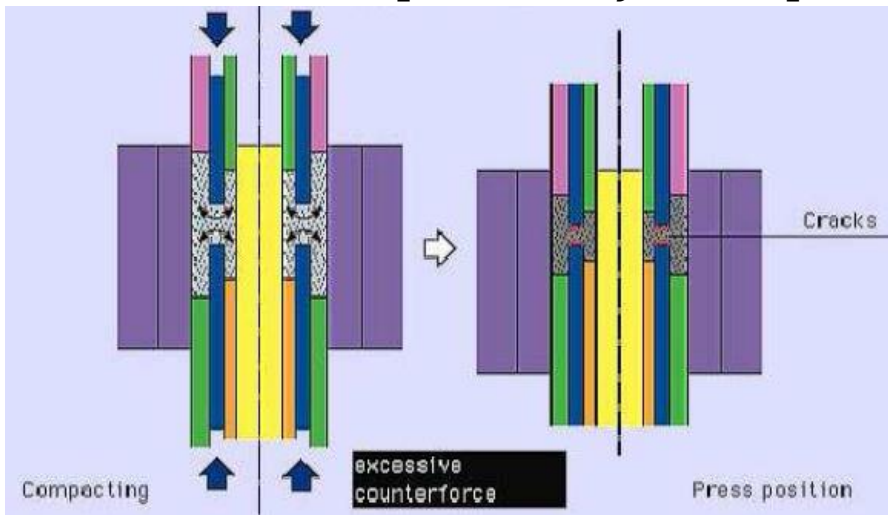


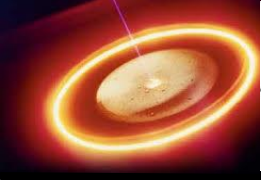
TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE COMPACTACIÓN

Compactación Uniaxial – Restricciones

- 5 – 6 toneladas de fuerza prensado por cada 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. Pre calentamiento del polvo (130 °C).

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

4. Mecanizado en verde.

5. Sinterización



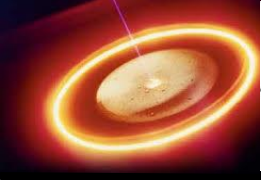
Menor tamaño de poro y forma redondeada

Distribución más homogénea de densidades

Mayor densidad en verde

Menor variación dimensional

Mejores propiedades en verde

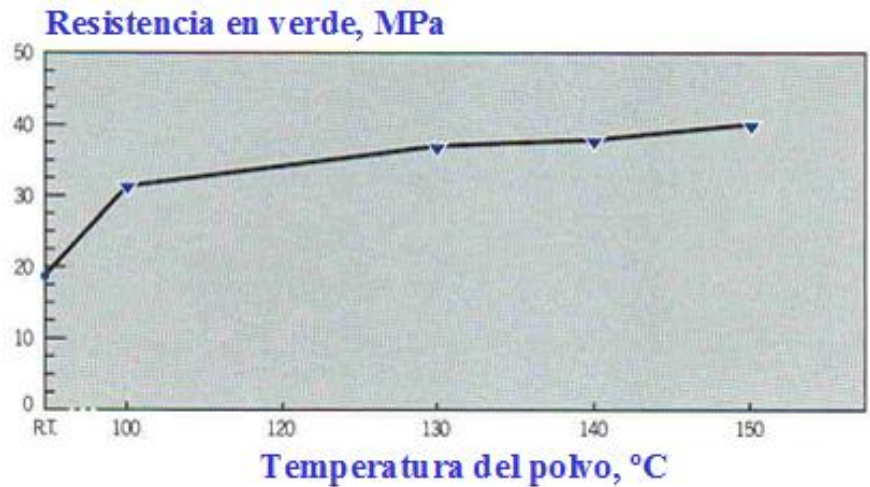
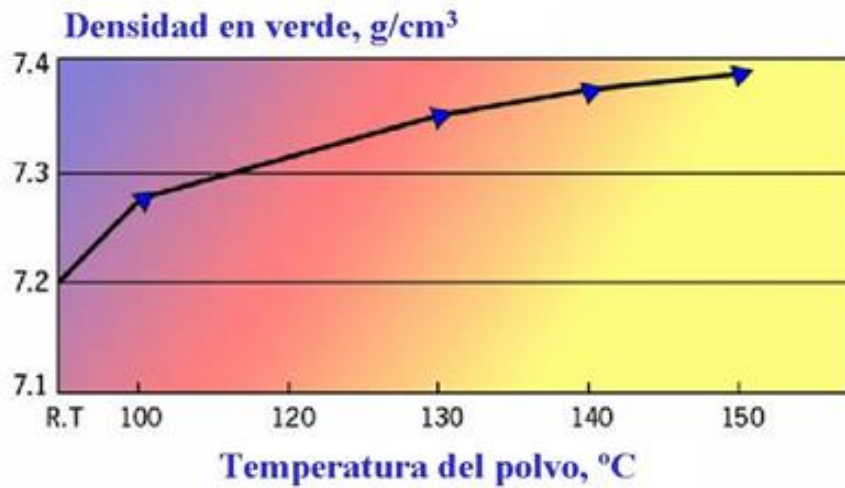


TECNOLOGÍA DE POLVOS

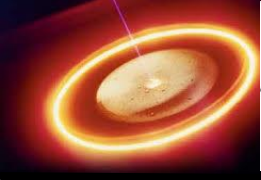
ETAPA DE COMPACTACIÓN

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

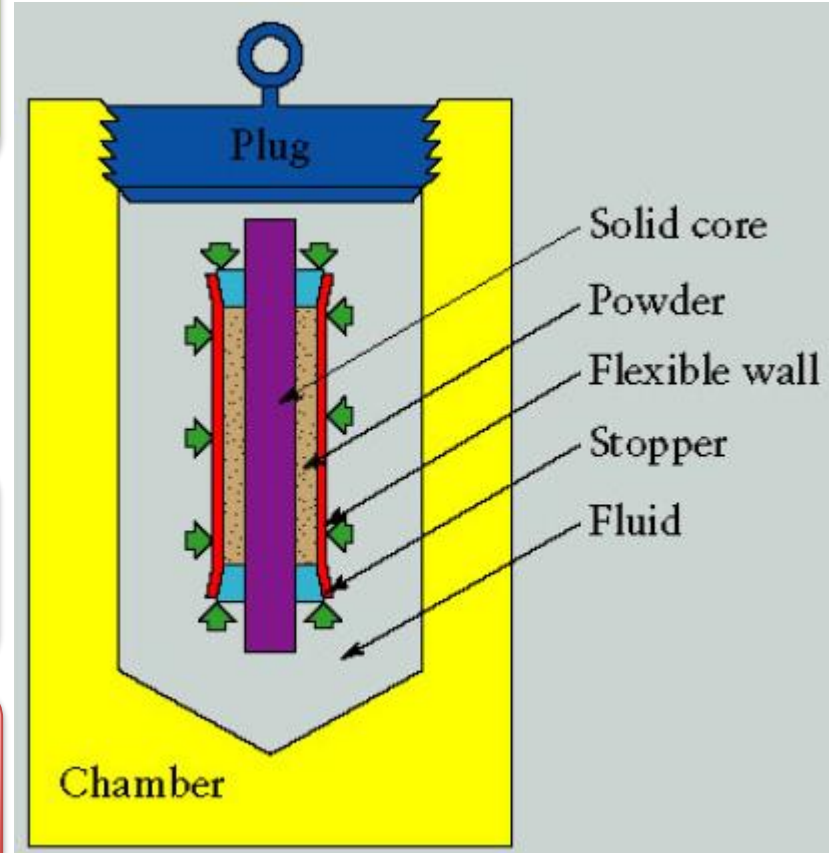
MAYORES
DENSIDADES
EN VERDE

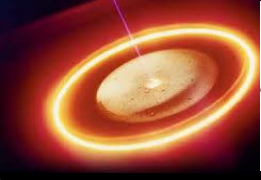
MÁS LENTO

MENOR
TOLERANCIA
DIMENSIONAL

PEOR
ACABADO
SUPERFICIAL

PROCESO
DISCONTINUO

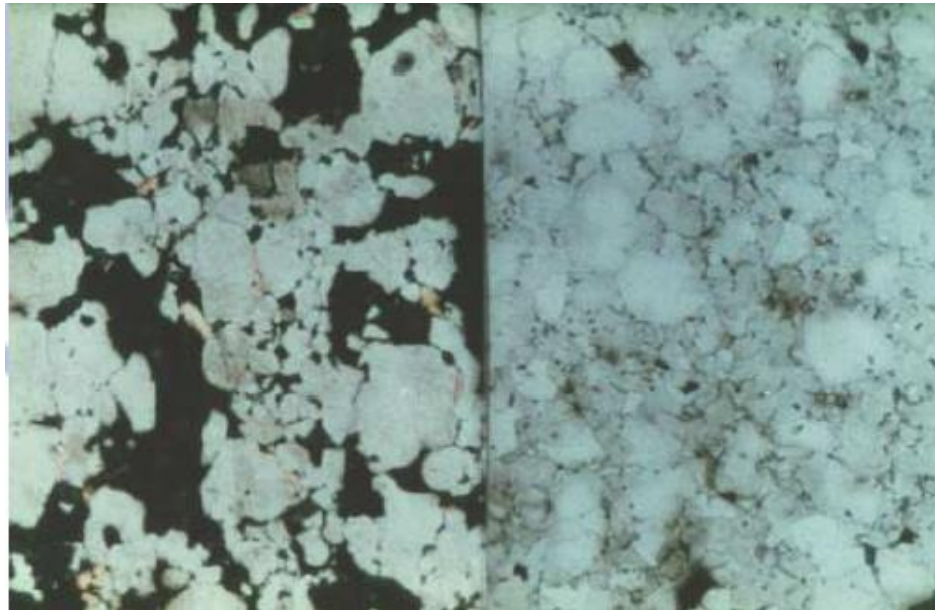


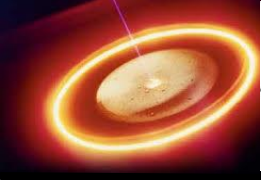


TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE SINTERIZACIÓN

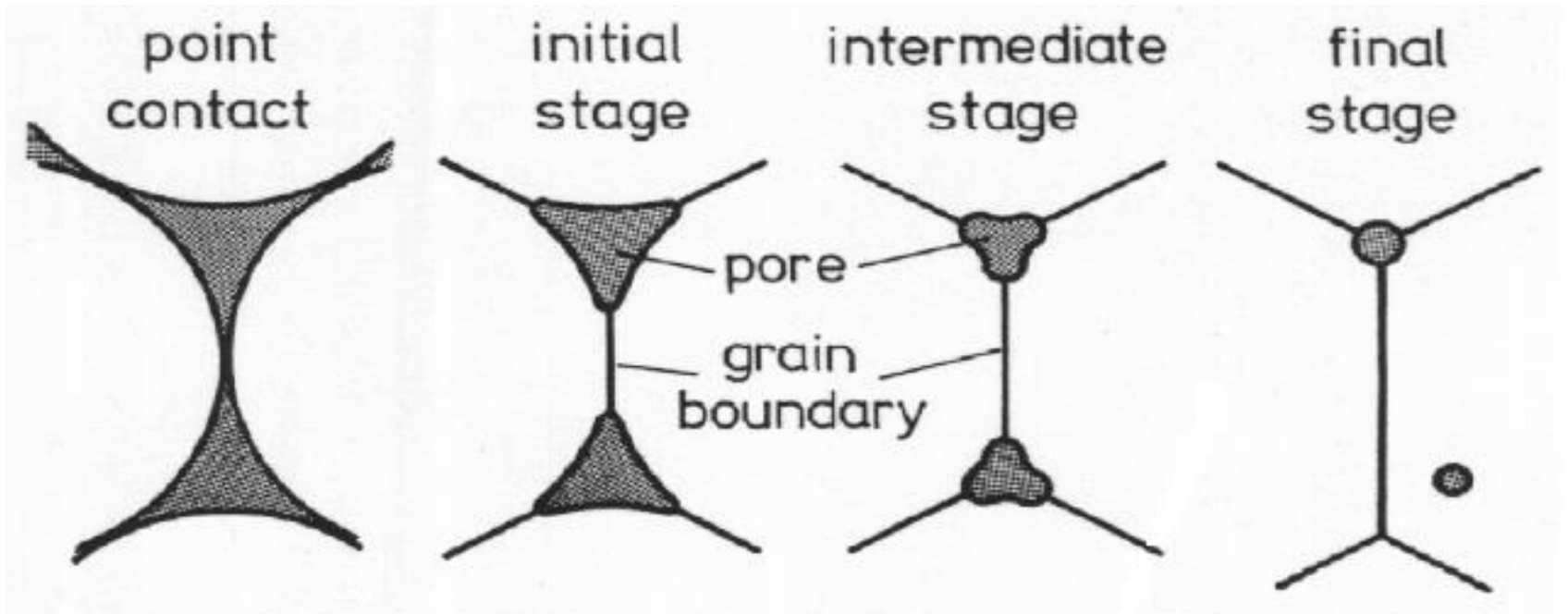
- Tratamiento térmico mediante el cual se favorece la unión entre partículas a través de fenómenos de transporte de masa lo que se traduce en una densificación mejorándose la resistencia y otras propiedades.
- El tratamiento se lleva a cabo a una temperatura menor que la temperatura de fusión del principal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





TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE SINTERIZACIÓN

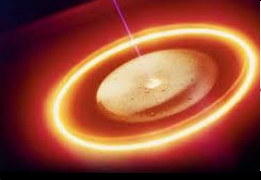


**Aproximación –
zonas de contacto**

**Formación de
cuellos**

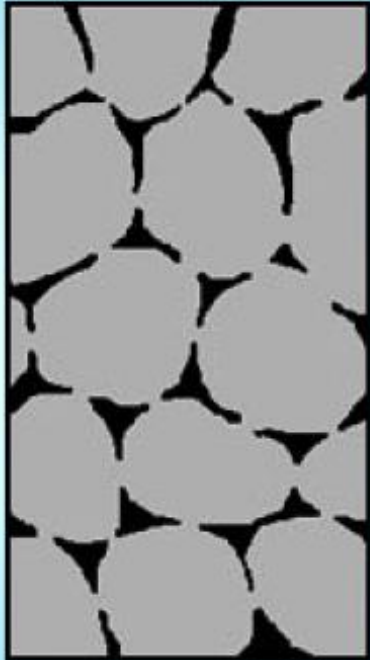
**Crecimiento de
cuellos -
Densificación**

**Densificación,
crecimiento
redondeo de poros**

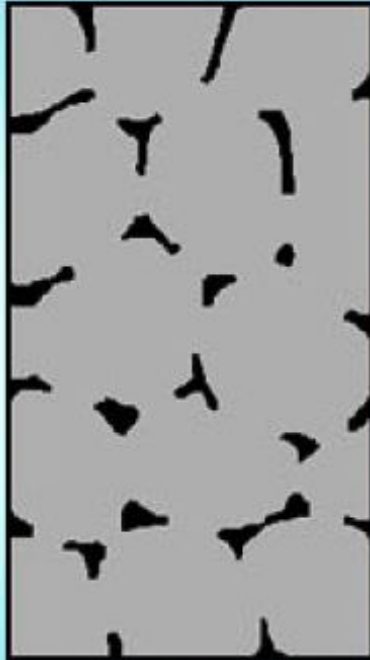


TECNOLOGÍA DE POLVOS

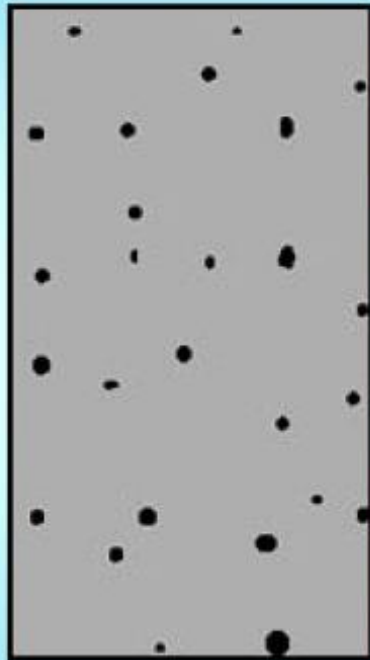
ETAPA DE SINTERIZACIÓN



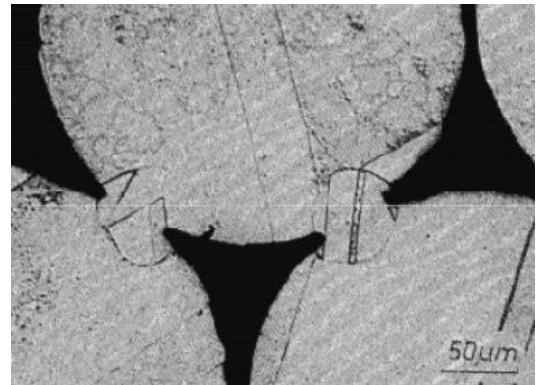
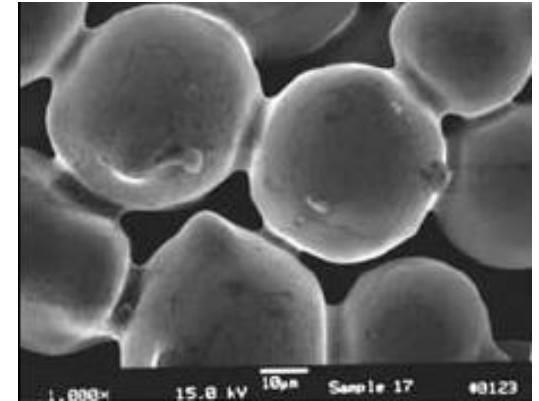
Initial stage



Intermediate stage



Final stage

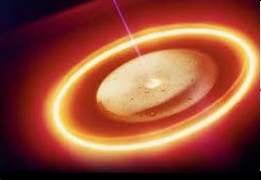


Aproximación –
zonas de contacto

Formación de
cuellos

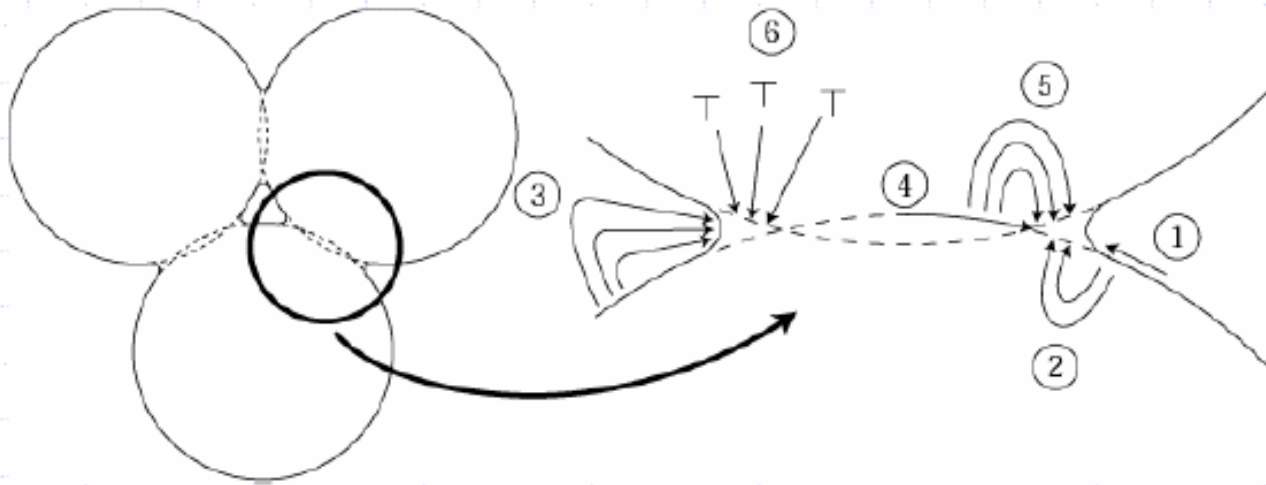
Crecimiento de
cuellos -
Densificación

Densificación,
crecimiento
redondeo de poros



TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE SINTERIZACIÓN



1

Difusión Superficial

2

Difusión en volumen

3

Difusión en fase vapor

4

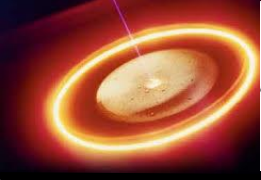
Difusión en borde de grano

5

Difusión en volumen

6

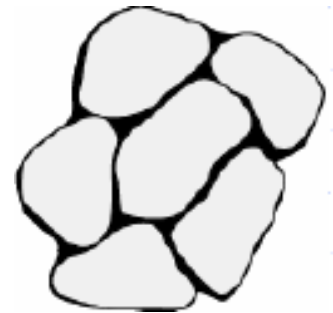
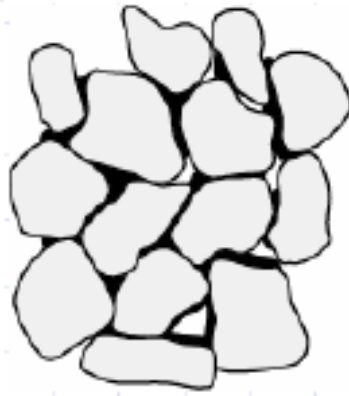
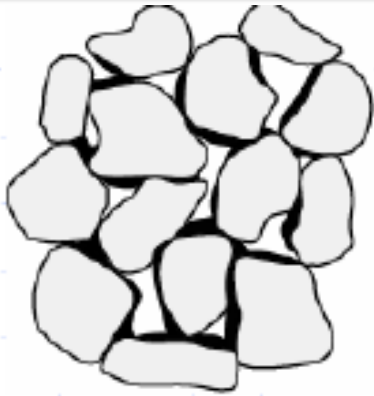
Flujo plástico



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

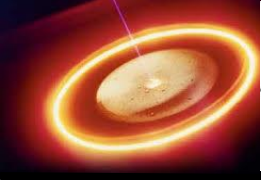
Activación de la sinterización para conseguir densidades más altas

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

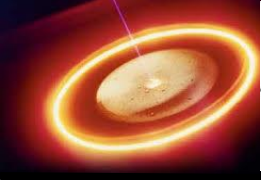
Atmósfera

Composición

**Contenido
lubricante**

**Tamaño de
partícula
inicial**

**Velocidad
calentamiento y
enfriamiento**



TECNOLOGÍA DE POLVOS

ETAPA DE SINTERIZACIÓN

Hornos empleados

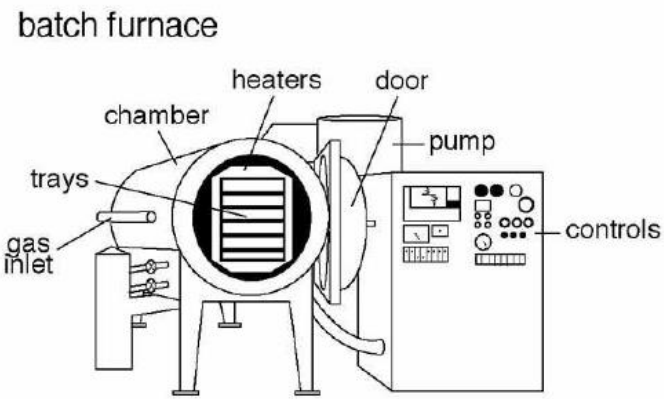
CONTÍNUO

- Cinta
- Empujadores
- Rodillos



DISCONTINUO

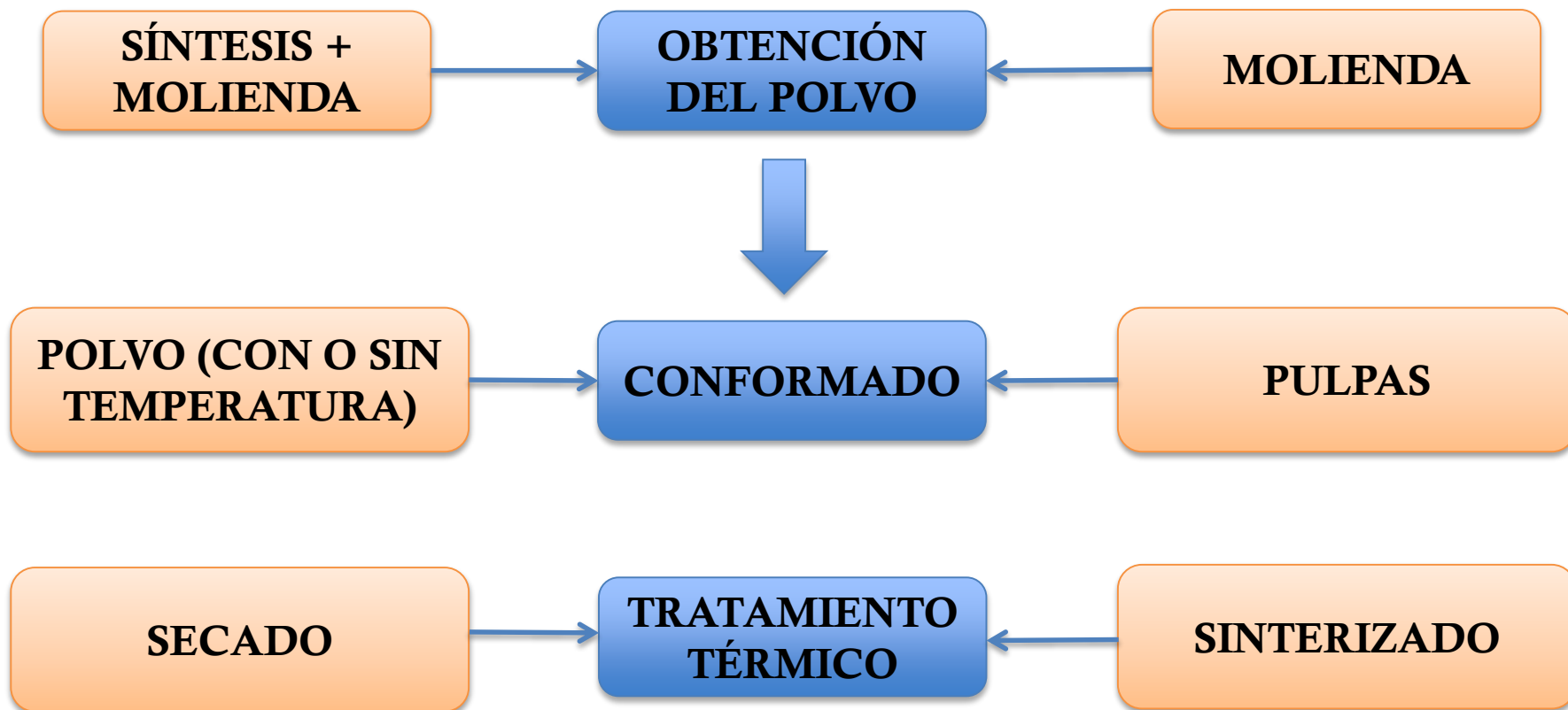
- Mufla
- Vacío





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

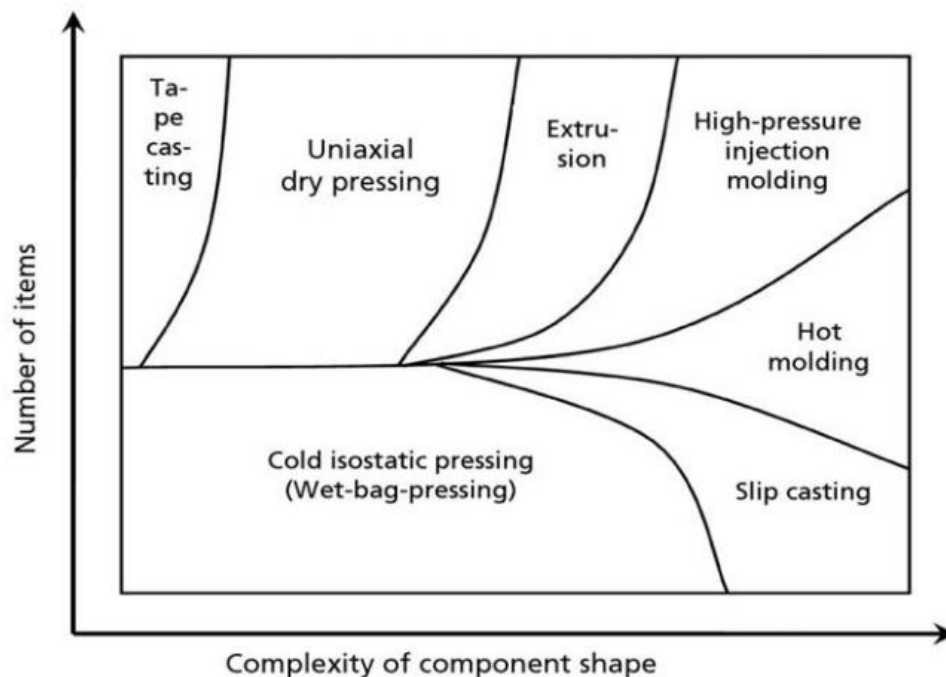
POWDER INJECTION MOLDING



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

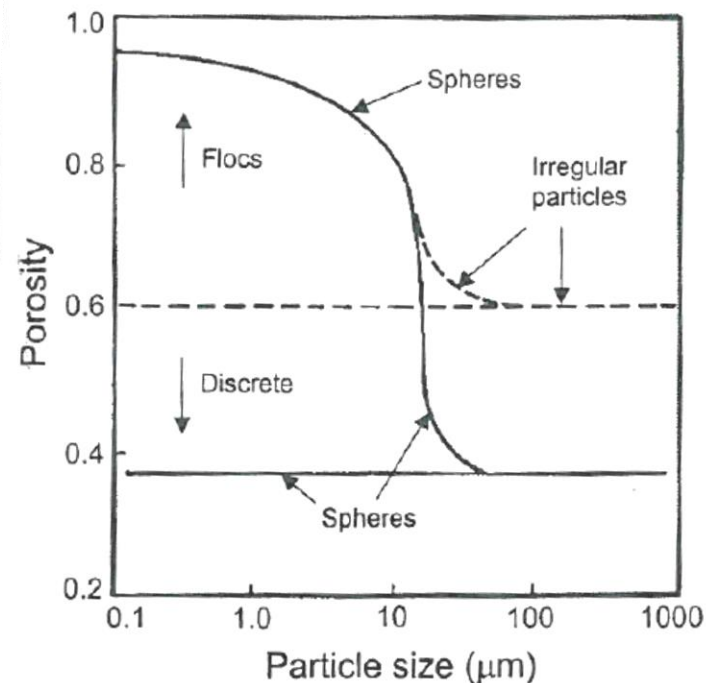
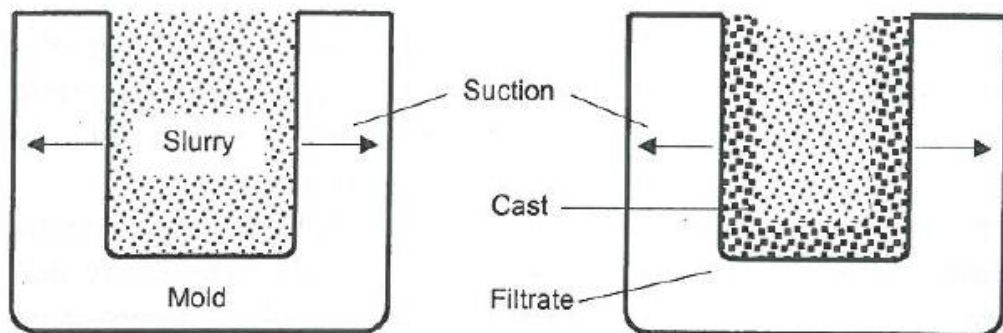
HUMECTANTE

**AGENTES
ADICIONALES**



Tecnología de polvos en materiales cerámicos

Slip Casting



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

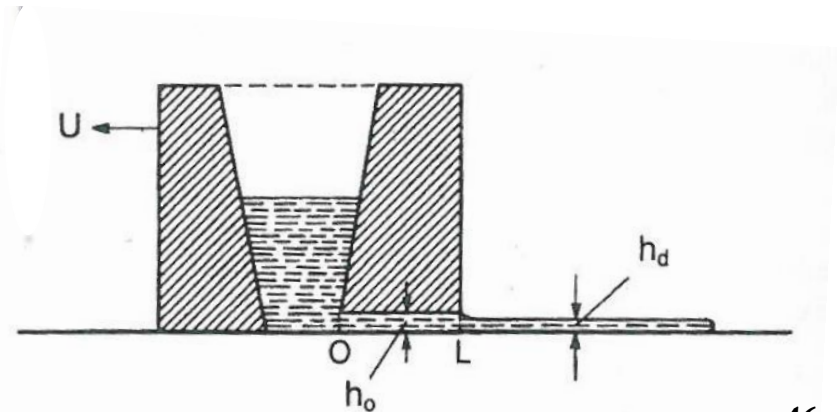
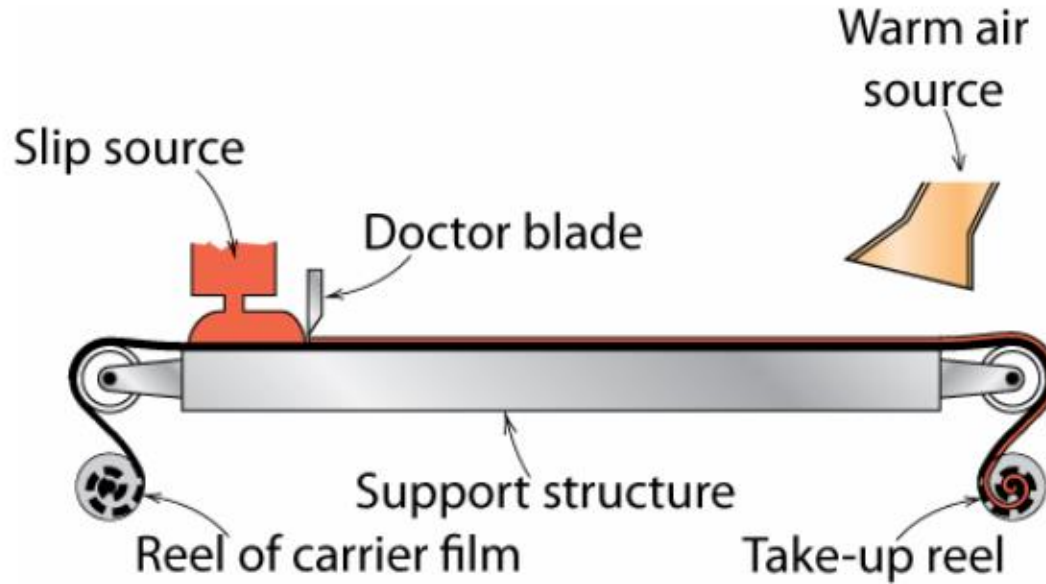
FACTORES A TENER EN CUENTA:

- 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



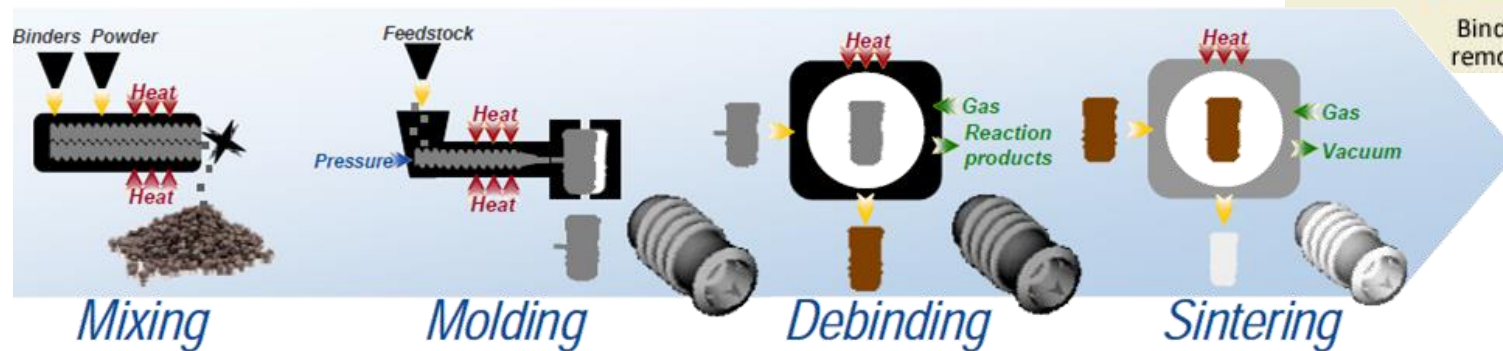
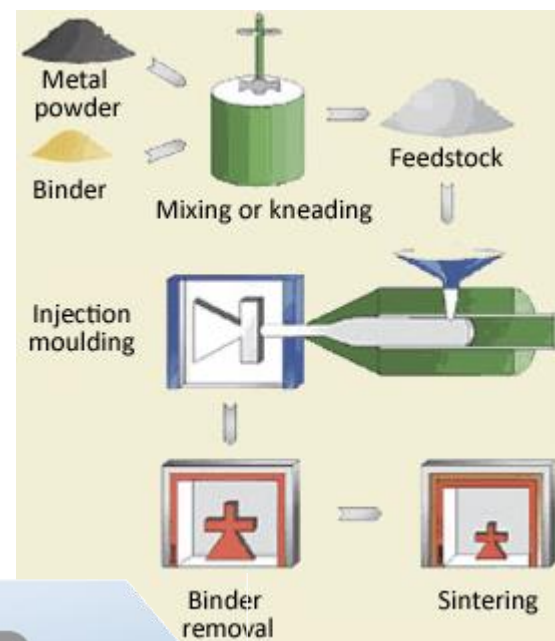
$$h_d = Cte \frac{\rho_w}{\rho_d} h \left(1 + \frac{h^2 \Delta P}{6vUL} \right)$$



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



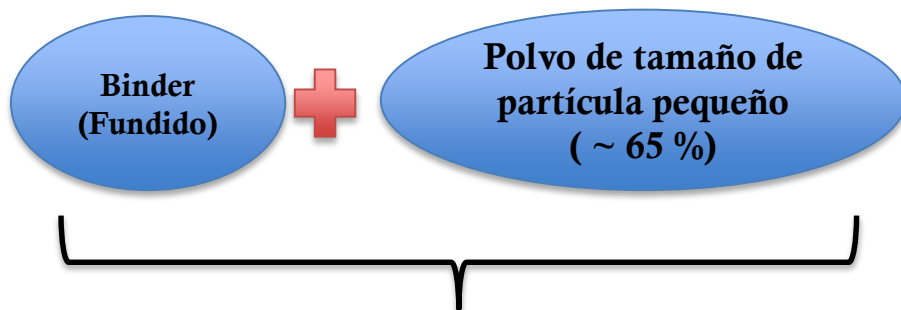


Tecnología de polvos en materiales cerámicos

Powder Injection Molding (PIM)

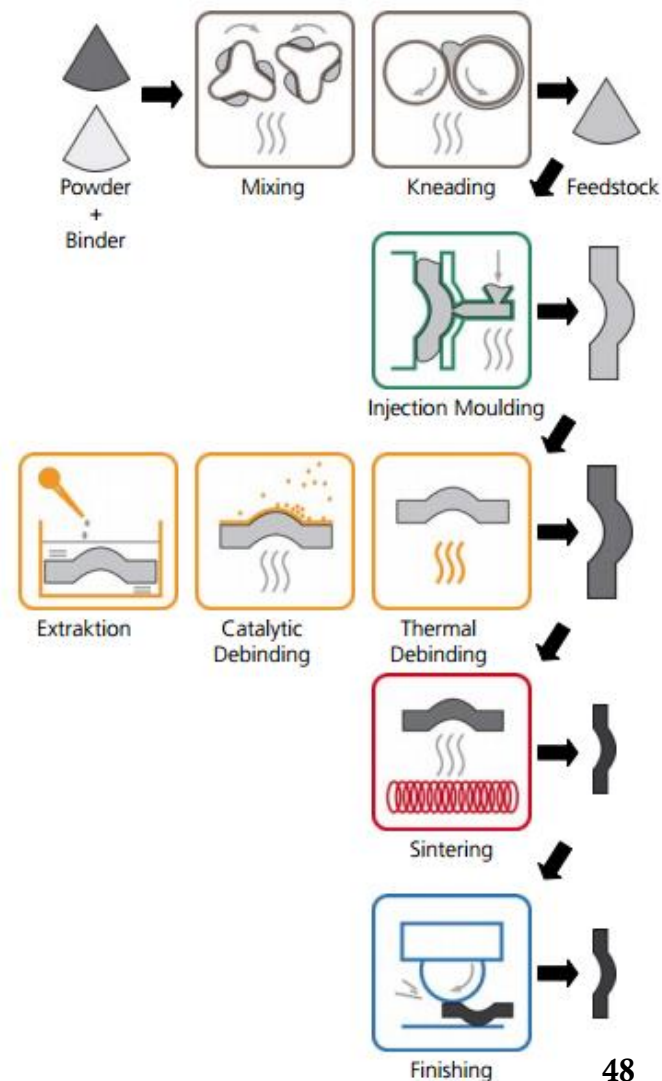
Binder – Agente aglomerante

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



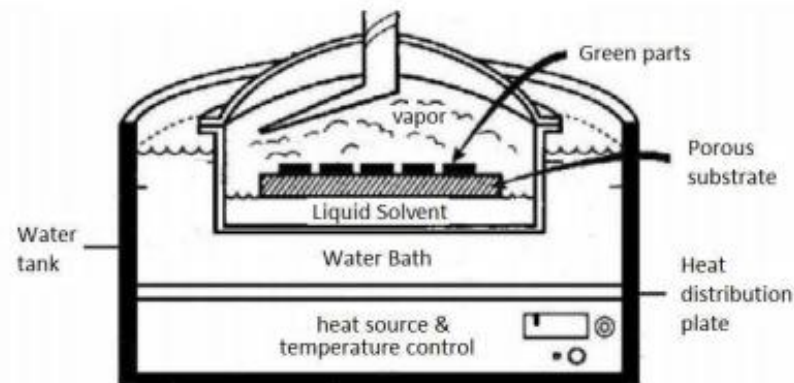


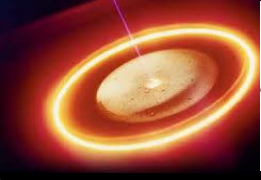
Tecnología de polvos en materiales cerámicos

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**

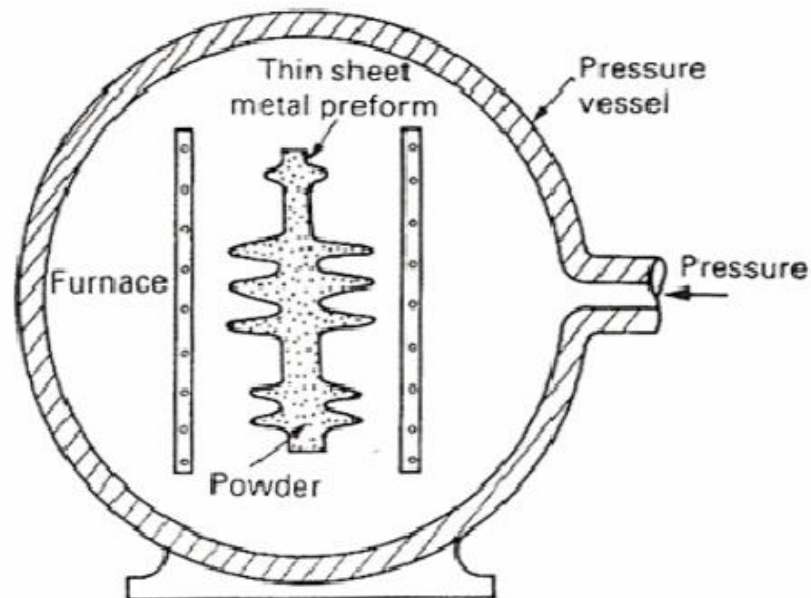
**PERMITE OBTENER
FORMAS MÁS
COMPLICADAS**

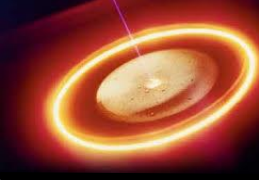
**MATERIALES CON
UNA MAYOR
DUREZA**

**MENOR CONTROL
DIMENSIONAL**

**DISCONTINUIDAD
DEL PROCESO**

**EQUIPAMIENTO
MÁS CARO**

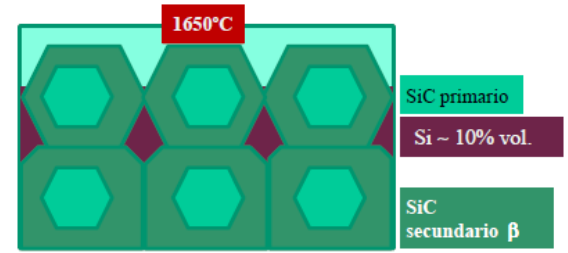
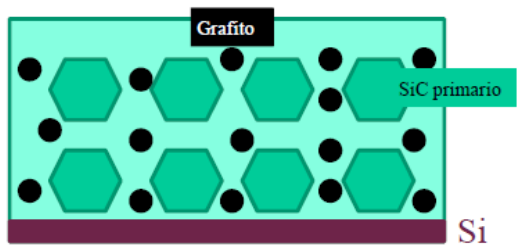




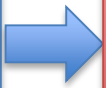
Tecnología de polvos en materiales cerámicos

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



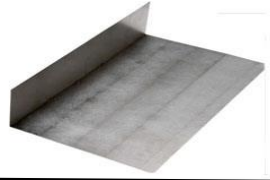
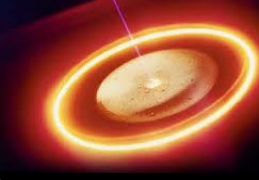
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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**

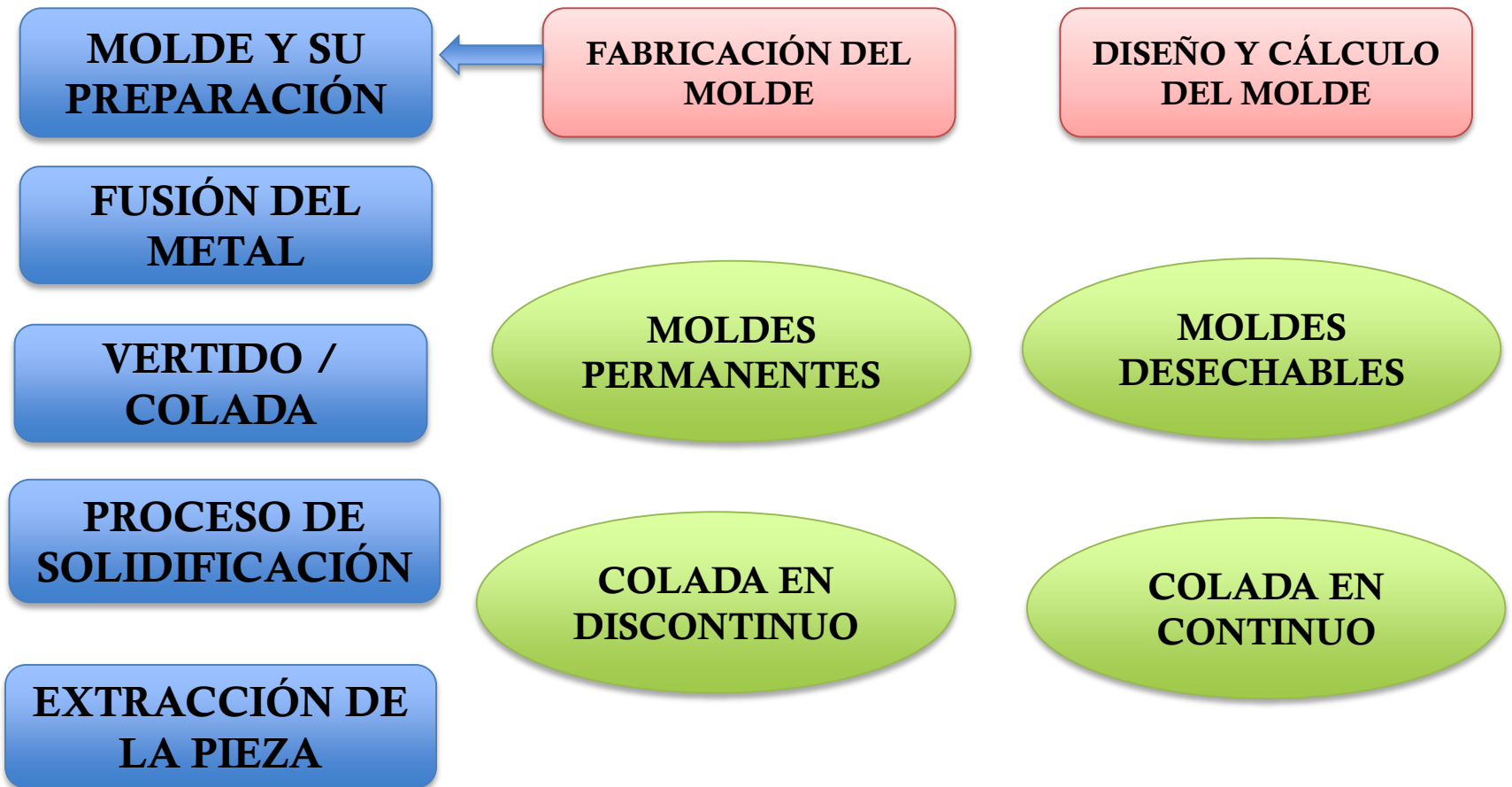
DESVENTAJAS

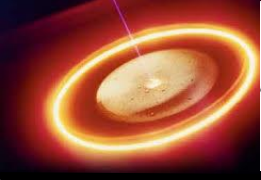
- **Generalmente se obtienen propiedades inferiores a las obtenidas por**
- **Cierta anisotropía**
- **Menor precisión dimensional**
- **Cierto número de defectos de colada (segregaciones, porosidad)**
- **Calidad superficial variable (dependiendo del molde)**
- **Elevado coste inicial**



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





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

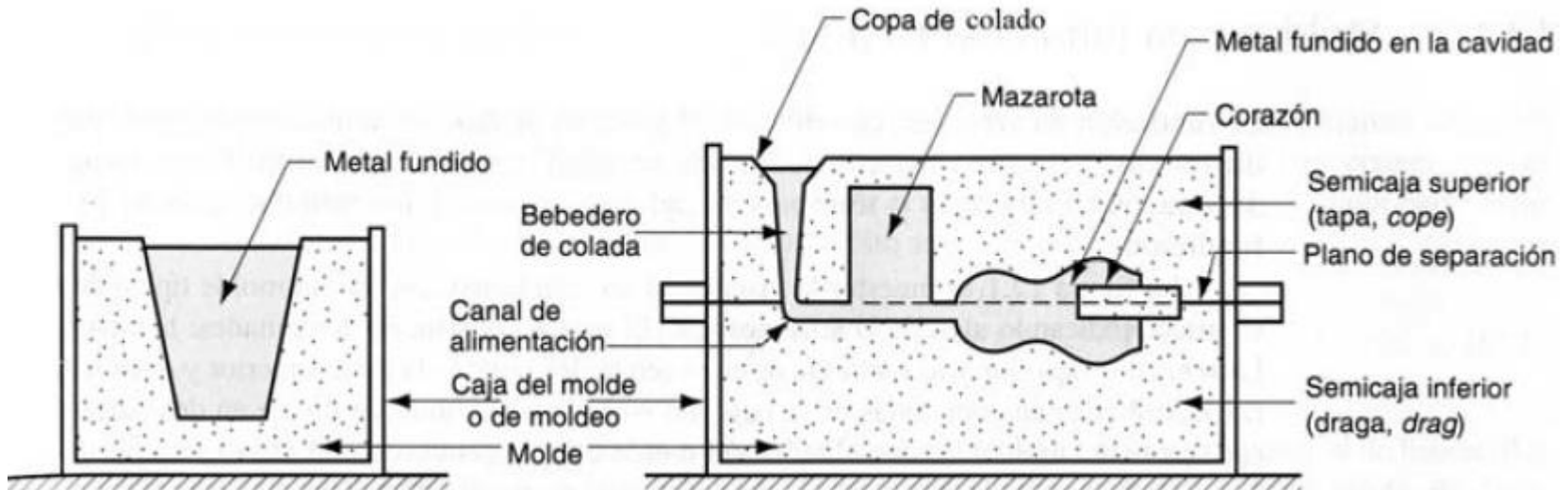
FUSIÓN DEL METAL

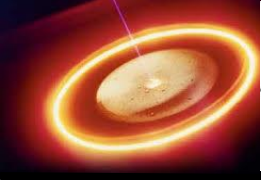
VERTIDO / COLADA

PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN

MOLDE Y SU PREPARACIÓN

EXTRACCIÓN DE LA PIEZA





TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

MOLDES PERMANENTES

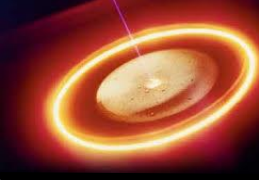
- Generalmente son moldes metálicos (acero, fundiciones) aunque también pueden ser de grafito formados por una o varias piezas
- Puede incluir una parte no permanente en núcleos o corazones realizados en arena o aglomerados
- Dan lugar a piezas con mejores tolerancias dimensionales, mejores acabados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

**Elevado
coste inicial
del molde**

**Formas
complejas**

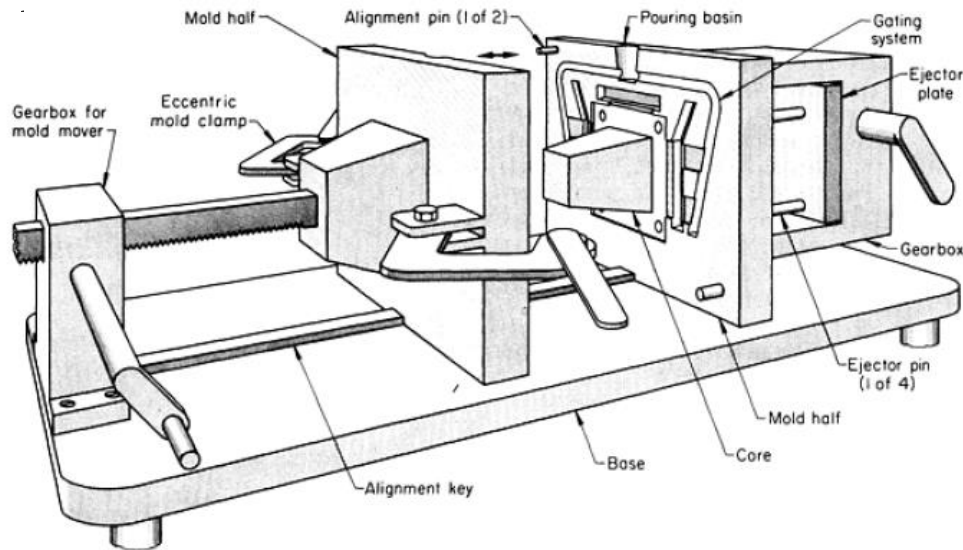
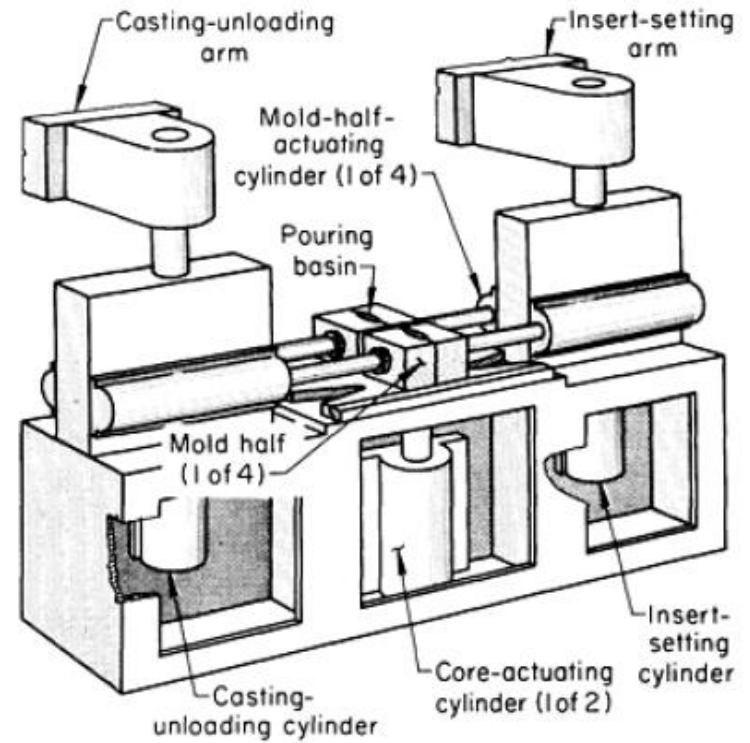
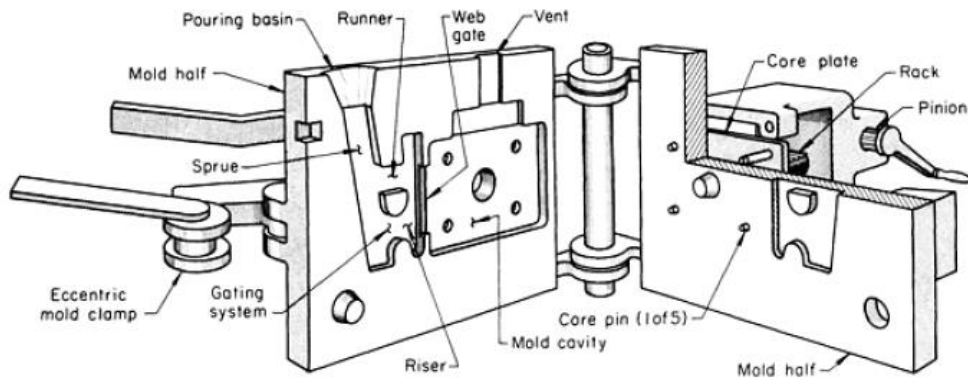
**Protección del
material del
molde**

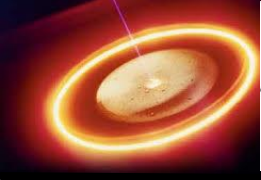




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

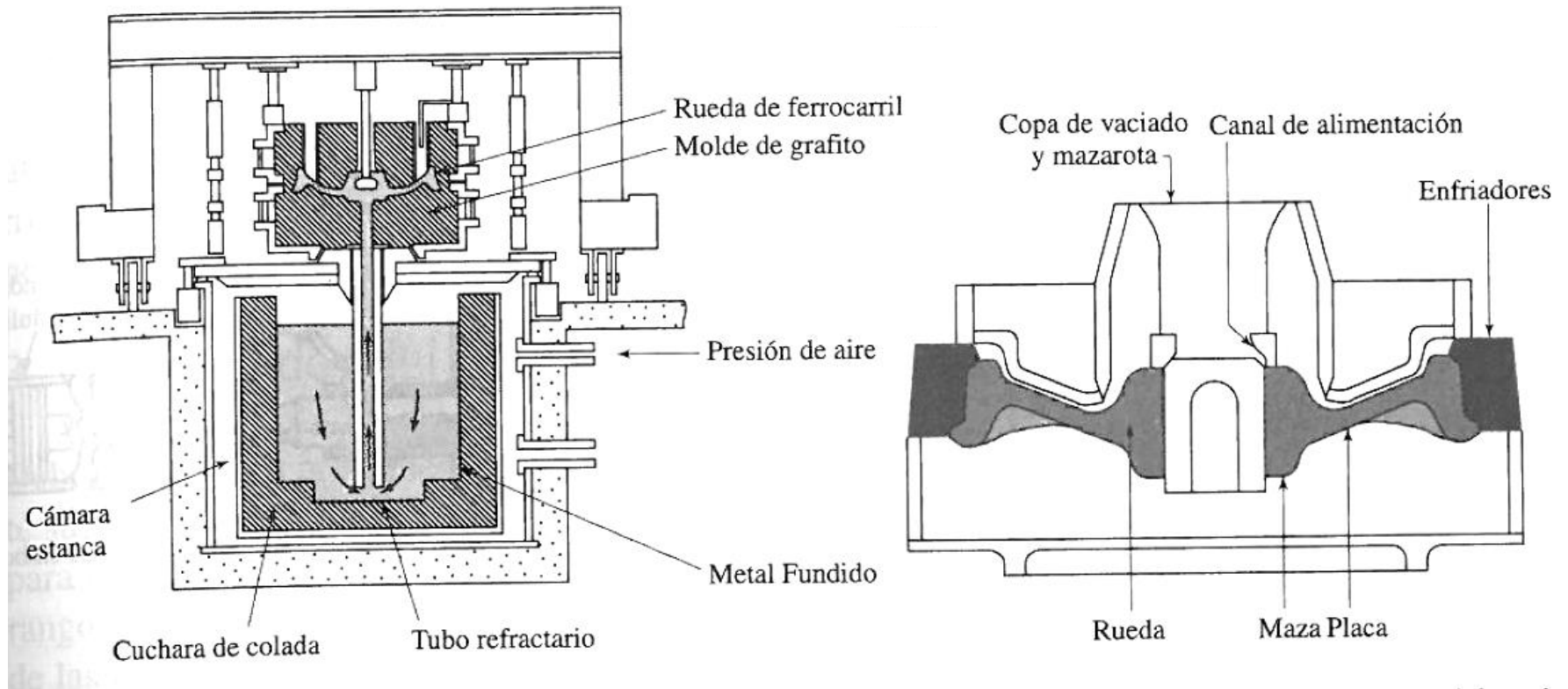
MOLDES PERMANENTES - PROCESO MANUAL Y SEMIAUTOMÁTICO

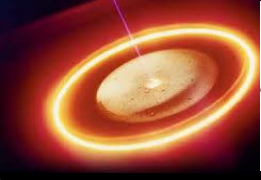




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

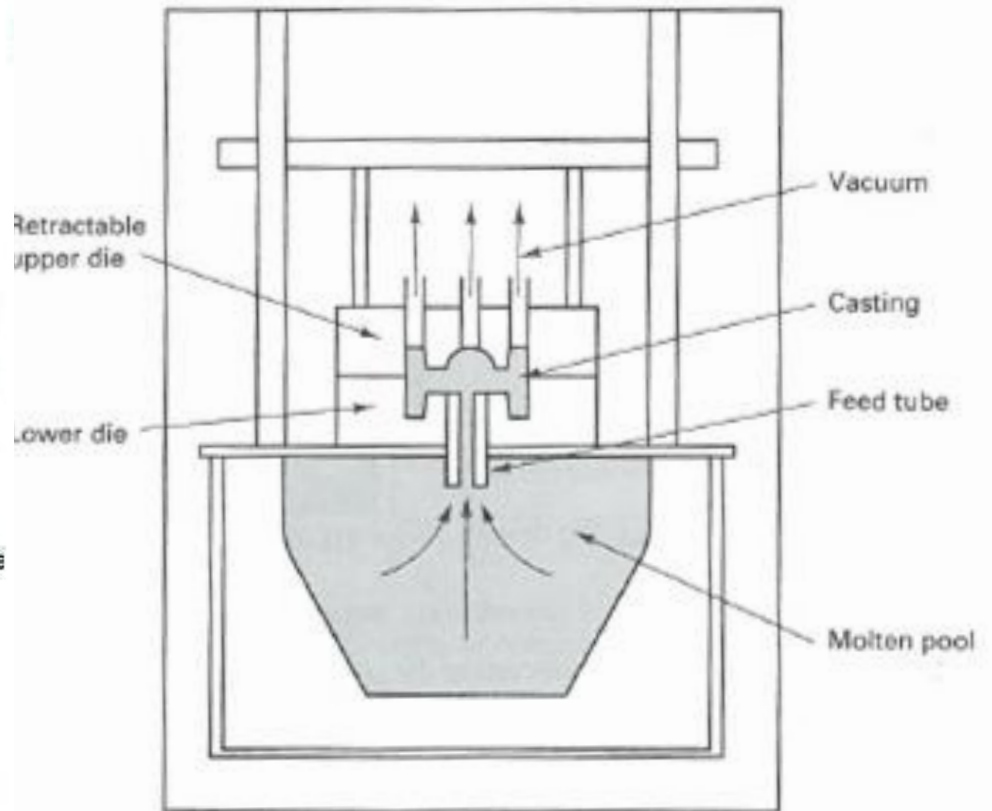
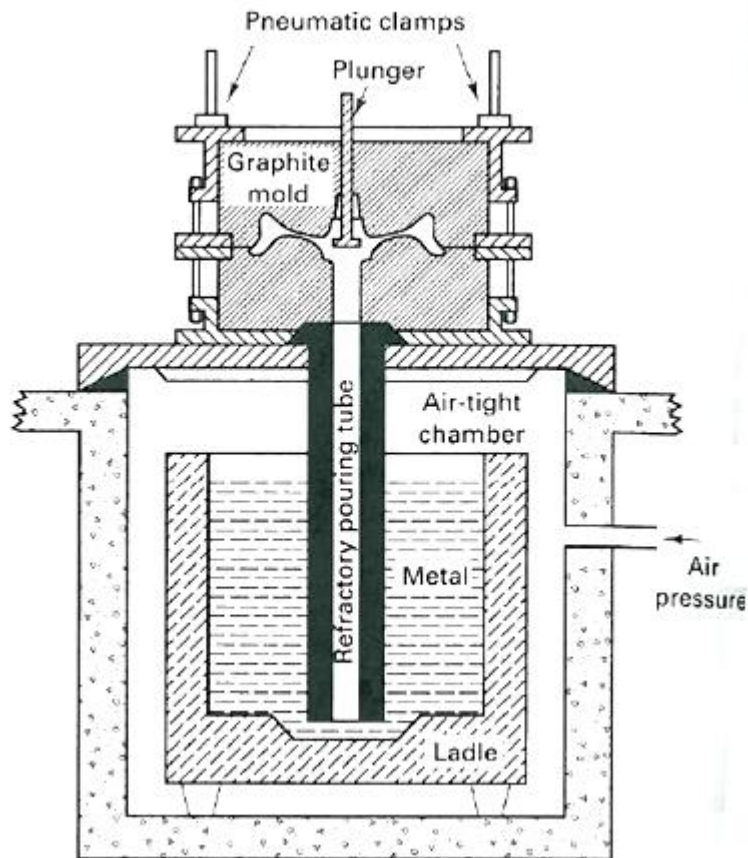
MOLDES PERMANENTES - PROCESO AUTOMATIZADO

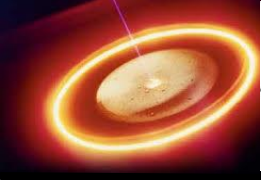




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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

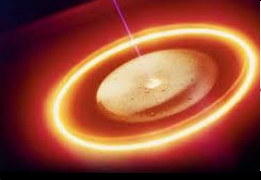
SISTEMA DE PRESIÓN: Controlar velocidad y aceleración para controlar el flujo durante el llenado

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**

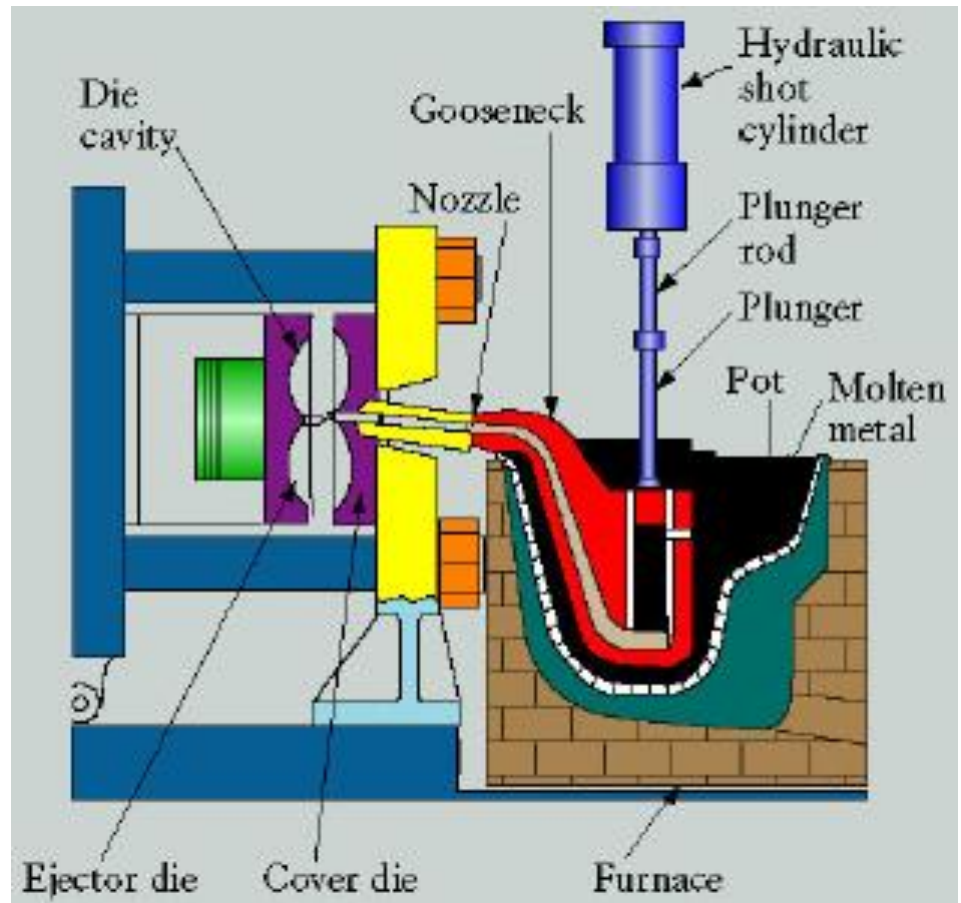


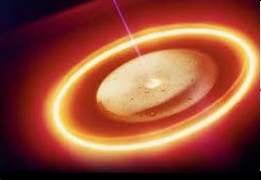
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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

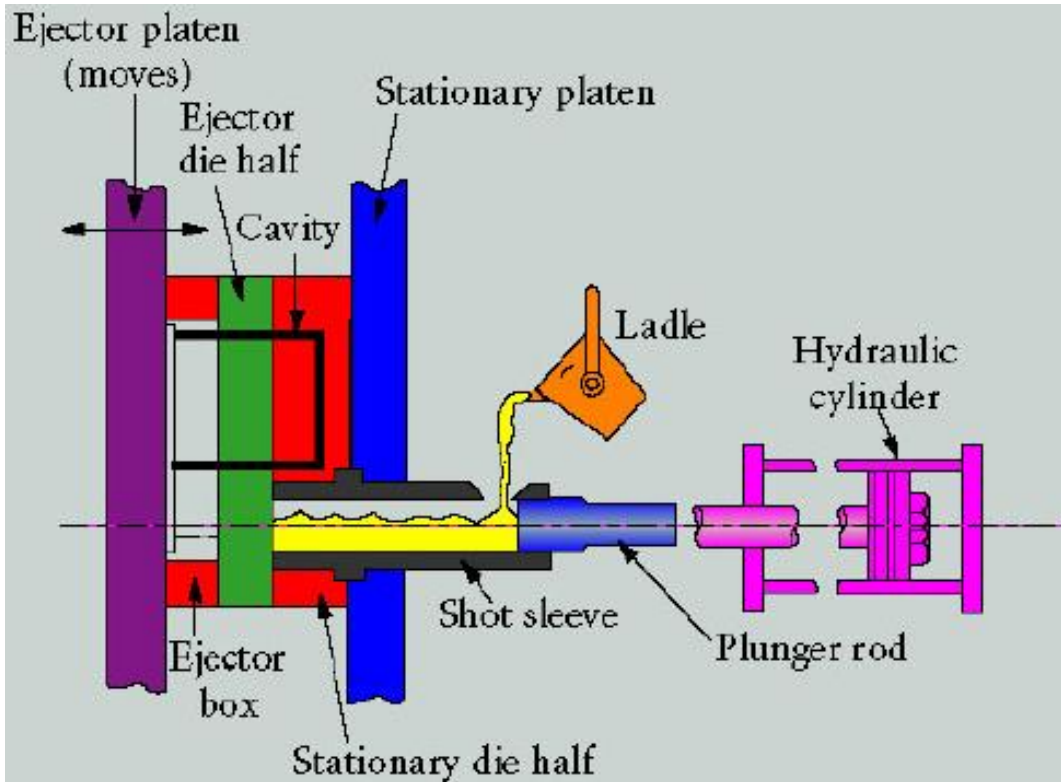




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

MOLDES PERMANENTES – FUNDICIÓN A PRESIÓN (Die Casting)

PROCESO EN CÁMARA FRÍA



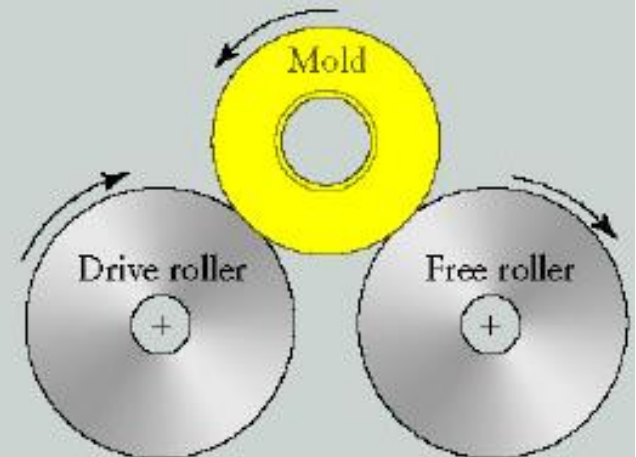
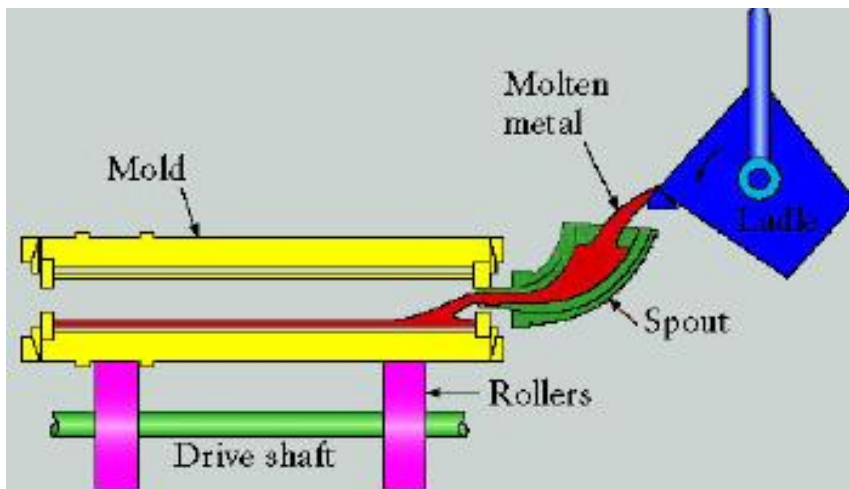
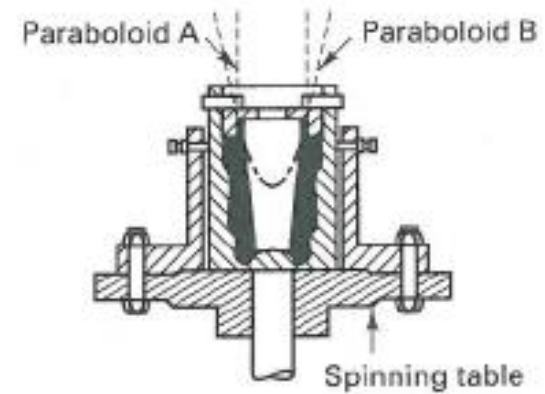
- Presiones más elevadas durante la fabricación (hasta 150 Mpa)
- Cámara de inyección no precalentada
- Generalmente se usa para aleaciones con un punto de fusión algo superior (aluminio, cobre, o incluso algunas aleaciones de magnesio)



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

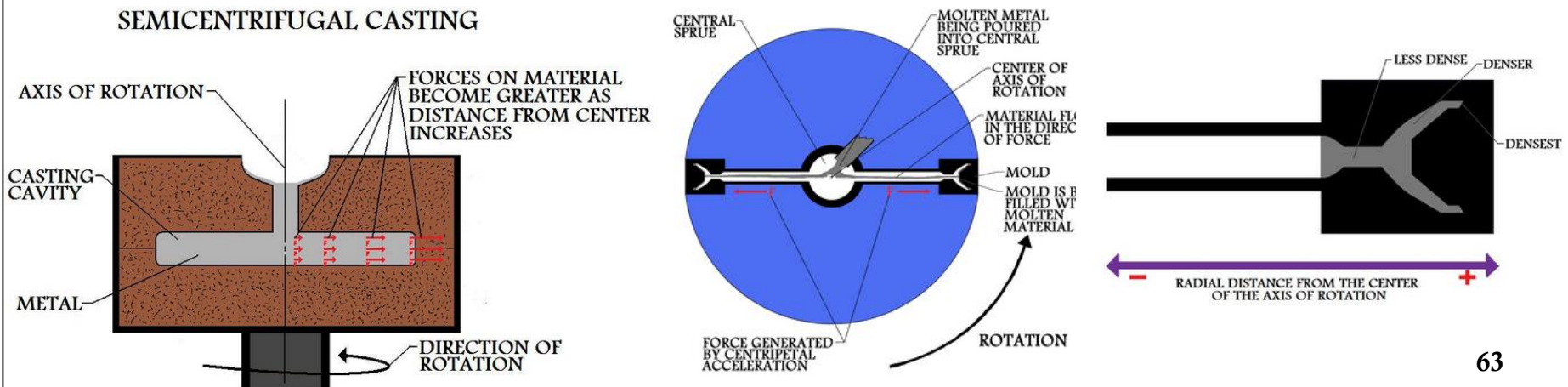
MOLDES PERMANENTES – COLADA SEMICENTRÍFUGA / CENTRIFUGADA

- 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

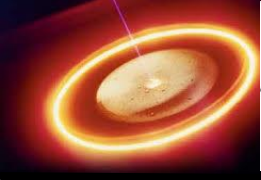
Temperatura de utillaje

Presión ejercida

Temperatura de colada

Tiempo

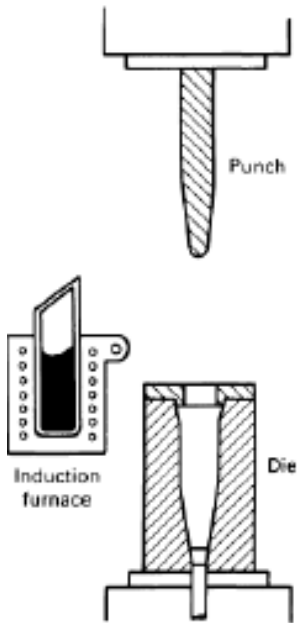
Lubricación



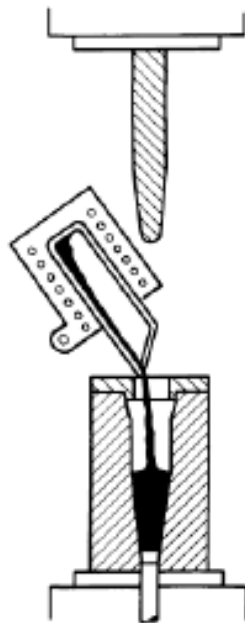
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

SQUEEZE CASTING

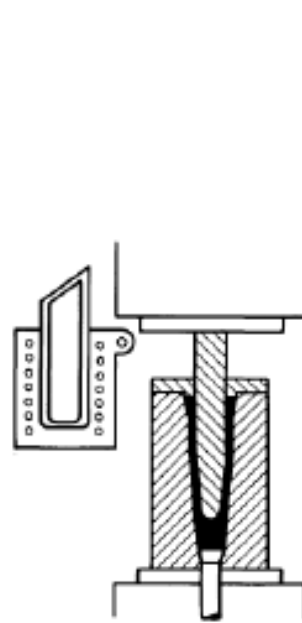
**Fusión,
lubricación y
precalentamiento**



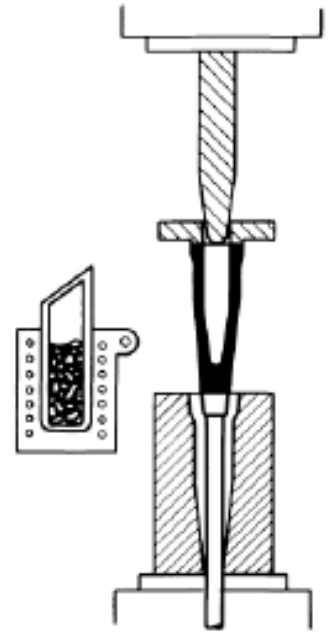
**Vertido del
fundido en la
matriz**

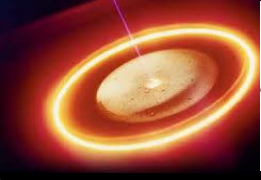


**Cierre del utillaje,
presión y
solidificación**



**Extracción y
limpieza**

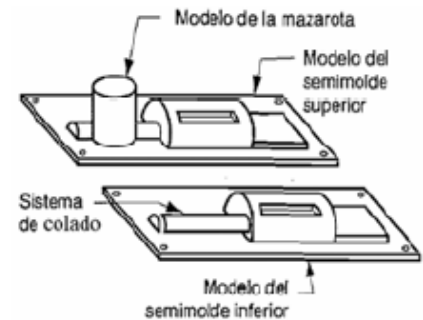
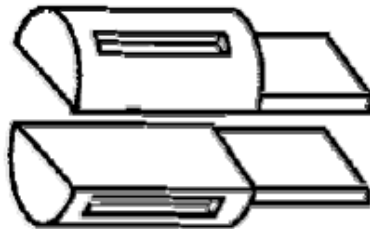




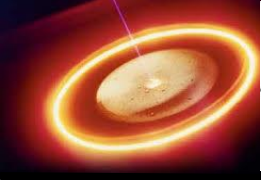
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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

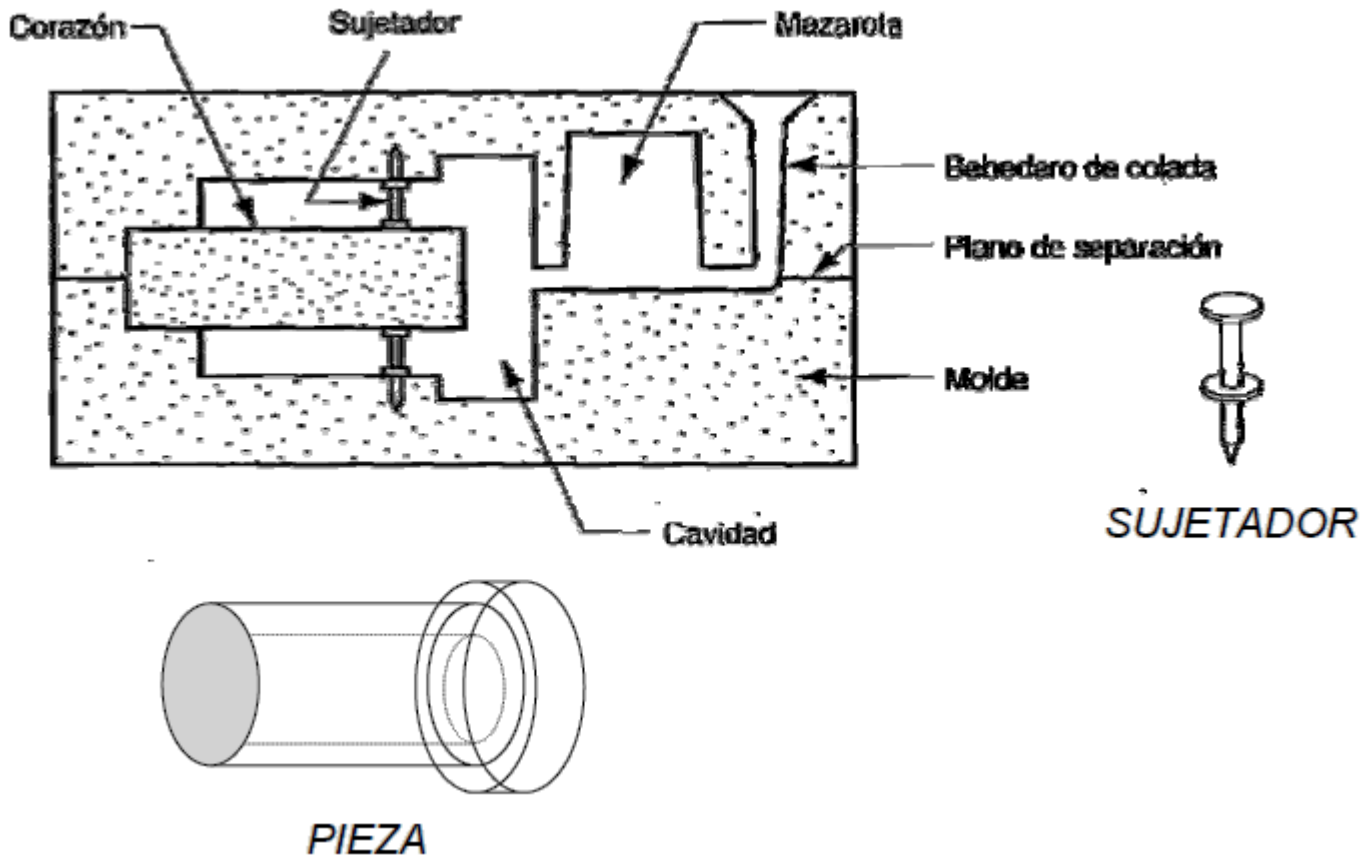


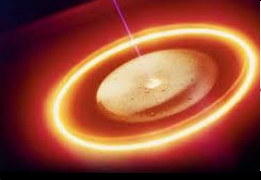
- El patrón puede requerir de un corazón o núcleo “core” si hay una cavidad interna vaciada. Pueden requerir soportes para sujetarlos (sujetadores)



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

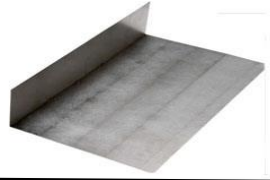
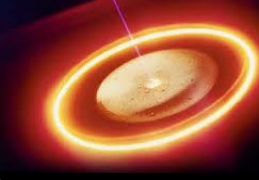
**OTROS TIPOS DE
COMPACTACIÓN: PRESIÓN
NEUMÁTICA, PROYECCIÓN**

**COMPACTACIÓN
MANUAL**

RESISTENCIA

PERMEABILIDAD

**ESTABILIDAD
TÉRMICA**



TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

OTROS MOLDES DESECHABLES

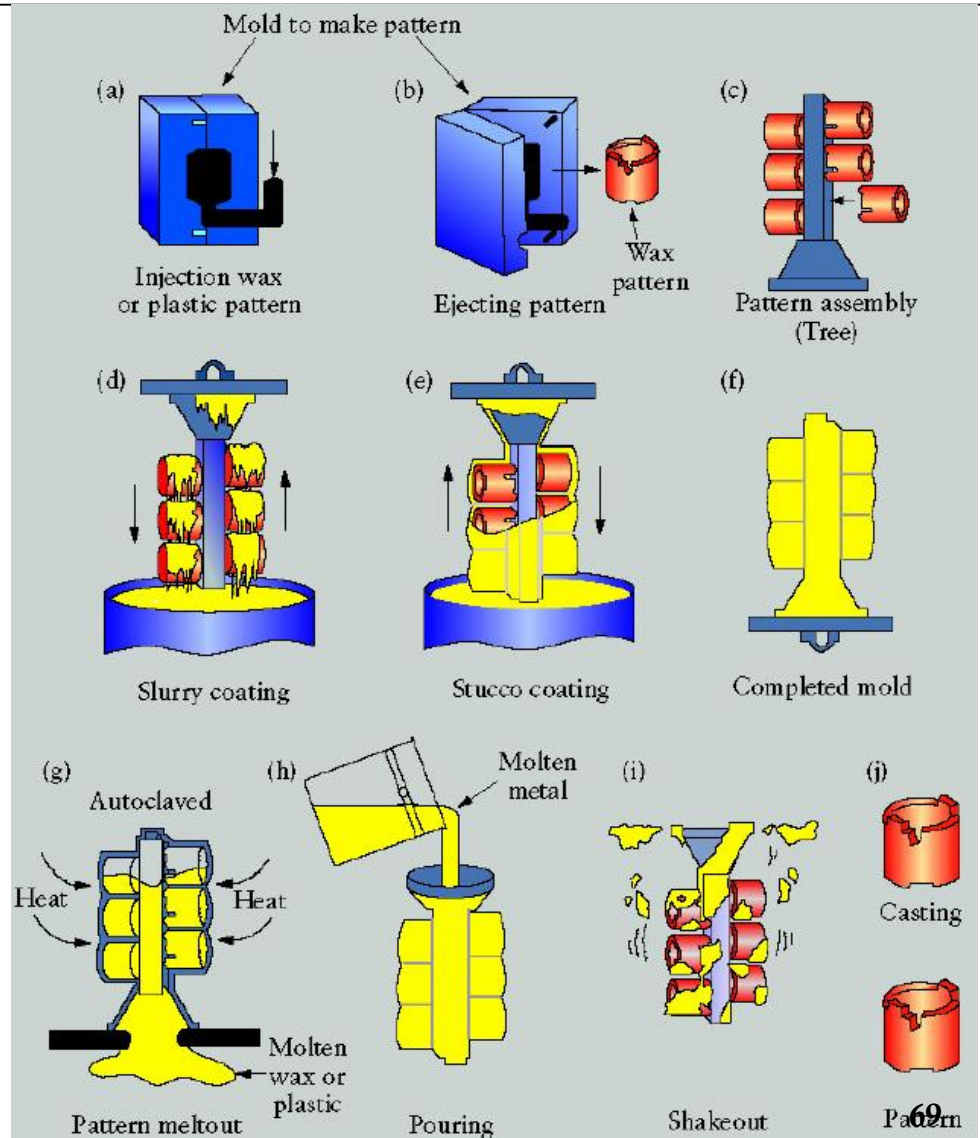
INVESTMENT CASTING (FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO)

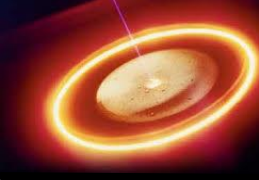
MOLDEO A LA CERA PERDIDA

-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

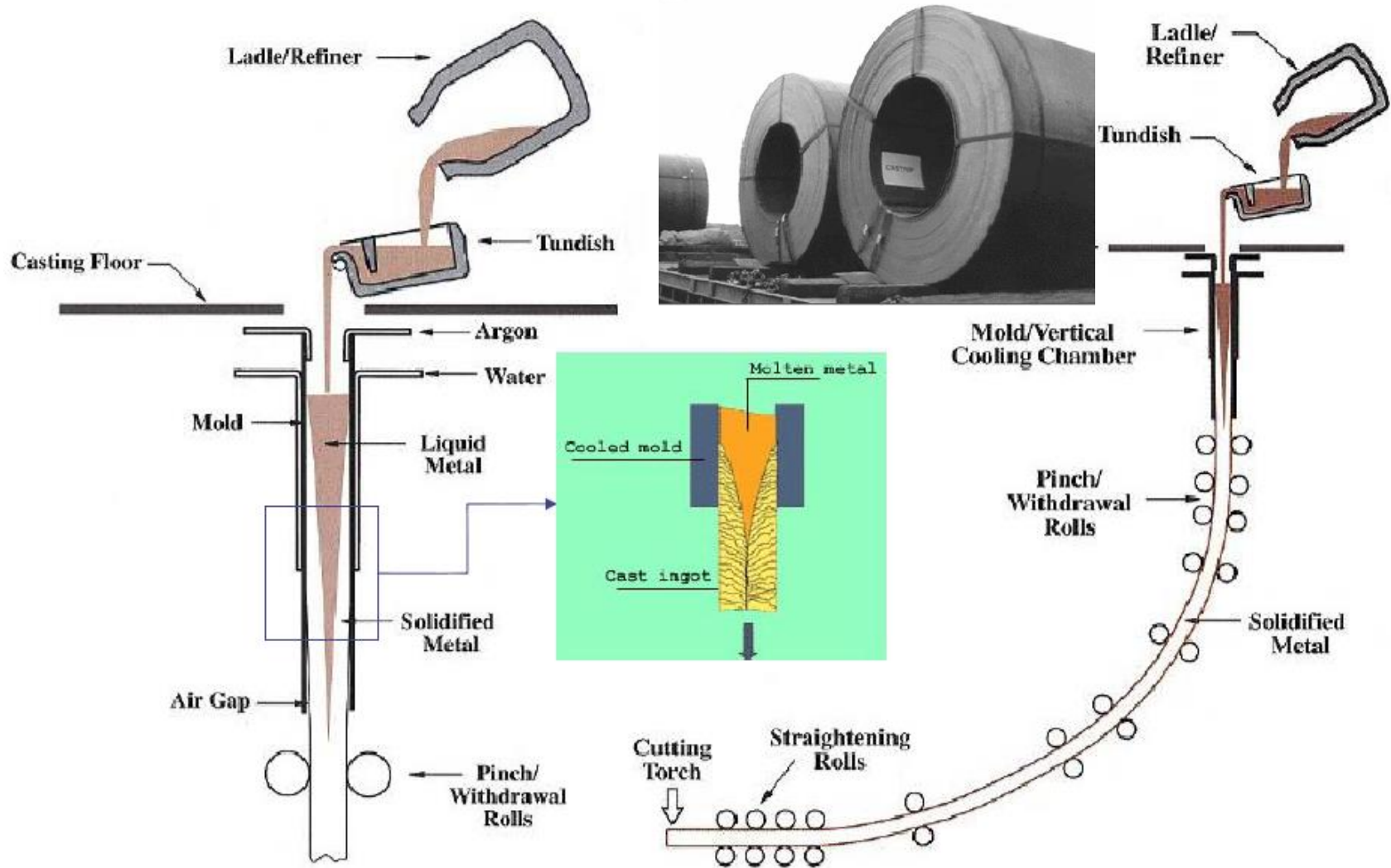
- Al emplear cera, se puede reutilizar

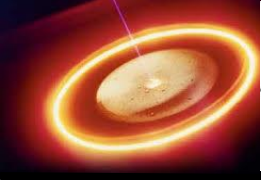




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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: $Q_1 + Q_2 + Q_3$

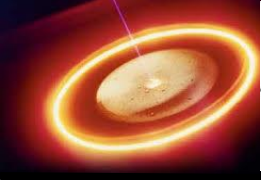
Q_1 : Calor específico sólido

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

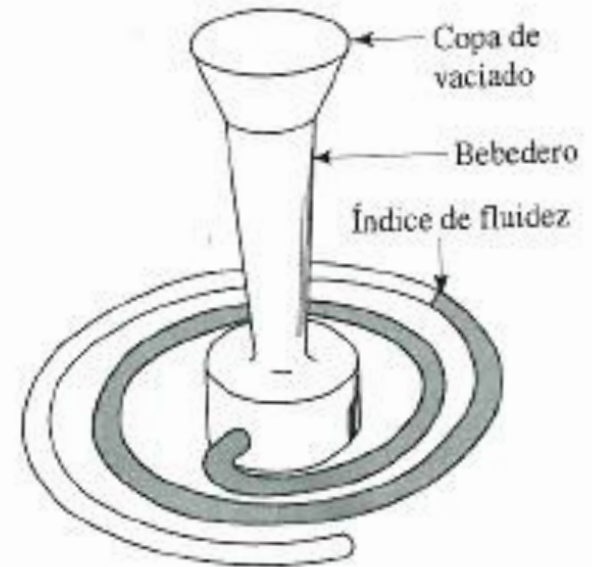


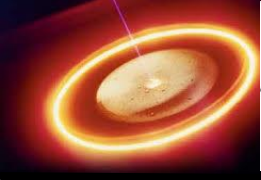
DISEÑO DEL MOLDE

MATERIAL Y SUPERFICIE

TRANSFERENCIA DE CALOR

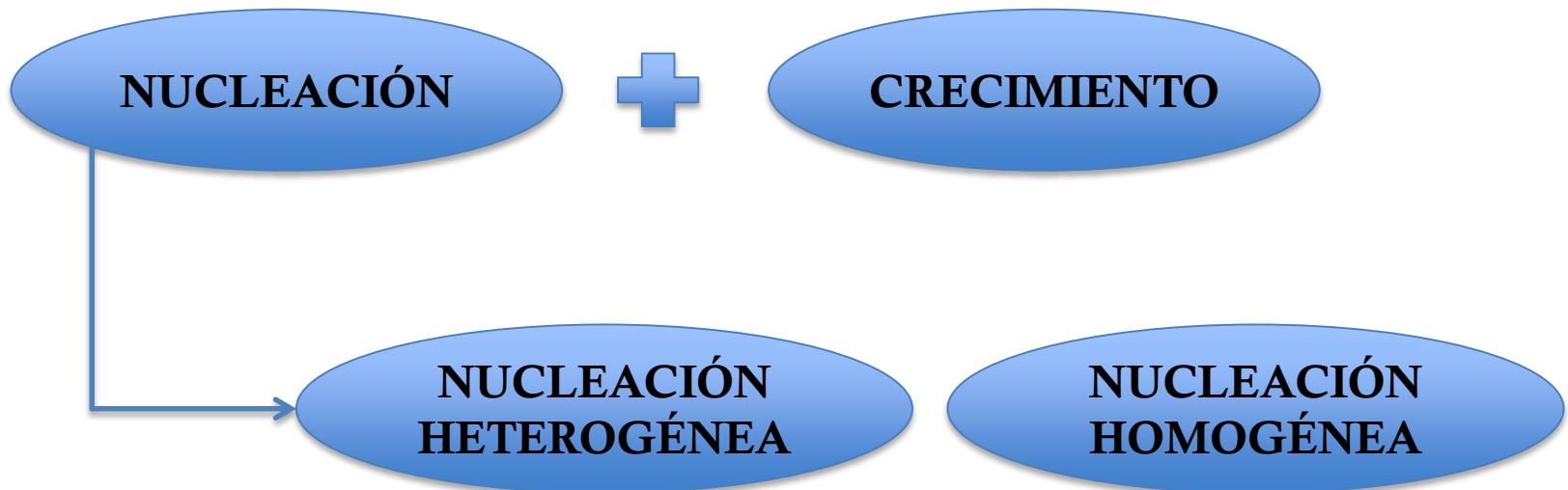
VELOCIDAD DE VERTIDO

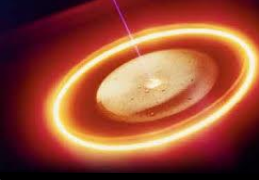




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

EL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN

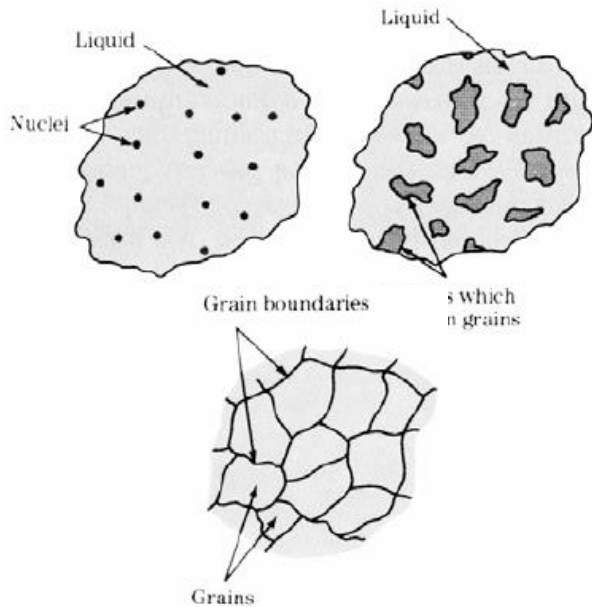




TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

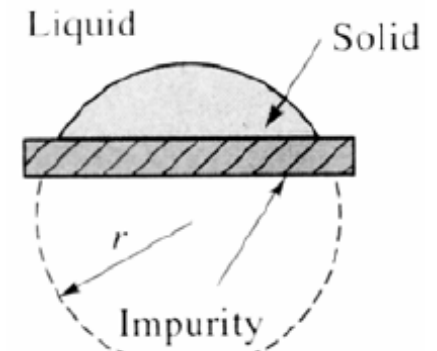
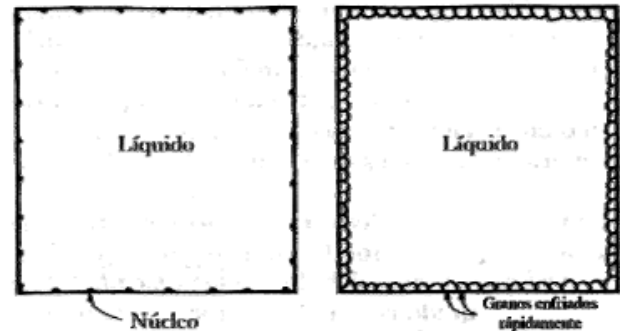
NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA

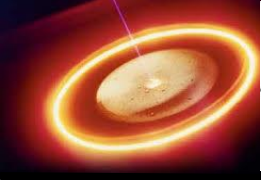
- No existen lugares preferenciales para la nucleación
- Requiere un subenfriamiento
- Subenfriamiento → Velocidad de nucleación



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



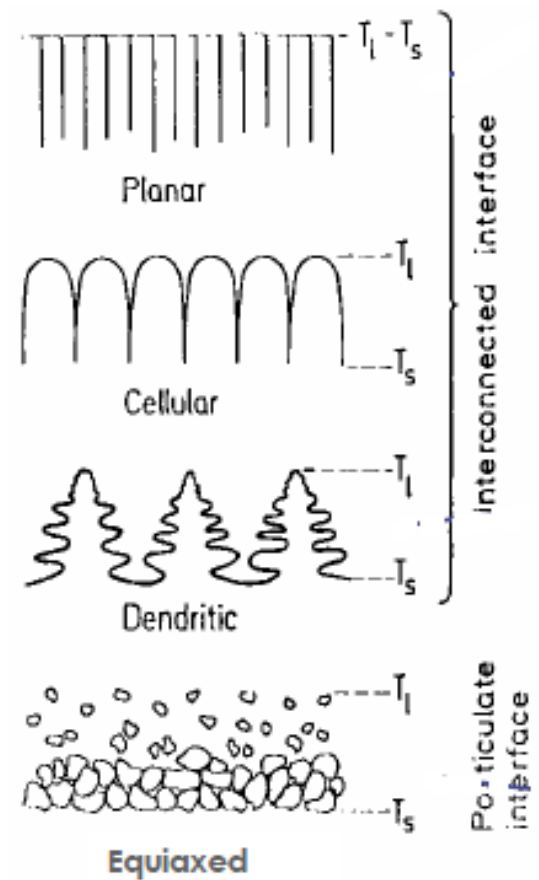
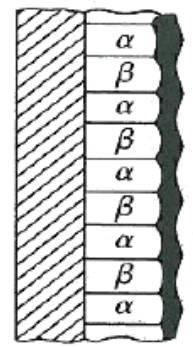
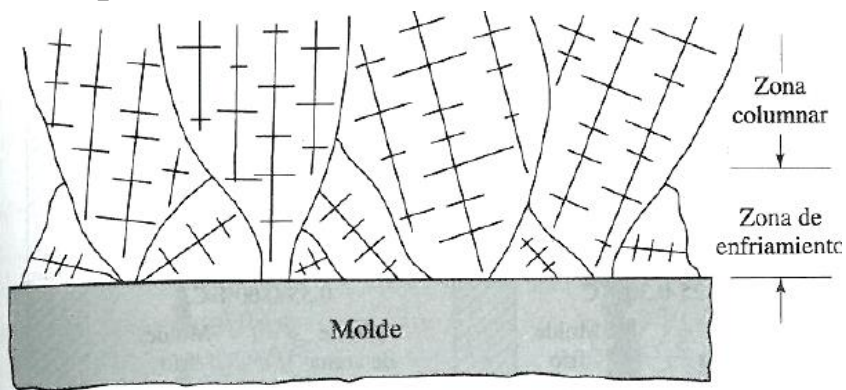


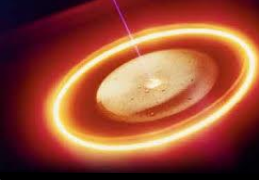
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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

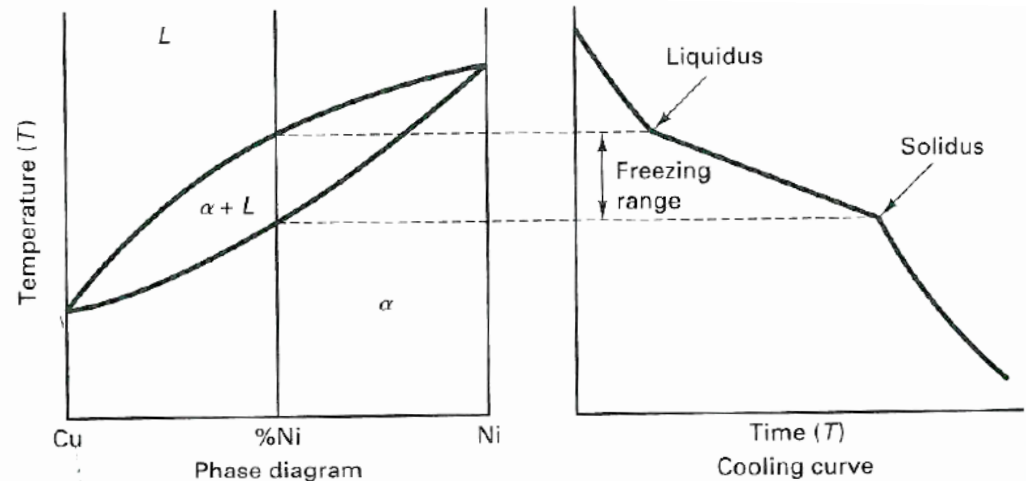
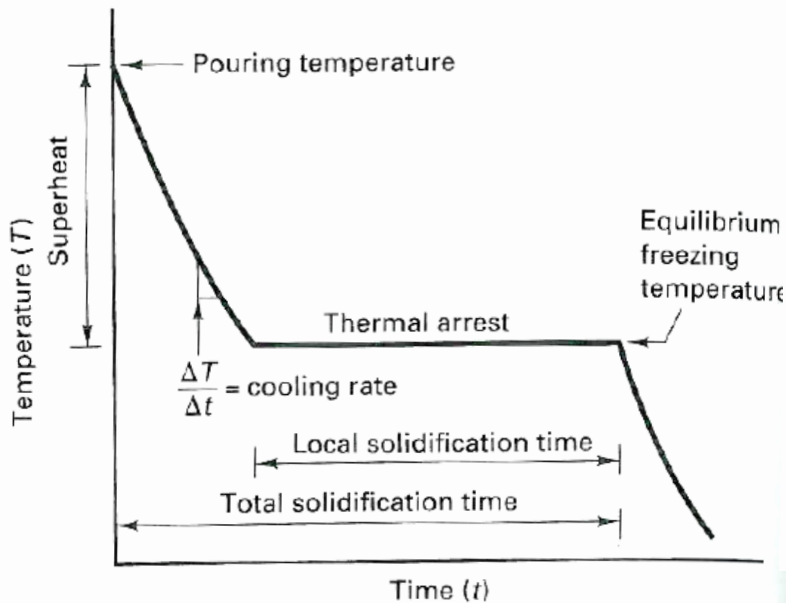
TEMPERATURA DE COLADA

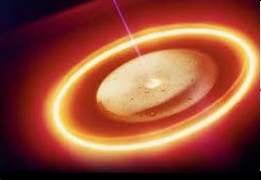
TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

SOBRECALENTAMIENTO

RANGO DE SOLIDIFICACIÓN





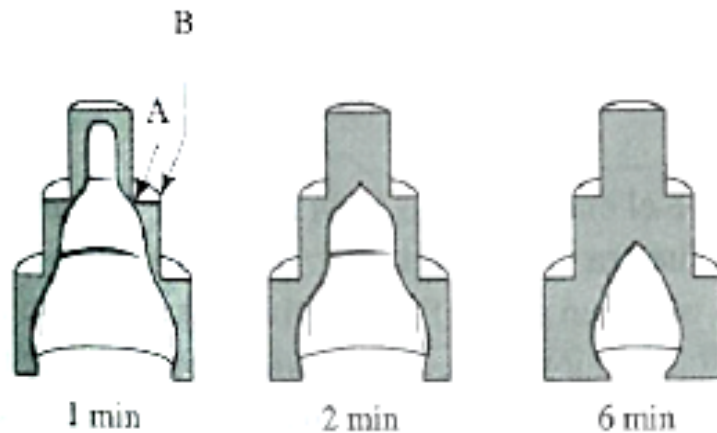
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

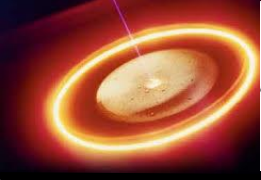
TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

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

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

- Influencia de la geometría





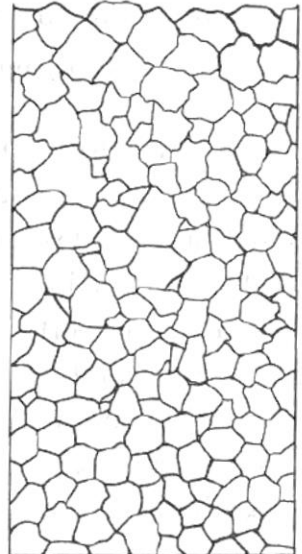
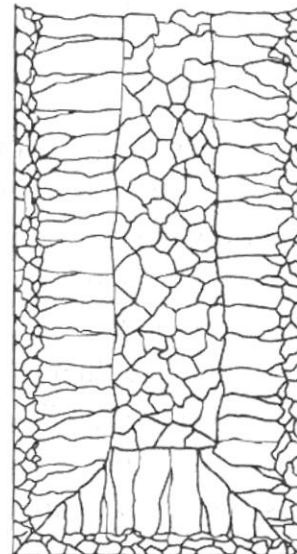
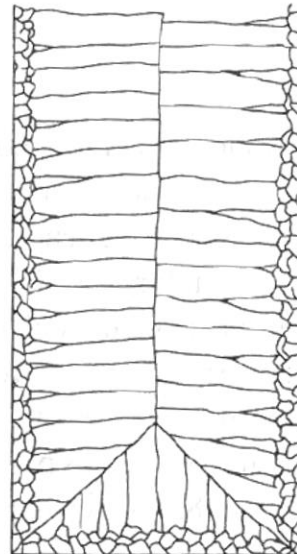
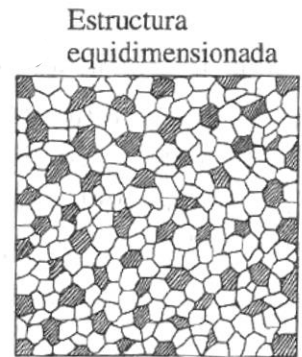
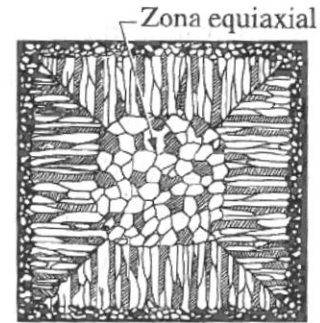
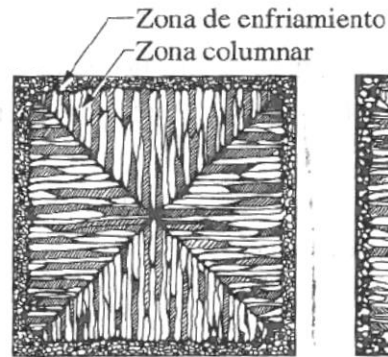
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

MICROESTRUCTURA DE LAS PIEZAS DE COLADA

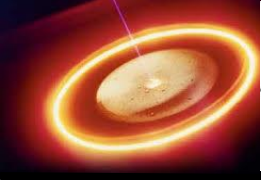
ZONA EQUIAXIAL EXTERIOR
(chill zone)

ZONA COLUMNAR

ZONA EQUIAXIAL INTERIOR



DIFERENCIAS EN CUANTO A ISOTROPÍA/ANISOTROPÍA

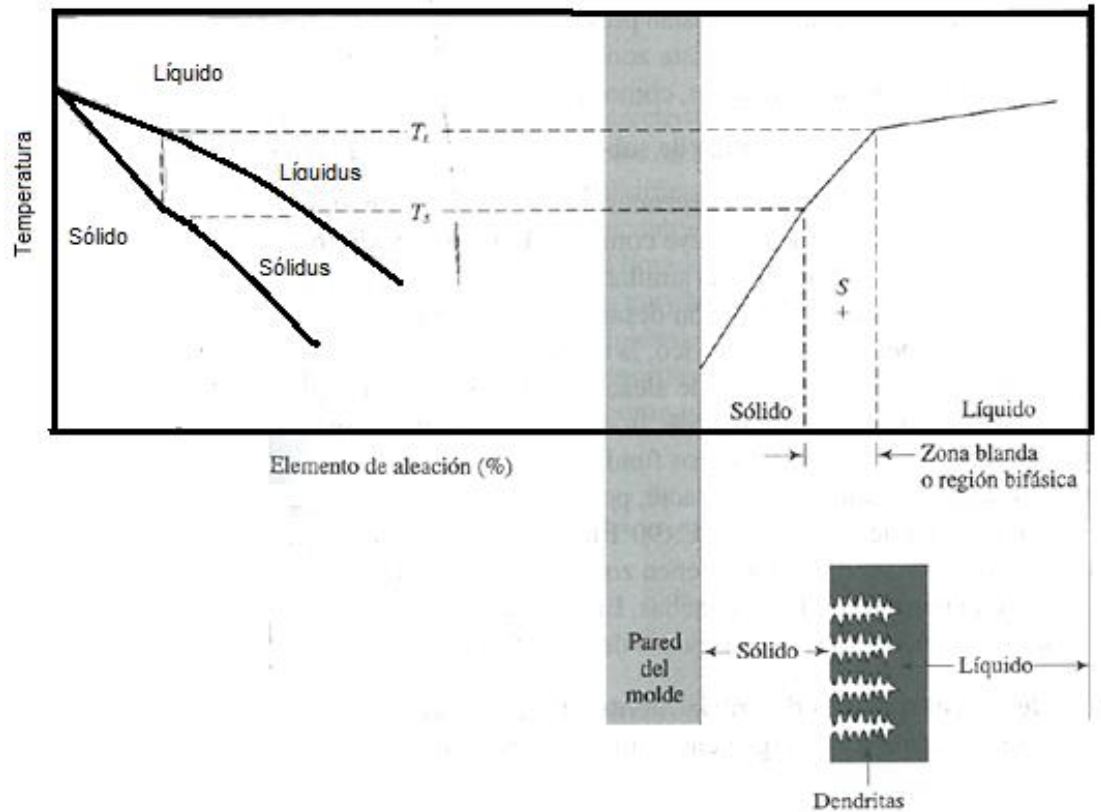


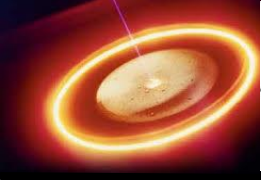
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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



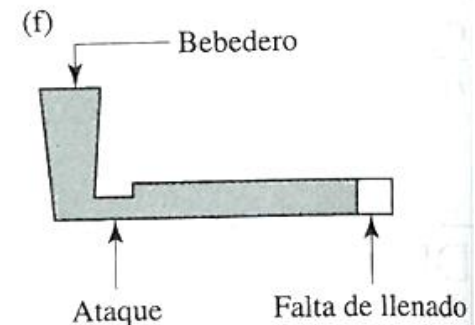
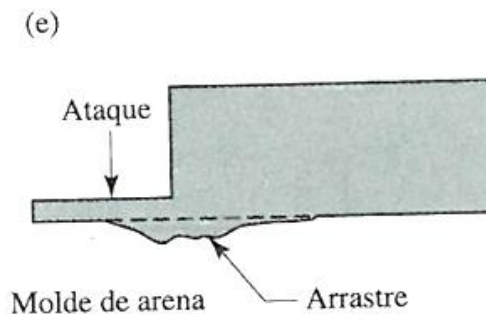
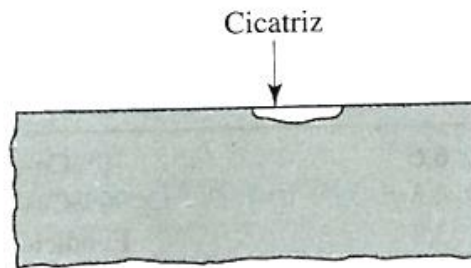
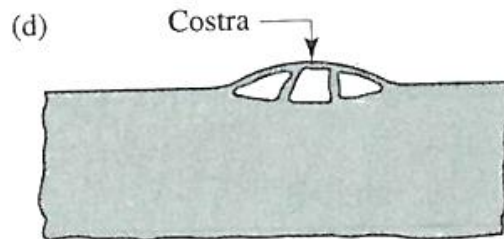
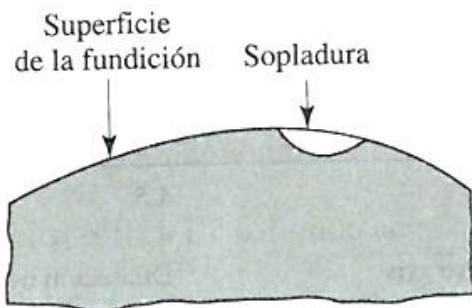
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

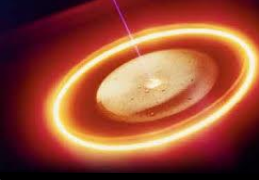
DEFECTOS EN COLADA

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

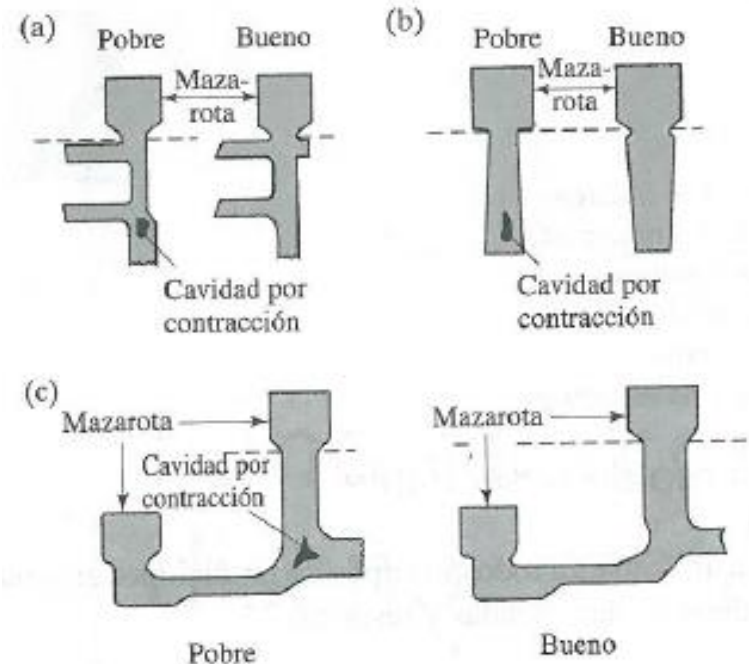
Contracción previa a la solidificación

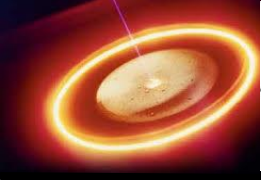
Contracción durante el cambio de fase

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





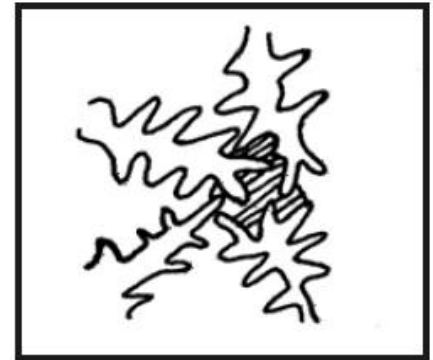
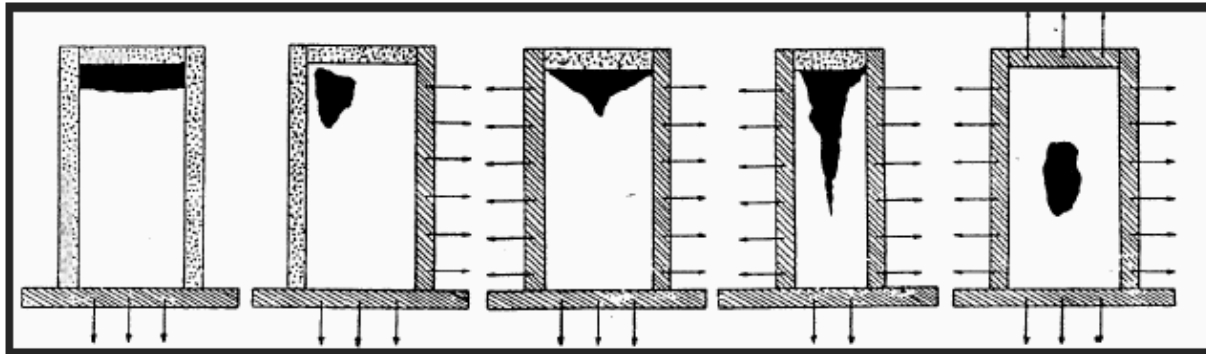
TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

Defectos en colada

Por efectos de la contracción → RECHUPES

- MACRORRECHUPE
- MICRORRECHUPE

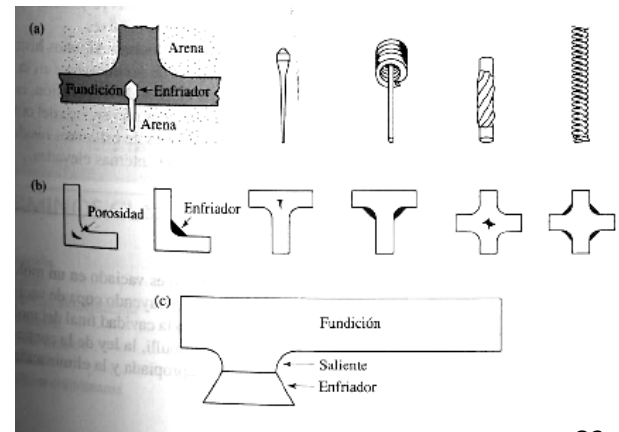
Cavidad por contracción

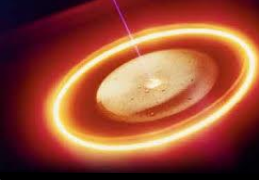


Utilización de enfriadores externos e internos en moldes de arena

Modificaciones del material del molde

Presión isostática en caliente

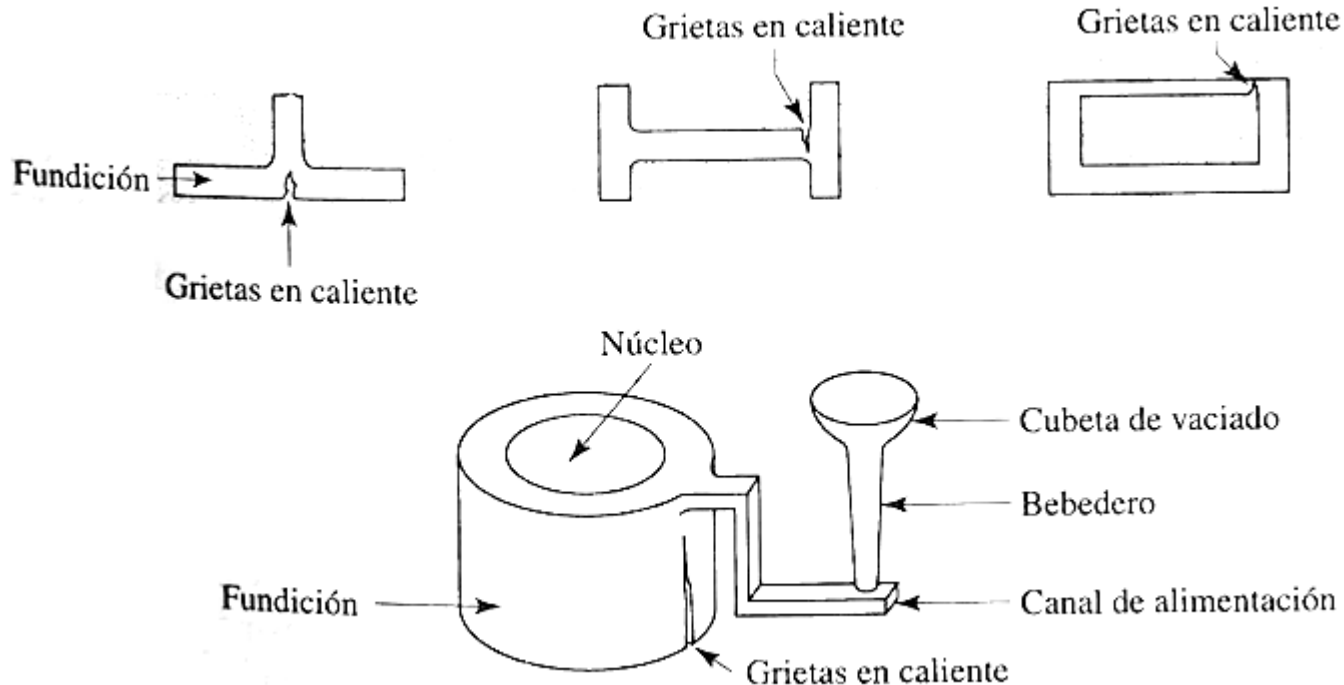


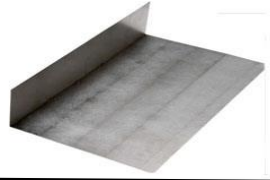
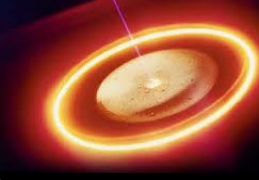


TÉCNICAS DE MOLDEO POR COLADA

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

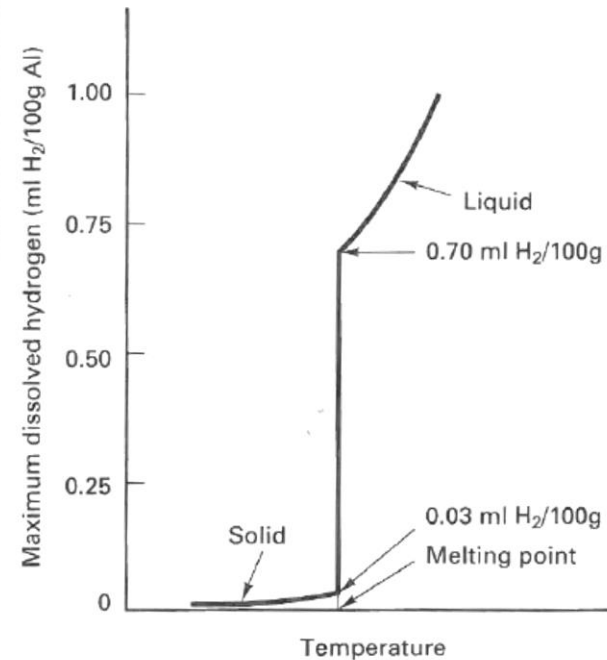
POROSIDAD

GASES DISUELTOS EN EL METAL

GASES PRODUCTO REACCIÓN

ACUMULACIÓN DE GASES EN ZONAS DE POROSIDAD

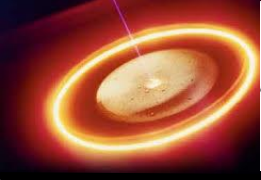
Se debe principalmente a la presencia de gases (incluido aire) o a contracciones



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**

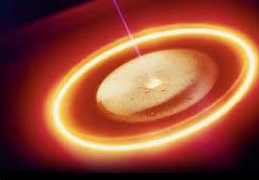
**SEGREGACIÓN
INVERSA**

**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

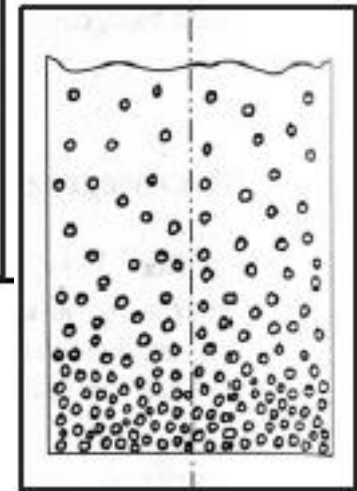
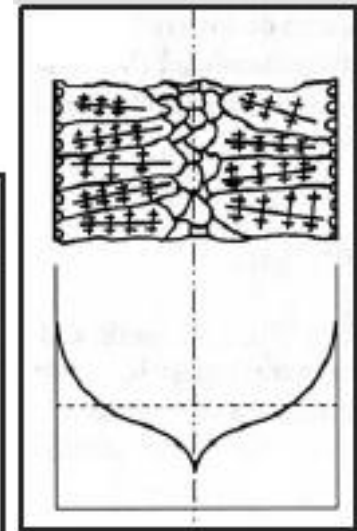
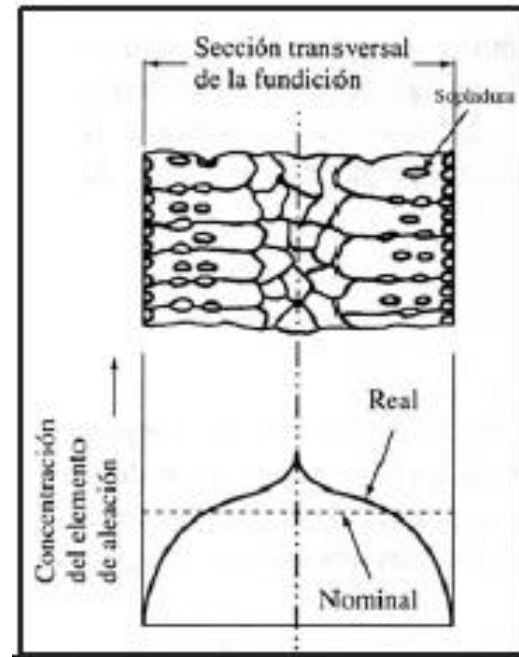
MICROSEGREGACIÓN

SEGREGACIÓN COMÚN

SEGREGACIÓN INVERSA

SEGREGACIÓN POR GRAVEDAD

M
A
C
R
O





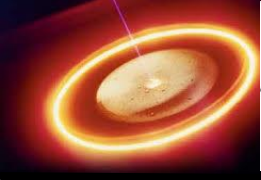
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

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**

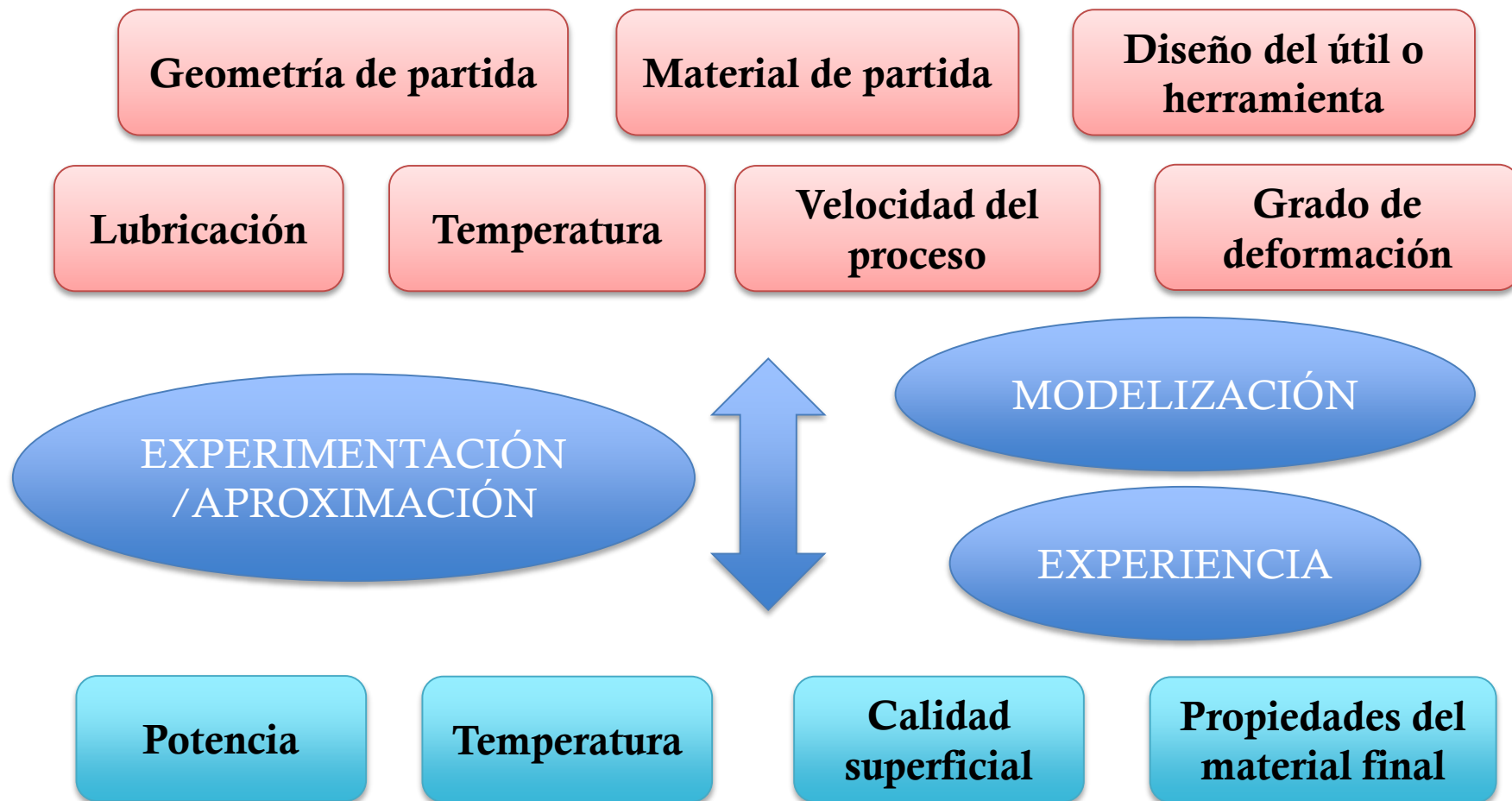
**Conformado en
frío**

**Conformado en
caliente**



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

VARIABLES DEL PROCESO



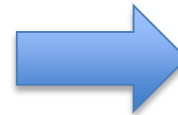


CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

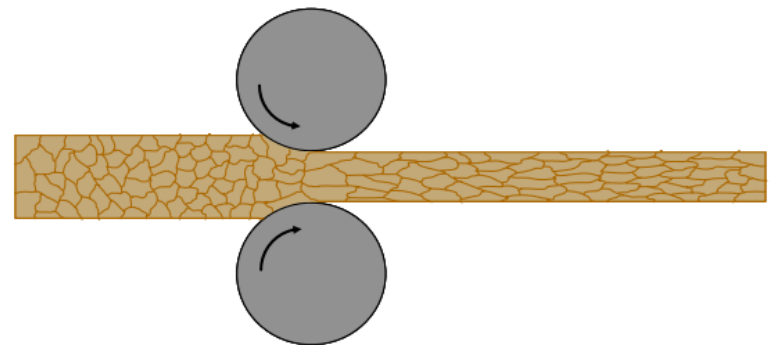
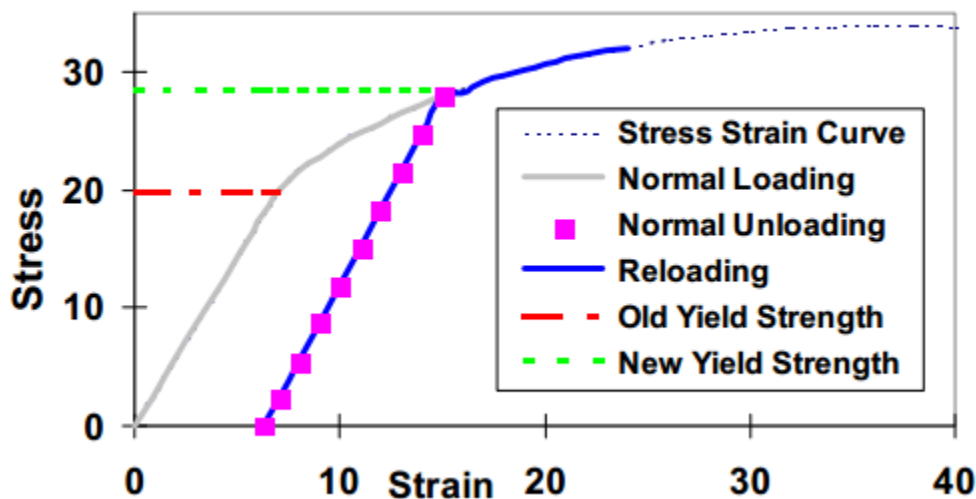
ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

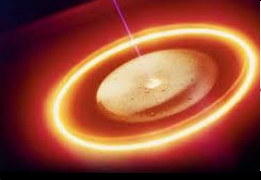
La deformación plástica en frío ocasiona un incremento en la dureza y la resistencia:

- 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

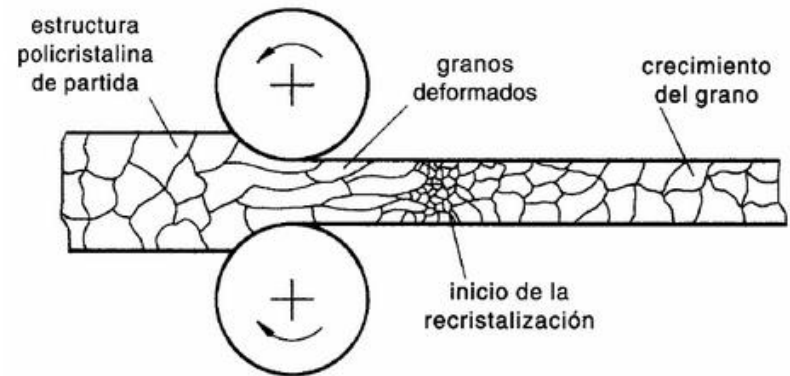
Se reduce la energía interna mediante la creación de nuevos cristales → Requiere incrementar la temperatura

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

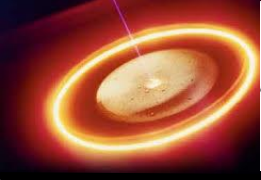
**Conformado
intermedio/templado
(Warm Working)**

Conformado en Caliente

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

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



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

TEMPERATURA EN EL PROCESO

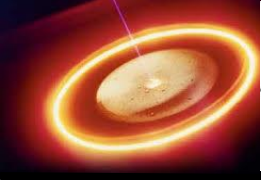
Conformado en Frío

**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
Material de partida		
Limpieza del material de partida	+	-
Ductilidad del material de trabajo	-	+
Dificultad del proceso	-	+
Equipo		
Posibilidad de conformado en un paso	-	+
Requerimientos de fuerza y energía	+	-
Facilidad de reproducción	+	-
Pieza obtenida		
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

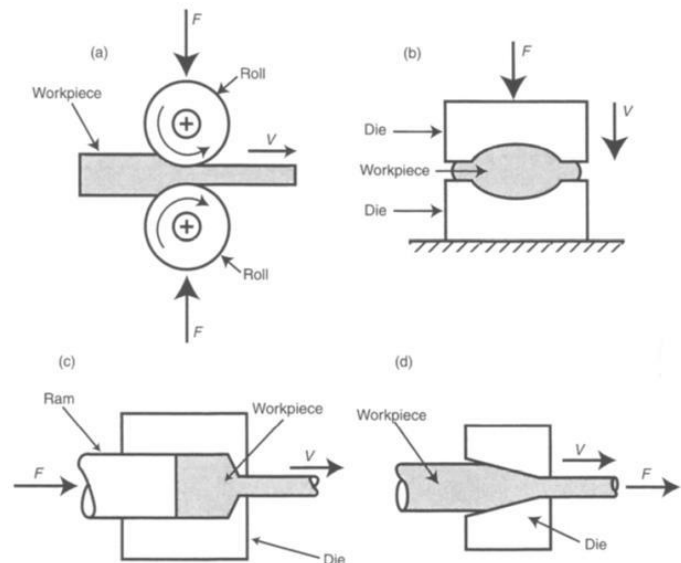
La deformación plástica suele ser mucho menor que la deformación elástica por lo que la recuperación es muy baja

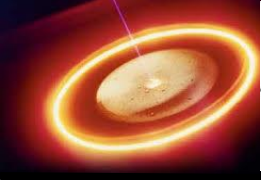
Laminado

Extrusión

Trefilado

Forja

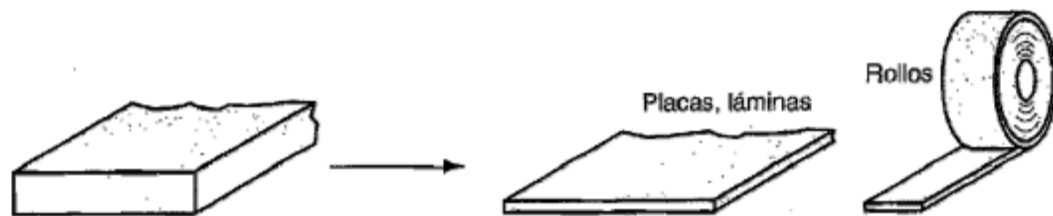


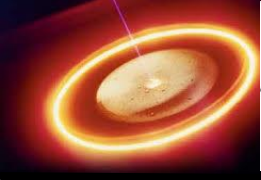


CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

LAMINACIÓN

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



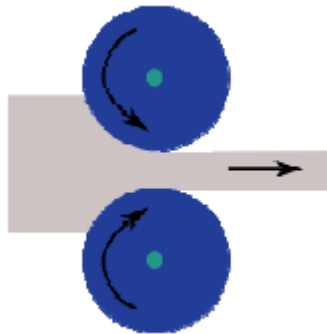


CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

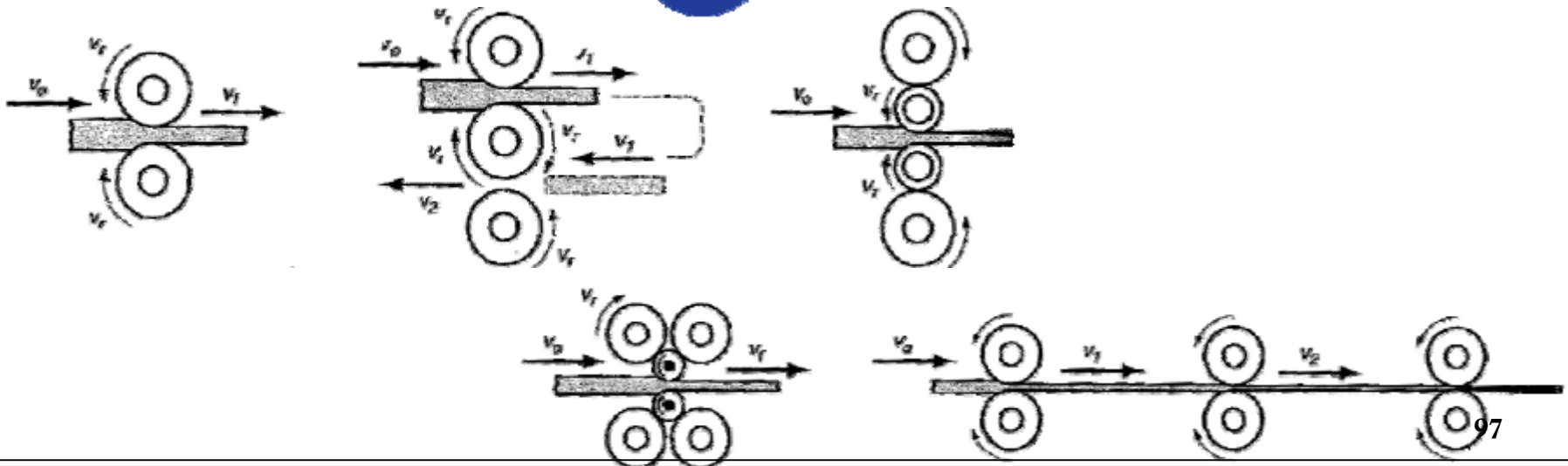
LAMINADOS PLANOS

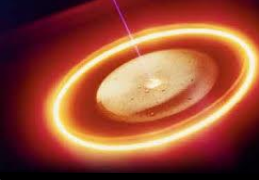
- Fuerzas de compresión entre dos rodillos que reducen el espesor del material
- Deformación plástica muy elevada → Laminación en caliente

REDUCCIÓN DE ESPESOR



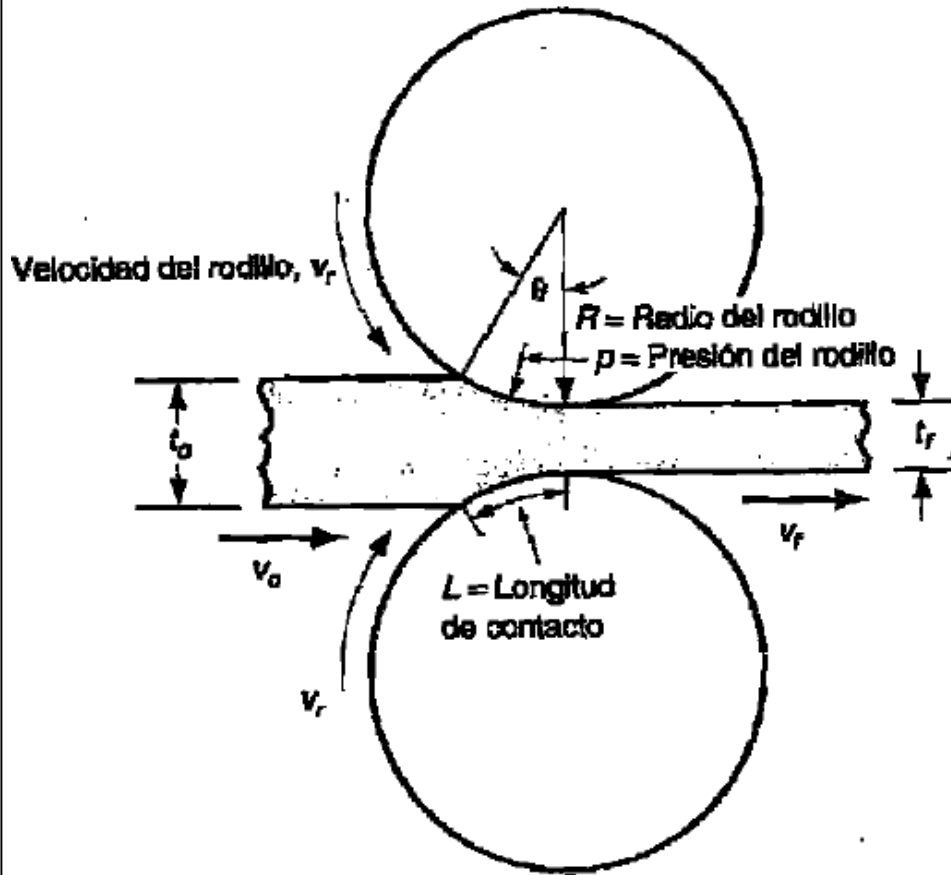
ENSANCHAMIENTO





CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

LAMINADOS PLANOS



Relación entre las velocidades

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f$$

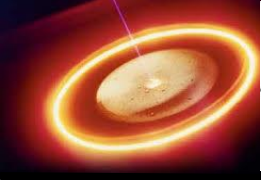
Fuerzas de fricción

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

Máxima reducción (d)

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

μ : 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

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

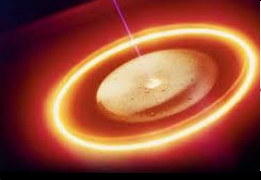
Par torsor

$$T = 0,5 F L$$

Potencia P

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

$$F = Y_f w L$$



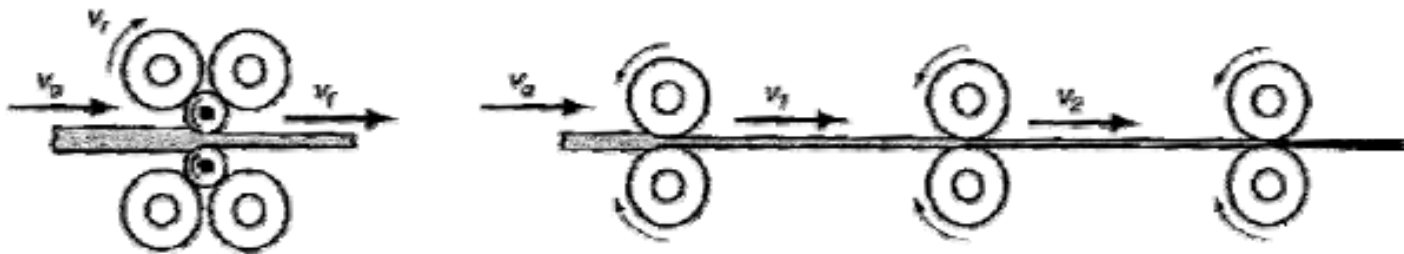
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

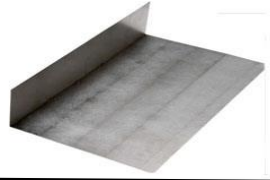
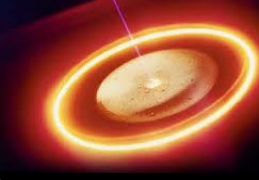
LAMINADOS PLANOS

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

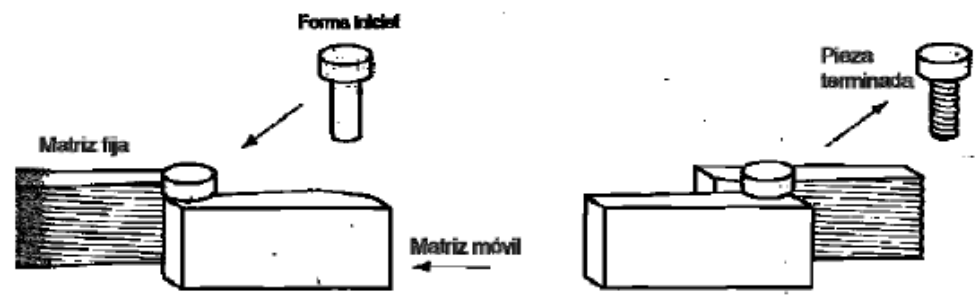




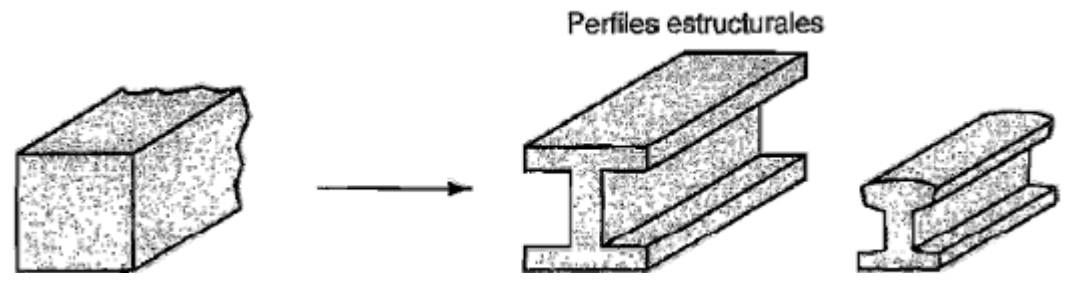
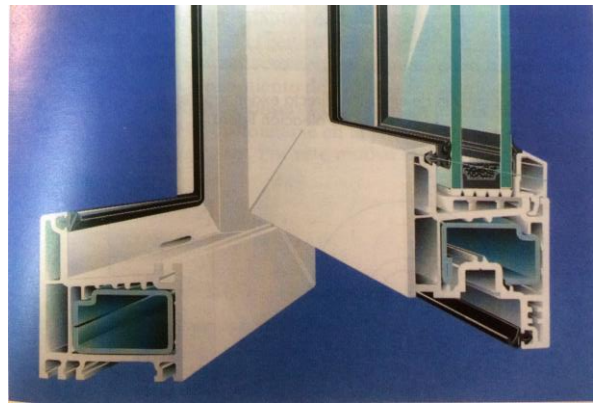
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

OTROS PROCESOS DE LAMINADOS

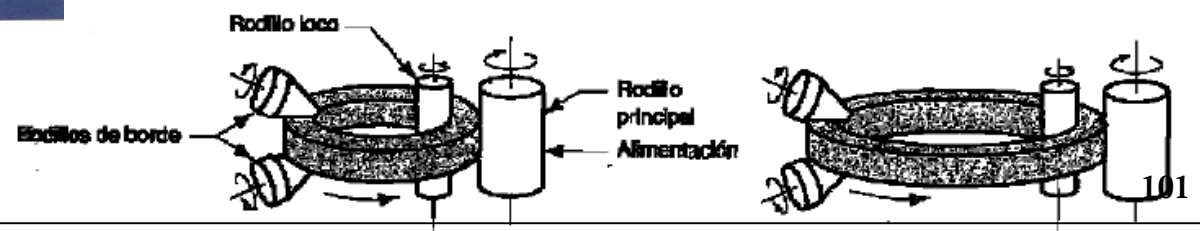
DE ROSCAS

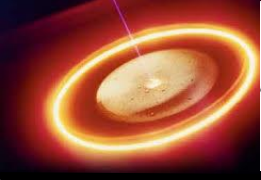


DE PERFILES



DE ANILLOS





CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

FORJA

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

EN FRÍO

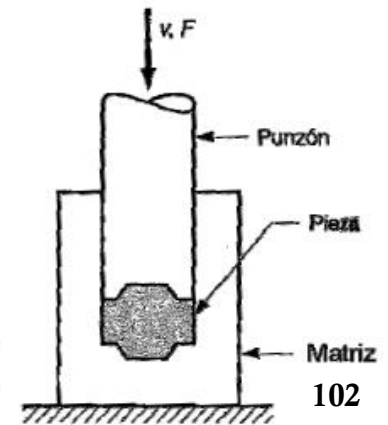
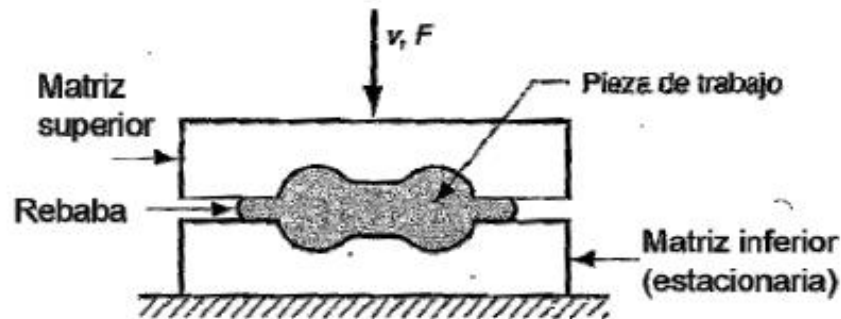
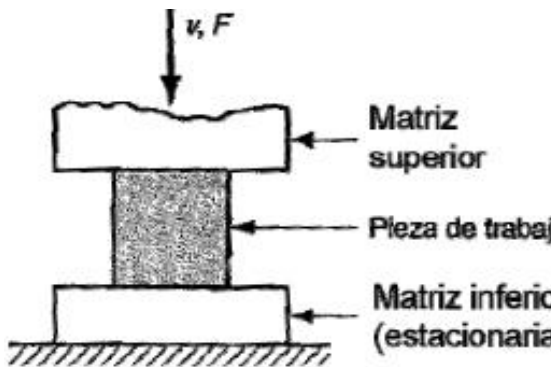
TIBIO
(INTERMEDIO)

EN CALIENTE

MATRIZ ABIERTA

MATRIZ DE
ESTAMPACIÓN

MATRIZ CERRADA
SIN REBABA

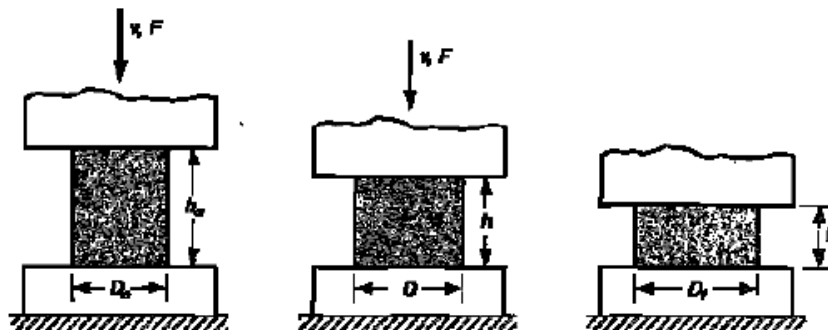




CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

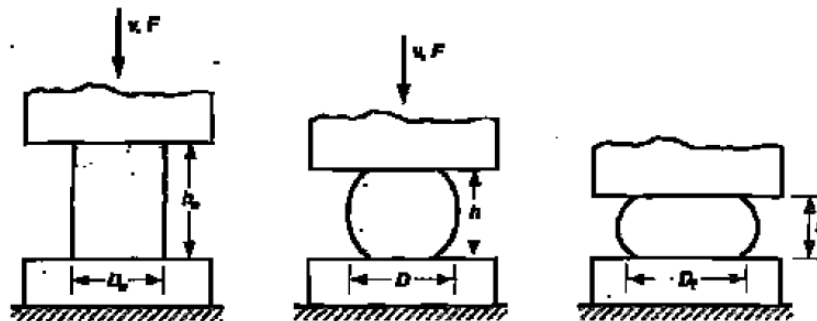
FORJA – EN MATRIZ ABIERTA

CASO IDEAL



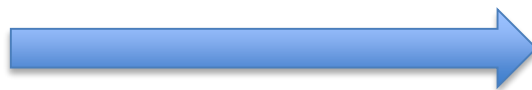
$$F = Y_f \cdot A$$

ABARRILAMIENTO



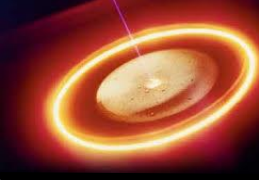
CASO REAL

$$F = Y_f \cdot A$$



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

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



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

FORJA – ESTAMPACIÓN

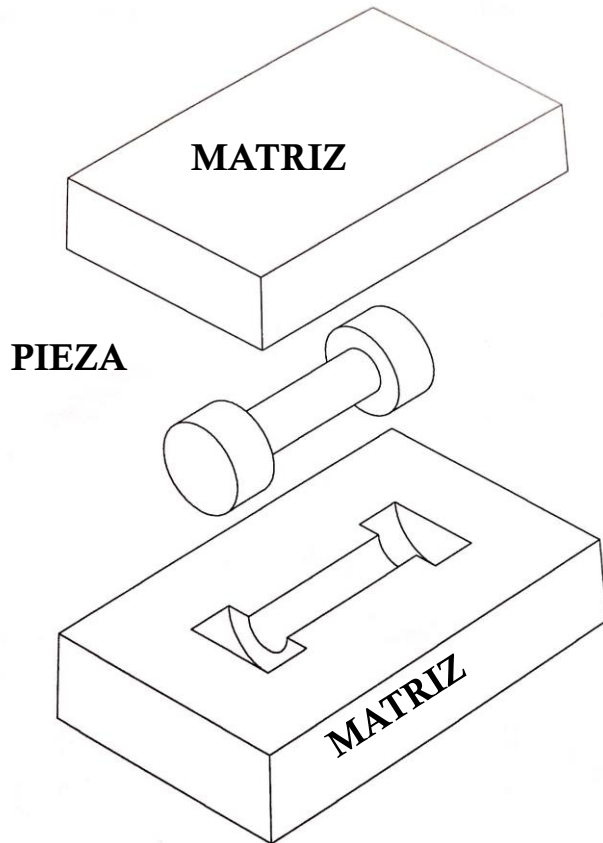
Se elimina la generación de porosidad y defectos de rechupe

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

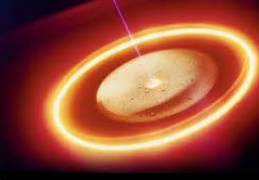
La velocidad de producción es más alta que en otros procesos

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



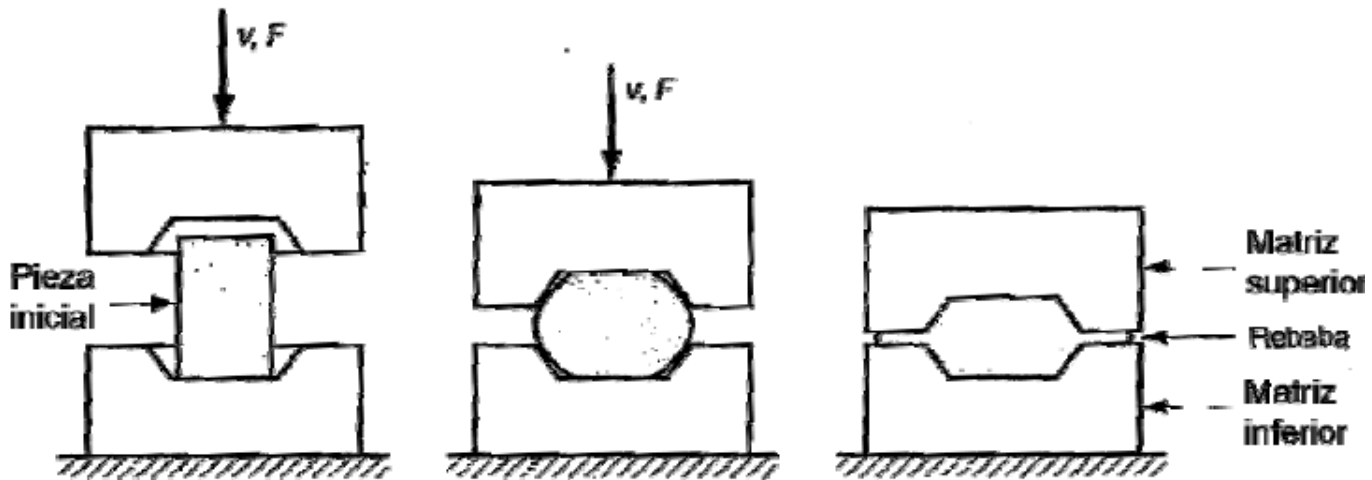
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

FORJA – ESTAMPACIÓN

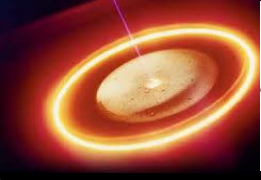
REBABAS:

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

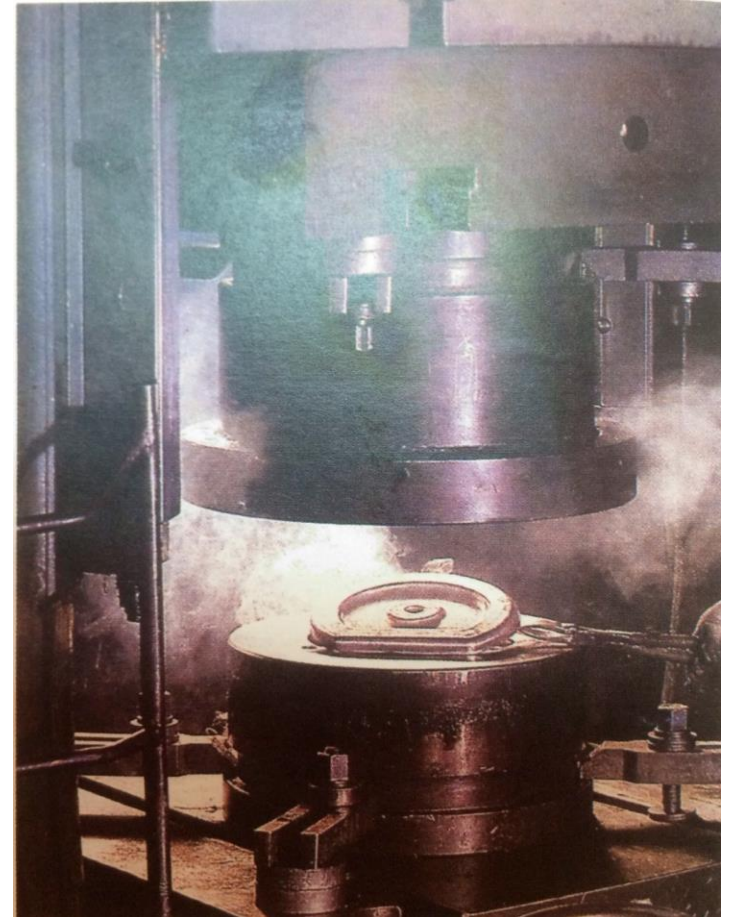
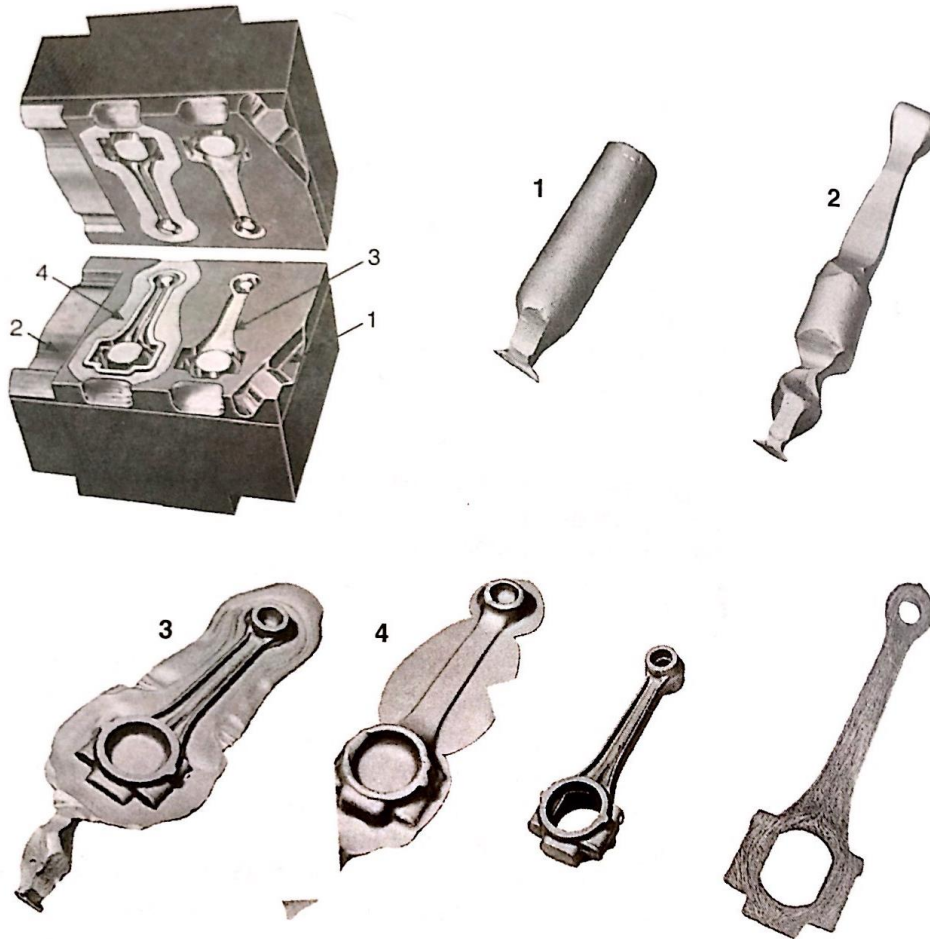


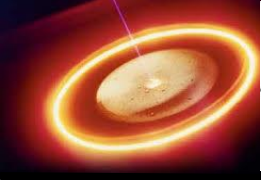
Al comenzar a crearse la rebaba → Fricción que evita la salida del material de la cavidad del molde → Rellena los detalles de la geometría



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

FORJA – ESTAMPACIÓN

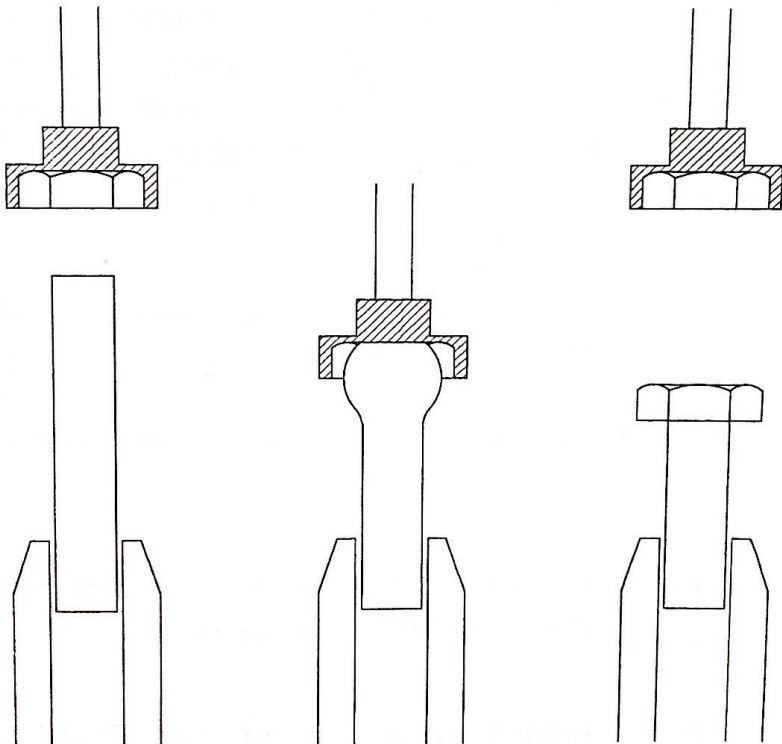


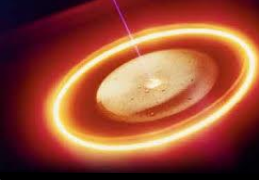


CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

RECALCADO

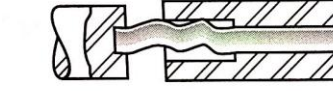
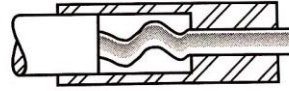
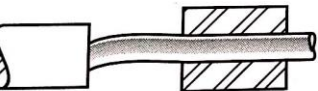
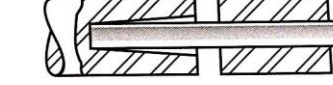
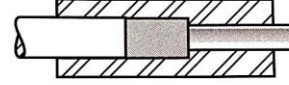
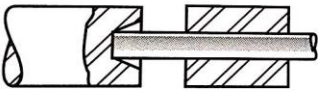
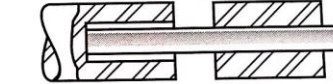
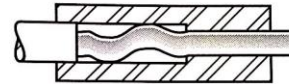
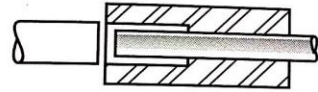
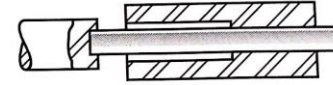
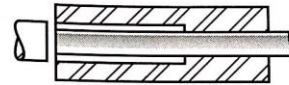
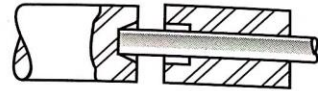
Se utiliza este término para las operaciones de forja dónde sólo se deforma un parte del material o elemento → Cabezas de tornillos, clavos, remaches





CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

RECALCADO



Applications of rule 1

Applications of rule 2

Applications of rule 3

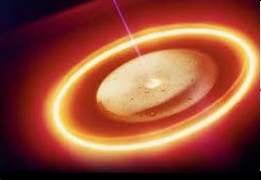
Violation of rule 1

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

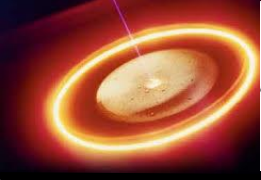
HIDRÁULICAS

- 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

$$F = Y_f \cdot A$$



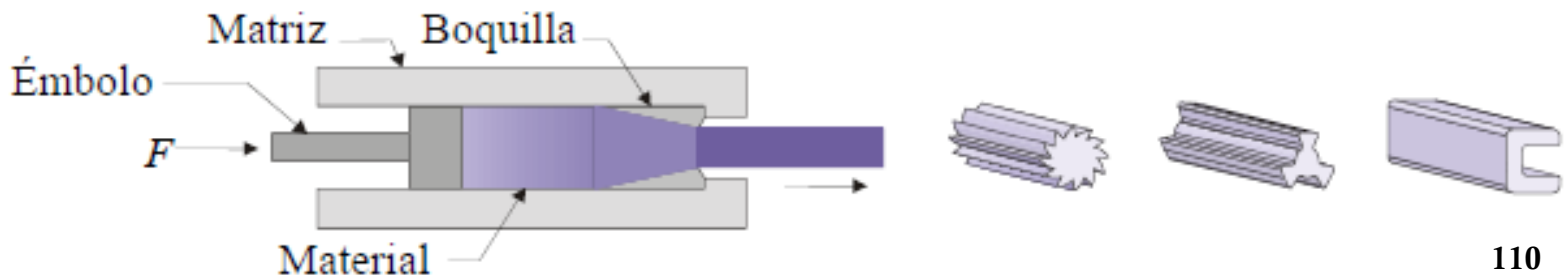
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

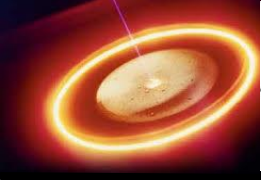
EXTRUSIÓN

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

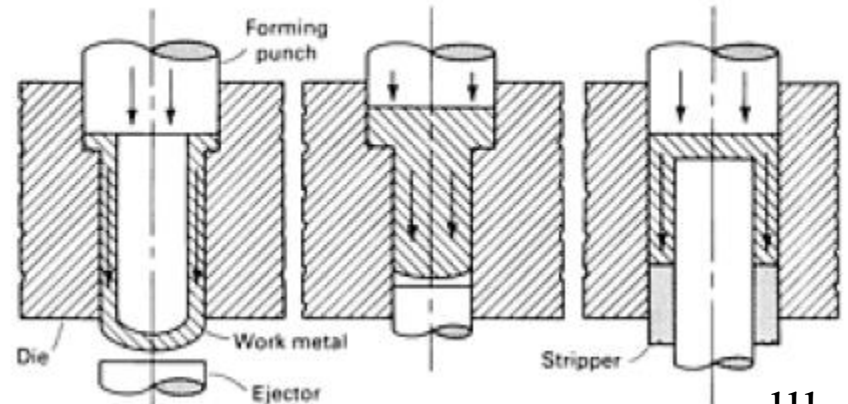
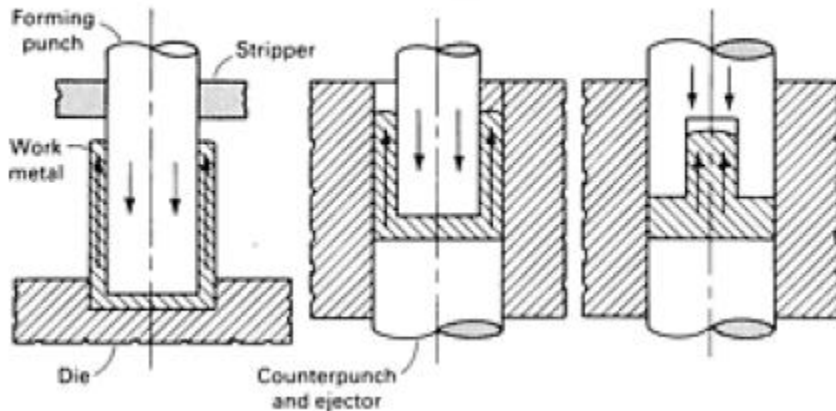
EN CALIENTE

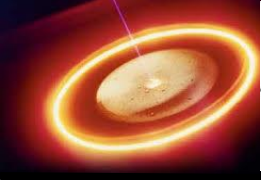
CONTINUO

DISCONTINUO

INVERSA

DIRECTA





CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

EXTRUSIÓN

**ALTAS
PRESIONES
SOTENIDAS**

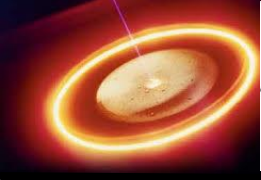
**TEMPERATURAS
PARA REDUCIR
TENSIÓN DE
FLUENCIA**



**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

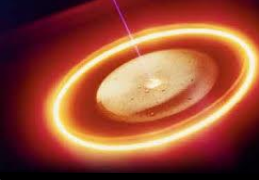
Es la propia boquilla con la sección de la pieza que se quiere extruir. Sufre un elevado desgaste → Es necesario cambiarla periódicamente. Aceros aleados (C, Cr, W)

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



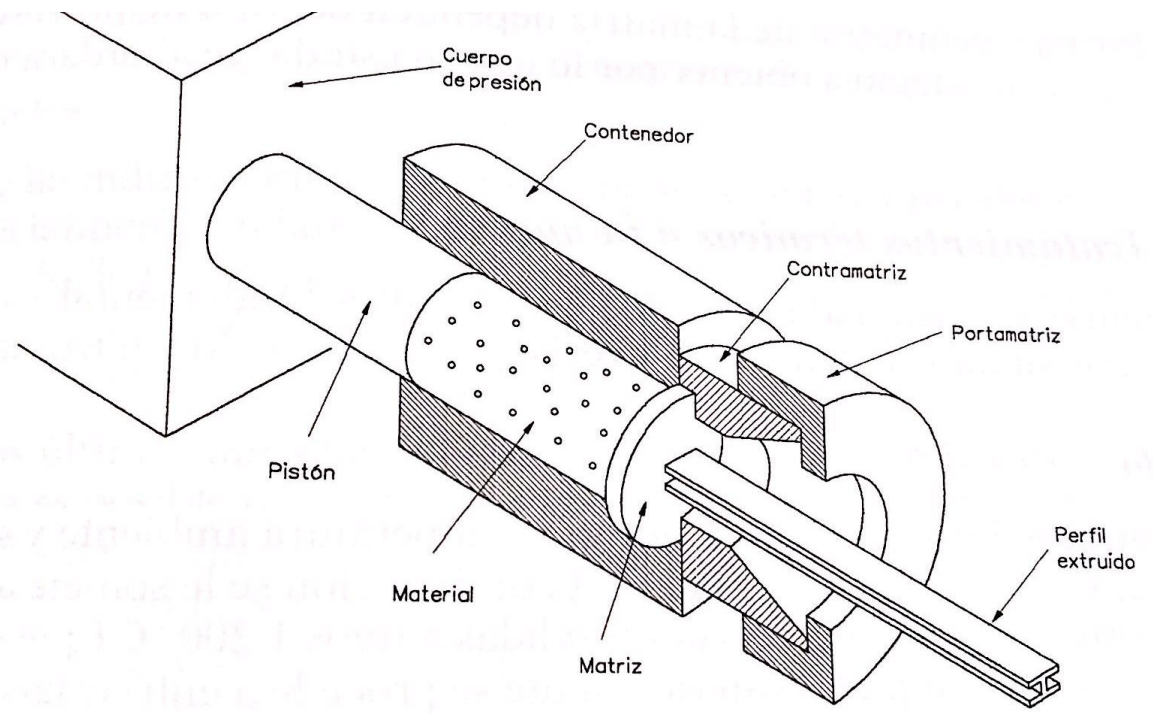
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

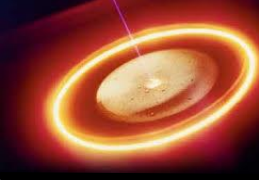
EXTRUSIÓN – MATRIZ DE EXTRUSIÓN

MATRIZ

CONTRA-MATRIZ

PORTA MATRIZ





CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

EXTRUSIÓN

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

Relación de Extrusión

Matriz

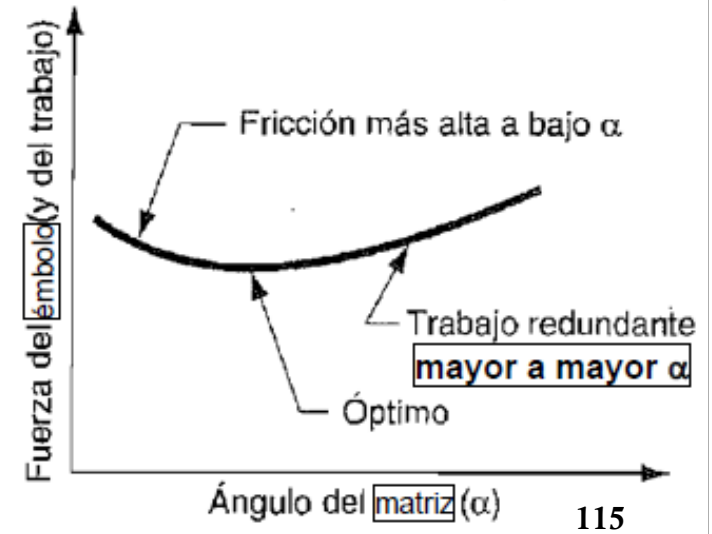
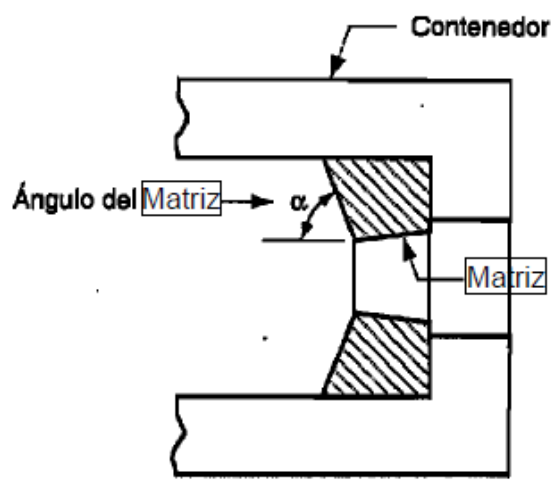
Ángulo de entrada

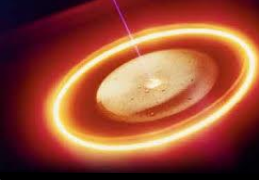
Radio de Entrada

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

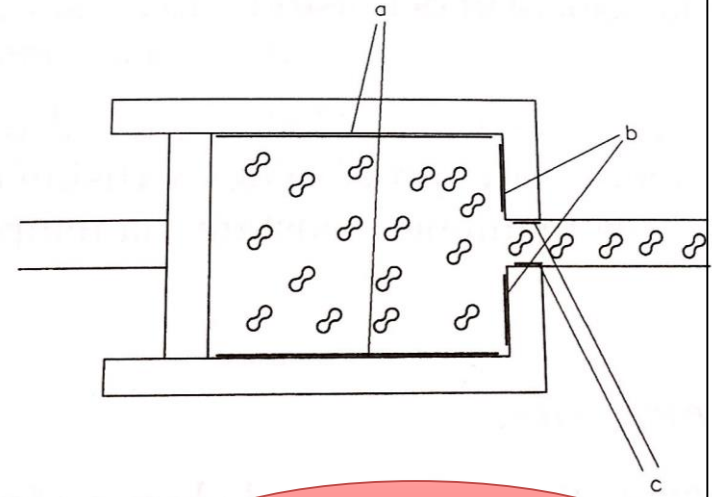
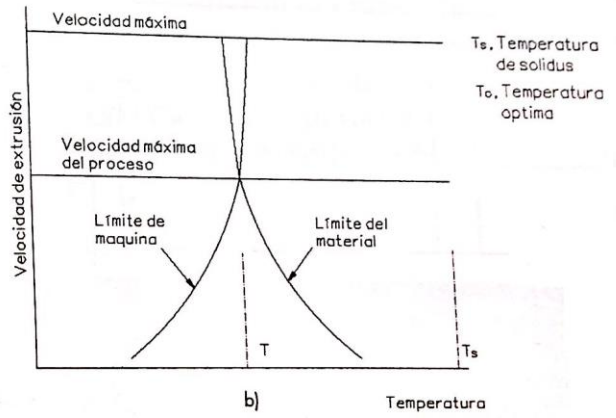
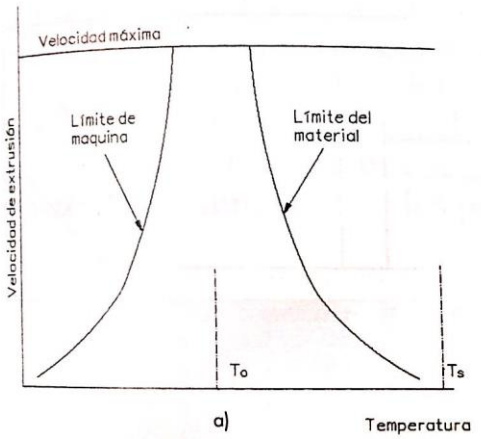




CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

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



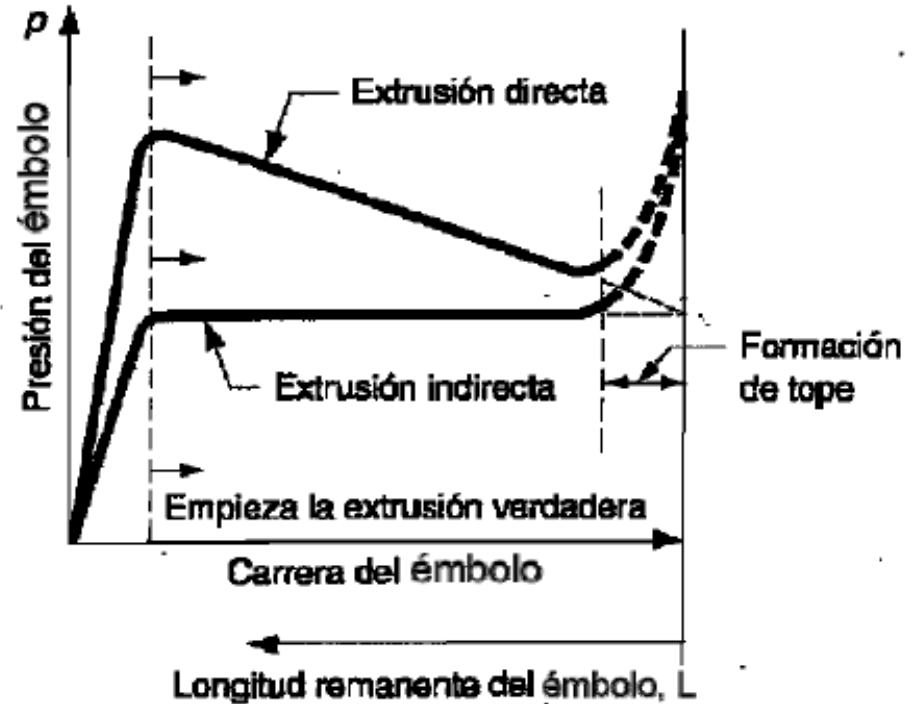
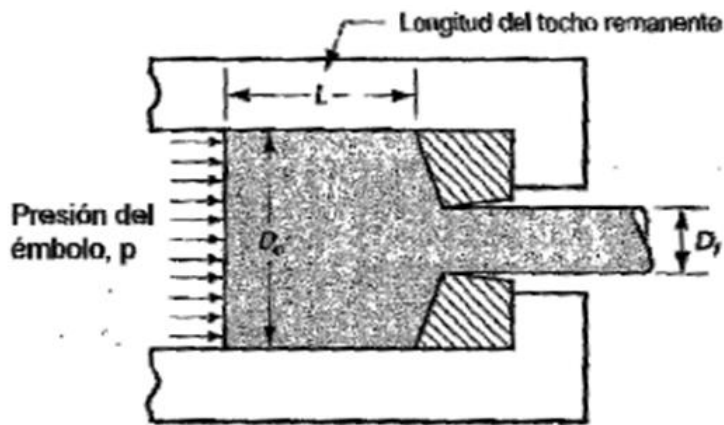
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

EXTRUSIÓN

Caso ideal:

$$\varepsilon = \ln r_x$$

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



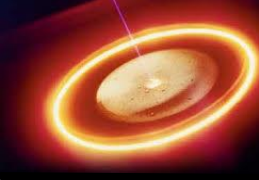
Corrección al caso

idea¹

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

Presión en extrusión directa con fricción en la interfase:

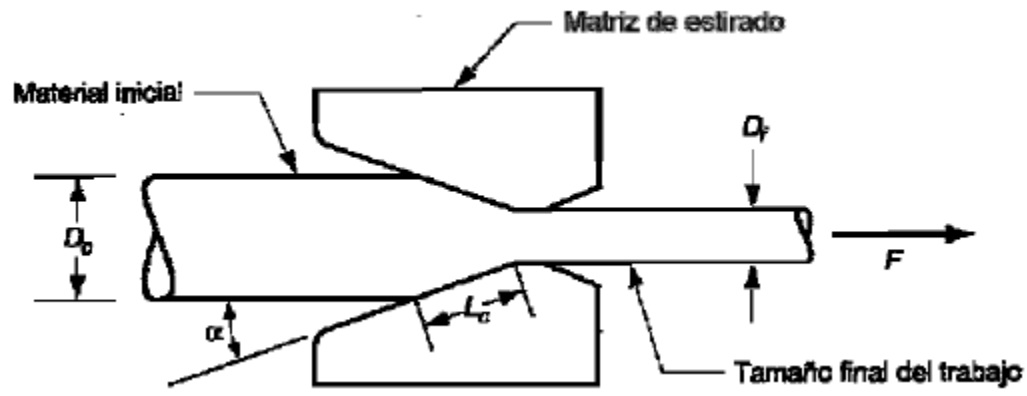
$$p = \bar{Y}_f \left(\varepsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right)$$



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

ESTIRADO - TREFILADO

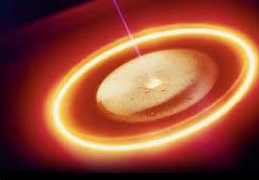
Operación para reducir la sección transversal de un material metálico al tirar del mismo a través de una abertura en una matriz



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)

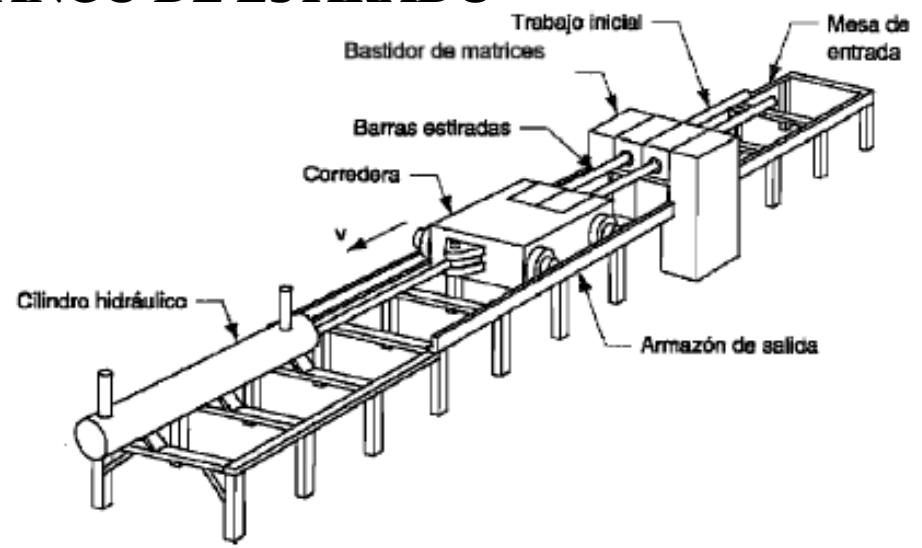
ESTIRADO: El mayor diámetro limita la longitud por lo que el proceso es más discontinuo



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

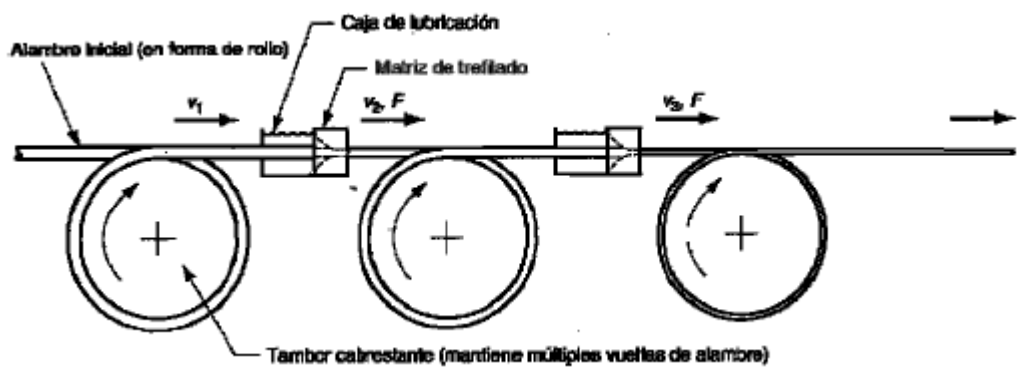
ESTIRADO - TREFILADO

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

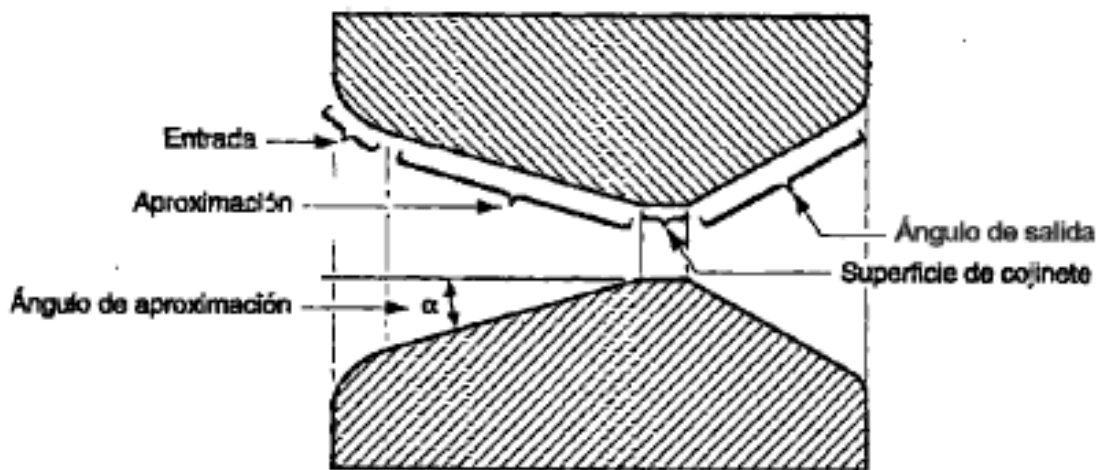
Generalmente lleva previamente tratamientos de:

-Recocido

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

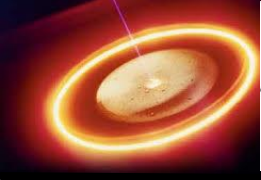
-Afilado

LA MATRIZ



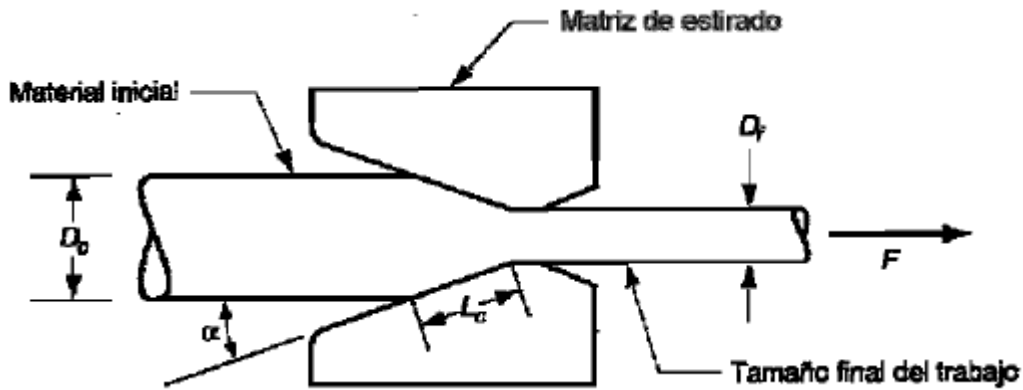
Suele estar fabricada en aceros de herramientas o metal duro (carburos cementados)

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

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

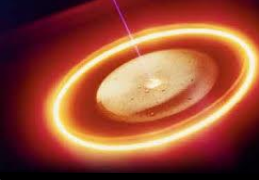
Reducción de diámetro

$$d = D_0 - D_f$$

CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS (en ausencia de fricción)

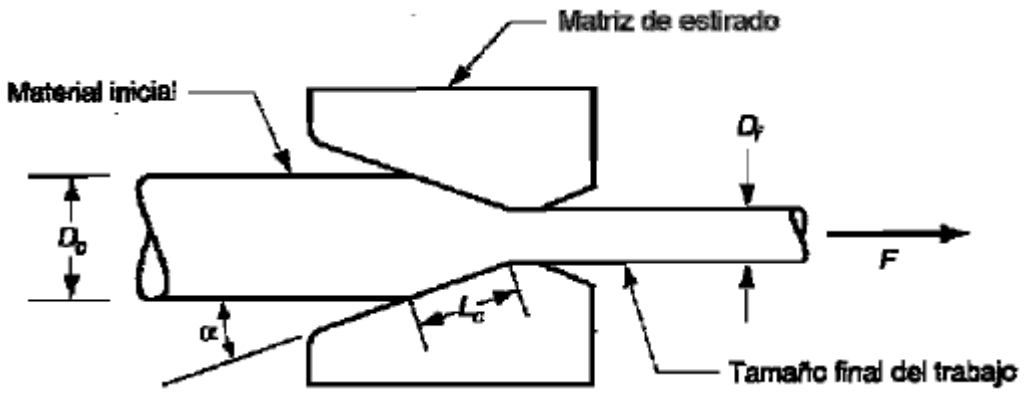
Deformación: $\epsilon_x = \ln (A_0 / A_f) = \ln (1 / (1 - r))$

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

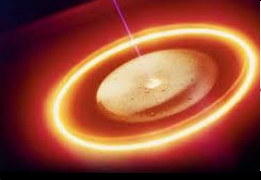
Número de etapas

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:

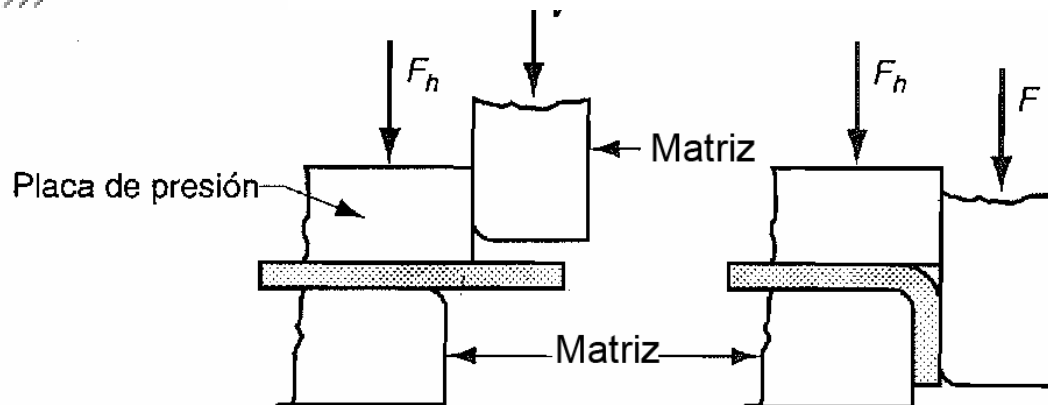
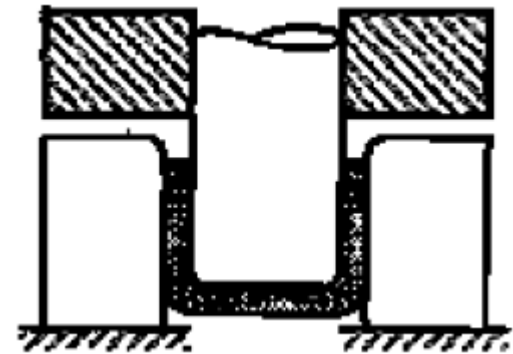
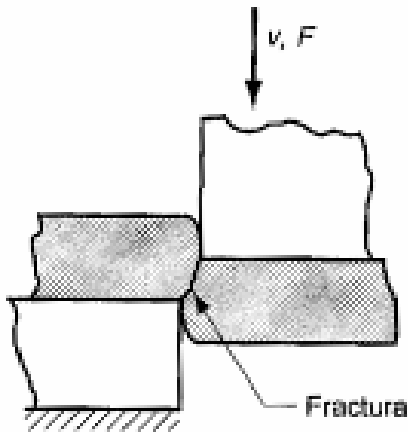
- Barras (ESTIRADO): 0.5
- Alambres (TREFILADO): 0.3



CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

CONFORMADOS EN LÁMINA

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

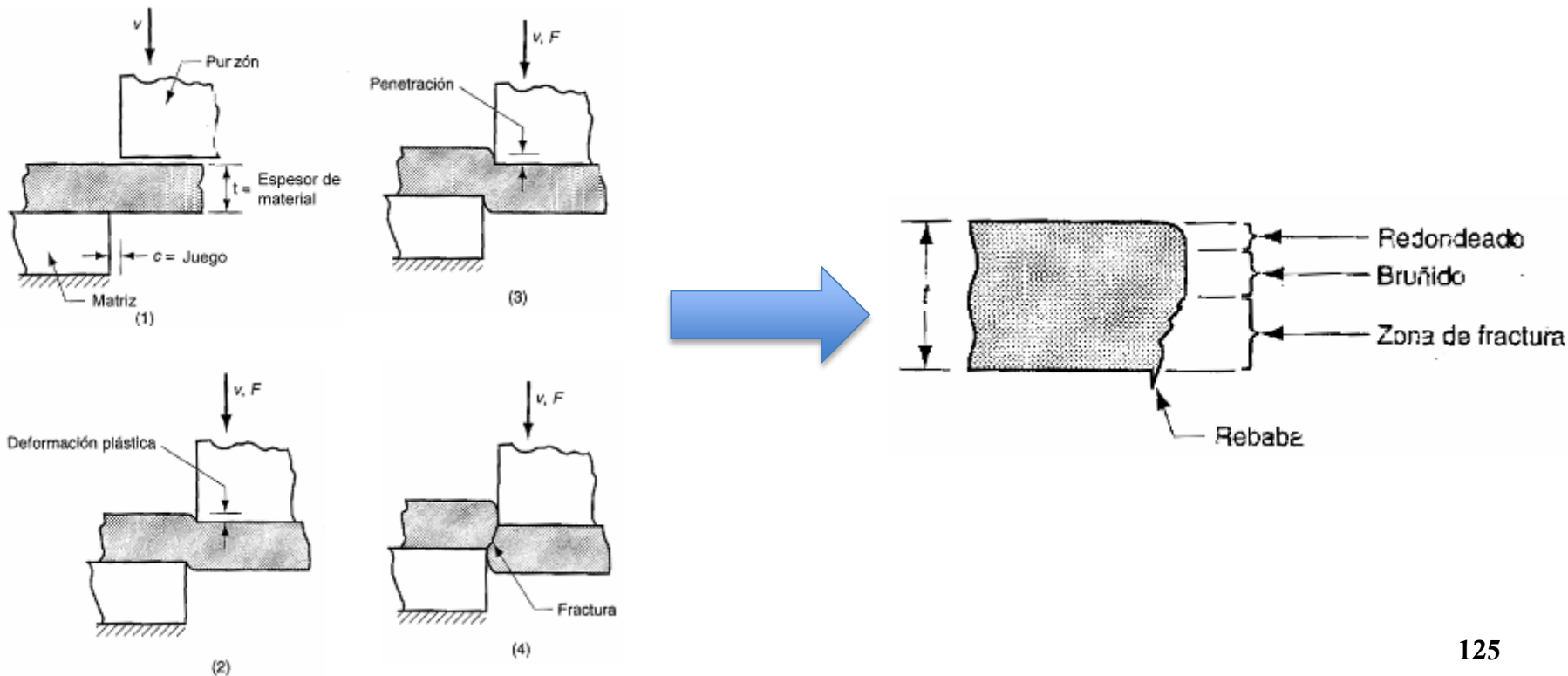




CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

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)





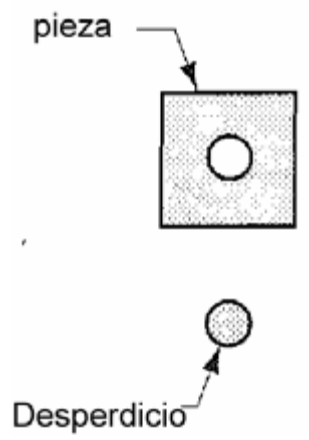
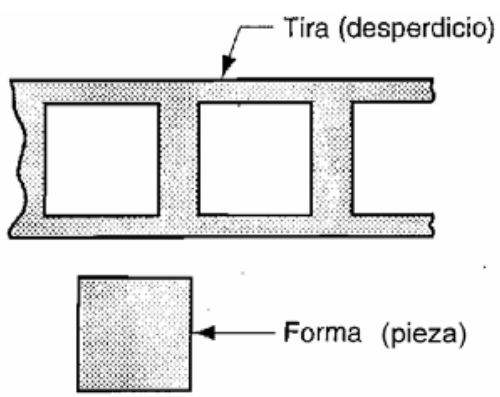
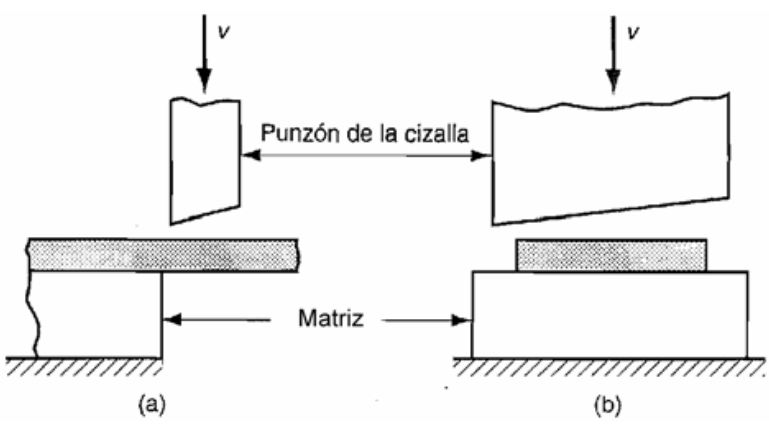
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

CORTE

CIZALLADO

TROQUELADO Ó PUNZONADO

PERFORADO





CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

CORTE

PARÁMETROS DEL CORTE

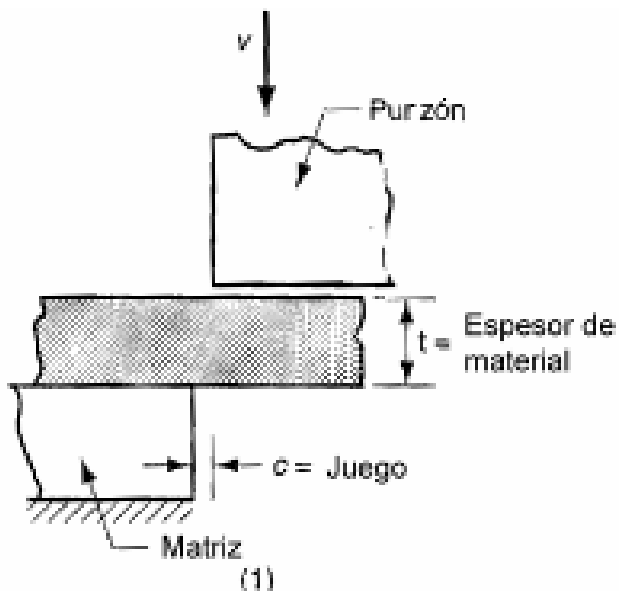
ESPESOR

TIPO DE MATERIAL

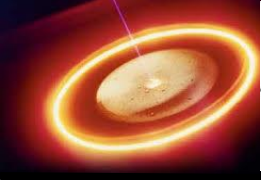
LONGITUD

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

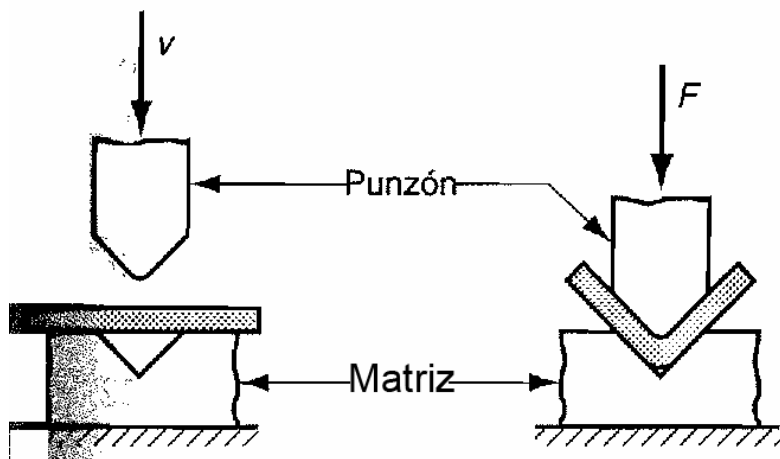


CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

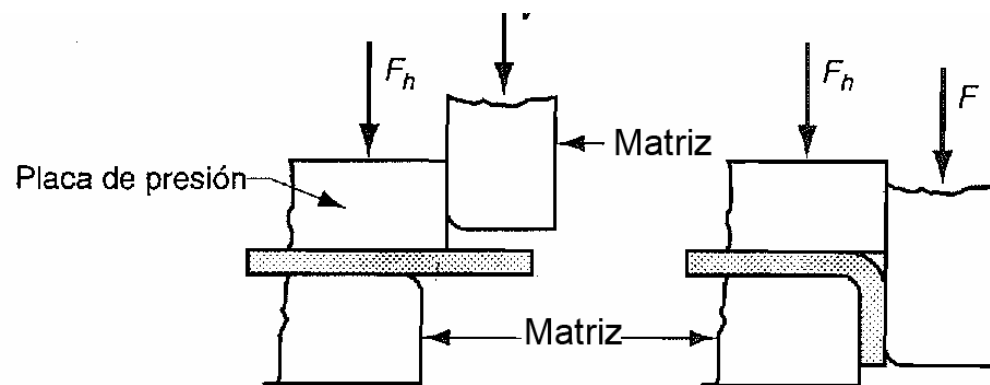
PLEGADO

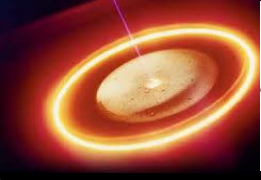
- Consiste en la deformación permanente de un metal alrededor de un eje recto
- El metal sufre compresión en un plano y tracción en otro, existiendo un plano neutral intermedio.
- Se considera que no se produce variación en el espesor de la lámina metálica

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

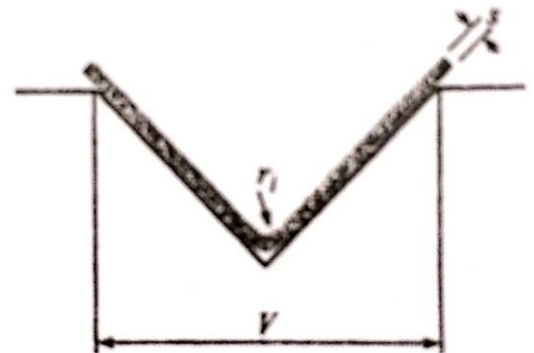
Debe ser lo mayor posible, según sus condiciones de operación, para evitar concentración de tensiones

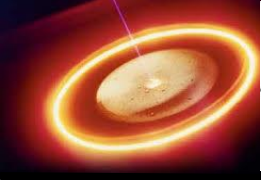
$$r_{\min} = s(mm) \left(0.0085 \cdot \frac{\sigma_{ult} (kg/mm^2)}{\epsilon_{rotura} (-)} \right)$$

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

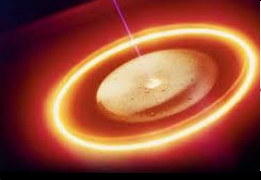
$$F_{\max} = k \frac{\sigma_{ult} L S^2}{w}$$

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

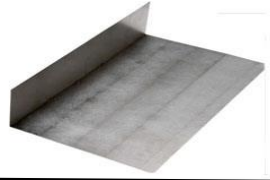
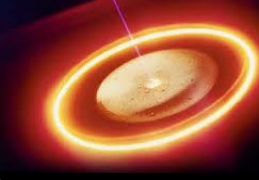
EMBUTICIÓN

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

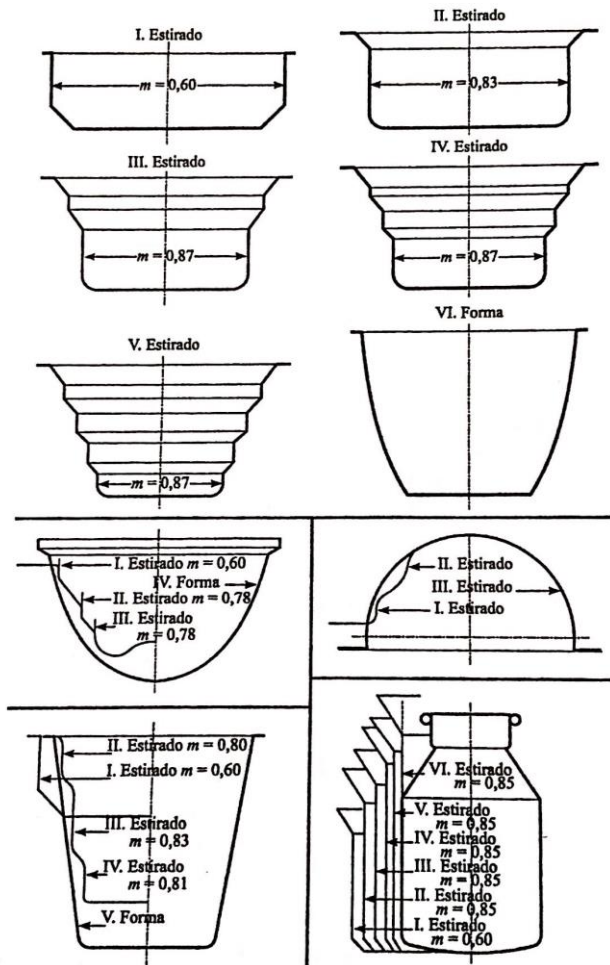
Estirado en
pasos sucesivos





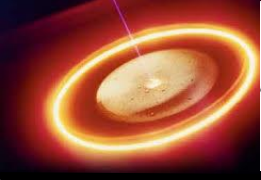
CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES

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:

β^* es la relación de embutición en el máximo de fuerzas

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

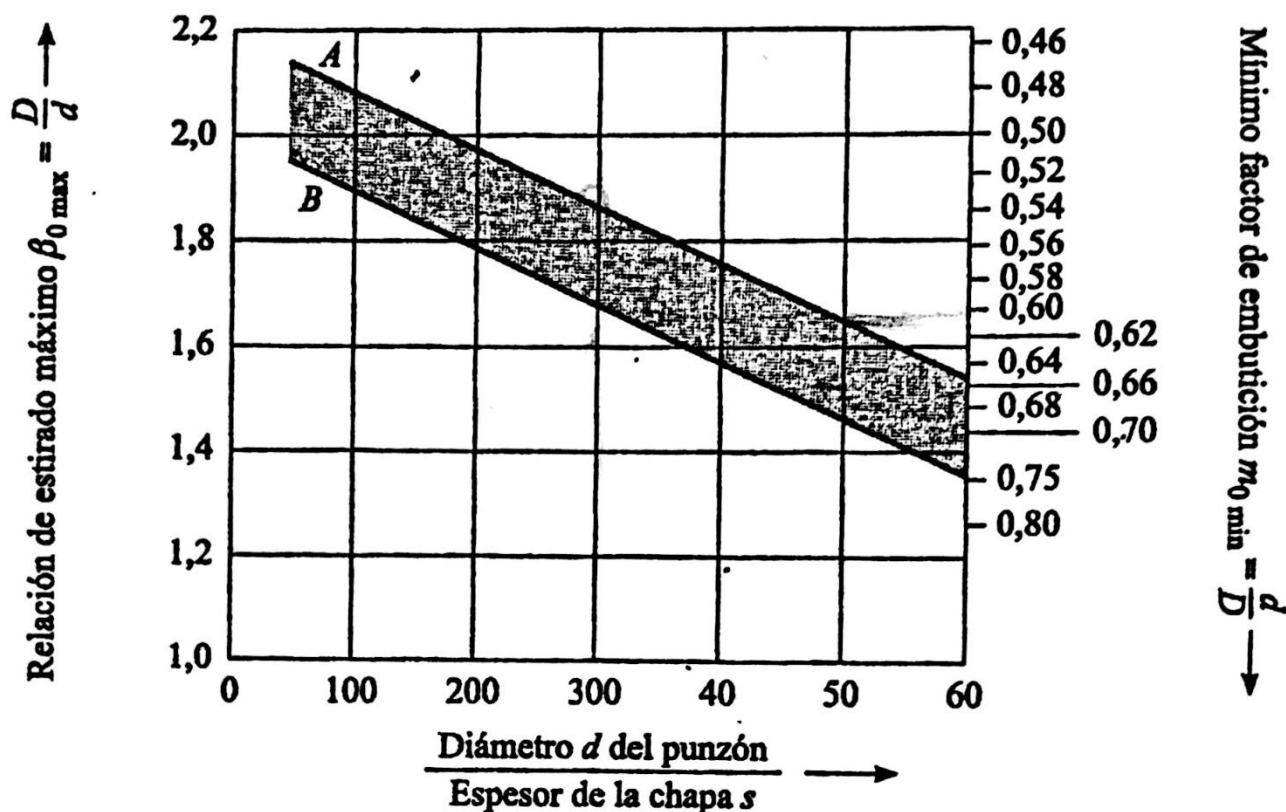
$$P_z = \pi ds \frac{K_{fm}}{\eta_f} \ln \beta^*$$

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

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

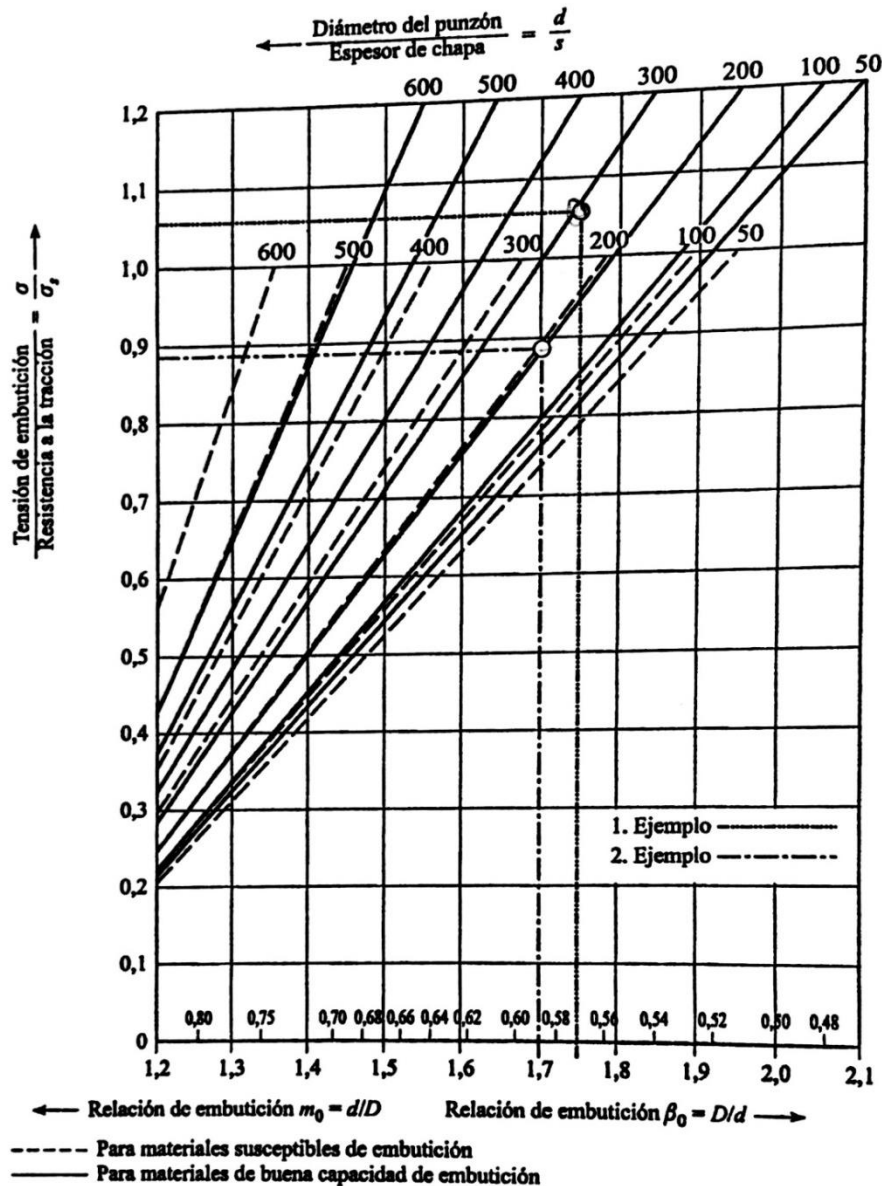
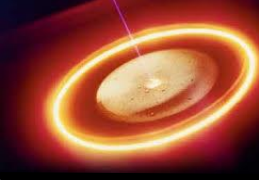
$s =$ Espesor de chapa

A = Material de buena embutición

B = Material de capacidad normal de embutición

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

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



Buena capacidad de embutición

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

Susceptible de embutición normal

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