

# Procesos de Fabricación

## Lectura 3

# Metalurgia de polvos

### Profesor:

Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ [ricardo.caballero@utp.ac.pa](mailto:ricardo.caballero@utp.ac.pa)



# Metalurgia de polvos

La **metalurgia de polvos (PM)** o **pulvimetalurgia** es un proceso de fabricación en donde polvos metálicos se compactan en formas complejas calientan sin llegar a fundirse (sinterizan) para formar piezas sólidas.

## Productos típicos fabricados:

- Partes mecánicas (bielas, engranajes, cojinetes)
- Electrodomésticos
- Motores industriales
- Sistemas hidráulicos
- Herramientas manuales
- Implantes quirúrgicos
- Y otros



# Proceso de metalurgia de polvos

Producción del polvo

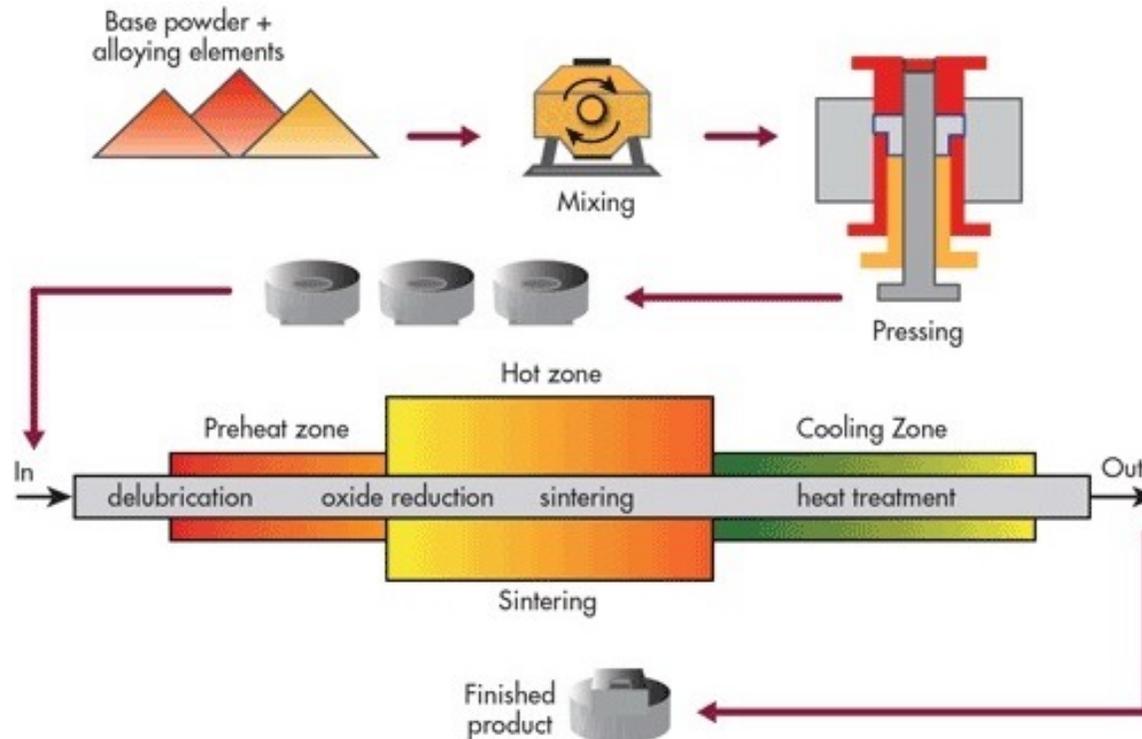
Mezclado

Compactación

Sinterizado

Operaciones de acabado

Powder Metallurgy Process



# Ventajas y desventajas

---

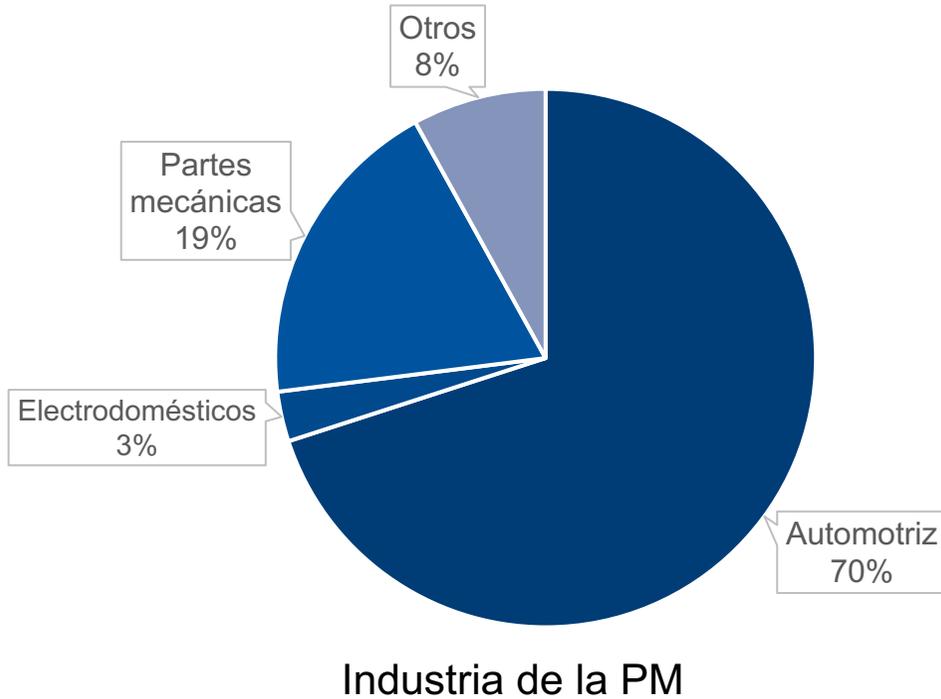
## Ventajas

- No se desperdicia material (buena utilización de material)
- Tiempo de corto de fabricación
- Geometrías complejas pueden ser manufacturadas en un solo paso
- La combinación de diversos materiales (mezcla de metales y no metales) es posible
- Estructuras densas y porosas pueden ser manufacturadas

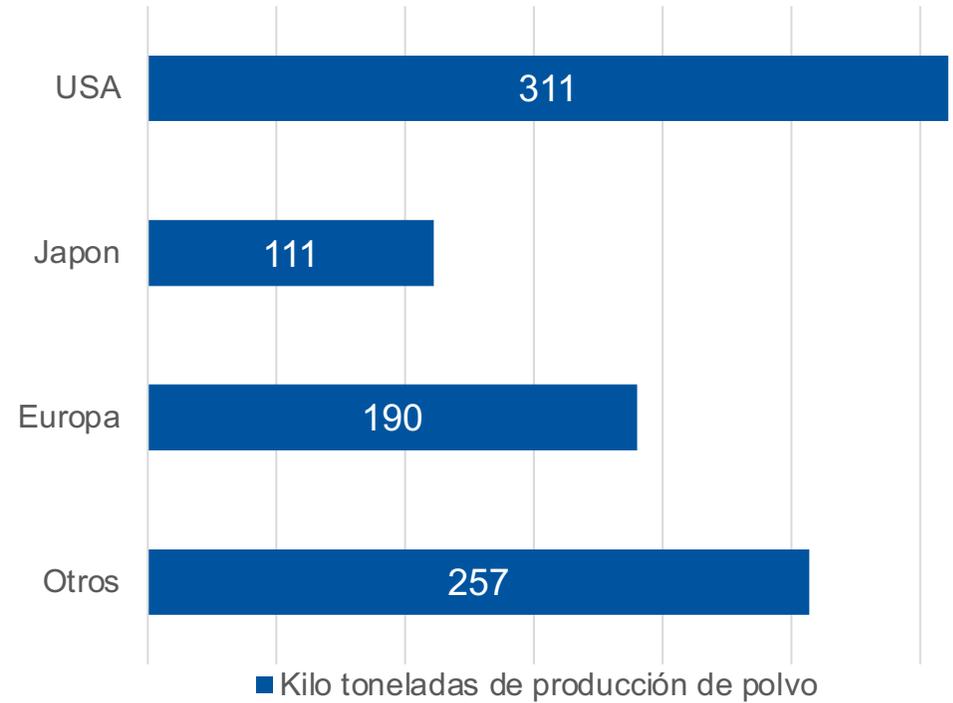
## Desventajas

- Elevado costo del equipo y polvos metálicos.
- Características mecánicas inferiores debido a la porosidad del material.
- Limitaciones de diseño: sección uniforme en la dirección de compactado, esbeltez limitada, etc.

# Mercado de la industria de la pulvimetalurgia



Producción de polvos a nivel mundial para aplicaciones PM



# Selección de material

## Requerimientos de las propiedades de los polvos

### Compresibilidad

- Material blando → baja presión
- Los materiales limpios son mejor comprimibles que las aleaciones
- Morfología (globular, acicular, hojuela, etc..)
- Tamaño y distribución del grano
- Fricción

### Sinterabilidad

- Baja distorsión durante la sinterización
- Afinidad al oxígeno, capa de óxido, barrera de difusión

### Templabilidad

- Muchos componentes deben ser templados

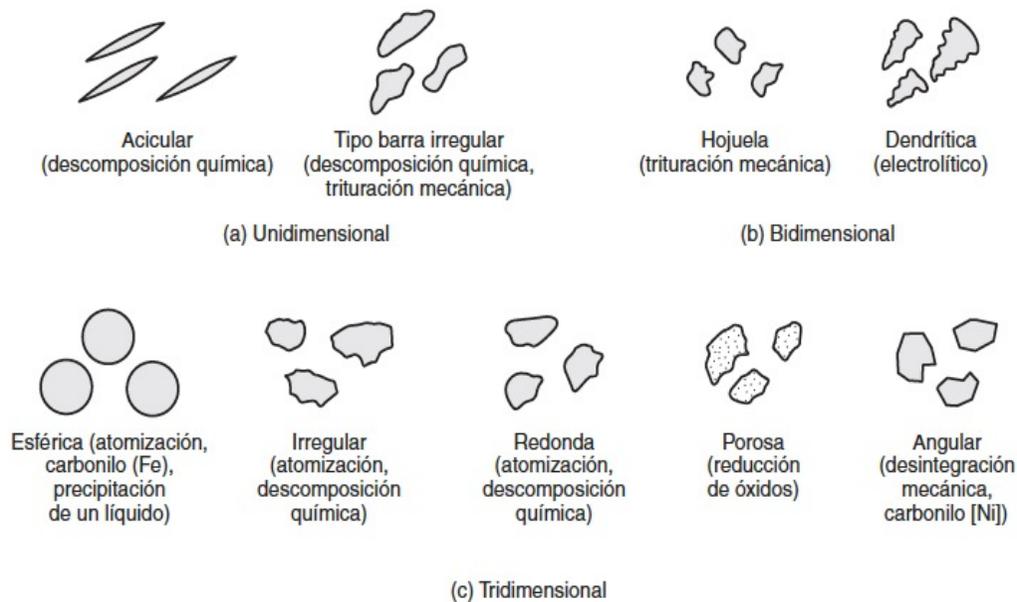
### Costos

- Los precios de las materias primas fluctúan, por lo que los costos de los elementos de aleación también fluctúan

# Métodos de producción

- Existen varios métodos de producción
- La elección del método depende de los requisitos del producto final
- Las características finales del polvo son importantes porque afectan el flujo y la permeabilidad durante la compactación y sinterizado.
- El tamaño de las partículas producidas va de 0.1 a 1000  $\mu\text{m}$

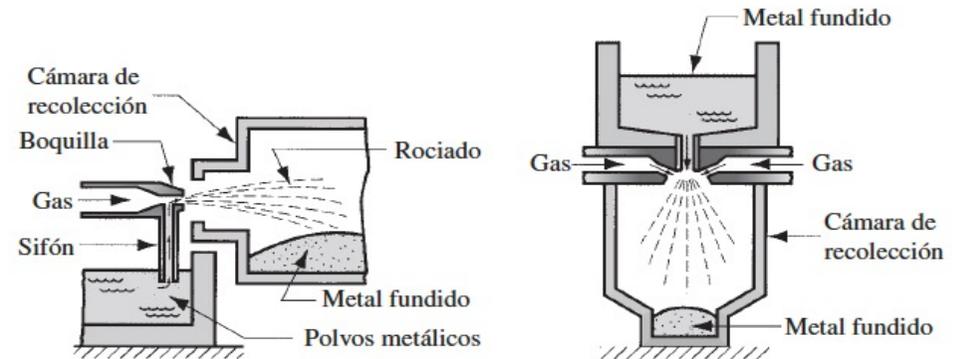
Formas de partículas en los polvos



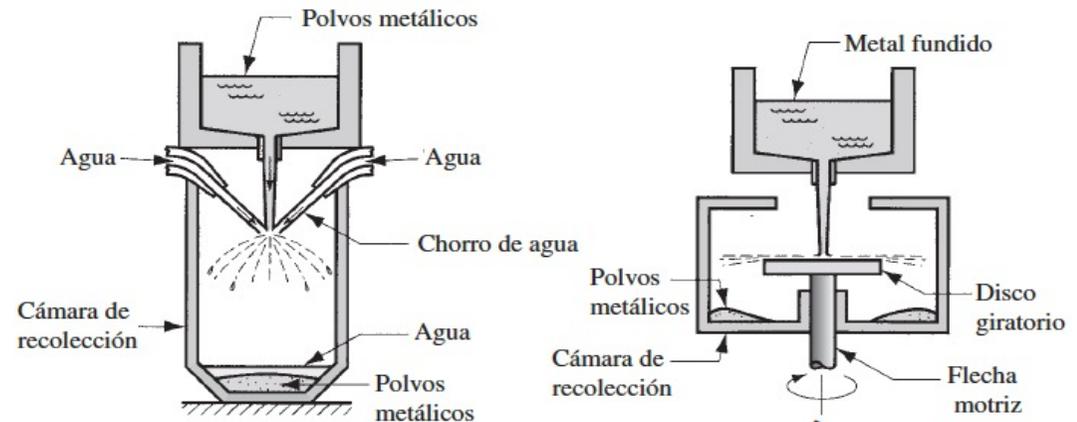
# Métodos de producción: Atomización

## Atomización

- Implica una corriente de metal líquido producida mediante la inyección de metal fundido a través de un pequeño orificio. La corriente se desarticula mediante chorros de gas inerte o aire o de agua.
- El tamaño y la forma de las partículas formadas dependen de la temperatura del metal fundido, de la velocidad del flujo, del tamaño de la boquilla y de las características del chorro.
- El uso del agua da como resultado una suspensión de polvo metálico y líquido en la parte inferior de la cámara de atomización.
- La atomización por gas suele resultar en partículas más esféricas



Atomización por gas



Atomización con agua

Atomización centrífuga

# Métodos de producción: Reducción, trituración y aleación mecánica

## Reducción

- La reducción de óxidos metálicos utiliza gases, por ejemplo el hidrógeno y el monóxido de carbono, como agentes reductores. Por este medio, los óxidos metálicos muy finos se reducen al estado metálico.
- Los polvos producidos son esponjosos y porosos
- Los polvos producidos tienen formas esféricas o angulares de tamaño uniforme

## Trituración

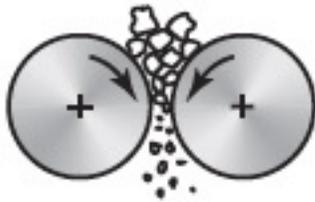
- Trituración mecánica (pulverización) implica el aplastamiento, la molienda en un molino de bolas o el molido de metales frágiles o menos dúctiles en pequeñas partículas.
- El molino de bolas tiene dos efectos en el polvo (I) las partículas se fracturan periódicamente, lo que resulta en partículas mas pequeñas y (II) la forma de las partículas se ve afectada.

## Aleación mecánica

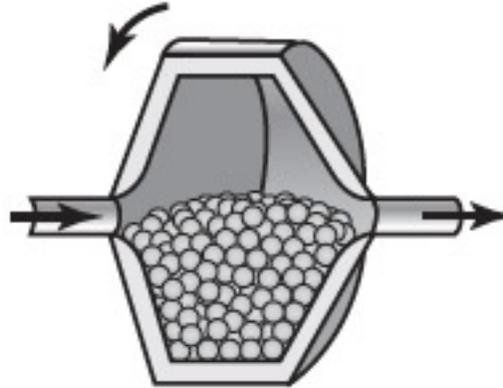
- Los polvos de dos o más metales puros se mezclan en un molino de bolas.
- Bajo el impacto de las duras bolas, los polvos se fracturan y enlazan entre sí por difusión, atrapando la segunda fase y formando polvos aleados.
- La fase dispersa puede resultar en el aumento de la resistencia de las partículas o puede transmitir propiedades eléctricas o magnéticas especiales al polvo

# Métodos de producción: Trituración mecánica

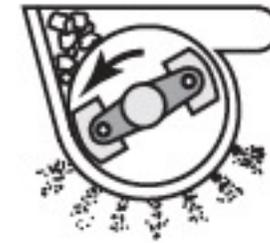
---



Trituración con rodillos



Molino de bolas

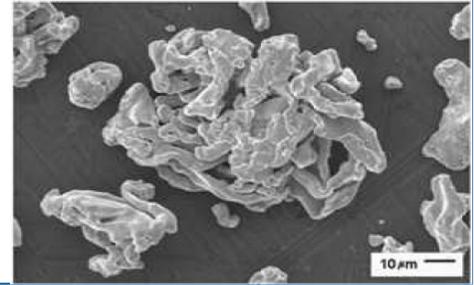


Molino de martillos

# Características de tipos de polvos

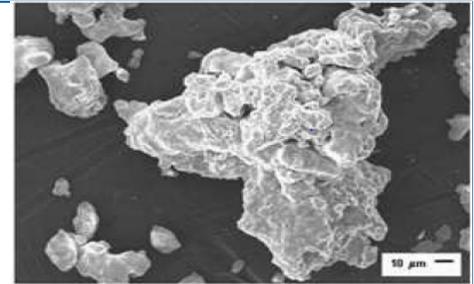
## Polvo por reducción

- forma salpicada
- porosidad interna
- mayor estabilidad del cuerpo verde
- baja densidad de prensado



## Polvo atomizado por agua

- forma salpicada
- buena compresibilidad
- mayor estabilidad del cuerpo verde
- posible aleación



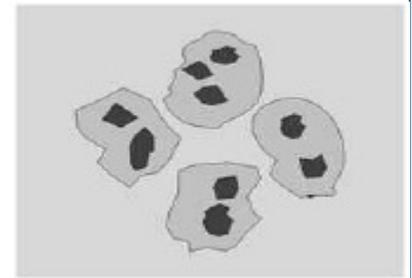
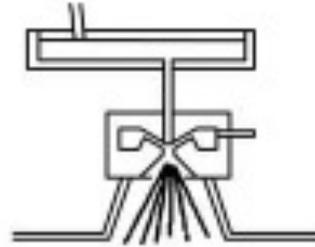
## Polvo atomizado por gas

- forma esférica
- buena compresibilidad
- buena fluidez
- baja estabilidad del cuerpo verde

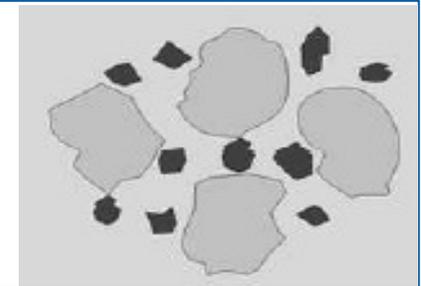
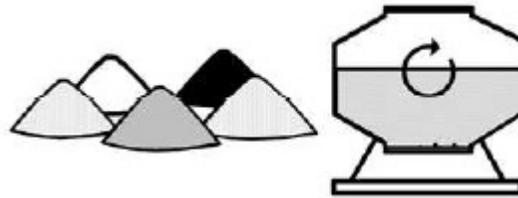


# Métodos de aleación para polvos metálicos

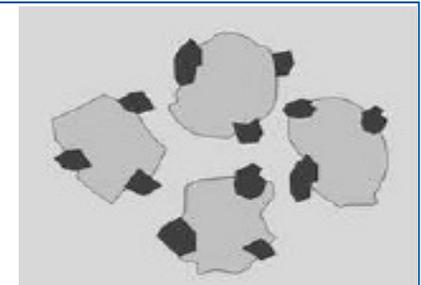
Polvo completamente prealeado



Polvo mezclado prealeado



Polvo parcialmente prealeado



# Métodos de aleación para polvos metálicos: Características

## Polvo completamente prealeado

- Cada partícula de polvo en la masa fundida ya tiene la composición de aleación deseada
- Solo los polvos atomizados están completamente aleados
- Ventaja: se aprovechan al máximo las características positivas de los componentes de aleación
- Desventaja: baja compresibilidad

## Polvo mezclado prealeado

- Se mezclan al menos dos componentes de polvo con diferentes configuraciones químicas
- Ventaja: buena compresibilidad
- Desventaja: riesgo de desmezcla. Se necesitan temperaturas y tiempos de sinterización elevados para obtener un componente de sinterización homogéneo

## Polvo parcialmente prealeado

- Subdivisión en difusión y adhesión de polvo aleado
- Aleación por difusión: el polvo de hierro y los elementos que permiten el grano fino (Ni, Mo, Cu) se mezclan y templan, de modo que se unen por difusión. Este enlace evita la mezcla durante el procesamiento posterior
- Aleación por adhesión: elementos de aleación que no pueden unirse al hierro por difusión.

# Tamaño, forma y distribución de partículas

- El **tamaño de las partículas** se controla generalmente por el cribado haciendo pasar el polvo metálico a través de cribas con diferentes tamaños de malla.

## Métodos para analizar el tamaño de las partículas

Sedimentación	Análisis microscópico	Dispersión de luz
Mide la velocidad a la que las partículas se asientan en un fluido	Uso de la microscopía electrónica de transmisión y barrido	A partir de un láser que ilumina la muestra de partículas suspendidas en medio de un líquido; las partículas causan que la luz se disperse y, después, un detector digitaliza las señales y calcula la distribución de los tamaños de las partículas
Métodos ópticos	Suspensión de partículas	
Las partículas bloquean un haz de luz y entonces cada partícula es detectada por una fotocelda.	En un líquido y la detección del tamaño y la distribución de las partículas mediante sensores eléctricos	

- El **factor de forma** es una medida de la relación del área superficial de la partícula a su volumen.
- La **distribución del tamaño** de las partículas afecta las características del procesamiento del polvo. Estas características son: Propiedades de flujo, Compresibilidad y Densidad

# Mezclado de polvos metálicos

El mezclado se lleva a cabo con los siguientes propósitos:

- Impartir propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto de la PM
- Asegurar uniformidad
- Agregar lubricante a la mezcla para mejorar sus características de flujo. (los lubricantes reducen la fricción entre las partículas de metal)
- Aumentar la resistencia en verde al agregar aditivos como aglutinantes

## Riesgos:

Se deben mantener precauciones como:

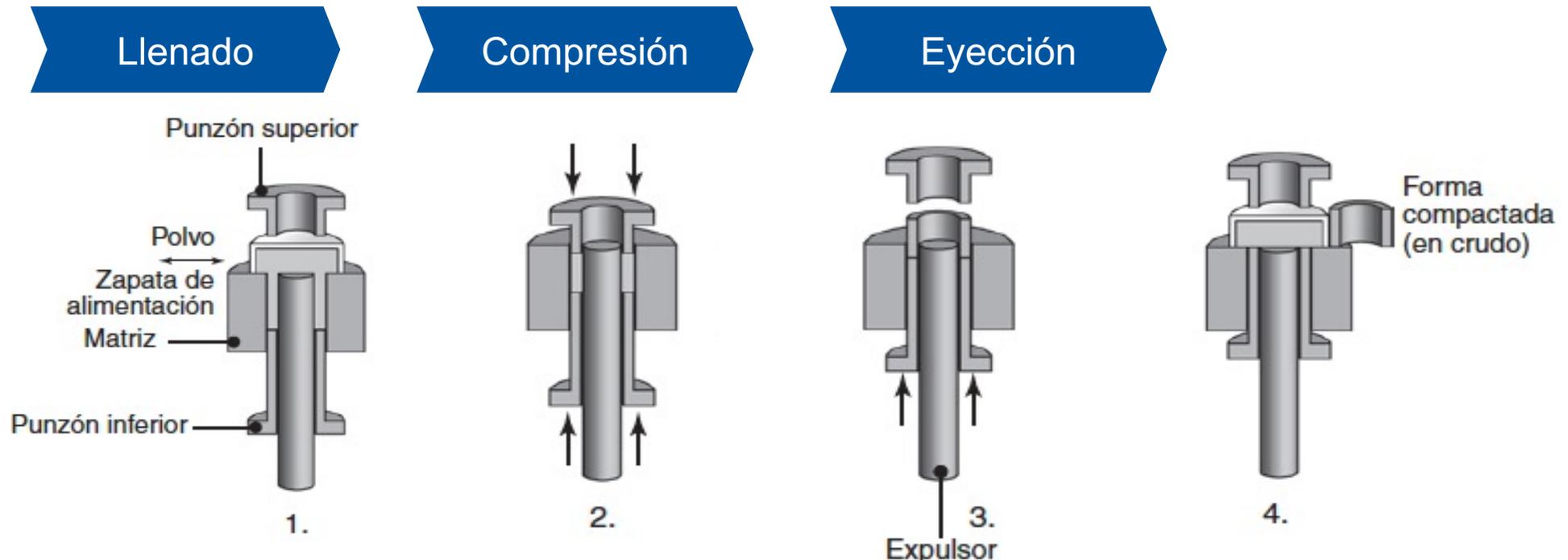
- Utilizar equipos de puesta a tierra
- Evitar las chispas
- Evitar la fricción como fuente de calor
- Evitar las nubes de polvo y la exposición a fuentes de ignición, como flamas



# Proceso de compactación

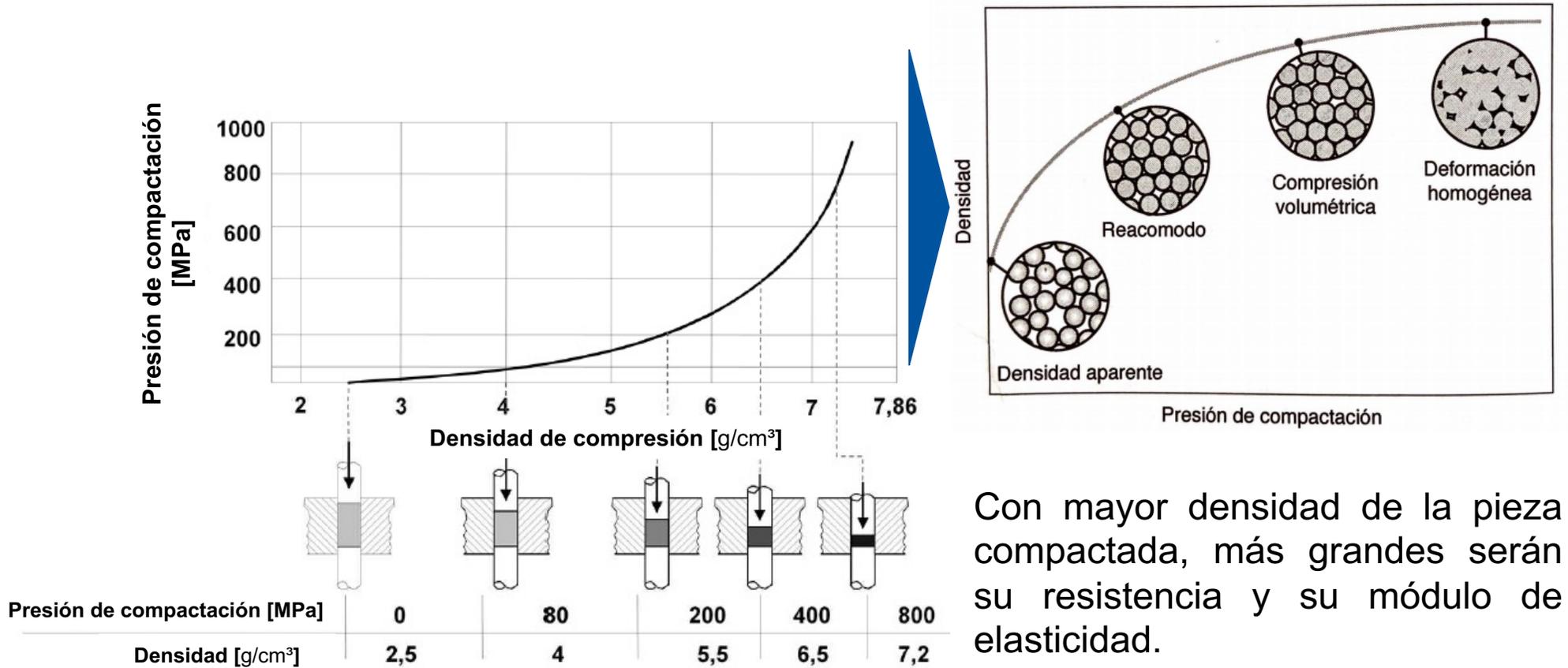
La compactación es una etapa en la que los polvos mezclados se presionan en dados o matrices. Los efectos de la compactación son:

- Obtener la forma, densidad y el contacto de partícula a partícula que se requieren
- Hacer que la pieza sea lo suficientemente resistente para su posterior procesamiento



<https://www.youtube.com/watch?v=4zXkn9iyC0c>

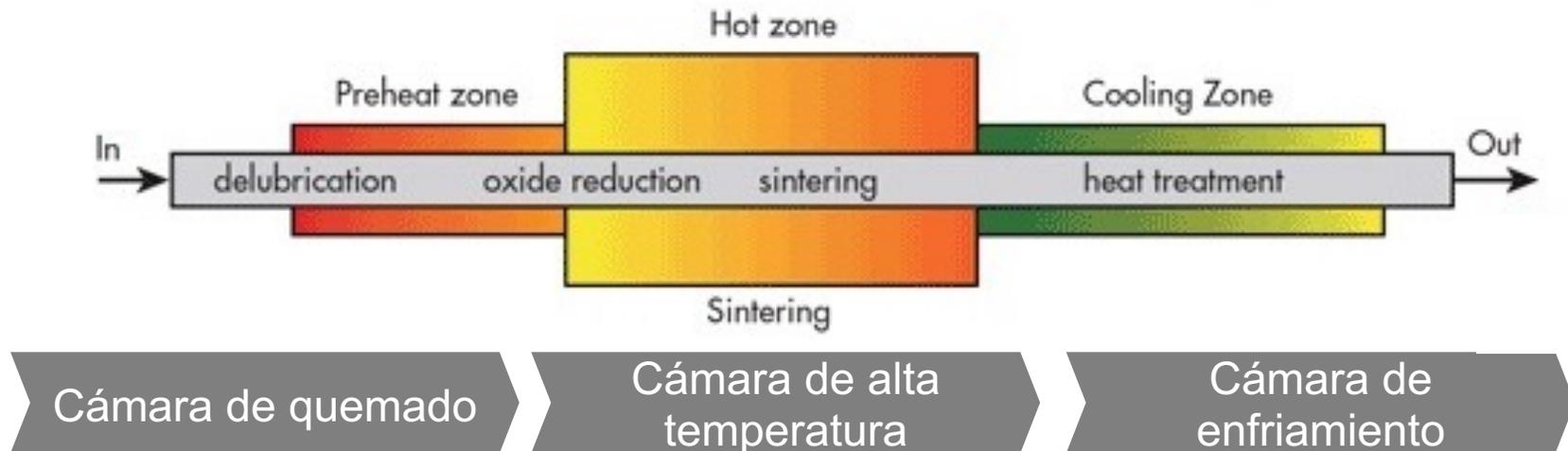
# Relación densidad-presión de compactación



Con mayor densidad de la pieza compactada, más grandes serán su resistencia y su módulo de elasticidad.

# Sinterizado

Proceso mediante el cual se calientan comprimidos en verdes, en un horno de atmósfera controlada a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal, pero lo suficientemente alta como para permitir la fusión (unión) de las partículas individuales e impartir resistencia a la pieza.

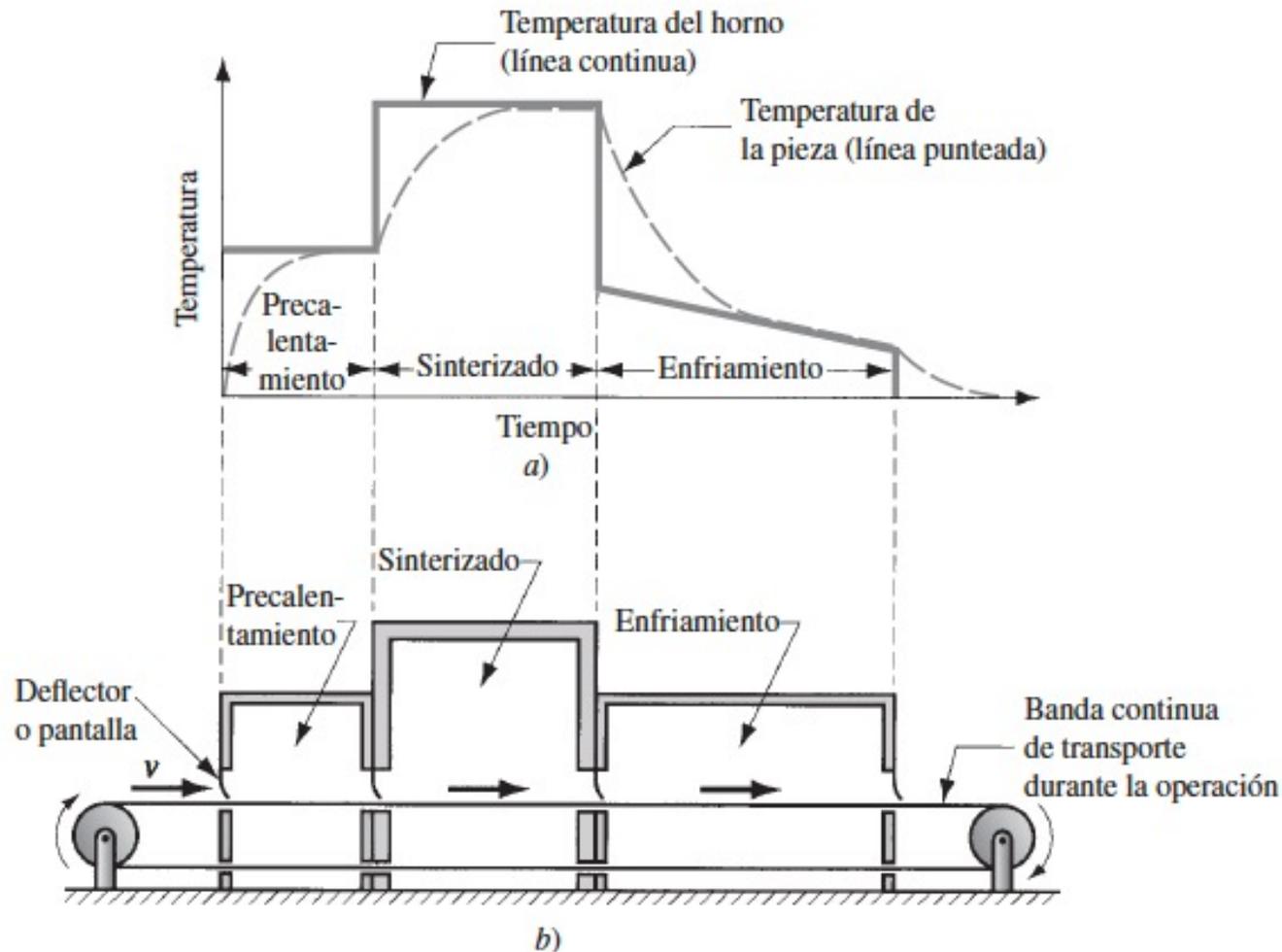


Entre unos  
760° C - 2400°C

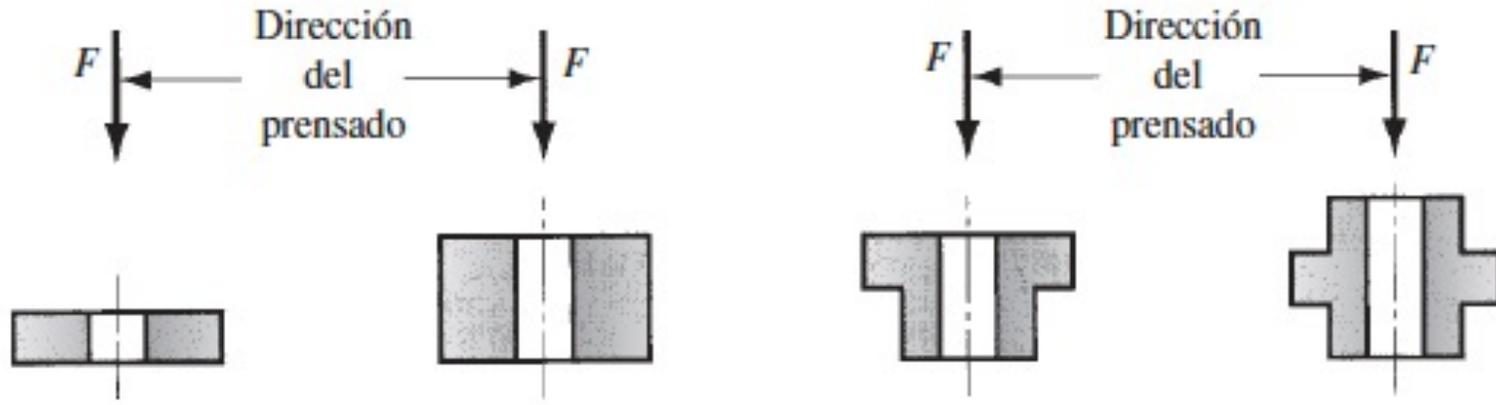


Mínimo de 10 minutos  
Máximo 8 horas

# Sinterizado



# Consideraciones de diseño según la Metal Powder Industries Federation



**Clase I**

Formas delgadas simples, se pueden compactar en una dirección

**Clase II**

Formas simples, más gruesas, presión en dos direcciones

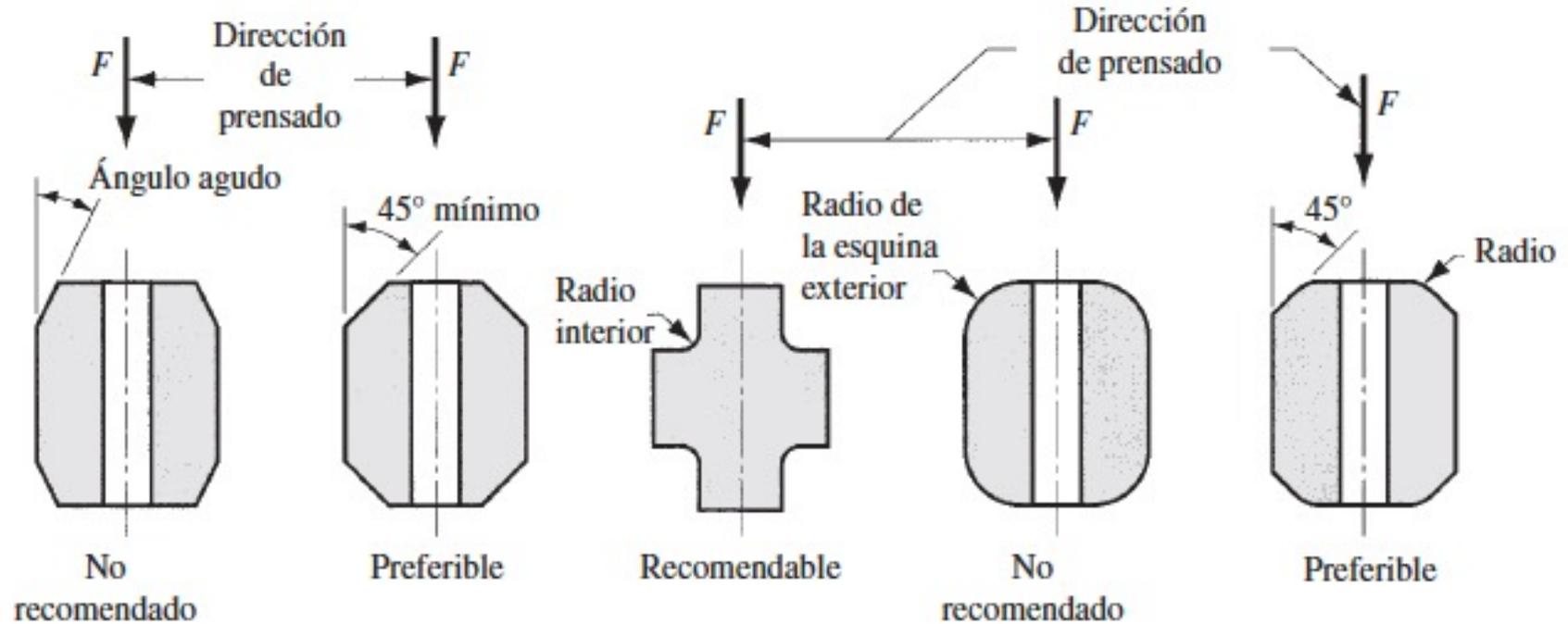
**Clase III**

Dos niveles de espesor presionadas en dos direcciones

**Clase IV**

Múltiples niveles de espesor, compactación en dos direcciones

# Consideraciones de diseño según la Metal Powder Industries Federation



Evitar ángulos agudos

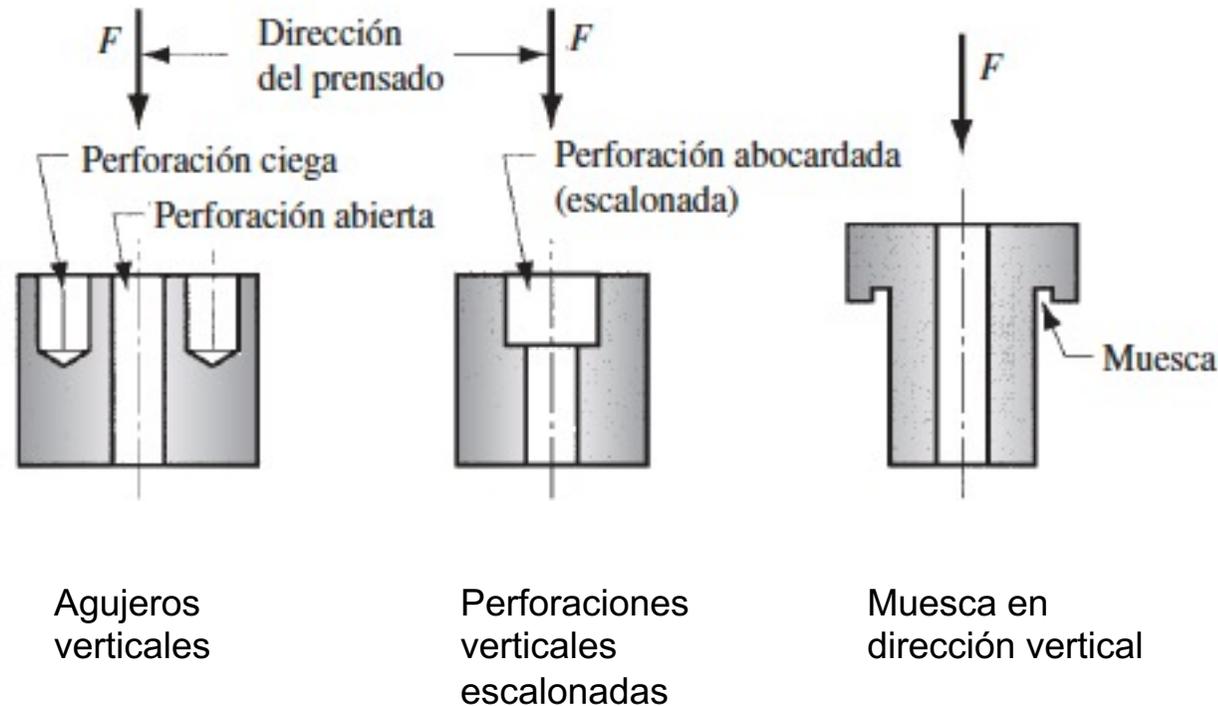
Ángulos mayores para rigidez del punzado

Radios interiores pequeños

Radios completos en las esquinas exteriores son difíciles porque el punzonado es frágil en los bordes de las esquinas

Combinar radios

# Consideraciones de diseño según la Metal Powder Industries Federation

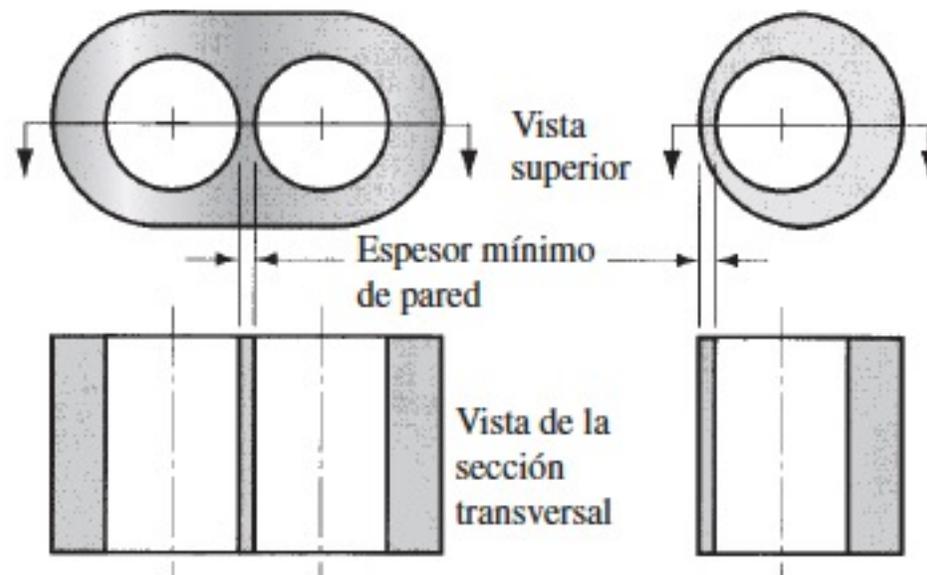


Son permisibles las muescas (socavados) y perforaciones verticales, porque no interfieren con la remoción.

# Consideraciones de diseño según la Metal Powder Industries Federation

El espesor de la pared debe tener un mínimo de 1.5 mm (0.060 pulg) entre dos perforaciones o entre una perforación y la pared exterior de la pieza.

El diámetro mínimo recomendado de la perforación es de 1.5 mm (0.060 pulg).



# Caracterización de polvos en ingeniería

**Tamaño de partícula y distribución:** se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Hay varios métodos disponibles para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común para obtener el tamaño de la partícula es por medio de **cribas de diferente tamaño de malla**, empleándose el término **número de malla** .

**Número de malla (mesh count)** utiliza para referirse al número de aberturas que posee la malla por pulgada lineal. Un número alto de malla indica un tamaño menor de partícula.

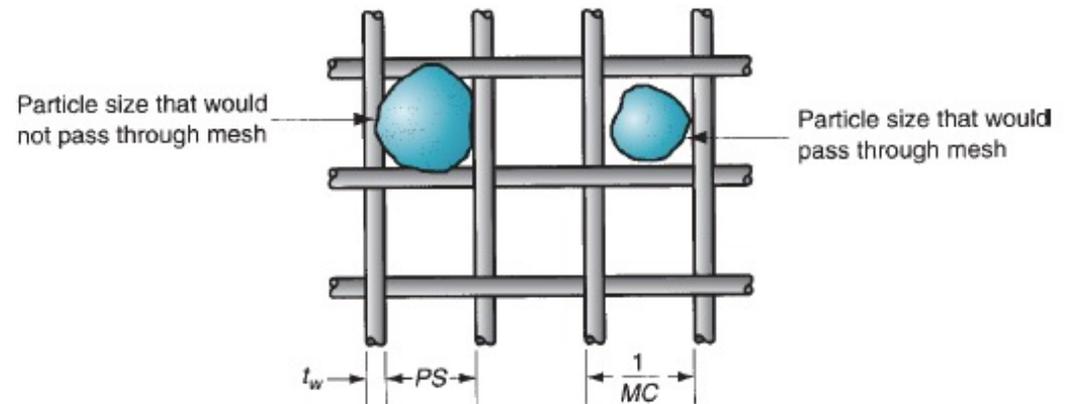
$$PS = \frac{1}{MC} - t_w$$

Donde

$PS$  = tamaño de la partícula

$MC$  = mesh count, aberturas por pulgada lineal

$t_w$  = grosor del alambre de la malla



## Ejemplo 1: Caracterización de polvos en ingeniería

---

Una pantalla con 325 de número de malla tiene alambres con un diámetro de 0,001377 pulg.

Determinar:

- (a) el tamaño máximo de partícula que atravesará la malla de alambre, y
- (b) la proporción de espacio abierto en la pantalla.

## Ejemplo 1: Caracterización de polvos en ingeniería

---

Tamaño máximo de partícula que atravesará la abertura

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w$$

$$PS = \frac{1}{325} - 0.001377 \text{ pulg}$$

$$PS = 0.00170 \text{ pulg}$$

Proporción de espacio de la malla que se encuentra abierto

*Hay  $325 \times 325 = 105,625$  aberturas en una pulgada cuadrada de la malla*

*Cada abertura mide  $(0.00170 \text{ pulg})^2 = 0.000002889 \text{ pulg}^2$*

*Área total en una pulgada cuadrada de la malla =  $(105,625)(2.89 \times 10^{-6}) = 0.30523$*

*Hay un 30.523% de espacio abierto de la malla*

## Ejemplo 2: Caracterización de polvos en ingeniería

---

Una pantalla con número de malla 10 tiene alambres con un diámetro de 0.0213 pulg.,

Determine:

- a. el tamaño máximo de partícula que atravesará la malla de alambre, y
- b. la proporción de espacio abierto en la pantalla.

## Ejemplo 2: Caracterización de polvos en ingeniería

---

Tamaño máximo de partícula que atravesará la abertura

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w$$

$$PS = \frac{1}{10} - 0.0213 \text{ pulg}$$

$$PS = 0.0787 \text{ pulg}$$

Proporción de espacio de la malla que se encuentra abierto

*Hay  $10 \times 10 = 1100$  aberturas en una pulgada cuadrada de la malla*

*Cada abertura mide  $(0.0787 \text{ pulg})^2 = 0.00619 \text{ pulg}^2$*

*Área total en una pulgada cuadrada de la malla =  $(100)(0.00619) = 0.619$*

*Hay un 61.9% de espacio abierto de la malla*

# Consideraciones de compactación y diseño

---

- La capacidad de una prensa para producción en PM se da generalmente en toneladas, o kN o MN.
- La fuerza requerida para el prensado depende del área proyectada de la pieza (área en el plano horizontal para una prensa vertical) multiplicada por la presión necesaria para compactar los polvos del metal.

Expresando esto en forma de ecuación:

$$F = A_p p_c$$

Donde

$F$  = Fuerza requerida,

$A_p$  = área proyectada de la pieza,  $\text{mm}^2$

$p_c$  = presión de compactación requerida para el material en polvo específico, MPa

## Ejemplo 3: Compactación y diseño

---

Un rodamiento de geometría simple debe ser extraído de polvos de bronce, usando una presión de compactación de 207 MPa. El diámetro exterior = 44 mm, el diámetro interior = 22 mm y la longitud del rodamiento = 25 mm.

¿Cuál es fuerza de la prensa requerido para realizar esta operación?



## Ejemplo 3: Compactación y diseño

---

Área proyectada de la pieza

$$A_p = 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2)$$

$$A_p = 0.25\pi[(44)^2 - (22)^2]$$

$$A_p = 1140.4 \text{ mm}^2$$

Fuerza de la prensa

$$F = A_p p_c$$

$$F = (1140.4)(207)$$

$$F = 236,062 \text{ kN}$$

# Resumen

---

- La metalurgia de polvos es un proceso para dar forma neta a la pieza con una geometría y acabado final que consiste en la producción, mezclado, compactación en matrices y sinterizado de metales en polvo con el fin de impartirles resistencia, dureza y tenacidad. Aunque el tamaño y el peso de los productos de la metalurgia de polvos son limitados, el proceso es capaz de producir piezas relativamente complejas a buen precio, en forma neta o final, con tolerancias dimensionales estrictas y a partir de una amplia variedad de polvos metálicos y aleados.
- En las piezas fabricadas por PM, se puede realizar operaciones secundarias y de acabado para mejorar su precisión dimensional, el acabado superficial, las propiedades mecánicas y físicas y la apariencia. Estas operaciones incluyen forjado, tratamiento térmico, maquinado, rectificado, recubrimiento, impregnación (por ejemplo con aceite) e infiltración (como en los metales con bajo punto de fusión).
- El control de la forma y la calidad del polvo, las variables del proceso y las atmósferas de sinterizado son consideraciones importantes en la calidad del producto. La densidad y las propiedades mecánicas y físicas pueden controlarse mediante el diseño de las herramientas y el ajuste de la presión de compresión

# Resumen

---

- Un proceso de PM importante es el modelo por inyección de polvos, el cual implica la mezcla de polvos metálicos muy finos con un polímero para hacer que los polvos fluyan más fácilmente en los modelos o matrices de forma compleja
- Las consideraciones de diseño para la PM incluyen la forma de la pieza, la capacidad para expulsar el comprimido en verde de la matriz y las tolerancias dimensionales que son aceptables para cada aplicación particular.
- El proceso de la metalurgia de polvos es adecuado para corridas de producción de volumen medio y alto y para piezas relativamente pequeñas. Tiene algunas ventajas competitivas frente a otros métodos de producción como la fundición, el forjado y el maquinado

## Libros de referencia

---

- Kalpakjian, S. & Schmid, S. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson
- Groover, M. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. McGraw-Hill.
- Black, B. (2015) *Workshop Processes, Practices and Materials*. Taylor & Francis Group
- Youssef, H. & El-Hoy, H. (2008). *Machining Technology – Machine Tools and Operations*. Taylor and Francis Group
- Noriega, S. et al. (2017). *Ingeniería de Manufactura en el Siglo XXI*. Academia de Ingeniería de México



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo  
Facultad de Ingeniería Industrial  
Centro Regional de Chiriquí  
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: [ricardo.caballero@utp.ac.pa](mailto:ricardo.caballero@utp.ac.pa)

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>