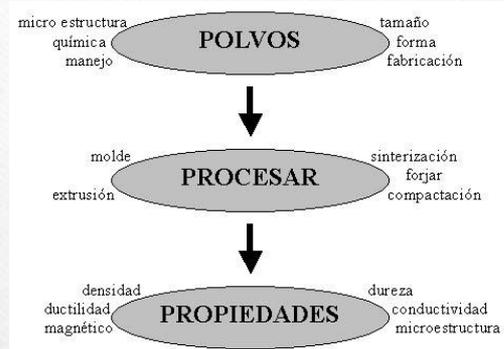
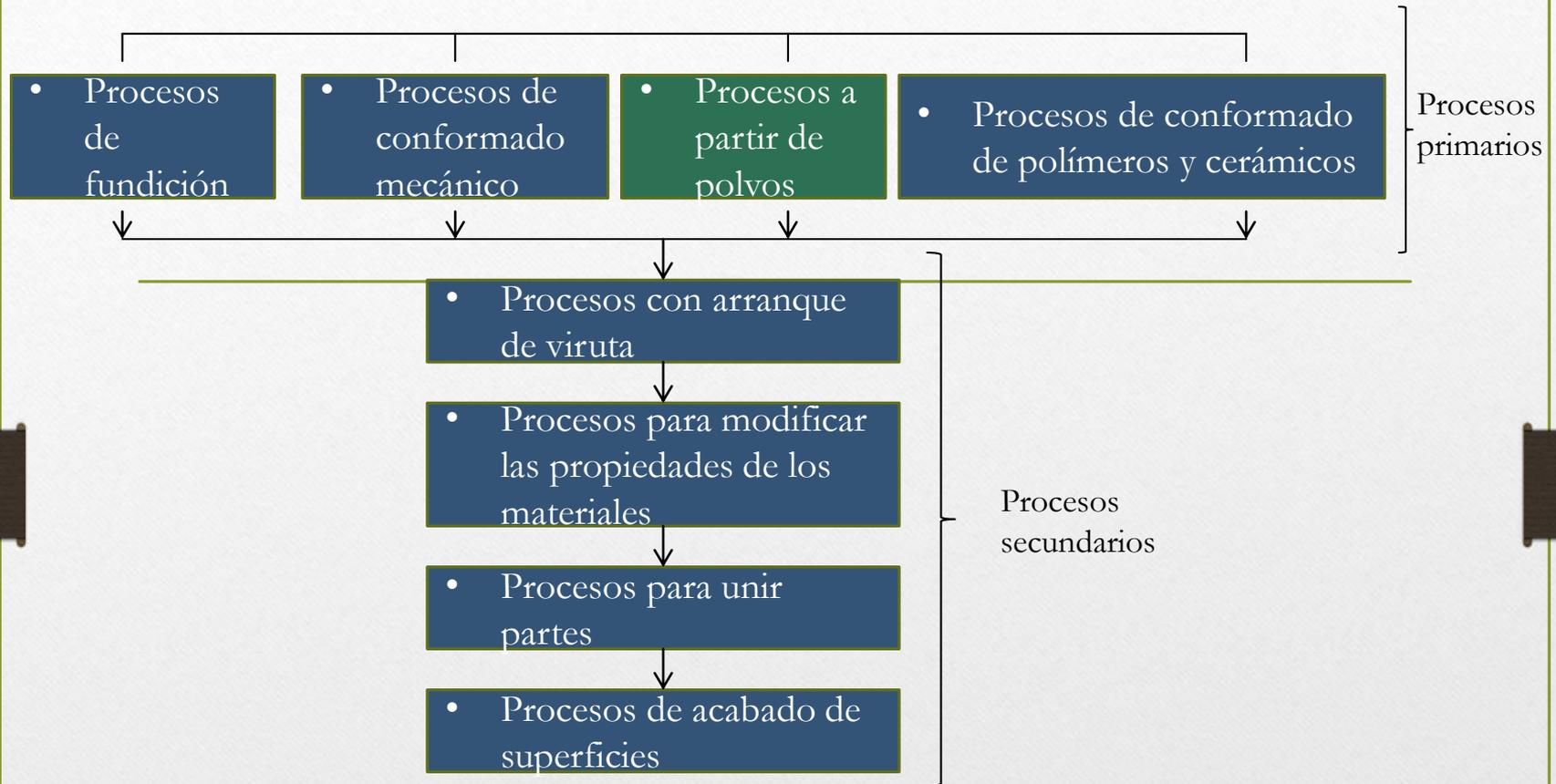


Pulvimetalurgia





Piezas producidas por pulvimetalurgia.



American Society for Metals

Arte y/o técnica de producir piezas de metal con base en polvos metálicos individuales, mezclados o aleados, compactándolos por presión o alguna otra técnica tal como vibración o decantación.

Los objetos pueden ser calentados para producir así una masa coherente, ya sea por difusión y crecimiento de grano o mediante la fusión de un constituyente de baja temperatura de fusión.

Es un proceso verde ya que permite la obtención de elementos metálicos sin necesidad de fundir el material, con el consiguiente ahorro de energía, por otra parte es factible producir las piezas prácticamente en su forma y dimensiones finales sin necesidad de procesos de maquinado, lo cual reduce también el consumo de energía y de materias primas.



- **Compactado y sinterizado** (*press and sinter*) que permite obtener geometrías complejas en aleaciones difíciles de fundir

- **Inyección de metal.** Polvos metálicos muy finos (menos de 20 micras) con un aglomerante, para ser inyectados en un molde para posteriormente por calentamiento eliminar el agente ligante y dar mayor tenacidad a la pieza. Usado para producir piezas muy pequeñas (unos cuantos gramos).
- **Compactado por presión** (*hot isostatic pressing*) utilizado para piezas grandes que se van a producir en lotes pequeños (no más de 10000 piezas/año). Proceso lento y costoso empleado para cualquier tipo de geometría
- **Forja de polvos.** El polvo es cargado en una matriz con una geometría aproximada a la de la pieza a producir, el compactado verde es sinterizado. Posteriormente se utiliza como una preforma en un proceso de forja (bielas con alta precisión dimensional y propiedades mecánicas excepcionales).

Sobre los polvos.

Independientemente de composición y pureza, las propiedades están determinadas por (características primarias):

- Tamaño y la forma de la partícula
- Distribución del tamaño
- Microporosidad
- Microestructura.

Tienen influencia en:

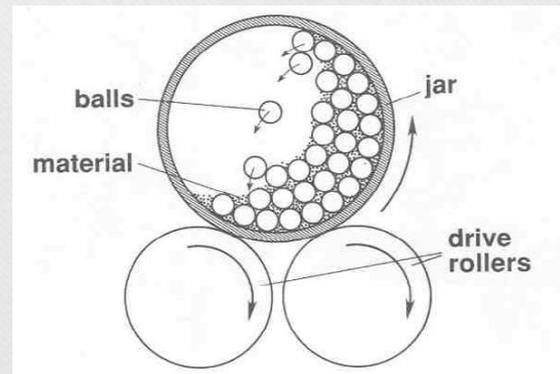
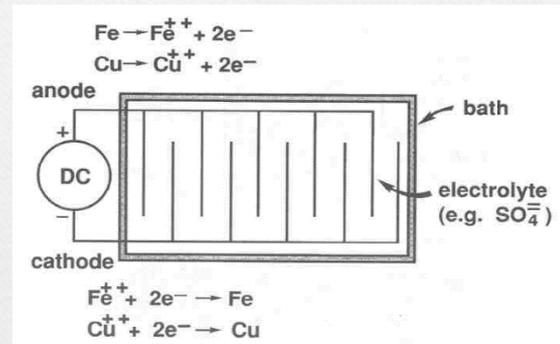
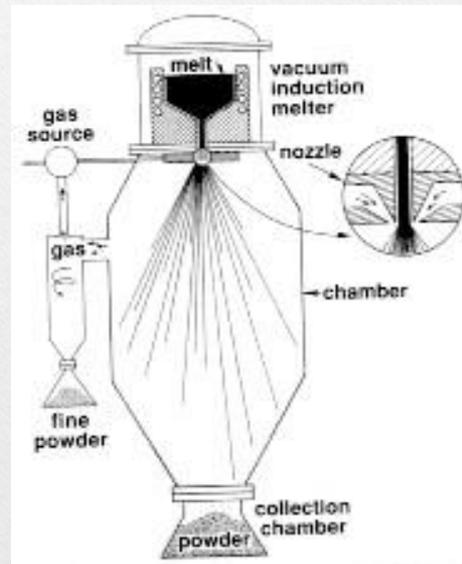
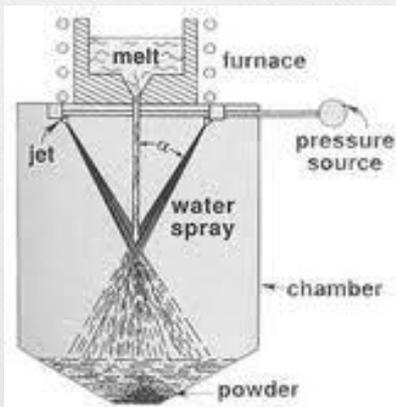
- Densidad (aparente, de polvo vibrado)
- Velocidad de derrame
- Compresibilidad
- Plasticidad
- Capacidad de endurecimiento

Sobre los polvos.

- La forma de la partícula influye de manera determinante en las características del empaquetamiento y flujo de los polvos.
- Las partículas de forma esférica tienen excelentes cualidades de sinterizado y proveen características uniformes al producto
- El tamaño de la partícula queda definido por su diámetro, en el caso de partículas esféricas
- El tamaño en partículas irregulares se define por un diámetro medio.
- En virtud de la baja posibilidad de obtener partículas de tamaño uniforme, es práctica común analizar la distribución de tamaños.

Etapas de la pulvimetalurgia.

Obtención de polvos: En función del metal y de las características requeridas; los procesos más comunes son atomización, reducción química, depósito electrolítico y trituración mecánica.



Etapas de la pulvimetalurgia.

Tratamiento de los polvos: Operaciones de purificación, recubrimiento, densificado, mezclado y recocido.

Obtención de la forma requerida: La operación de moldeo normalmente se efectúa por compresión, se puede combinar con calentamiento del molde, aunque generalmente se realiza a temperatura ambiente.

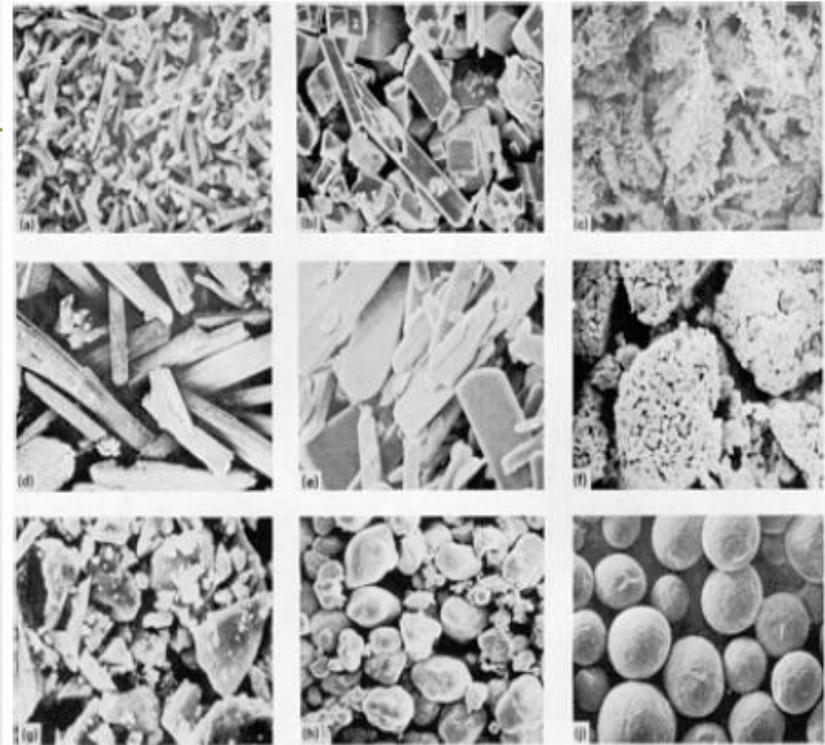
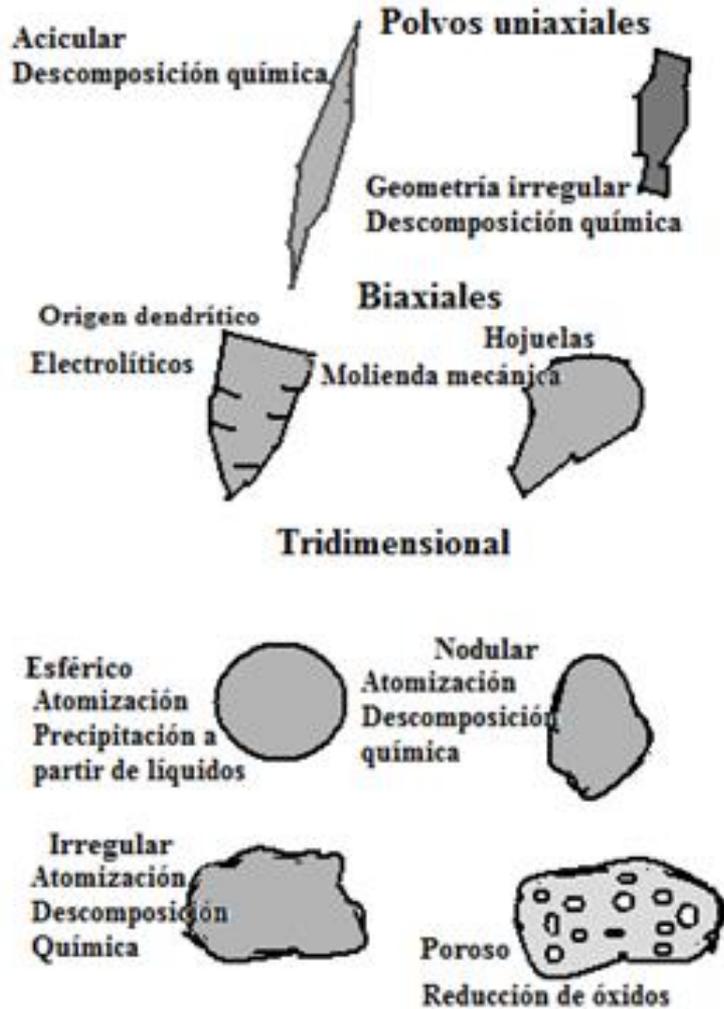
Sinterizado: Los aglomerados verdes compactados, son sometidos a calentamiento a una temperatura menor a la de fusión, lo cual provoca un marcado incremento en la tenacidad y resistencia de la pieza.

Operación de acabado: En función de la pieza y sus usos, se tienen varias operaciones secundarias: tratamiento térmico, el maquinado, entre otras.

Proceso de pulvimetalurgia.



Geometría de los polvos de acuerdo con la norma ISO 3252.



Diversas geometrías de polvos de CuPb .

Figura inferior izquierda: geometría irregular.

Figura derecha: forma aprox. esférica [Udiatem, FI].

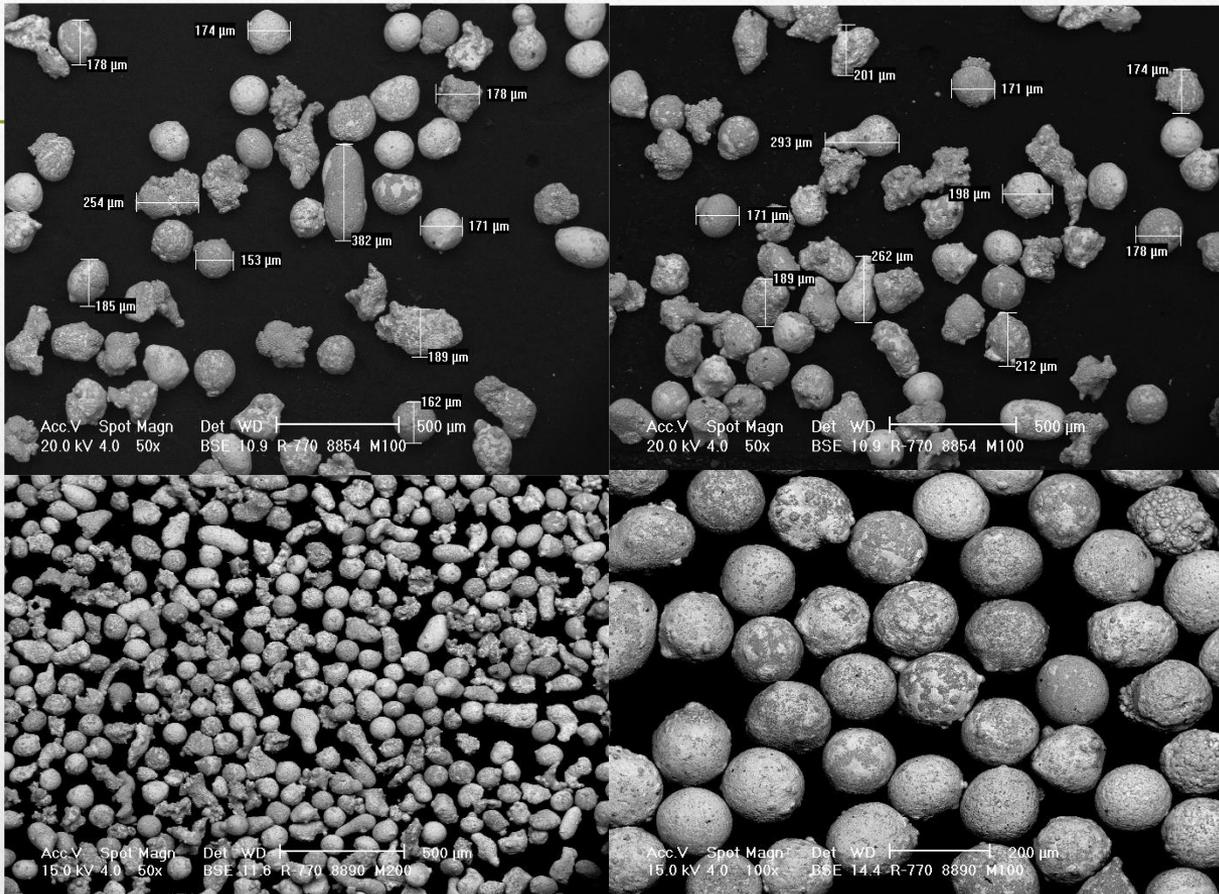
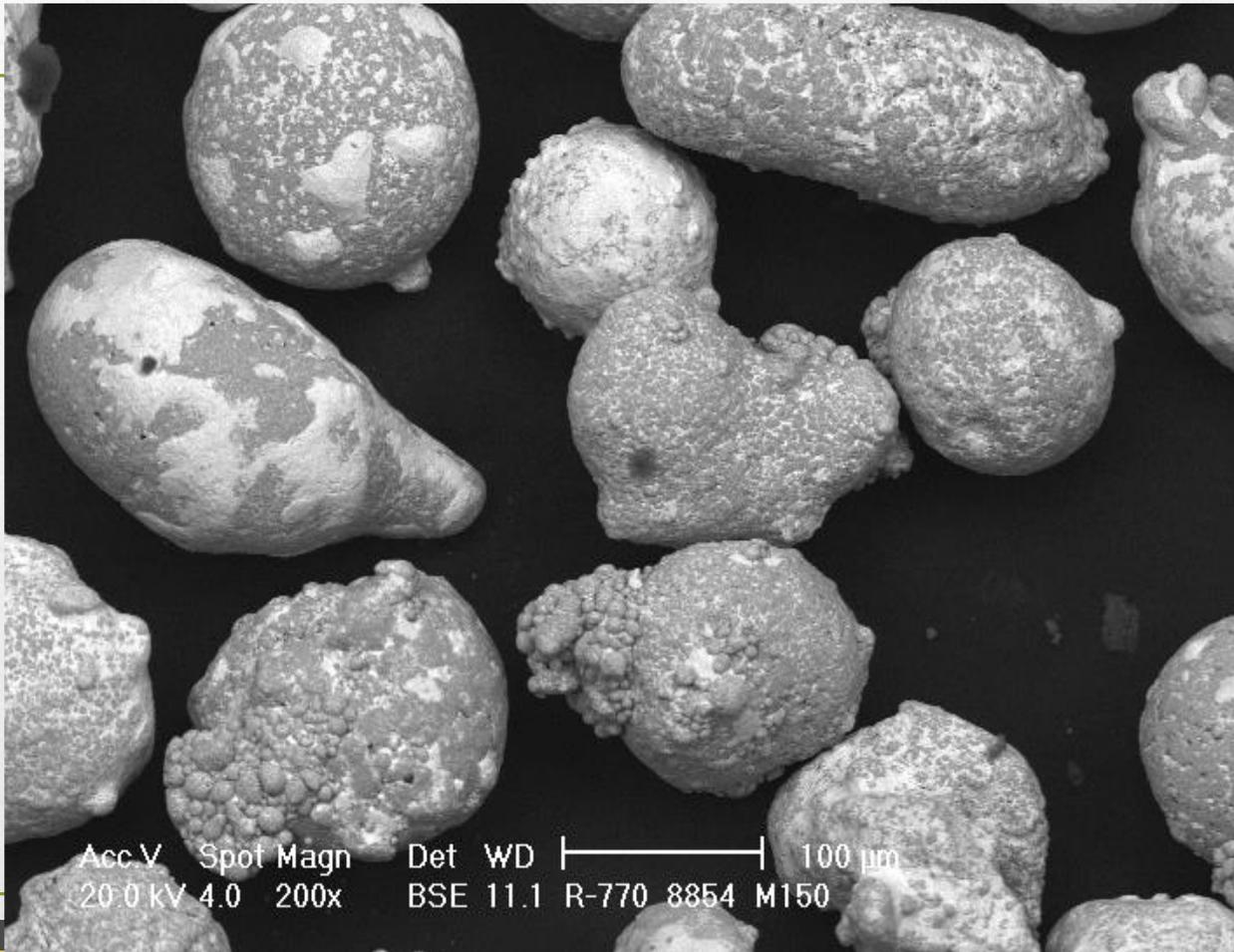


FIG. 4.10 A elevados aumentos se observa que muchas de las partículas de polvo están formadas por la unión de otras mucho más pequeñas [Udiatem FI UNAM].



FIG. 4.11 Dada la baja solubilidad en estado sólido el cobre y el plomo se separan durante la solidificación dando como resultado una matriz de cobre (tonalidad más oscura) sobre la cual se deposita el plomo [Udiatem FI UNAM].



Ej. Se va a compactar por vibración polvo de níquel perfectamente esférico con partículas de diámetro de 0.1 mm. (a) ¿Qué porcentaje de densidad teórica se puede alcanzar? (b) ¿Ese porcentaje se incrementará o disminuirá si el diámetro de la partícula aumenta a 0.2mm?

Ej. Se tienen un polvo metálico compuesto por partículas esféricas de tungsteno, las cuales se van a trabajar por pulvimetalurgia hasta su máxima compactación. Estas tienen un tamaño promedio de 0.006 cm. ¿Cuál es la densidad máxima (densidad aparente) que se logrará al compactar? Considere que la densidad del tungsteno es de 16 g/cm³

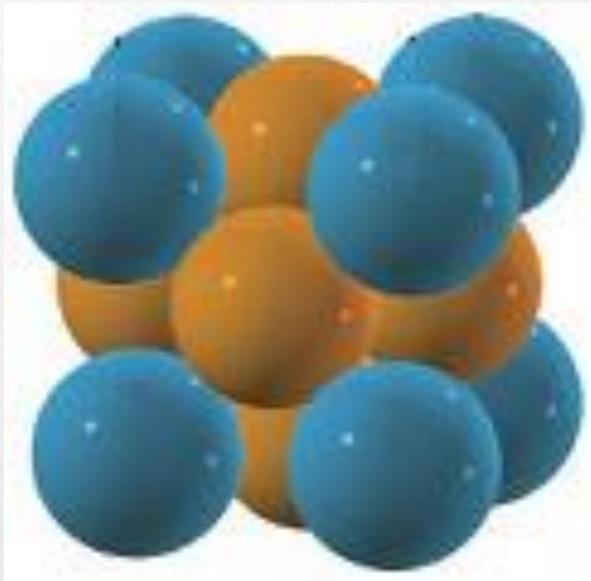


FIG. 4.5 Curvas de Compresibilidad (Densidad vs Presión).

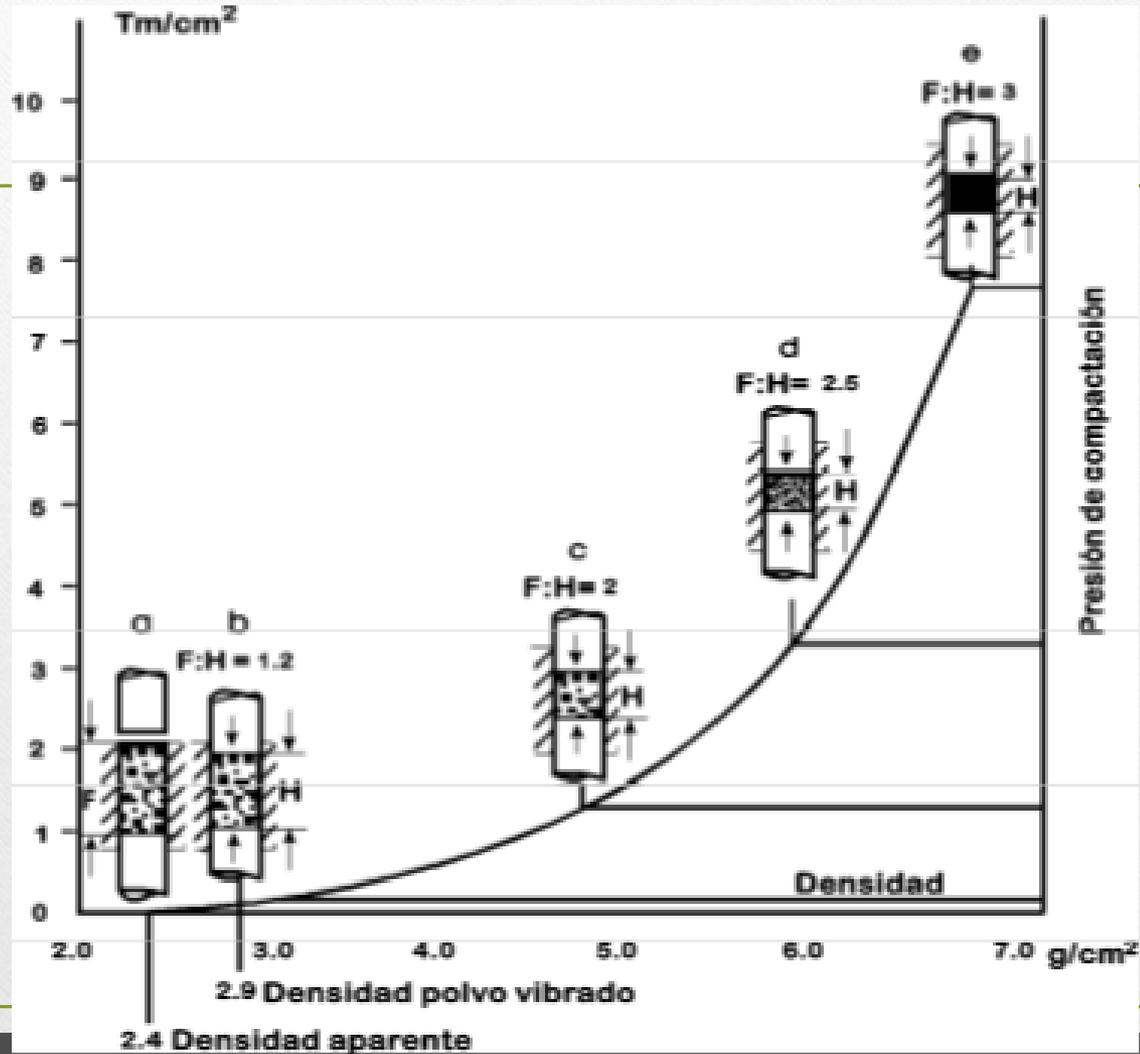
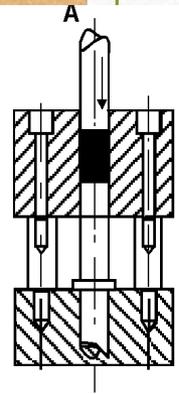
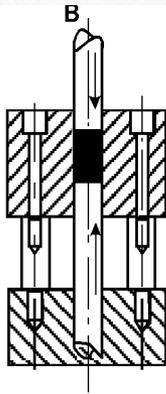


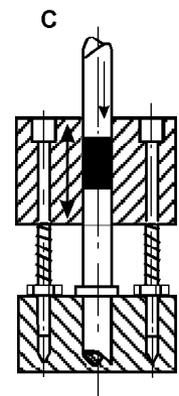
FIG. 4.6 Distintos métodos de compactado en matriz.



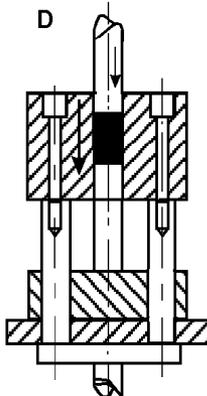
A) Presión aplicada por un solo lado



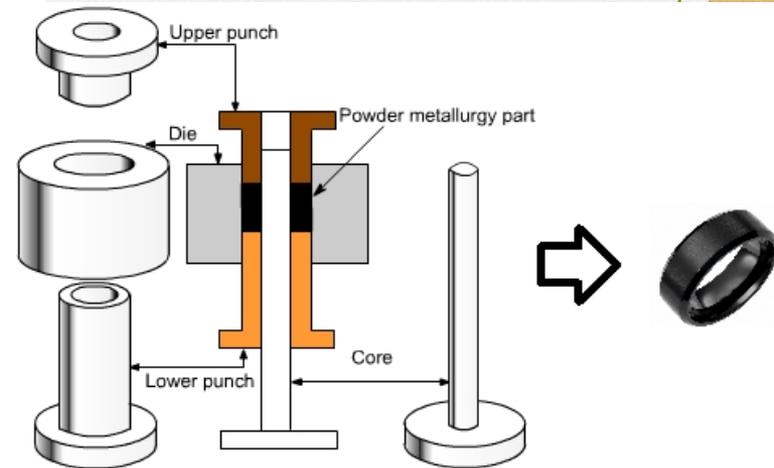
B) Presión aplicada simultáneamente por los dos lados



C) Matriz flotante



D) Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior



La efectividad del prensado con un punzón de una sola acción es limitada, por lo que el material en partículas no transmite las presiones como lo haría un sólido continuo, además de que la fricción de la pared también se opone a la compactación. La presión disminuye rápidamente y la densidad decrece al alejarse del punzón, limitando la razón profundidad – diámetro que se obtiene.

Para una presión aplicada P_0 , la presión en la profundidad l en el cuerpo es:

$$P_L = P_0 \exp \left[\frac{-\mu k A_{fr}}{A_0} \right]$$

Donde μ es la fricción en la pared, A_{fr} es el área superficial donde ocurre la fricción, A_0 el área compactada y k es el factor que expresa la razón del esfuerzo radial a axial y es, para un sólido elástico

$$k = \frac{P_r}{P_a} = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Ej. Un cilindro de polvo de Ni se va fabricar por prensado uniaxial. Calcule la longitud máxima l permisible si la caída de presión se limita a dos tercios del valor original. No se utiliza lubricante por lo que la fricción es $\mu = 0.5$ y $\nu = 0.31$.

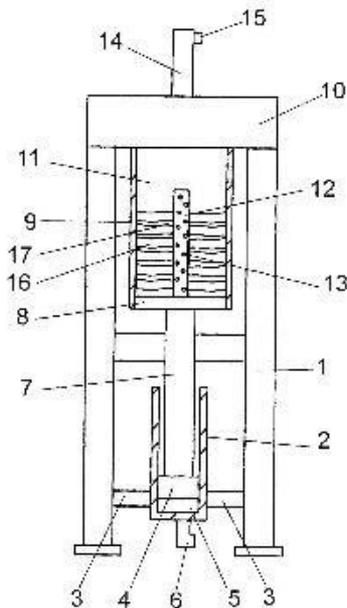
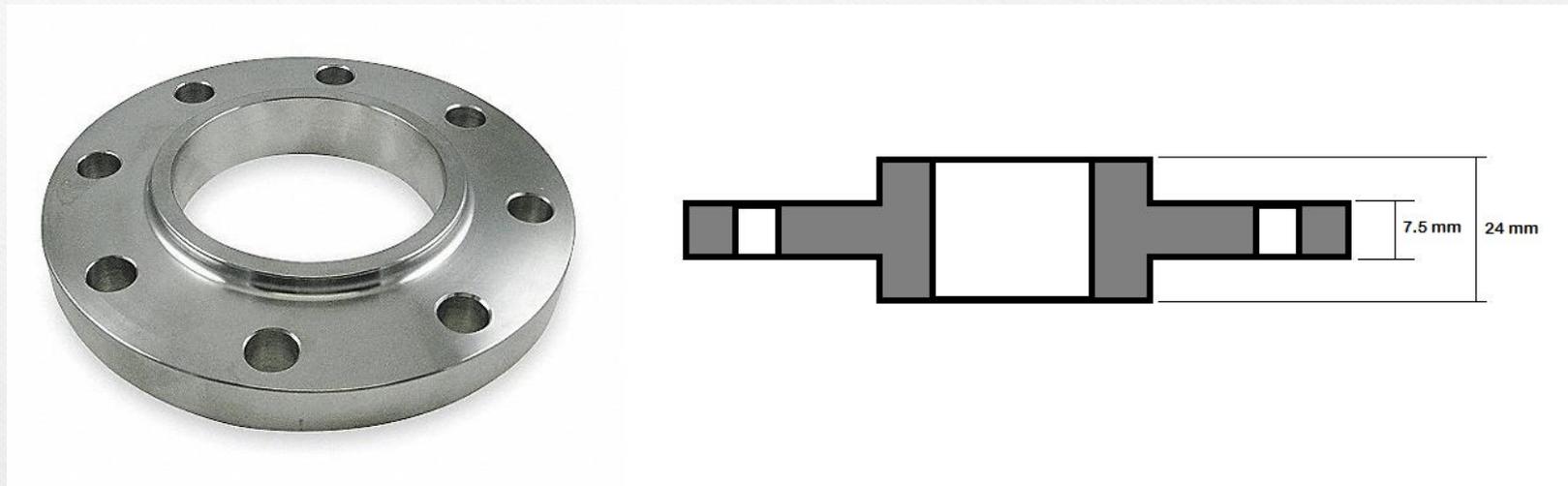


FIG. 1



$$P_L = P_0 \exp \left[\frac{-\mu k A_f r}{A_0} \right]$$

El compactado crudo que se muestra en la figura tiene una maza de 24 mm de altura y una brida de 7.5 mm de espesor. Calcule la posición de los punzones inferiores requeridos para llenar la cavidad de la matriz, si la densidad del polvo suelto es 38% y la del compacto crudo es 78% de la densidad teórica.



$$m_{\text{polvo}} = m_{\text{compacto}}$$

Sinterizado

Esta etapa consiste en calentar la pieza previamente formada hasta una temperatura inferior a la de fusión, resultando un notable incremento de la resistencia mecánica y en la tenacidad del producto.

El proceso se puede clasificar en dos grupos, dependiendo de los mecanismos que producen la aglomeración:

- a) Procesos en los que la temperatura de sinterizado es inferior a la temperatura de fusión de todos los componentes; por tanto, la aglomeración se obtiene por difusión y crecimiento de grano. Como ejemplo se tiene el sinterizado de metales de alto punto de fusión, como el tungsteno y las aleaciones de níquel.

- b) La temperatura de calentamiento es mayor a la temperatura de fusión de algunos de los componentes, lo cual da como resultado la infiltración del material fundido entre las partículas del otro, aleándose en su superficie y produciendo así una unión metálica continua. Cu-Sn, Cu-Pb.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Tabla 4.1 Condiciones de Sinterizado de Diversos Materiales

Características del proceso. Los principales parámetros del proceso son la temperatura y el tiempo de sinterizado; estos parámetros varían considerablemente, dependiendo del material

Regularmente la temperatura de sinterizado es de $2/3$ a $4/5$ de la temperatura de fusión.

En general la atmósfera de trabajo debe ser altamente reductora, para de esa forma evitar la oxidación de los polvos.

Material	Temperatura °C	Tiempo (min)
Bronce	825	15
Cobre	850	25
Latón	850	25
Hierro-Grafito	1050	25
Níquel	1100	35
Ferritas	1400	60
Material pesado	1500	60
Metal duro	1450	30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalio	2400	480

FIG. 4.8a Descripción esquemática del efecto de sinterizado en los granos de la mezcla.

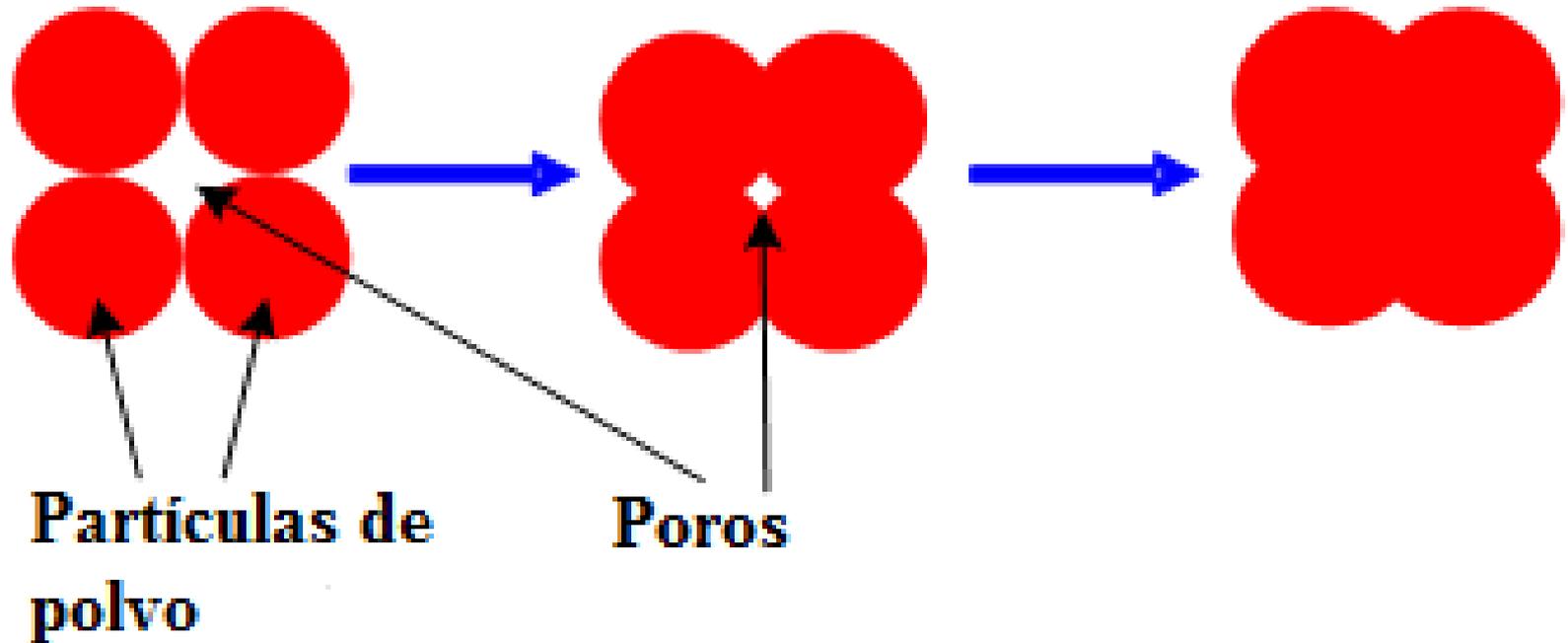
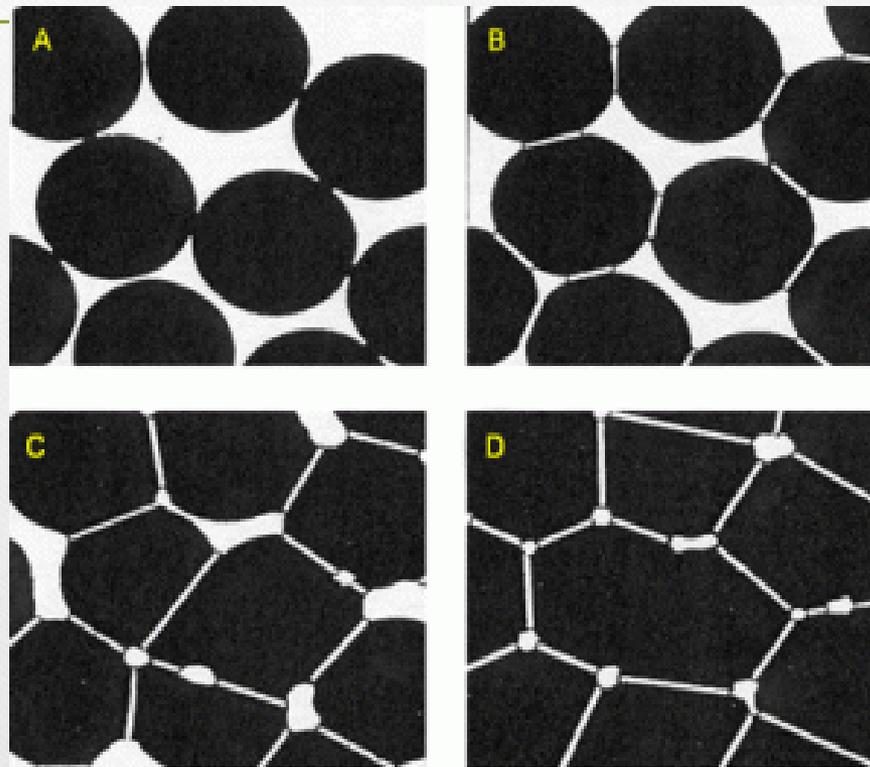


FIG. 4.8b Efecto del tiempo en el aglomerado de los polvos durante el sinterizado.



Contracción

- Normalmente es necesario realizar pruebas para determinar el valor exacto de la contracción en el sinterizado, pero se puede obtener una buena aproximación considerando que la contracción es uniforme en todas direcciones y que la masa no cambia (a menos que se encuentren presentes volátiles).

$$\text{Masa} = \text{constante} = (\rho_{\text{crudo}})(V_{\text{crudo}}) = (\rho_{\text{sinterizado}})(V_{\text{sinterizado}})$$

$$\text{Contracción volumétrica} = \frac{V_{\text{sinterizado}}}{V_{\text{crudo}}} = \frac{\rho_{\text{crudo}}}{\rho_{\text{sinterizado}}}$$

$$\text{Contracción lineal} = \left(\frac{\rho_{\text{crudo}}}{\rho_{\text{sinterizado}}} \right)^{1/3}$$

Un compactado se sinteriza hasta el 96% de la densidad teórica. La composición es Fe-8Cu-2C.

Calcule:

- a) La densidad teórica. Considere $\rho_{\text{Fe}} = 7.87$, $\rho_{\text{Cu}} = 9.86$ y $\rho_{\text{C}} = 2.25 \text{ g/cm}^3$
- b) La contracción de la dimensión de 24 mm. . Considere $\rho_{\text{crudo}} = 0.78$ de la densidad teórica.

$$\text{Volumen de 100g} = (90 / \rho_{\text{Fe}}) + (8 / \rho_{\text{Cu}}) + (2 / \rho_{\text{C}})$$



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Operaciones Suplementarias y de Acabado

- *Calibrado.*
- *Mecanizado.*
- *Tratamiento térmico.*
- *Infiltración.*
- *Recubrimiento electrolítico.*
- *Soldadura.*
- *Otros procesos.* P. ej. forja de preformas sinterizadas, lo cual abre nuevas y muy amplias perspectivas al proceso.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Características de Diseño, Ventajas, y Aplicaciones.

Diseño de Piezas para Metalurgia de Polvos.

Para especificar la configuración de una pieza → Se deberán considerar las condiciones bajo las que el polvo se conforma en la matriz.

→ Dado que la presión no se distribuye de manera hidrostática y que el material no fluye libremente, se evitarán entonces las esquinas afiladas, las piezas de gran longitud y reducida sección transversal

→ Se debe considerar que los cambios bruscos de sección dan lugar a una densidad no uniforme.

→ Será necesario tomar en cuenta las también las limitaciones inherentes al propio equipo, por ejemplo:

Carrera del pistón y su accionamiento (normalmente vertical), la capacidad máxima de compactado y la sección transversal máxima del herramental.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Características de Diseño, Ventajas, y Aplicaciones.

Diseño de Piezas para Metalurgia de Polvos.

- Las paredes de espesor variable no deberán presentar valores inferiores a 0.8 mm; si son de espesor constante no deberán ser menores a 1.5 mm.
- Se evitarán escalonamientos en la pieza; en caso de que la presencia de éstos sea necesaria se producirán por un maquinado posterior.
- Las esquinas deberán ser redondeadas.
- Se evitarán las ranuras angostas y de gran profundidad.
- Se considerará una pequeña conicidad para facilitar la extracción de la pieza.
- Las ranuras o acanaladuras perpendiculares a la dirección de compactado se evitarán en lo posible.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Características de Diseño, Ventajas, y Aplicaciones.

Ventajas del Proceso.

- Elevada eficiencia en el empleo de la materia prima, ya que en la mayoría de los casos sólo se usa la cantidad requerida para alcanzar la densidad y dimensiones finales.
- Un control exacto de la composición.
- Posibilidad de automatizar.
- Obtención de buenos acabados superficiales.
- Única técnica que permite obtener porosidad controlada.
- Aglomeración de materiales con alto punto de fusión sin tener que alcanzar dicha temperatura.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Características de Diseño, Ventajas, y Aplicaciones.

Ventajas del Proceso.

- Posibilidad de producir aleaciones que mediante fundición serían imposibles, como es el caso de que las temperaturas de fusión de los componentes difieran mucho entre sí, o en el caso de metales con comportamiento muy disímulo, o el de mezclas de metales con otros materiales de carácter no metálico.
- Tolerancias del orden de 0.05 mm (0.002 pulg), las cuales por ser muy precisas pueden reducir o incluso evitar el maquinado posterior.
- Modificación o adecuación de las propiedades del producto a través de una serie de operaciones complementarias como las mencionadas en el punto de operaciones suplementarias y de acabado.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



Características de Diseño, Ventajas, y Aplicaciones.

Desventajas y limitaciones del Proceso.

- En virtud de que la presión no se transmite de manera uniforme, se pueden presentar problemas de heterogeneidad en la compactación y, por tanto, en la densidad y resistencia.
- En relación con lo anterior el proceso se aplica básicamente para piezas pequeñas, aunque se han llegado a producir en serie piezas con un peso de más de 20 kg, esto mediante compactado en troquel.
- Es necesario que las piezas en verde se manipulen con gran cuidado, debido a su relativa fragilidad.
- El costo del herramental (matrices) es muy alto, razón por la cual el método queda circunscrito a grandes volúmenes de producción.



CAPÍTULO 4

Pulvimetalurgia



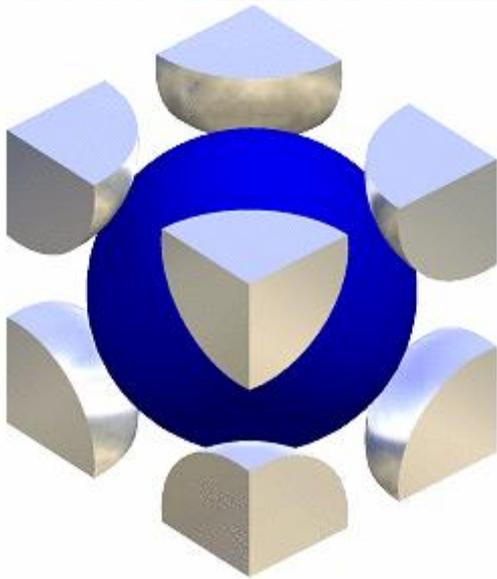
Características de Diseño, Ventajas, y Aplicaciones.

Desventajas y limitaciones del Proceso.

- Las operaciones de producción de los polvos son en general complicadas, lo cual se traduce en un elevado costo. Otra desventaja es la referente al cuidado que se debe tener en el manejo de los polvos en el almacenado y manipulación, ya que se oxidan más fácilmente que en estado sólido y en algunos casos pueden resultar explosivos, como en el caso del aluminio.
- La forma de las piezas debe ser normalmente sencilla para facilitar la extracción de la matriz.



Gracias por su atención



Udiatem

Fac. Ingeniería, UNAM
Unidad de Investigación y
Asistencia Técnica en Materiales