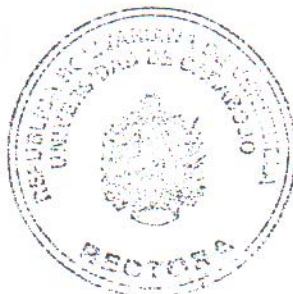


UNIVERSIDAD DE CARABOBO



CONSEJO UNIVERSITARIO  
VALENCIA - VENEZUELA



Asunto: ASCENSO

Data: 199° y 151°

Fecha: 17 MAR 2010

N°CD-1295

Ciudadano  
Prof. LUIS FERNANDO SIDOROVAS GARCÍA  
C.I. Nro. V-4.922.646  
a/c. Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería

Presente.-

De acuerdo con lo previsto en el Ordinal 4° del Artículo 36 de la Ley de Universidades, atendiendo a la solicitud del Consejo de la Facultad de Ingeniería y visto el informe del Vicerrectorado Académico Nro. VRAC-ASC-61-10-CD del 02/03/2010, aprobada por la Comisión Delegada del Consejo Universitario en su Sesión N° 092 de fecha 08/03/2010, en uso de la atribución que le confiere el Artículo 44 del Reglamento Interno respectivo, en virtud de lo establecido en el Capítulo II, Título III del Estatuto del Personal Docente y de Investigación de la Universidad de Carabobo, tengo el honor de ascenderlo a la categoría de Profesor AGREGADO, con un (01) año, seis (06) meses y veinte (20) días de antigüedad acumulada, con efectos académicos a partir del 25/02/2008 y efectos administrativos a partir del 07/07/2009.

Asciende con el Trabajo Titulado:

**Monografía de la Metalurgia de los Polvos. (Pulvimetalurgia).**

Atentamente,

Jessy Divo de Romero  
Rectora

c.c.: Recursos Humanos  
C.I.D. (anexo trabajo de Ascenso)

Elaborado por: Lisset, 11 de marzo de 2010

Revisado por: / CM / TB / OS

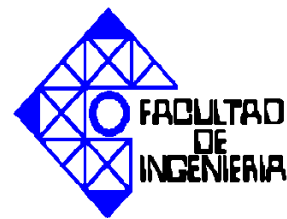
08/03/2010 *Jab* B.6.



NO BEBE TRATARSE MAS DE UN ASUNTO EN CADA OFICIO



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**DPTO. DE MATERIALES Y**  
**PROCESOS DE FABRICACIÓN**



# **MONOGRAFÍA DE LA METALURGIA DE LOS POLVOS (PULVIMETALURGIA)**

Trabajo de Ascenso presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para ascender a  
la categoría de Profesor Agregado

Autor: **Luís F. Sidorovas G.**  
Tutor **Dr. Luís E. Valles D.**

# Contenido

Contenido.....	2
PROLOGO .....	6
Capítulo 1. Introducción a la Metalurgia de los Polvos.....	9
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación. ....	15
CAPÍTULO 2 Características de los Polvos Metálicos .....	16
Selección de Polvos.....	17
Características de los Polvos Metálicos. ....	19
Composición Química. ....	19
Tamaño de las partículas. ....	19
Forma de las partículas. ....	21
Capacidad de sinterización. ....	23
Factor de forma. ....	23
Distribución de tamaño. ....	23
Densidad. ....	24
Microestructura de partículas. ....	24
Factor de flujo. ....	24
Ensayo y evaluación de polvos.....	25
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación. ....	27
Capitulo 3. Producción de los Polvos Metálicos. ....	28
Reducción a estado solidó. ....	31
Electrolisis. ....	31
Atomización. ....	32
Desintegración Mecánica o Pulverización. ....	35
Aleación mecánica. ....	36
Reducción química. ....	37
Métodos diversos.....	40
Precipitación de elementos mecánicos. ....	40
Nanopolvos. ....	40
Polvos Microencapsulados.....	41
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación. ....	41
Capitulo 4. Mezcla de Polvos Metálicos.....	43
Mezclado y Combinación de Polvos.....	46
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación. ....	51

Capitulo 5. Compactado de los Polvos Metálicos.....	52
Relación entre longitud y ancho.....	55
Etapa de compactación.....	61
Etapa de Remoción de las Piezas y Punzones.....	62
Propiedades de los Compactados Verdes.....	64
Compactación Semi-Caliente.....	65
Compactado en Caliente.....	66
Otros Métodos de Compactación.....	66
Equipos.....	68
Preguntas de Repaso. Autoevaluacion.....	71
Capitulo 6. Sinterizado de los Polvos Metálicos.....	72
Presintetizado.....	72
La Sinterización.....	72
Secado.....	73
Sinterizado.....	73
Sinterizado en fase líquida.....	78
Crecimiento de Grano.....	79
Sinterizado en Vacío.....	82
Contracción.....	82
Sinterizado-Endurecimiento.....	84
Etapas de sinterización.....	84
ETAPA INICIAL.....	86
ETAPA INTERMEDIA.....	90
ETAPA FINAL.....	91
Densificación y crecimiento de grano.....	93
Cálculos e importancias de los mecanismos de transporte.....	95
Hornos de Sinterizado.....	96
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.....	99
Capitulo 7. Acabado fina de las Piezas de Metalurgia de los Polvos.....	100
Densificación y Dimensionamiento.....	101
El Reprensado.....	101
El Dimensionamiento.....	101
El Acuñado.....	101
El Reimpactado en Frió. (Acuñado o labrado).....	102

La porosidad.....	103
Impregnación e Infiltración.....	103
Impregnación.....	103
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.....	104
Capitulo 8. Tratamientos Térmicos.....	105
Endurecimiento superficial.....	106
Tratamiento al vapor.....	106
Chapeado.....	107
Pavonado.....	107
El recubrimiento Electrolítico.....	108
Normalizado de los Materiales Sinterizados.....	109
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.....	111
Capitulo 9. Aplicaciones de la Metalurgia de los Polvos.....	112
Proyecto de piezas sinterizadas.....	112
Piezas porosas.....	114
Cojinetes de babbit para automóviles.....	116
Carburos cementados.....	116
Tungsteno dúctil.....	117
Piezas estructurales y de la máquina.....	117
Material refractario compuesto.....	118
Filtros metálicos.....	118
Herramientas de diamante.....	119
Núcleos y electrodos.....	119
Piezas e imanes eléctricos.....	119
Sellos de vidrio metálico.....	120
Recubrimiento metálico.....	120
Otras aplicaciones de la MP.....	120
Superaleaciones.....	121
Superaleaciones base hierro.....	121
Superaleaciones base cobalto.....	122
Superaleaciones base níquel.....	122
Casos prácticos de piezas fabricadas por MP.....	122
1.- Sierra de la Cadena de Embrague.....	123
- Cubo Sincronizador.....	125

Preguntas de Repaso. Auto Evaluación. ....	131
Capitulo 10. Ventajas de la Metalurgia de los Polvos.....	132
Ventajas de la Metalurgia de los Polvos. ....	132
Desventajas de la Metalurgia de los Polvos.....	134
Seguridad en la Producción de la Metalurgia de los Polvos. ....	135
Preguntas de Repaso. Auto Evaluación. ....	137
GLOSARIO.....	138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

## PROLOGO

**E**l uso de los metales en polvos se remonta a varios centenares de años atrás.

Pero fue apenas en el siglo pasado que, debido a avances tecnológicos de la segunda guerra mundial, la industria de la pulvimetalurgia se creó como tal. Desde entonces y gracias a sus continuos avances y la calidad y utilidad de sus productos ha crecido más rápidamente que cualquier otro proceso de manufactura de piezas metálicas.

La pulvimetalurgia o metalurgia de polvos (MP) es un proceso de manufactura que se inicia con la obtención de los polvos, generalmente de metales puros, principalmente hierro, cobre, estaño, aluminio, níquel y titanio, aleaciones como latones, bronces, aceros y aceros inoxidable o polvos prealeados. Luego se unen con la dosificación y mezcla. Para obtener las características requeridas, (polvos de tamaños y composiciones diferentes, aditivos que actúen como lubricantes durante el compactado o aglutinantes que incrementen la resistencia del compactado crudo. Posteriormente se comprime mediante prensas mecánicas o hidráulicas en una matriz, resultando una forma que se conoce como compactado crudo. El cual se sinteriza en un horno con atmósfera controlada a una temperatura en torno al 75% de la de fusión. El producto final se puede someter a una operación de acabado. Como el Acuñaado, Impregnación y Tratamientos térmicos y superficiales y Mecanizado.

Algunos la definen ***“como el arte de elaborar productos comerciales a partir de polvos metálicos por debajo de su punto de fundición”***.

Este proceso es adecuado para la fabricación de grandes series de piezas pequeñas de gran precisión, para materiales o mezclas poco comunes y para controlar el grado de porosidad o permeabilidad.

Algunos productos típicos son: *rodamientos, árboles de levas, herramientas de corte, segmentos de pistones, guías de válvulas, filtros y piezas porosas, piezas de bioingeniería, etc.*

Las propiedades mecánicas alcanzadas en estas piezas son difíciles de obtener por cualquier tipo de fabricación, trayendo beneficios importantes tanto en

lo económico (costos de piezas y mantenimiento) como en funcionamiento de la máquina que tenga la pieza fabricada por este método.

El metal en forma de polvo es más caro que en forma sólida y el proceso es sólo recomendable para la producción en masa de los productos, en general el costo de producción de piezas es más alto que el de la fundición, sin embargo es justificable y rentable por las propiedades excepcionales que se obtienen con este procedimiento. Existen productos que no pueden ser fabricados y otros no compiten por las tolerancias que se logran con este método de fabricación. Las piezas metálicas son producto de la mezcla de diversos polvos de metales que se complementan en sus características. Así se pueden obtener *metales con cobalto, tungsteno o grafito* según para qué va a ser utilizado el material que se fabrica.

La Metalurgia de los Polvos **MP**, es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen partes a partir de polvos metálicos. En la secuencia usual los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión de las partículas en una masa dura y rígida. La compresión llamada prensado, se realiza en una maquina tipo prensa, cuyas herramientas consiste en un dado y uno o mas punzones, es costosa y es por eso que es más adecuada para niveles medios o altos de producción.

En la Metalurgia de los polvos, se mezclan entre si los polvos correctos y se forman a la forma requerida dentro de una matriz. Ya que no se requiere maquinado y solo se utiliza la cantidad de material necesaria para cada parte, la pérdida de desechos es mínima.

Las características únicas del proceso de metalurgia de los polvos son:

1. No involucra el manejo de metales fundidos.
2. Raramente se necesitan operaciones de maquinado o acabado.
3. Permite una rápida producción en masa de formas de acero o de otros metales de alto punto de fusión.
4. Pueden producirse fácilmente partes de berilio, molibdeno y tungsteno, lo que seria impráctico o poco económico utilizando otros métodos.



5. Permite combinaciones de metales y no metales, así como aleaciones, que no son posibles mediante otros métodos.
6. Permite el control preciso de la densidad o porosidad de la pieza acabada.

Una vez conocido todo este proceso de la metalurgia de polvos, debemos concluir que es un método al que hay que tener en cuenta para fabricar muchas de las piezas que normalmente utiliza la industria, tanto a nivel nacional como internacional para exportación. Las propiedades mecánicas alcanzadas en estas piezas son a veces inalcanzables por cualquier tipo de fabricación trayendo beneficios importantes tanto en lo económico (costos de piezas y mantenimiento) como en funcionamiento de la máquina que tenga la pieza fabricada por este método.

Aun cuando se requiere un análisis profundo de costos, de producción y de mercado, para determinar la pertinencia de este proceso de fabricación, a primera vista se ve como una buena oportunidad para investigar y desarrollar un laboratorio que genere no sólo ingresos a la facultad sino también incentivar la investigación y el desarrollo tecnológico.

# Capítulo 1. Introducción a la Metalurgia de los Polvos.

**L**os procesos de producción de los polvos metálicos constituyen una etapa de gran importancia que determinara la mayor parte de las características de los componentes finales.

*La Metalurgia de los Polvos (MP)* se define como el proceso que se utiliza para fabricar componentes (metálicos, no metálicos o mezclas de los dos) a partir de polvos de los materiales y después hacer objetos mediante la aplicación de presión y después calor o ambos simultáneamente. ***“La MP es la técnica de formación de objetos sólidos o porosos a partir de polvos metálicos o no metálicos”***. Es un proceso de fabricación en el que polvos metálicos se compactan para darles formas deseadas, con frecuencia complejas, y se sinterizan (se calientan sin que se fundan) para formar una pieza sólida. Los egipcios emplearon este proceso por primera vez hace 3000 años A.C. para fabricar herramientas de hierro. Uno de los primeros usos en la época moderna fue a principios del siglo XX, a fin de hacer filamentos de tungsteno para bombillos. La disponibilidad de una amplia variedad de composición de polvos metálicos, la capacidad de producir partes en forma netas (*formado de formas netas*) y la economía general de la operación, proporcionan a este proceso único sus numerosas aplicaciones, atractivas y crecientes.

La PM es una tecnología en constante y rápido desarrollo, que comprende la mayoría de los metales y aleaciones metálicas, y una amplia variedad de formas. La PM es un método altamente desarrollado para la fabricación de piezas fiables de metales tanto férreos como no férreos; con una producción mundial de

polvo metálico anual que supera el millón de toneladas. La excepcional flexibilidad del proceso PM permite obtener productos fabricados a partir de materiales a la medida para las necesidades específicas de la aplicación. Utilizando materiales especialmente seleccionados esta capacidad permite introducir mejoras en las propiedades mecánicas de las piezas.

En la actualidad es posible producir piezas con propiedades iguales o incluso superiores a las fabricadas por vías más tradicionales. Por Ejemplo. Compactación en tibio, Compactación en frío a alta presión, Compactación de alta velocidad o. Sinterización en fase ferrita o en los tratamientos de densificación post-sinterizado. Por Ejemplo. Forja de polvos, Laminación en frío superficial.

El proceso de fabricación de piezas por MP (ver figura 1.1) implica la unión en estado sólido de un polvo de grano fino para convertirse en un producto policristalino.

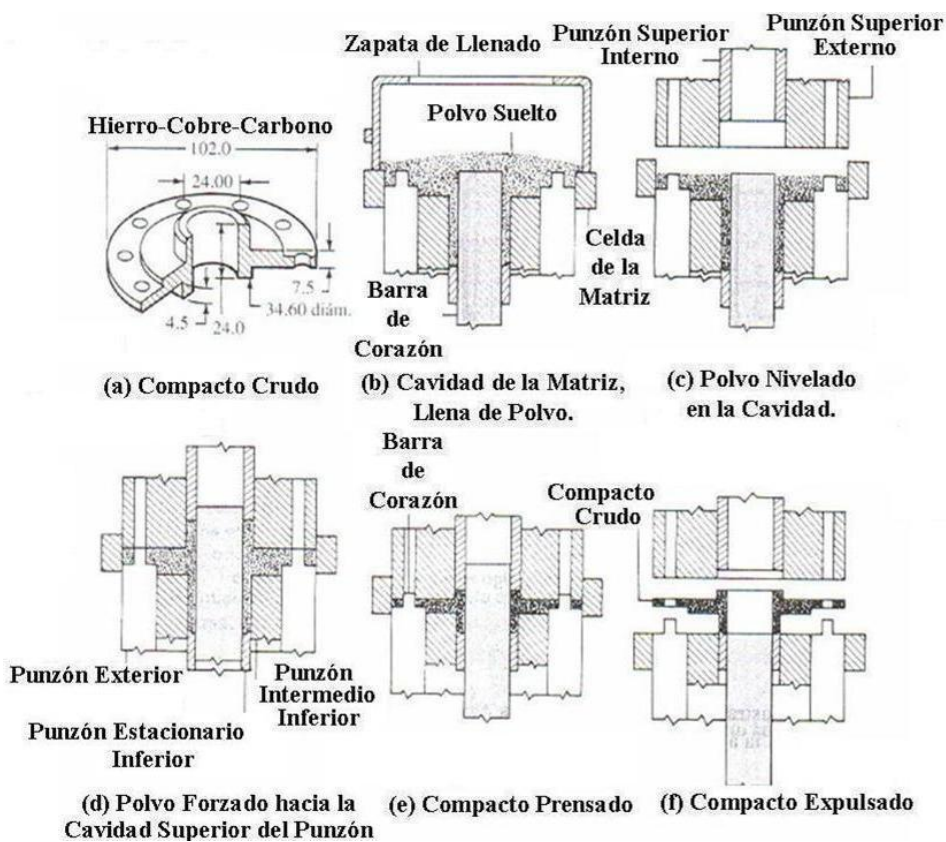


Figura 1.1. Proceso de fabricación de piezas por MP (Shey, 2004)

Cada grano del polvo original corresponde de forma aproximada a un grano de la estructura policristalina final. Una difusión de estado sólido suficiente puede llevar a un producto completamente denso, aunque es común cierta porosidad residual. Esta técnica de procesamiento presenta ventajas para las aleaciones de alta temperatura de fusión y los productos con formas intrincadas. Un avance en el campo de la MP es la técnica de Compresión Isostática en Caliente, en la que se aplica una presión uniforme a la pieza por medio de un gas inerte a alta temperatura.

Para intervenir en el proceso de MP, un metal debe poseer las siguientes características:

1. Debe ser capaz de responder a la soldadura de fase sólida.
2. Debe ser capaz de adquirir un grado de compactación lo suficientemente cerrado bajo presión, y en el caso de las aleaciones, de mezclarse suficientemente e íntimamente para permitir que el soldado se produzca para formar un componente en una masa coalescente.

Las consideraciones que hacen de la MP un proceso importante desde el punto de vista comercial y tecnológico son las siguientes:

- Las partes de MP se pueden fabricar masivamente en forma neta o casi neta, eliminando o reduciendo la necesidad de procesos posteriores.
- Los procesos de MP implican muy poco desperdicio de material, cerca del 97 por ciento de los polvos iniciales se convierten en productos. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales las coladas, alimentadores y mazarotas con material de desperdicio en cada ciclo de producción.
- Debido a la naturaleza del material inicial en la MP, se pueden hacer partes con un nivel específico de porosidad. Esta característica se presta a la producción de partes de metal poroso, como rodamientos y engranajes impregnados con aceite, así como filtros.

- Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos, se pueden fabricar por MP. El tungsteno es un ejemplo, los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se manufacturan con tecnología de MP.
- Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermets que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por MP.
- La MP se comparan favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de  $\pm 0,13$  mm. ( $\pm 0,005$  pulg.)
- Los métodos de producción de MP se pueden automatizar para hacer más económica la operación.

Por medio de las técnicas de la **MP** se fabrica una amplia gama de partes y componentes (**Figura 1.2**): (a) Pequeños balines para bolígrafos, (b) Componentes Automovilísticos (que en la actualidad constituyen el 70 % del mercado de la PM), como anillos para pistones, varillas de conexión, placas de frenos, engranajes, levas y bujes; (c) Aceros para Herramientas, Carburos de Tungsteno, Cermets como materiales para herramientas y matrices, (d) Escobillas de Grafito impregnadas con cobre para motores eléctricos, (e) Materiales Magnéticos, (f) Filtros Metálicos y Rodamientos Impregnados con Aceite de porosidad controlada, (g) Espumas Metálicas, (h) Implantes Quirúrgicos, y (l) muchos otros para aplicaciones aeroespaciales, nucleares e industriales.

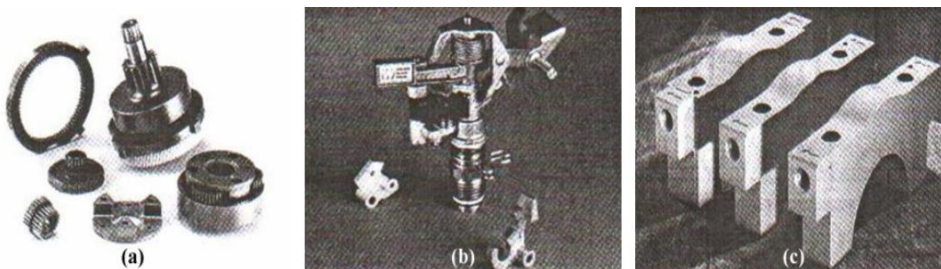


Figura 1.2 (a) Ejemplos de partes comunes fabricadas por medio de los procesos de Metalurgia de los Polvos. (b) Palanca superior de disparo de un rociador comercial, esta la parte se fabrica con una aleación de latón sin plomo, reemplaza a un pieza fundida a presión en matriz con un ahorro de 60% del costo. (c) Tapas principales para soportes de motores automovilísticos (Cojinetes) de 3,8 y 3,1 litros de General Motors. (Kalpakjian, 2008)

Hoy los avances de esta tecnología permiten fabricar partes *estructurales* para aeronaves, como algunos componentes de los frenos de aterrizaje, soporte para montaje de motores, discos para motores, propulsores y bastidores o armaduras para motor de barquillas por medio de la **PM**.

La **MP** ha resultado competitiva con los procesos (como la fundición, el forjado y el maquinado o mecanizado), en particular para partes relativamente complejas fabricadas con aleaciones de alta resistencia y duras. Aunque la mayoría de las partes pesan menos de 2,5 Kg. Pueden llegar hasta 50 Kg. Se ha demostrado que las piezas se pueden producir en masa de manera económica, en cantidades que van desde 5000 piezas al año hasta 100 millones anuales de contrapeso para vibradores de teléfonos celulares.

Los metales mas utilizados en la **MP** son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y los metales refractarios. Para las partes fabricadas con latón, bronce, aceros y aceros inoxidable se emplean *polvos prealeados*, en los que cada partícula de polvo es una aleación. Por lo general, las fuentes de metales son metales y aleaciones a granel, menas, sales y otros compuestos.

La **MP** hace posible una clase de materiales conocidos como Cermets. Como el nombre lo indica, son una Combinación de metales y cerámicas, con la resistencia de los metales o aleaciones y las resistencias a la abrasión y al calor de los compuestos cerámicos. Un ejemplo es el  $Al_2 Cr$ . Los cermets fueron desarrollados en Alemania en la II guerra mundial para su utilización en los motores de propulsión, este uso no se llevo a cabo debido a su fragilidad, pero se encontraron otras aplicaciones importantes, como aparatos químicos resistentes a la corrosión, equipo para energía nuclear, bombas para servicios severos y sistemas para manipular combustibles de cohetes.

La MP abarca la preparación de los polvos y su combinación en artículos útiles. En forma básica, un polvo de metal se compacta a la forma deseada y se calienta para reforzar el compactado. Los procesos reales son muchos y difieren para adecuar los materiales tratados y obtener las propiedades requeridas en el

producto terminado. El proceso de metalurgia de los polvos (MP) consta de las siguientes operaciones, en secuencia (**Figura 1.3**).

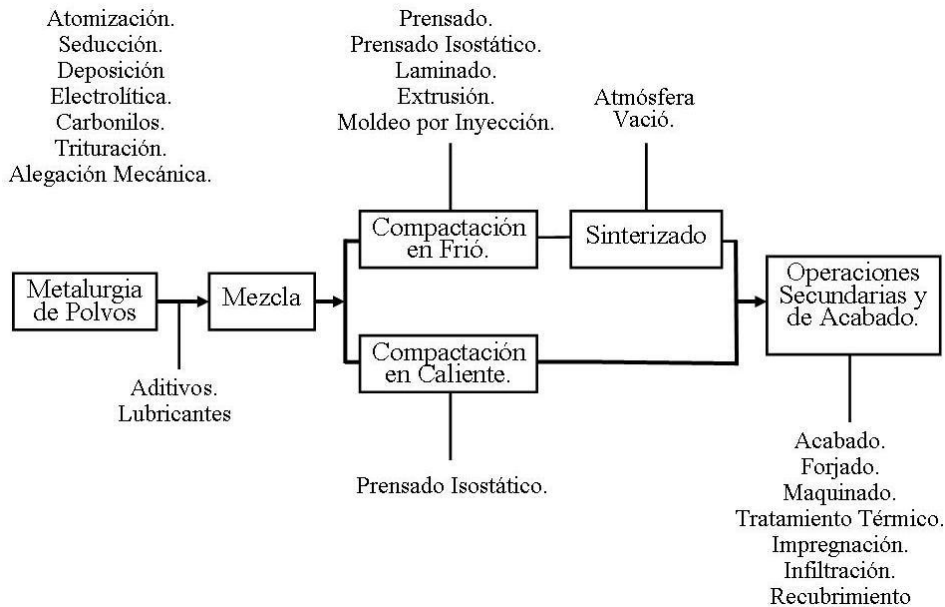


Figura 1.3 Resumen de Procesos y Operaciones comprendidas en la fabricación de partes mediante Metalurgia de los Polvos. (Kalpakjian, 2008)

También el ahorro de energía contribuye considerablemente a las ventajas económicas que aporta la PM. En la fabricación de una pieza, por ejemplo “un notch segment” utilizado en la transmisión de un camión, donde la PM consume sólo alrededor del 43 % de la energía comparado con la forja o el mecanizado, y el número de etapas del proceso se ha reducido considerablemente.

### Referencias Bibliográficas.

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

Doyle L; Keyser C; Leach J; Scharader G; Singer M. Materiales y procesos de Manufactura para Ingenieros. Tercera Edición. Pretince Hall Hispanoamericana. Méjico, 1988.

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.

Schrader George F., Singer Morse B. Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros. México, 1988.

### **Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.**

1. Explique en que consiste la Metalurgia de los Polvos.
2. ¿Cuáles son las características más importantes de los polvos metálicos para intervenir en un proceso de MP?
3. ¿Cuáles son las consideraciones más importantes de un proceso de fabricación por MP?
4. ¿Cuáles son los productos más comunes fabricados por el proceso de MP?
5. ¿Cuáles son los polvos metálicos más utilizados en MP?
6. ¿Cuál es el rango de peso de las piezas fabricadas por el proceso de MP?
7. ¿Qué cantidad de piezas se deben fabricar para que el proceso de MP sea económicamente rentable?
8. ¿Como se definen los materiales llamados en la MP Cermets?
9. ¿Cuáles son las operaciones del proceso de fabricación por la MP?



## CAPÍTULO 2 Características de los Polvos Metálicos

**S**e requiere del conocimiento exacto de los polvos metálicos y de sus características para

mediante la Metalurgia de los Polvos (**MP**). Las propiedades de un polvo, sea metálico o no, se determinan según su fineza y el grado de subdivisión. Se ha visto que un cuerpo de un trozo solidó tiene diferentes propiedades mecánicas y otras que un producto fabricado mediante polvos metálicos. Incluso las acciones químicas y atmosféricas son diferentes para los polvos metálicos que las de un trozo solidó. Por ejemplo, un cubo de aluminio que tiene una cara de  $1 \text{ cm}^2$  tiene un área superficial de  $6 \text{ cm}^2$ , mientras que un polvo del mismo cubo, que puede pasar por una malla de 200 redes tiene una superficie de  $2.000.000 \text{ cm}^2$  sobre la que pueden incidir diversas acciones químicas y atmosféricas. Actualmente se utilizan polvos muy finos que tienen diámetros atómicos de partículas de hasta  $0,001 \text{ mm}$  ( $1 \text{ micra} = \mu\text{m}$ ) para fabricar componentes mediante la técnica de la **MP**.

Aunque se ha visto que los polvos metálicos son más costosos, también tienen propiedades mecánicas pobres y son más propensos a los ataques químicos y de la atmósfera. Pero se ha comprobado que los productos fabricados mediante esta técnica *tienen muchas ventajas sobre los otros métodos de producción*.

Existen muchos componentes que no se pueden producir mediante otros métodos.

Los futuros procesos, y el resultado final alcanzado después del sinterizado, están altamente ligados con las características del polvo tales como: tamaño de las partículas, forma de las partículas, estructura y condición de la

superficie. Una de las propiedades más importantes de los polvos es la *densidad aparente*; esto se debe a que la dureza alcanzada en el compactado depende directamente de la densidad aparente, a su vez esta característica depende de la forma y de la porosidad promedio entre las partículas.

Una vez se tiene el polvo empieza el proceso de fabricación de la pieza deseada. Este proceso está compuesto por básicamente tres etapas - la mezcla, el compactado y la sinterización. Cada una de estas etapas contribuye en las características finales de la pieza.

### **Selección de Polvos.**

Existe un bagaje teórico muy sencillo para la selección de polvos, pero básicamente este se ha desarrollado experimentalmente. Los conceptos básicos se basan en qué tipo de caracterización del polvo se necesita para un proceso dado. En la Tabla 2.1 se observan los diversos procesos para la producción de polvos, que tipo de polvo produce.

Tabla 2.1 Diversos Procesos para Producción de Polvos

Proceso	Tamaño Partícula (µm)	Forma Partícula	Densidad	Moderado Alloying	Costo
Descomposición Carbonyl	2-20	Esférica	Moderado	NO	
Atomización Centrifuga	50-1000	Esférica	Alto	SI	Variable
Electrolítico	5-300	Dendrítico Irregular	Bajo	NO	Moderado
Atomización por Gas	10.300	Esférico	Alto	SI	Alto
Pulverización Mecánica	2-500	Angular	Moderado	Algún	Alto
Atomización Centrifuga	200-1000	Angular	Moderado	SI	Alto
Molino de Reducción	20-800	Hojuela	Moderado	NO	Alto
Oxido Reduccion	30-500	Esponja	Bajo	NO	Moderado
Atomización por Plasma	5-80	Esférica	Alto	SI	Muy alto
Electro erosión	0,1-20	Esférica	Moderado	Algo	Muy alto
Atomización (Agua)	5-400	Irregular, Ligamentoso	Moderado a Bajo	SI	Moderado

(Fuente: Randall, 1998)

Por otro lado se contrasta el tipo de polvo que se requiere para cierto tipo de proceso en la siguiente Tabla 2.2 que se presenta a continuación.

Tabla 2.2 Cuadro comparativo de Polvos necesarios para los diversos Procesos y Productos.

<b>Polvos Metales para varias aplicaciones</b>			
<b>Aplicación</b>	<b>Tamaño de la Partícula Rango (µm)</b>	<b>Forma de la Partícula</b>	<b>Consideraciones Importantes</b>
Imanes Consolidados	5-199	Redondeada	Alta Pureza, Respuesta Magnética.
Reacción Química	20-100	Redondeada	Alta Pureza
Presión Isostática Fría	45-300	Redondeada, Irregular	Compresibilidad Resistencia Verde
Compactación en Matriz	20-200	Irregular	Compresibilidad Empaquetamiento
Electrofotografía	100-200	Esférica	En Forma de propiedades Magnéticas
Flame Cutting	40-200	Redondeada, ligamentoso	Flujo Bueno, bajo nivel de pureza
Forja	20-150	Irregular	Pureza, Compresibilidad y Resistencia
Fricción de Materiales	20-200	Irregular	Forma Irregular, esponjada
Presión Isostática en Caliente	75-300	Esférica	Alta Pureza, Alta densidad de Empaquetamiento
Moldeado por Inyección	1-10	Esférica	Al densidad de empaquetamiento y Sinterizado.
Clase y pruebas Magnéticas	20-100	Redondeado Aplanado Irregular	Alta Pureza, Respuesta Magnética.
Farmacéutico y Alimentaos	2-50	Redondeado, Esférica	Dispersión
Absorción Radar	1-10	Esférica	Tamaño pequeño de Grano
Rolling	1-40	Irregular	Oxigeno bajo.
Granalla	100-3000	Redondeada	Dureza Alta
Piedra de Corte	500-1400	Angular	Alta dureza para cortes abrasivos.
Rociado Térmico	45-200	Redondeada, Esférica	Flujo Uniforme, Alta Pureza
Electrodo Revestido	60-400	Irregular	Bajo Oxigeno

Fuente: Randall, 1998.

## ***Características de los Polvos Metálicos.***

Las características importantes de los polvos metálicos son: *Pureza, Composición Química, Tamaño de la Partícula, Distribución por Tamaño de las Partículas, Densidad, Relación de Compresión, Forma de la Partícula, Factor de Flujo, Capacidad de Sinterización.*

### **Pureza.**

Los elementos indeseables o las impurezas tienen efectos adversos en los productos fabricados mediante la metalurgia de los polvos. Si son puros y no contienen óxidos o impurezas, se pueden obtener mejores propiedades mecánicas por medio de esta técnica.

## ***Composición Química.***

Por lo general, este término se emplea para denominar componentes que se van a producir a partir de polvos metálicos. *El tamaño de la partícula y la compresibilidad* también tienen un gran efecto sobre las propiedades del producto. La composición química del polvo se determina mediante el análisis químico de los materiales. Existen polvos con diversas composiciones, aleaciones etc. En **PM** se pueden hacer mezclas de polvos que usualmente no se pueden alear obteniéndose compuestos nuevos con propiedades nuevas. Hay que tener cuidado con las mezclas, ya que si se generan diferencias de energía muy grandes, pueden haber reacciones químicas y explosiones indeseadas, pero por otro lado se puede mejorar y facilitar el proceso especialmente en lo concerniente a temperaturas de sinterización.

## ***Tamaño de las partículas.***

Por lo general, el tamaño de las partículas se mide por el tamizado, es decir, pasando el polvo metálico a través de tamices (*Cribas*) con diversos

tamaños de malla. El análisis del tamizado se realiza mediante una pila vertical de tamices, con el tamaño cada vez más fino de malla conforme el polvo pasa hacia abajo a través de los tamices. Cuando más grandes es el tamaño de la malla, más pequeña es la abertura en el tamiz. Por ejemplo, una malla tamaño 30 tiene una abertura de 600  $\mu\text{m}$ . El tamaño de 100 tiene 150  $\mu\text{m}$  y el tamaño de 400 tiene 38  $\mu\text{m}$  (*este método es similar a la de los granos abrasivos. Cuando más grande es el número más pequeño será el tamaño de la partícula abrasiva*).

El tamaño de las partículas es muy importante e influye en gran medida en el producto final. También se ha visto que si no son de una forma geométrica regular, su proporción y distribución en el componente final puede variar. Todas las partículas pueden pasar una criba 100, mientras que solo el 70 por ciento puede pasar una criba 200 y en 40 por ciento de este porcentaje puede superar una criba 300. En consecuencia el tamaño de las partículas varía de malla 100 a malla 300. La mayoría de ellas se separan mediante el paso a través de mallas.

En el caso de los polvos más finos se utiliza *el método de elutriación de aire*. En polvos gruesos es necesario considerar la forma de las partículas, pero es menos importante que en los polvos más finos. El tamaño de partícula que se utiliza en la metalurgia de los polvos por lo general varía de 5 a 200 micras. Las dimensiones de las partículas tienen un marcado efecto en *el moldeo, resistencia, densidad, porosidad, permeabilidad y estabilidad dimensional del producto*.

Además del análisis del tamiz, existen diversos métodos para analizar el tamaño de las partículas.

1. ***Sedimentación***. Que comprende la medición de la rapidez a las que las partículas se sedimentan en un fluido.
2. ***Análisis Microscópico***. Que puede incluir microscopía electrónica de transmisión y de barrido.
3. ***Dispersión de la Luz***. De un láser que ilumina una muestra constituida por partículas suspendidas en un medio líquido. Las partículas hacen que la luz se disperse; después un detector digitaliza las señales y calcula la distribución del tamaño de las partículas.

4. **Óptico** (como el de las partículas que bloquean a un rayo de luz). Que después se detecta a través de una foto celda.
5. **Partículas Suspendidas en un líquido**. Cuyo tamaño y distribución se detecta después mediante sensores eléctricos.

### **Relación de Compresión.**

Es la relación del polvo sin comprimir y el volumen del polvo después de la compresión. También se le conoce como **compresibilidad**. La relación de compresión, varía entre los diversos materiales, depende del tamaño de las partículas. Por lo general es deseable una *relación de compresión de 3 a 1*, pero puede ser más alta en el caso de los polvos finos. Esta relación es importante cuando se diseñan moldes para polvos particulares y con frecuencia se obtienen dividiendo la densidad de los polvos comprimidos entre la densidad aparente del polvo.

$$\text{Relación de Compresión} = \frac{\text{Densidad de Polvo Comprimido}}{\text{Densidad Aparente del Polvo}} \quad (2.1)$$

### **Forma de las partículas.**

La forma de las partículas, que afecta en gran medida las características de su procesamiento, por lo general se describe en términos de **relación de forma o factor de forma**. La relación de aspecto es la relación de la dimensión más grande respecto a la dimensión más pequeña de la partícula, de manera que una esfera tendrá una RA de una Unidad, mientras que una partícula filiforme puede tener un RA de 4. Esta relación va de la unidad (para una partícula esférica) hasta aproximadamente 10, para partículas en forma de hojuelas o de aguja. Los polvos metálicos tienen varias formas: *esféricas, angular, redonda y acicular*. Las partículas esféricas se encuentran en el zinc condensado y tiene excelentes propiedades de sinterización, mientras que las partículas irregulares (aciculares o angulares) tienen propiedades de moldeo superiores.

La fricción entre partículas se determina haciendo pasar el polvo a través de una boquilla, de manera que se amontone por gravedad, la medida del ángulo final entre la pendiente del montón y la horizontal es el Angulo de fricción  $\theta$  (Figura 2.1)

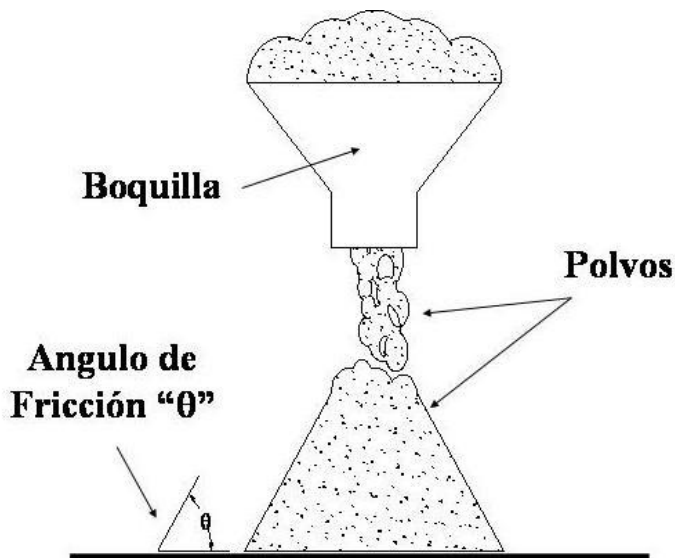


Figura 2.1 Determinación del Angulo de Fricción en una distribución determinada de polvos metálicos. (Salán, 2005)

Cuando menor sea el valor de  $\theta$ , mas fluido será el polvo y mejor se distribuirá en el molde, mientras que los ángulos de fricción elevados indican un costoso deslizamiento de partículas entre ellas (fricción elevada). El Angulo de fricción  $\theta$  depende de las características del polvo, de manera que:

- Las partículas pequeñas presentan una menor fricción que las partículas de diámetros equivalentes menores.
- Las partículas esféricas ( $RA=1$ ) poseen valores de  $\theta$  menores que las alargadas ( $RA>1$ ).
- Una población heterogénea, con distintos tamaños de partículas, se repartirá mejor que una distribución homogénea.

De forma similar, cabe decir, que cuando mayor sea el valor de  $RA$  menor será la densidad, ya que entre partículas de forma irregular se vera mas favorecida la existencia de huecos entre partículas esféricas.

### ***Capacidad de sinterización.***

Es la propiedad de los polvos metálicos debido a la cual no requieren un rango de temperaturas muy estrecho para propósitos de sinterización. Un polvo metálico que tiene una buena capacidad de sinterización presenta una buena adhesión entre las partículas, y, en consecuencia, el resultado se refleja en mejores propiedades mecánicas y físicas del producto.

### ***Factor de forma.***

También conocido como ***Índice de Forma***, es una medida de la relación del área de la superficie de la partícula respecto de su volumen, que se normaliza por referencia a una partícula esférica de volumen equivalente. Por lo tanto, el factor de forma de una hojuela es más alto que el de una esfera.

### ***Distribución de tamaño.***

La distribución del tamaño de las partículas se especifica en términos de análisis de mallas e influye en la compactación del polvo y su comportamiento durante la sinterización y el moldeo. Su análisis se realiza sobre la base del polvo que pasa a través de las diferentes mallas.

La distribución de tamaño de las partículas es un factor que debe considerarse, porque afecta las características del procesamiento del polvo. Se determina en términos de la grafica de frecuencia y distribución. Al valor máximo se le conoce como tamaño de modo (o de la moda).

Otras propiedades de los polvos metálicos que tienen un efecto sobre su comportamiento durante el procesamiento son:(a) ***las propiedades del flujo***, cuando se llenan las matrices o dados, (b) ***la compresibilidad***, cuando se compactan, (c) ***la densidad***, como se define en diversos términos como la densidad teórica, la densidad aparente y la densidad al momento de que el polvo se sacude o se golpea ligeramente dentro de la cavidad de la matriz.



### ***Densidad.***

La densidad es masa por unidad de volumen. *La densidad aparente* es el peso de una unidad de volumen de polvo cuando se compacta con flojedad. Se calcula en términos de gramos por centímetros cúbicos, pesando un volumen conocido de polvos. La densidad aparente también se llama peso de carga y su valor es mucho menor que el de la partícula sólida.

### ***Microestructura de partículas.***

El examen microscópico de alta ampliación de las partículas, que revela diversas fases, inclusiones, impurezas, etc., es muy útil en el estudio del comportamiento del material después de formado el producto. La microestructura también ayuda a estudiar las fisuras y la porosidad del componente.

### ***Factor de flujo.***

El empaquetamiento y flujo va a ser muy importante tanto para el manejo como compactación de los polvos. A medida que hay más empaquetamiento, la materia está mejor reorganizada existiendo menos espacio. Esto disminuye las porosidades, y en el producto final se tendrán mejores propiedades mecánicas. Combinaciones de diversos tamaños de polvos hacen más posible un mejor empaquetamiento, razón por la cual las distribuciones en los polvos deben tener varianzas considerables. El número exacto para estos valores se obtiene experimentalmente. El flujo permite observar la fricción existente entre las partículas. Es muy importante para entender la capacidad de las partículas para reordenarse y mejorar los empaquetamientos. La vibración (batidas) va a ser de vital importancia, ya que dependiendo del flujo del polvo, mejorará el empaquetamiento (y por lo tanto la densificación del polvo).

El factor de flujo o capacidad de flujo, se define como la rapidez a la que el polvo metálico fluye bajo la acción de la gravedad de un contenedor a través de

un orificio, con forma y acabado estándar. Por lo general, es el tiempo necesario para que 50 gr. de polvo fluyan a través del orificio estándar en el fondo de un cono metálico cuyo ángulo interno es 60°. El tiempo se computa en segundos. La rapidez de flujo es necesaria para estudiar el comportamiento del polvo, es decir, para saber si llenara todas las cavidades y rebajes del molde. El factor de flujo depende del *tamaño, la forma, la distribución de tamaños y de la fricción entre partículas*. Es necesario un buen factor de flujo para llenar el molde rápida y uniformemente.

Para medir esto se utiliza el embudo de Hall que mide la rata a la que fluye un polvo a través de un hueco estandarizado, y permite comparar cuantitativamente el flujo. También está el embudo de Arnold que simula el llenado en un proceso típico de la metalurgia de polvos. (Ver Figura 2.2)

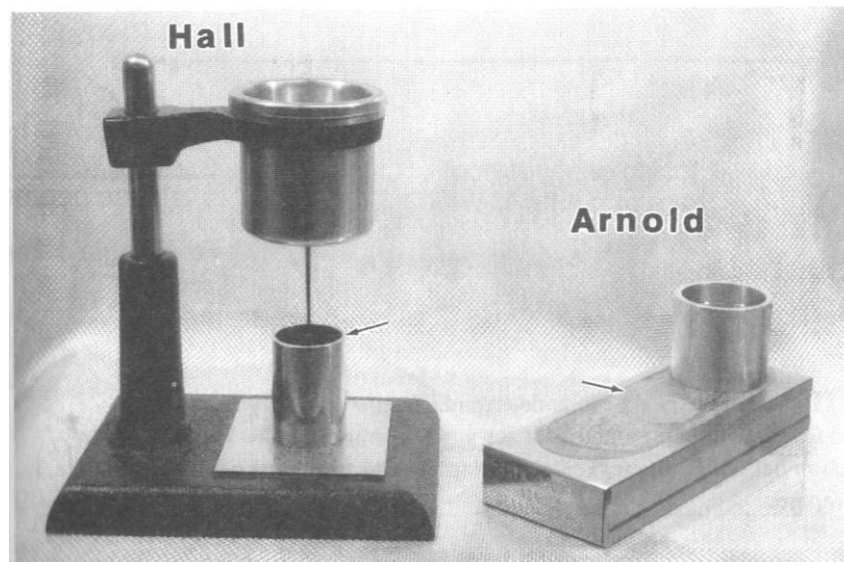


Figura 2.2 Embudos de Hall y Arnold. En el de Hall se mide el tiempo en el que se demora pasar 50g de la sustancia. Con este se mide el flujo. El de Arnold sirve para simular el llenado de un volumen de 20cm<sup>3</sup> mostrando la densidad aparente del polvo. (Randall, 1998).

### ***Ensayo y evaluación de polvos.***

Además de la *composición, tamaño, la forma y la textura superficial*, en los polvos metálicos se evalúa ulteriormente su aptitud para las etapas siguientes. Así la *rapidez de flujo*, que mide la facultad con que un polvo puede introducirse y distribuirse en una matriz, puede influir esencialmente en la duración del prensado, y por ende, en la cadencia de producción. Unas características de flujo deficientes pueden también producir el amotinamiento del polvo bajo las boquillas

y hacer necesario el uso de boquillas de alimentación o un vibrado antes de prensar.

Asociada a las características de flujo esta la *densidad aparente*, que mide la aptitud del polvo para llenar el espacio disponible sin aplicación de una presión externa. Con los *ensayos de compresibilidad* se evalúa la efectividad de la presión aplicada para elevar *la densidad del polvo* y la *resistencia en crudo* sirve para especificar la resistencia de los polvos después de compactados en la prensa. Con la resistencia en crudo se valora la aptitud para manipular los productos después de compactados, pero antes de sinterizados.

La compresibilidad es la capacidad del polvo de aumentar su densidad dada una presión. Usualmente no se puede llegar hasta la densidad obtenida por otros procesos a no ser que se realicen compactaciones en caliente.

La compresibilidad depende del empaquetamiento de las partículas del polvo, de los aglutinantes o como lubricantes, de la presión, y del endurecimiento por trabajo en frío, junto con la dureza de los polvos obtenidas durante su manufactura. Existen modelos para explicar este comportamiento pero por rangos. La teoría sobre este tema varía dependiendo de las escalas de presiones que se trabajen y las escalas de tiempo que dura el proceso. Para aceros y hierros varía de 2.3 a 6.6 g/cm<sup>3</sup> a 60,000psi (414Mpa). De aquí salen las compactaciones (verdes) con resistencias que van a ser vitales para la extracción y manejo de los productos intermedios.

### **Referencias Bibliográficas.**

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

De Garmo E.P. et al, Materiales y Procesos de Fabricación. Editorial Reverse S.A. Segunda Edición. ISBN 84-291-4822-1. 1988, España.

Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Education, México, 2008.

Randall M. German. Powder Metallurgy of Iron and Steel. John Wiley & Sons, Inc. USA. 1998.

Salan Ballesteros Nuria Maria. Tecnología de Proceso y Tecnologías de Materiales. Ediciones UPC, España, 2005.

### **Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.**

1. ¿Cuáles son las características más importantes de los polvos metálicos?
2. ¿Cuáles son los métodos para analizar el tamaño de las partículas de los polvos metálicos?
3. ¿Qué se entiende por relación de compresión?
4. ¿Que se entiende por relación de forma?
5. ¿Cuáles son las formas más comunes de los polvos metálicos?
6. ¿Defina Capacidad de Sinterización?
7. ¿Qué otras propiedades de los polvos metálicos que tienen un efecto sobre su comportamiento durante el procesamiento?
8. ¿Qué se entiende Densidad Aparente?
9. ¿Qué se entiende por Factor de Flujo?
10. ¿Cuál es la incidencia de las dimensiones de las partículas de polvo en las piezas fabricadas?

### Capítulo 3. Producción de los Polvos Metálicos.

Existen diversos métodos para producir polvos metálicos, la mayoría de los cuales se puede elaborar por más de un método. La elección depende de los requisitos del producto final. La microestructura, las propiedades de la masa y la superficie, la pureza química, la porosidad, la forma y la distribución del tamaño de las partículas dependen del proceso específico que se usó (**Figuras 3.1 y 3.2**). Estas características son importantes. Ya que afectan de manera significativa el flujo y la permeabilidad durante la compactación y en la operaciones posteriores al sinterizado.

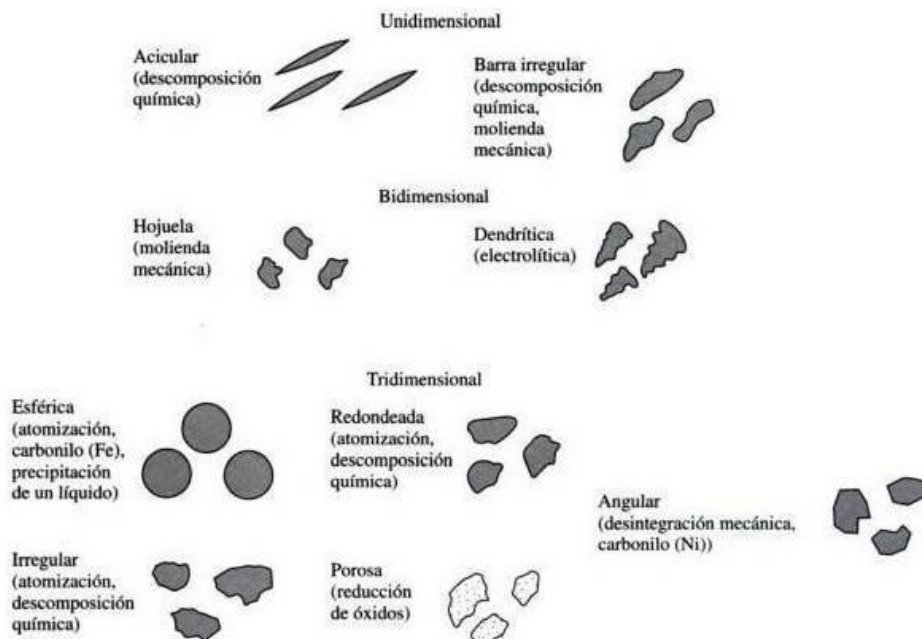


Figura 3.1 Forma de las Partículas en la Metalurgia de los Polvos y Procesos por los cuales se producen. Los polvos de Hierro se elaboran de muchos de estos Procesos. (Kalpakjian, 2008)

El tamaño de las partículas producidas va de 0.1 a 1000  $\mu\text{m}$ . Casi cualquier tipo de metal puede producirse en forma de polvo: sin embargo, solo unos cuantos tienen las características y propiedades deseables, necesarias para la producción económica. *Las dos clases principales son los polvos a base de hierro y cobre*, y se prestan bien al proceso de Metalurgia de los Polvos. *Los polvos de aluminio, níquel, plata y tungsteno* no se utilizan ampliamente: sin embargo tienen algunas aplicaciones importantes, algunos de los métodos más comunes son: La atomización, la deposición electrolítica, el maquinado, el molido, la reducción y el pulverizado.



Figura 3.2 (a) Imagen de Microscopio Electrónico de Barrido de las partículas de polvo de hierro fabricadas mediante Atomización. (b) Partículas de polvo de Súper Aleación de Níquel (Udimet 700) fabricadas mediante el proceso de Electrodo Giratorio. (Kalpakjian, 2008)

En la **Figura 3.3** se ven diversas formas que se pueden obtener, estas son: Esféricas, Redondeadas, angulares, Irregulares, Poligonales o Cúbicas y Esponjosas. A medida que hay más tiempo para el enfriamiento en el momento de producción de los polvos, se obtendrá una forma más esférica. Por otro lado, si el método es químico, es muy probable que se obtengan polvos porosos con inclusiones de óxidos e impurezas.

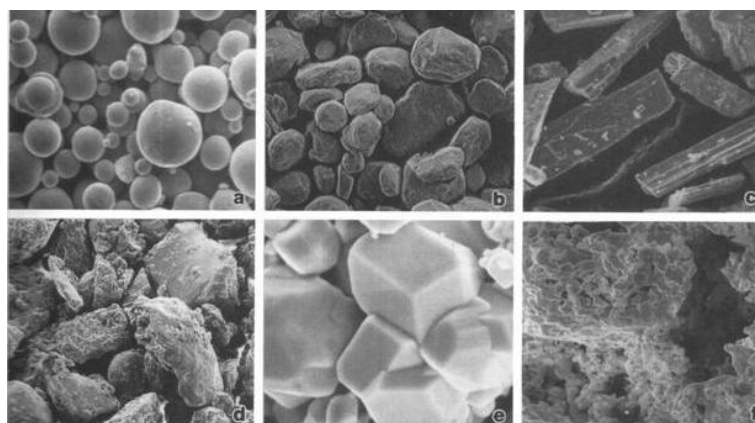


Figura 3.3 Formas que se pueden obtener para diversos polvos. La a) son esféricas, b) redondeada, c) angular, d) irregular, e) poligonal o cúbica y f) esponja. (Randall, 1998)

Para las formas rómbicas y tetragonales, esto depende mucho de las relaciones interatómicas que se explican mejor con la teórica cuántica.

Todo el proceso de la industria de la metalurgia de polvos tiene su comienzo con los procesos por el cual se fabrican los polvos metálicos. Hay gran variedad de procesos para producir polvos de metales. Discutiremos los tres más importantes, estos manejan la mayor cantidad de producción de polvos metálicos.

Las composiciones mas usadas son *los polvos con base de cobre y base de hierro, latón, hierro y acero para parte estructurales, bronce para cojinetes*. Otras de importancia, aunque en cantidades menores *son aceros inoxidable, aluminio, titanio, níquel, estaño, tungsteno, cobre, zirconio, grafito y óxidos metálicos y carburos*.

Se usan polvos puros en algunas piezas y en otras se usan aleaciones. Estas aleaciones se pueden obtener aleando un metal antes de pulverizarlo originándose una aleación mas fina y uniforme o por mezclado de polvos con los ingredientes deseados, siendo fácil de componer pero se debe sinterizar con cuidado para asegurar que los ingredientes llegue a difundirse.

Las características típicas de un metal en polvo están influenciadas por el modo en que se hace. Las principales características son *forma de la partícula, tamaño y distribución del tamaño, pureza, estructura del grano, densidad, velocidad de flujo y compresibilidad*. Para obtener las propiedades deseadas se acostumbra mezclar polvos diferentes.

La mayoría de los polvos se obtienen por reducción de mineral refinado, de escoria de laminadora o de óxidos preparados por monóxido de carbono o hidrogeno. Los granos tienden a ser porosos. El tamaño de la partícula puede hacerse bastante uniforme, lo que contribuye a la uniformidad del producto final.

### ***Reducción a estado solidó.***

Este proceso ha sido, por mucho tiempo el más utilizado para la producción de polvo de hierro. Materia prima seleccionada es aplastada, mezclada con carbón y pasada por un horno continuo en donde reacciona. Este proceso deja una especie de torta esponjada de hierro. Después se aplasta nuevamente, se separan los materiales no metálicos y se tamiza para producir el polvo. Debido a que no se hace ninguna refinación, la pureza del polvo es totalmente dependiente de la pureza de la materia prima. Este mismo proceso se puede utilizar para hacer polvo de cobre.

### ***Electrolisis.***

En la electrolisis se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrolito y se deposita en el cátodo. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvo de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

En condiciones controladas el polvo del metal puede depositarse electrolíticamente. El material puede tener que triturarse y se muele para obtener finura, se calienta para recocerlo y expulsar el hidrogeno, se selecciona y se mezcla. Los polvos electro depositados se encuentran entre los de más pureza y tienen características dendríticas (4\$ Kg.) La deposición electrolítica es el método más común para producir polvos de cobre, hierro, platas y tantalio.

Escogiendo las condiciones apropiadas - posición y fuerza del electrolito, corriente, densidad, temperatura, etc., muchos metales pueden convertirse en polvos metálicos. Este proceso puede requerir de otros procesos (secado, aleado, lavado, etc.) para lograr las propiedades deseadas. Se usa por lo general para producir *polvo de Cobre*, pero también se puede utilizar para la producción de



*polvo de Cromo y Manganeso.* Dos de las mayores cualidades de este proceso son la alta pureza y la alta densidad alcanzada en los polvos.

Por lo general, se producen polvos de cobre, plata, hierro, tantalio, zinc, estaño y molibdeno por medio de electrolisis como se muestra en la **figura 3.4**. Estos polvos no tienen impurezas y por tanto son resistentes a la oxidación. Además, los que se obtienen mediante este proceso tienen una estructura dendrítica característica, con una densidad aparente y se comprimen con facilidad. El polvo de cobre es muy utilizado para manufacturar cojinetes porosos.

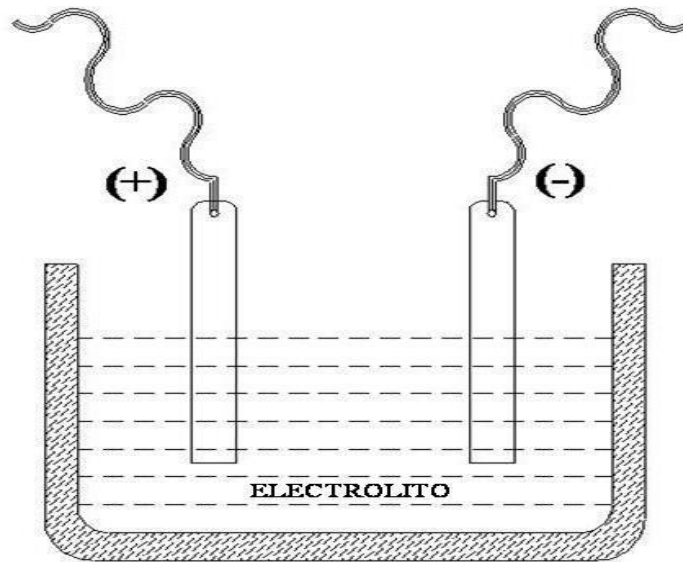


Figura 3.4 Electrolisis. (Bawa, 2004)

Este proceso es similar a la electrolisis, pues el material puro se deposita en el cátodo de un electrolito cuando se hace pasar una corriente a través de él. El metal se deposita en el cátodo y se retira cuando se llega al grano de finura que se requiere. Después se lava con agua para retirar las impurezas y luego se seca.

### **Atomización.**

Los metales pueden atomizarse en una corriente de aire, vapor o gas inerte. Algunos pueden fundirse por separado e inyectarse a través de un orificio en la corriente. Otros como el hierro y el acero inoxidable, pueden fundirse en un arco

eléctrico (como aspersión del metal), y los *metales refractarios en un arco de plasma*, como ejemplo, las pequeñas gotas de titanio se solidifican en polvo después de que sea lanzado desde el extremo de una barra que gira con rapidez calentado por un arco de plasma en una atmósfera de helio. Las partículas atomizadas son un poco redondas.

La atomización o roció de metal es el medio de producir polvos a partir de metales de bajo punto de fusión, como el aluminio, el plomo, el estaño y el zinc. Este proceso produce partículas de polvo de forma irregular.

En este proceso, el metal fundido es separado en pequeñas goteras que luego son congeladas rápidamente antes de que entren en contacto entre ellas o con una superficie sólida. El principal método para desintegrar la delgada corriente de metal fundido es el de someterla al impacto de fuertes golpes de gas (se usan comúnmente Aire, Nitrógeno y Argón) o de líquido (generalmente agua). Variando diferentes parámetros del proceso se puede controlar el tamaño de las partículas.

En principio la técnica es aplicable para todos los metales que se puedan fundir, pero es comercialmente utilizada para la producción de polvos de Hierro, Cobre, Aceros, Bronce, Aluminio, Plomo y Zinc.

Hay muchas maneras de crear el rocío de metal fundido, varias de ellas se ilustran en la **Figura 3.5**. Dos métodos se basan en la atomización con gas, en los cuales se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido. En la parte (a) de la figura el gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando el metal líquidos de la fisión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotitas se solidifican en forma de polvo. En un método parecido que se muestra en la parte (b), el metal fluye a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por chorros de aire. Los polvos metálicos resultantes se recolectan en una cámara situada debajo.

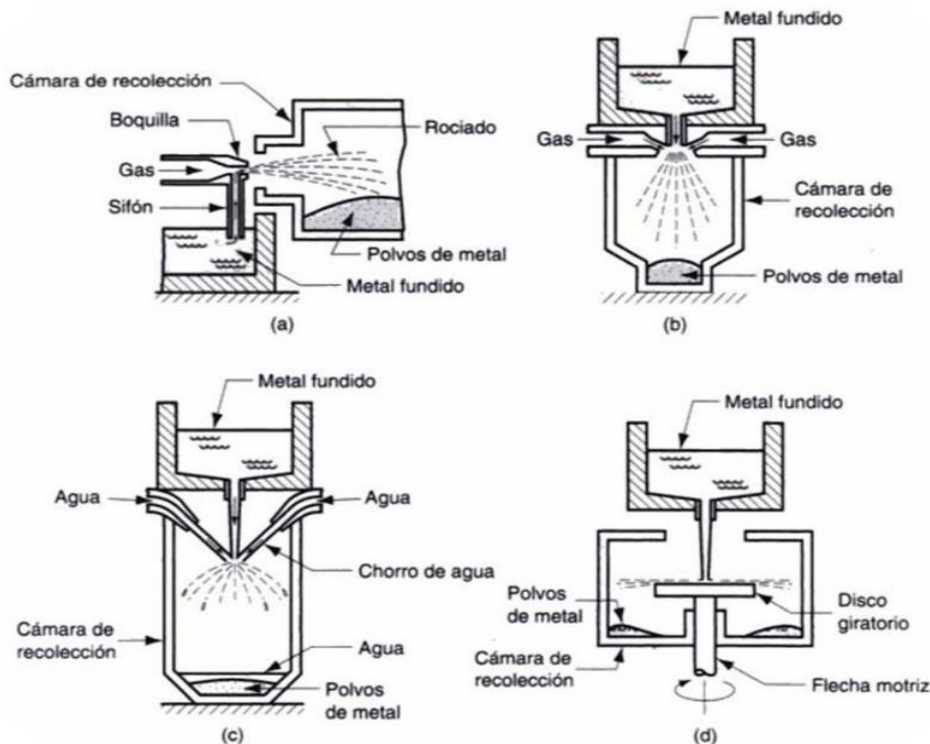


Figura 3.5 Varios métodos de Atomización para producir Polvos Metálicos. (a) y (b) métodos de atomización por gas; (c) atomización por agua; (d) atomización centrífuga por el método de disco giratorio (Groover, 1997)

El método que se ilustra en la parte (c) es similar al (b) excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Este se conoce como atomización por agua y es el más común de los métodos de atomización, particularmente apropiado para metales que funden después de los 1600 °C. El enfriamiento es más rápido y la forma del polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación. En ambos procesos de atomización con aire o agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente del fluido; el tamaño de la partícula está en relación inversa con la velocidad.

Varios métodos se usan en atomizados centrífugos. Una versión es el método de disco rotatorio, mostrado en la parte (b) de la figura, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y que rocía el metal en todas direcciones pulverizándolo.

Además de estos tres procesos, hay varios que están obteniendo una creciente aceptación, debido a sus aplicaciones. Los procesos de *Electrodo Rotatorio* y *Trituración Mecánica* son ejemplos representativos de estos métodos.

El proceso de *Electrodo Rotatorio* tiene la gran ventaja de que se puede ejecutar en envases cerrados, con atmósfera controlada e inclusive en el vacío, con esto se obtiene un polvo muy puro y limpio, además permite trabajar con metales altamente reactivos.

### ***Desintegración Mecánica o Pulverización.***

Con este proceso se producen los polvos necesarios mediante la aplicación de fuerzas mecánicas sobre las piezas metálicas. Algunos de los métodos mecánicos de desintegración que se utilizan para producir polvos metálicos son: *torneado, maquinado, fresado, cepillado y rectificado*. Por lo general, este proceso se utiliza para trabajar materiales quebradizos. También se emplean el martillado y los molinos de turbulencia en el proceso mecánico de la pulverización. En los pulverizadores mecánicos que dan golpes continuos con martillos rotatorios a los polvos metálicos, que los desintegran en pequeñas partículas debido a la potencia de los golpes. Por lo general, a la desintegración mecánica sigue de un maquinado, torneado, fresado etc., donde las partículas metálicas gruesas se reducen notablemente, como se muestra en la Figura 3.6. Los trituradores, molinos rotatorios y el estampado también producen polvos finos. Se puede producir partículas muy finas fresando partículas de materiales quebradizos y suaves, como el magnesio, el antimonio y el aluminio.

Cuando se aplica la técnica de baleo, el metal fundido se hace pasar por cribas o por un orificio y luego se le somete a enfriamiento en agua dejándolo caer desde una cierta altura. Este proceso da como resultado partículas esféricas o con forma de perla. Los polvos metálicos de aluminio, plomo y zinc se producen mediante este método.

La trituración mecánica (Pulverización) comprende la trituración, molido en un molino de bolas, o esmerilado de metales frágiles o menos dúctiles en

pequeñas particular. Un molino de bolas (**Figura 3.6**) es una maquina con un cilindro hueco giratorio que se llena parcialmente con bolas de acero o de fundición blanca. En el caso de los materiales frágiles, las partículas de polvo producidas tienen formas angulares, si los metales son dúctiles tienen forma de hojuelas y no son particularmente adecuadas para aplicaciones de MP.

El Proceso de Trituración Mecánica tiene gran aplicabilidad en la producción de polvos extremadamente finos. Esto se alcanza con la pulverización mecánica en un molino de bolas.

La molienda en *molinos de bolas, martillos, trituradoras, etc.*, es un medio para producir polvos casi con cualquier grado de finura a partir de metales frágiles o maleables. Los granos de carburo de tungsteno se pulverizan de esta forma. Algunos metales maleables se muelen con un lubricante en hojuelas, las cuales no son adecuadas para el moldeo pero se usan en pinturas y pigmentos.

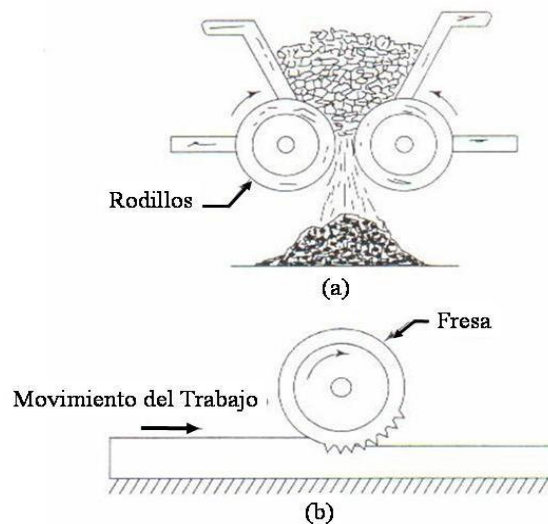


Figura 3.6. Desintegración Mecánica (a) Trituración, (b) Fresado. (Bawa, 2007)

### ***Aleación mecánica.***

En la aleación mecánica se mezclan polvos de dos a más metales puros en un molino de bolas, como se ilustra en la **Figura 3.7**. Debido al impacto de las bolas duras, los polvos se fracturan y se unen por difusión, formando polvos de aleaciones. La fase dispersa puede producir el reforzamiento de las partículas o

proporcionar propiedades eléctricas o magnéticas especiales al polvo.

(Kalpakjian, 2008)

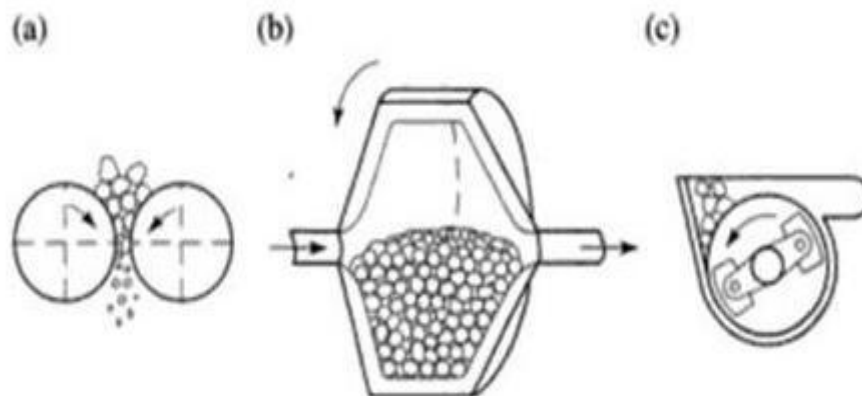


Figura 3.7 Métodos de Trituración Mecánica para obtener partículas finas: (a) Pulverización con Rodillo; (b) Molino de Bolas; (c) Molino con Martillos. (Kalpakjian, 2008)

### **Reducción química.**

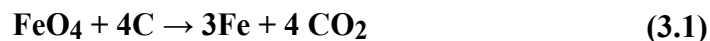
La reducción de óxidos metálicos (*es decir, la eliminación del oxígeno*) utiliza gases, entre ellos el *hidrogeno y el monóxido de carbono*, como agentes reductores. Por este medio, óxidos metálicos muy finos son reducidos al estado metálico. Los polvos producidos son esponjosos, porosos y tienen formas esféricas o angulares de tamaño uniforme.

La reducción química comprende una serie de reacciones químicas que reducen los componentes metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrogeno o monóxido de carbono. El agente reductor se produce para combinarlo con el oxígeno del compuesto y liberar el elemento metálico. Por este método se producen polvos metálicos de hierro, de tungsteno y de cobre. Otro procesó químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza. Los polvos producidos por este método se ilustran en la fotomicrografía de la **Figura 3.8**.

Puede hacerse que el níquel o el hierro reaccionen con monóxido de carbono, para formar carbonilos metálicos como el  $(Fe(CO)_5)$  y el  $Ni(CO)_4$ , estos

se descomponen en polvos de metal de alta pureza, de grano uniforme de pequeño tamaño y partículas densas y redondas. Los polvos de carbonilo son mas costosos pero son mas fáciles para trabajar que otras formas. Por ejemplo, los compactos e carbonilo de hierro son tan y dúctiles cuando se sinterizan a 650 °C como otros compactos de hierros sinterizados a 1100 °C. Sirven bien para hacer cintas continuas de polvo y para componentes electrónicos críticos pero principalmente se añaden polvos para agregar resistencia y ductilidad.

El proceso de reducción química se emplea para producir polvos de metales que tienen un alto punto de fusión, como el cobalto, níquel, tungsteno, molibdeno y hierro. En este proceso se calientan óxidos metálicos en una corriente de hidrogeno para reducirlos a polvo; se pueden obtener tamaños extremadamente finos de partículas. **Figura 3.8.** Las partículas de los metales que se obtienen por medio de la reducción, que tienen una naturaleza similar a las de las esponjas, son ideales para aplicar bajas presiones debido a su suavidad y plasticidad. Los polvos puros de plata y cobre se producen por precipitación. La reducción del hierro se lleva a cabo calentando oxido de hierro con carbón. Al hierro producido de esta manera se le llama hierro esponja.



En polvos metálicos de bajo punto de fusión y de ebullición, como el zinc, cadmio y magnesio, se producen por condensación, lo que implica alimentar una varilla de metal a una flama de alta temperatura que vaporiza el metal. Luego, las gotas de vapor del metal se hacen pasar por una superficie fría del material, donde el metal puro se condensa en forma de polvo. Este método no es económico para llevar a cabo a una producción de polvo a gran escala.

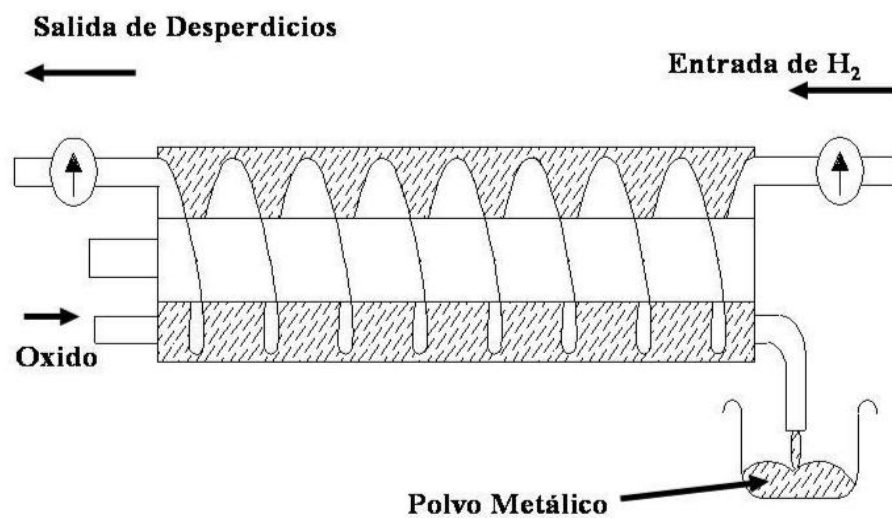


Figura 3.8 Reducción de polvos Metálicos. (Bawa, 2004)

Para este proceso se acostumbra utilizar como materia prima metales que ya hayan sido pulverizados. La finura de los polvos producidos por este método, le ha representado un incremento en su uso sobre todo para la fabricación de polvos finos para el moldeo por inyección (Método nuevo de la metalurgia de polvos).

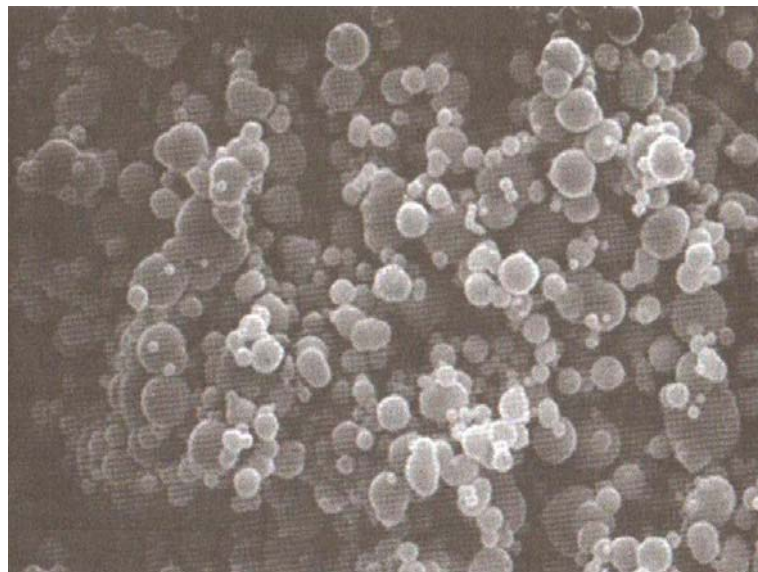


Figura 3.9 Polvos de hierro producidos por el petacarbonilo de hierro; los tamaños de partícula fluctúan de 0,25 a 3,0  $\mu$  m. (Groover, 1997) Pg. 401.



### ***Métodos diversos.***

Otros métodos que se utilizan de manera poco común para hacer polvos son:

- Precipitación de una solución química.
- Producción de virutas finas de metal por medio de maquinado.
- Condensación de Vapor.

### ***Precipitación de elementos mecánicos.***

Los procesos químicos incluyen la precipitación de elementos metálicos de sus sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto se pueden producir por este método.

La deposición electrolítica utiliza soluciones acuosas, o sales fundidas. Los polvos producidos se encuentran entre los más puros existentes.

Desarrollos mas recientes incluyen las técnicas basadas en *procesos metalúrgicos extractivos de altas temperaturas*, que se basan en la reacción de halogenuros volátiles (compuesto de halógeno y un elemento electropositivo) con metales líquidos y la reducción controlada y reducción/carburación de óxidos sólidos.

### ***Nanopolvos.***

Los desarrollos mas recientes incluyen la producción de *nanopolvos de cobre, aluminio, hierro, titanio y diversos metales*. Debido a que estos polvos son *pirofóricos* (se enciende de manera espontánea) o se contaminan de inmediato al exponerlos al aire, se embarcan como lodos espesos bajo hexano gaseoso (que por si mismo es altamente volátil y combustible).

Cuando el material se somete a una deformación plástica mediante compresión y cizallado a niveles de esfuerzo de 5500 MPa durante el proceso de los polvos, se reduce el tamaño de las partículas, en tanto que el material queda libre de poros y posee propiedades mejoradas.

### ***Polvos Microencapsulados.***

Estos polvos metálicos se recubren por completo con un aglutinante. Para aplicaciones eléctricas (como los componentes magnéticos de bobinas de ignición y otras aplicaciones de pulso de C y CD), el aglutinante actúa como aislante, el cual evita que la electricidad fluya entre partículas, reduciendo así las pérdidas por corrientes de eddy (corrientes parásitas). Los polvos se compactan mediante prensado a temperatura media y se utiliza con el aglutinante todavía existente.

### **Referencias Bibliográficas**

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

Doyle L; Keyser C; Leach J; Scharader G; Singer M. Materiales y procesos de Manufactura para Ingenieros. Tercera Edición. Prentice Hall Hispanoamericana. Méjico, 1988.

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.

Krur f.Steve, Check F. Albert. Tecnología de las Maquinas Herramientas. Alfaomega Grupo Editor, S.A. Quinta Edición. México, 2006.

Salán Ballesteros Nuria Maria. Tecnología de Proceso y Tecnologías de Materiales. Ediciones UPC, España, 2005.

### **Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.**

1. Como es el método de selección para producir polvos metálicos.
2. ¿Cuál es el tamaño de las partículas en los procesos de MP?

3. ¿Cuáles son las principales clases de polvos metálicos en MP?
4. Mencione son las características de los polvos metálicos en MP.
5. ¿Cuántos procesos de fabricación de polvos existen en MP?
6. Defina el proceso de producción de polvos por Atomización en la MP?.
7. ¿Cuáles son los diferentes métodos del proceso de Atomización en la MP?
8. Que significa Desintegración Mecánica (Pulverización) en los procesos de MP?
9. ¿Cuál es el significado de Aleación Mecánica en la MP?
10. ¿Cómo se describe la Reducción Química en la MP?
11. ¿Qué otros métodos se usan para la producción de Polvos Metálicos?

## Capítulo 4. Mezcla de Polvos Metálicos.

La operación de combinación o mezcla de los polvos metálicos se lleva a cabo antes de aplicar la presión. En esta etapa se agregan algunos lubricantes, materiales de unión y agentes volátiles para dar la porosidad deseable. Se realiza un mezclado completo para obtener una distribución uniforme del tamaño de la partícula.

El principal elemento añadido en la mezcla de polvos es *el lubricante*, cuya finalidad es incrementar la fluidez del sistema para que la densidad del componente acabado sea elevada y homogénea. Pues añadiendo lubricante, se reduce la fricción entre las paredes de la matriz y el punzón, entre las partículas de polvo, entre las partículas y las paredes, entre las partículas durante la deformación y entre el contacto y las paredes de la matriz.

La mezcla de polvos consiste en la homogenización en tamaño micro de diferentes sustancias con diferentes propiedades (**ver Figura 4.1**). Por ejemplo una buena mezcla de polvos con diferentes colores da como resultado un nuevo color. Una mezcla de metales con polímeros cambia las propiedades como viscosidad, densidad, etc.

En la **MP** las mezclas se utilizan en un paso inicial del proceso para darle las características de fricción entre los polvos adecuadas para un buen reordenamiento de estos en el caso de la compactación, y en el caso de inyección para agregar la matriz polimérica para inyectar los polvos con máquinas de inyección. Por lo tanto un conocimiento adecuado de esta etapa es crucial para una buena repetibilidad del proceso, y buenas características de los productos finales.

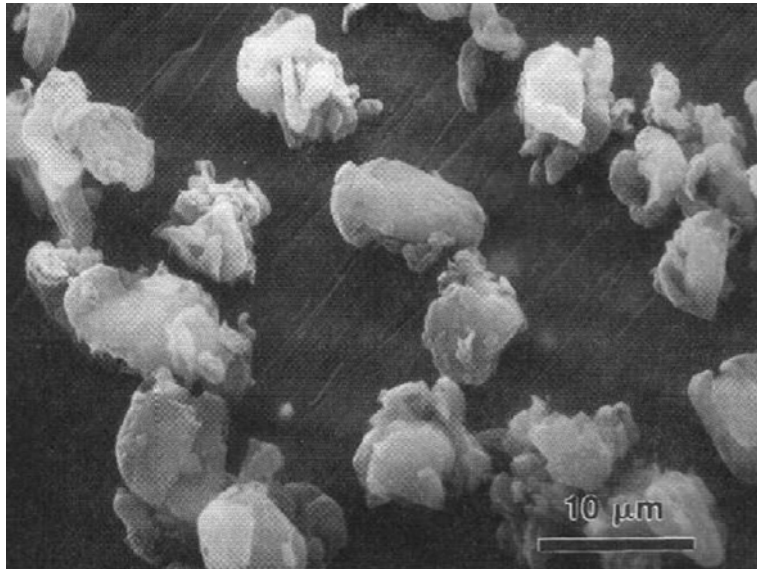


Figura 4.1 Foto en SEM de Lubricantes para mezclar con hierro. (Randall, 1998)

La operación de mezcla se lleva a efecto con mezcladores en forma de doble cono o de V. los tiempos de mezclado suelen ser del orden de una hora para los polvos de hierro y estereato y del orden de un día para la mezcla de carburo de wolframio con cobalto, parafina y acetona.

Si la mezcla se realiza en fase líquida, se separa el disolvente por volatilización o mediante separadores que proyectan la mezcla en una especie de embudo invertido y, por diferencia de densidades separan el disolvente.

Mediante condiciones mecánicas muy severas, se consiguen mezclas de polvos elementales tan perfectas que las futuras piezas sinterizadas tienen propiedades equiparables a las de las piezas macizas.

Los polvos metálicos se suelen mezclar en tambores a fin de conseguir una distribución homogénea de partículas, evitando que las partículas mayores queden abajo y, por encima las de menor tamaño. Si se han mezclado distintos tipos de polvo o bien se han añadido aditivos (lubricantes o aglutinantes), la mezcla permite una correcta homogenización de la composición deseada. El polvo que proviene de los tambores mezcladores, totalmente homogenizados, se introduce en

un recipiente, que reproduce la forma del componente que se desea elaborar (molde), y se somete a vibración a fin de conseguir una correcta distribución del polvo, maximizando la capacidad de empaquetamiento. En este momento se puede determinar *la densidad aparente* del polvo, que dependerá en gran medida de sus características. Así una distribución irregular de partículas favorece una densidad elevada, ya que los huecos son ocupados por partículas más pequeñas.

La mezcla o combinación de polvos metálicos es el siguiente paso en el procesamiento de la **MP**. Se realiza con los siguientes propósitos:

- Se pueden mezclar polvos de diferentes metales y otros materiales con el fin de proporcionar propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto de la **MP**. Obsérvense que se pueden producir combinaciones de metales aleándolos antes de elaborar un polvo, o se pueden producir por mezclas. La combinación adecuada es fundamental para garantizar la uniformidad de las propiedades mecánicas en toda la pieza
- Aun cuando se utiliza un solo metal, los polvos pueden variar significativamente en tamaño y forma, por lo que deben mezclarse para obtener uniformidad entre las piezas. La combinación ideal es aquella en que todas las partículas de cada material (y de cada tamaño y morfologías) se distribuyen de manera uniforme.
- Se pueden mezclar lubricantes con los polvos para mejorar sus características de flujo. Reducen la fricción entre las partículas metálicas, mejoran el flujo de los polvos metálicos en las matrices y mejoran la vida de la matriz. En general, los lubricantes son ácido esteárico o estearato de zinc en una proporción de 0,25 al 5 por ciento en peso.
- Se utilizan otros aditivos: aglutinantes (*como los moldes de arena*) para desarrollar suficiente resistencia en verde (*crudo*) y también se pueden usar aditivos para facilitar el sinterizado.
- La mezcla de polvos debe efectuarse en condiciones controladas para evitar la contaminación o el deterioro. Este se debe a un mezclado excesivo, que puede alterar la forma de las partículas y hacer que se endurezcan por

trabajo, dificultando así la operación posterior de compactado. Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósfera inertes, *para evitar la oxidación* o en líquidos *que actúan como lubricantes y hacen que la mezcla sea mas uniforme*. Existen diversos tipos de equipo de *mezclado* (**Figura 4.2**).

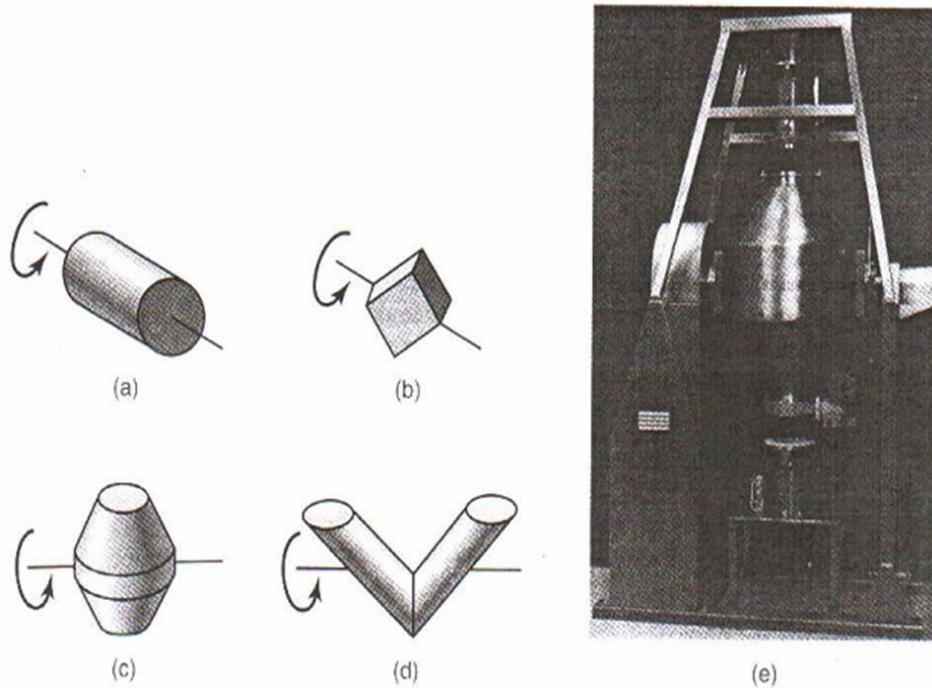


Figura 4.2 (a) a (d) Algunas figuras comunes de recipientes para combinar o mezclar polvos. (e) Mezclador adecuado para mezclar polvos metálicos. Dados que son abrasivos, los mezcladores se basan en la rotación o volteado de figuras cerradas, al contrario del uso de agitadores agresivos. (Kalpakjian, 2008)

### ***Mezclado y Combinación de Polvos.***

Para lograr buenos resultados en la compactación y en el sinterizado, *los polvos metálicos necesitan homogeneizarse* perfectamente antes del proceso. Los términos mezclados y combinación se usan en este contexto. ***El mezclado*** se refiere a la mezcla de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. ***La combinación*** se refiere a la mezcla de polvos de diferente composición química. Una ventaja de esta tecnología es combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos. Algunas alternativas se ilustran en la **figura 4.3**, estas son: (a) *por rotación en tambor*, (b) *por rotación en un recipiente de cono doble*, (c) *por agitación en un mezclador de tornillo* y (d) *por agitación en un mezclador de paletas*.

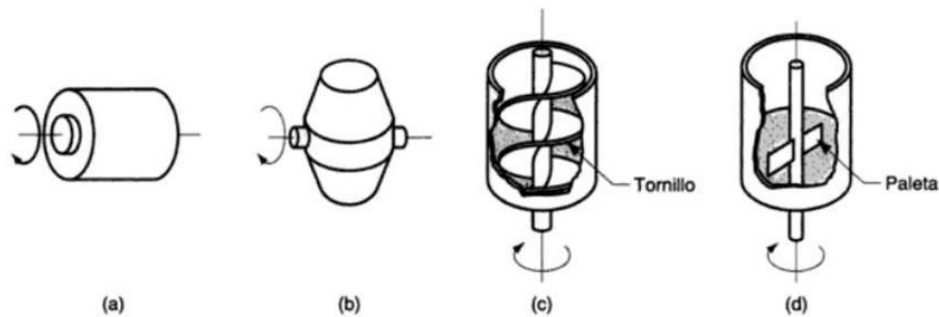


Figura 4.3 Varios dispositivos de Mezclado y Combinación: (a) Tambor Rotatorio; Doble Cono Rotatorio; (c) Mezclador de Tornillo y (d) Mezclador de Paletas. (Groover, 1997)

En estos dispositivos hay más ciencia de la que se puede sospechar. Los mejores resultados se obtienen cuando se llenan entre un 20 y 40 por ciento. Los recipientes se diseñan generalmente con baffles internos u otras formas para impedir la caída libre durante el mezclado de polvos de diferentes tamaños, debido a que en las *variaciones en la velocidad de asentamiento* de los diferentes tamaños *genera segregación*, precisamente lo contrario de lo que se busca en el mezclado. No es conveniente que los polvos se sometan a vibración, ya que esto produce segregación.

Generalmente se añaden otros ingredientes a los polvos metálicos durante el paso de mezclado o combinación. Estos aditivos son:

- 1) **Lubricantes.** Como el estereato de zinc y el aluminio en pequeñas cantidades para reducir *la fricción* entre las partículas y en las paredes del dado durante la compactación.
- 2) **Aglutinantes.** Que se requieren en algunos casos para lograr una resistencia adecuada en las partes prensadas pero no sinterizadas.
- 3) **Defloculantes.** Que inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar las características de flujo durante la alimentación.



En la etapa del mezclado se debe alcanzar una mezcla homogénea de los materiales y añadir el lubricante. La principal función del lubricante es la reducir la fricción entre el polvo metálico y las superficies de las herramientas utilizadas en el proceso. Además, el lubricante debe deslizarse durante la compactación, y así ayudar a conseguir una densidad uniforme en todo el compactado (pieza). De igual importancia resulta el hecho de que la reducción de fricción también ayuda a la eyección del compactado minimizando la posibilidad de formación de grietas.

Se debe tener gran cuidado en la escogencia del lubricante, debido a que una mala escogencia puede resultar en efectos adversos en las durezas del compactado antes y después de sinterizar.

En la mezcla de polvos se puede hablar de dos tipos de sustancias importantes: los polvos metálicos o cerámicos del material que se necesite, y lubricantes. Cada polvo del material que se requiere tiene características importantes para la forma como se va a sinterizar, para la forma como se va a compactar. Además de esto, hay que agregarle aditivos que desaparecerán casi completamente durante el proceso. Estos lubricantes cambian la densidad y viscosidad de los polvos puros. Por lo tanto es importante conocer que pasará con estos aditivos en el momento de su remoción (ya sea químicamente por disolución química, o por evaporación de este al elevarse la temperatura a su punto de ebullición). Usualmente en el caso de evaporación quedan residuos que se cuantifican como cenizas (ash) y se mide su contenido. Se quiere que este valor sea lo mínimo pues pasa a ser un contaminante en el proceso que afectará por lo tanto la calidad del producto final (ver **Tabla 4.1**).

Otra precaución que se debe tener en esta etapa del proceso es la de no sobre mezclar. El sobre mezclar aumenta la densidad aparente de la mezcla y reduce la dureza de la pieza antes del sinterizado.

Tabla 4.1. Características de los Lubricantes.

Nombre Común	Oxido	Cenizas (%)	Temperatura Softening (°C)	Temperatura de Fusión (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Estereato de Calcio	CaO	9	115-120	160	1,03

Acravax C Ethylenebisstearamide	-----	2	120	144	1,05
Duramax B-1013 Polymethylmethacrylate	-----	9	105	160	1,1
Glycotube PM.100	ZnO	1	120	137	1,06
Estereato de Litio	Li <sub>2</sub> O	5	195	220	1,01
Parafina Wax	-----	1	85	99	0,93
Acido Esterico	-----	2	45	55	0,85
Teflón Polytetrafluoroethylene	-----	0	275	325	2,1
Estereato de Zinc	ZnO	14	110	120	1,09

(Randall, 1998)

El tiempo de mezcla va a ser también muy importante, pues dependiente del tamaño que se obtenga de los aditivos (usualmente vienen en polvos de mayor tamaño que se debe moler hasta obtener los tamaños deseados) y su homogenización, se obtendrá el mejor empaquetamiento, máxima densidad aparente, y homogeneidad de propiedades tanto para los compactados como las piezas finales. Si se forman aglomeraciones se generarán poros en las piezas finales bajando la resistencia de las piezas. Estas aglomeraciones pueden formar burbujas de gas que son capaces romper la pieza en el momento de sinterizar. Experimentalmente se puede encontrar el tiempo dada una velocidad de mezcla donde se estabiliza la homogenización y tamaño de los aditivos. Un ejemplo de cómo cambia la densidad aparente se presenta a continuación (**ver Figura 4.4**).

Cuando se ha conseguido la adecuada mezcla de polvos, y en relación con la concentración de aditivos se obtendrá una resistencia del compactado mayor o menor según sea el caso; se puede compensar la pérdida de la máxima densidad obtenida con mayor presión, y vale la pena aclarar que existe un valor óptimo para el que se tienen las mejores condiciones de empaquetamiento gracias al lubricante, sin que el mismo afecte las propiedades de las piezas. (**Ver Figura 4.5**)

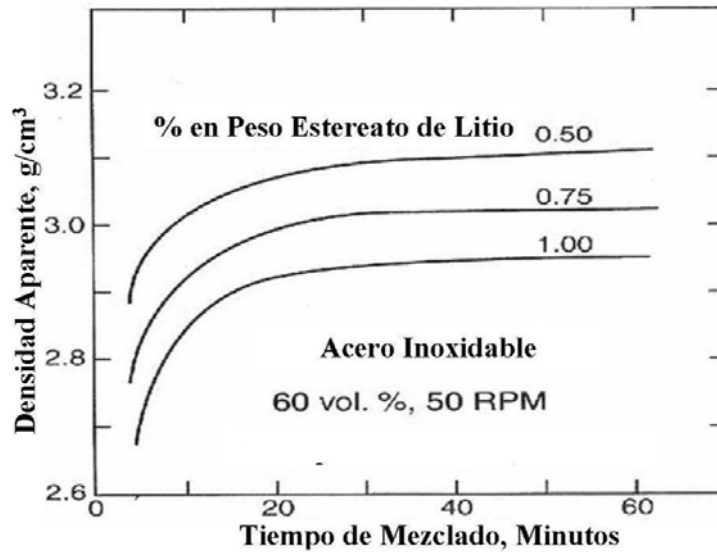


Figura 4.4 Densidades aparentes dependiendo del tiempo de mezclado para acero inoxidable con diferente concentración de ligante. (Randall, 1998)

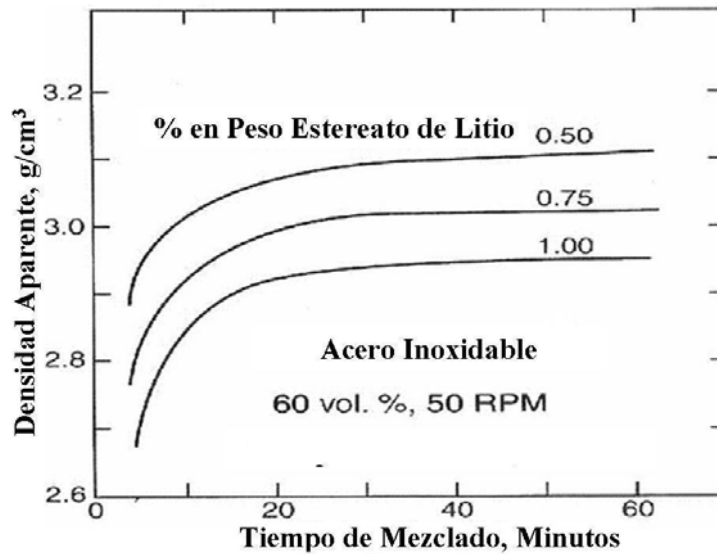


Figura 4.5 Gráfica de densidad del compactado para diferentes presiones y concentraciones de lubricante. (Randall, 1998)

### Referencias Bibliograficas.

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Kalpajian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Education, México, 2008.

Randall M. German. Powder Metallurgy of Iron and Steel. John Wiley & Sons, Inc. USA. 1998.

Salán Ballesteros Nuria Maria. Tecnología de Proceso y Tecnologías de Materiales. Ediciones UPC, España, 2005.

### **Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.**

1. ¿Qué se entiende por Mezclado de Polvos Metálicos?
2. ¿Qué se entiende por Combinación de Polvos Metálicos?
3. ¿Cuáles son los medios mecánicos para las operaciones de Mezclado y Combinación de polvos metálicos?
4. ¿Cuáles son los aditivos que se agregan a los polvos metálicos?
5. ¿Cómo influye el tamaño y la distribución de los polvos metálicos en las piezas fabricadas por MP?
6. ¿Cuál es la función de los Lubricantes que se agregan en la mezcla de los polvos metálicos?
7. ¿Cuál es la función de los Aglutinantes que se agregan en la mezcla de los polvos metálicos?
8. ¿Cuál es la función de los Defloculantes que se agregan en la mezcla de los polvos metálicos?
9. ¿Cuál es la consecuencia directa del Sobre Mezclado en la fabricación de piezas por PM?

## Capítulo 5. Compactado de los Polvos Metálicos.

La manipulación de los polvos, una vez obtenidos estos, esta encaminada a facilitar las etapas de *compactación*, *sinterización* y a mejorar las propiedades del componente acabado. No hay que olvidar que los polvos tienen una naturaleza metálica y que es fácil que reaccionen con el ambiente a través de su superficie. Por otra parte, es preciso tener en cuenta que, debido a la viscosidad de la masa pulverulenta, esta no cumple el principio de Pascal propio de los fluidos.

Debido a la gran afinidad metal-oxígeno, al trabajar con polvos metálicos, es preciso tomar una serie de precauciones destinadas a evitar la oxidación, como son, por ejemplo. El embalaje en recipientes herméticos, cerrados al vacío o con gas inerte; el almacenamiento en locales con humedad controlada, etc.

Los polvos, antes de compactarlos, se tratan químicamente, mecánicamente y térmicamente, según los casos, en las operaciones de *purificación*, *recubrimiento*, *densificado*, *mezclado* y *recocido*.

La compactación consiste en la densificación de los polvos en una matriz mediante presión. La forma de la matriz en la prensa determinará la forma de la pieza final. Entre estas compactaciones se habla de la compactación uniaxial, biaxial, e isostática. Estas consisten en las direcciones en las cuales hay compactación o densificación debida al movimiento relativo entre las partículas (acercamiento entre ellas). Como se puede observar en la siguiente **Tabla 5.1** de acuerdo con el tipo de proceso cambian las condiciones de trabajo y por lo tanto las facilidades o maquinaria necesaria.

---

Tabla 5.1 Opciones de Compactación. (Randall, 1998)

Proceso	Isostática en Frió	Forja Frió	Comp. Matriz	Comp. Explosiva	Comp. Laminada	Comp. Caliente
<b>Presión</b>	Moderada 400Mpa	Muy Alta >800Mpa	Alta 700 Mpa	Muy Alta >1Gpa	Bajo	Alta 700 Mpa
<b>Temperatura</b>	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Muy Alta	Ambiente	Tibio
<b>Herramental</b>	Suave	Duro	Duro	Suave	Duro	Duro
<b>Rata de Deformación</b>	Bajo	Alto	Alto	Muy alto	bajo	Alto
<b>Continuo</b>	No	No	No	No	Si	No
<b>Dirección de Presión</b>	3	1	1	1	1	1
<b>Forma Completada</b>	Moderada a Alta	Moderada	Alta	Baja	Baja	Moderada
<b>Polímetro</b>	No	No	Bajo, 0,5 %	No	Bajo, 0,1 %	Bajo, 0,6 %
<b>Precisión</b>	Bajo Moderado	Moderado Bajo	Alto Extensivo	Bajo muy Bajo	Alto Moderado	Alto Bajo

(Randall, 1998)

La compactación es la etapa donde se presan los polvos mezclados para darles formas dentro de las matrices, como se muestran en la **Figura 5.1**. Los propósitos son obtener forma, densidad y contacto de partícula con partícula necesarios y hacer que la pieza tenga suficiente resistencia para su proceso posterior. El polvo es introducido en la matriz mediante una zapata de alimentación y el punzo superior desciende al interior de la matriz. Las prensas utilizadas son las accionadas por mandos hidráulicos o mecánicos, y por lo general es proceso se realiza a la temperatura ambiente, aunque puede efectuarse a temperaturas elevadas.

A la pieza compactada se le conoce como comprimido crudo o compactado en verde, ya que tiene una resistencia baja.

Las partes crudas (verdes) son frágiles y se pueden desmoronar o dañar con mucha facilidad, esta situación se exagera por medio de prácticas deficientes de prensado. Para obtener resistencias mas elevadas en verde, el polvo se debe proporcionar de manera adecuada a la cavidad de la matriz y tienen que desarrollarse las presiones adecuadas en toda la pieza.

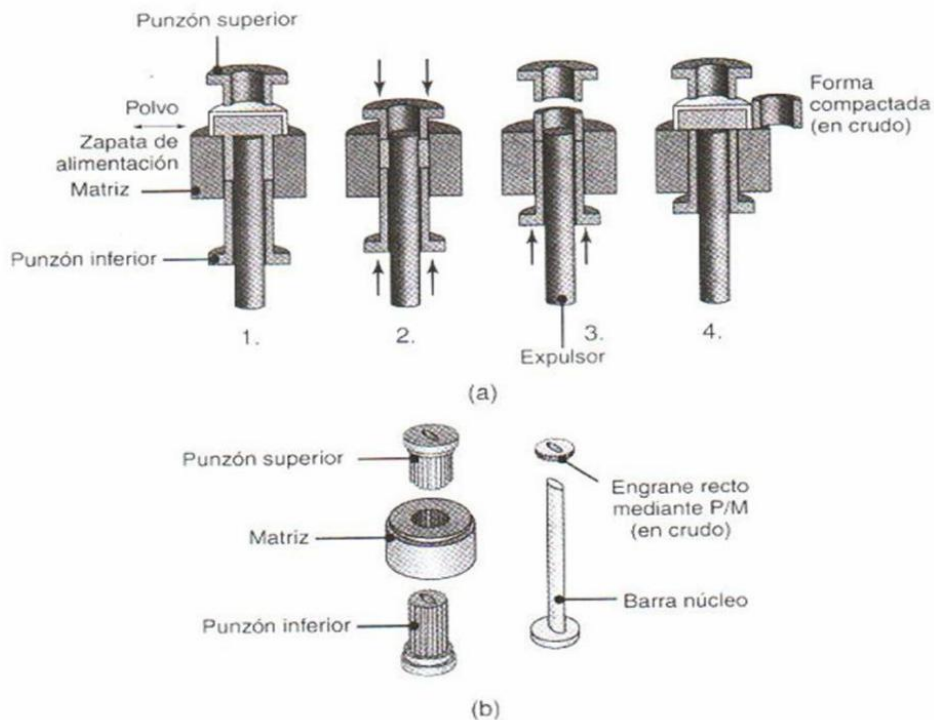


Figura 5.1 (a) Compactación de un Polvo para formar un Buje. A la parte de Polvo prensada se le conoce como compacto crudo o verde. (b) Juego Típico de Herramental y Matriz para compactar un engranaje recto. (Kalpajian, 2008)

La mezcla debe ser presionada lo suficiente para que soporte la fuerza de la eyección del molde y que pueda ser movida antes del sinterizado. El compactado es una etapa muy importante ya que la forma y las propiedades mecánicas finales de la pieza están fuertemente relacionadas con la densidad al presionar. Debido a que los polvos metálicos bajo presión no se comportan como líquidos, la presión no es transmitida uniformemente por el molde y hay virtualmente cero flujo lateral. Por esto, la obtención de buenas densidades en la pieza depende en un alto grado del diseño de la herramienta que aplica la presión. Las siguientes son consideraciones que se deben tener al diseñar una herramienta para el compactado.

En forma teórica si un polvo se comprime lo suficiente, alcanzara el 100 % de la densidad y resistencia del metal padre, cuando menos al ser sinterizado. En ciertas partes esto se logra, en una manera por la recompresión después de la compresión inicial y el presintetizado. Las altas presiones y en particular las

operaciones adicionales son costosas y no se garantizan para partes que no requieran tener alta resistencia. En otro extremo de la escala de densidad, no se necesita poca o ninguna presión para las partes porosa.

***Relación entre longitud y ancho.*** La presión aplicada y por ende la densidad decrece a lo largo de la pieza. La compactación de doble lado (se aplica presión por los dos lados de la mezcla) mejora la distribución de la presión pero sigue dejando una región en la mitad de la pieza con menos densidad. Por esto relaciones entre largo y ancho de piezas superiores a 3:1 no son recomendadas.

- Cambios bruscos en las secciones se deben omitir, debido que producen mas estrés, lo que puede llevar a fracturas en la pieza.
- La complejidad en la forma de la pieza y el número de operaciones de presión que se necesitan entran en juego para la velocidad en que se puede fabricar una pieza.

La mayoría de las partes se comprimen en frío. Para obtener mas densidad y resistencia las partes pueden comprimirse en caliente o forjarse (martillando) subsecuentemente. La compresión en caliente produce mayor exactitud, pero la forja da mayor resistencia y cuesta más.

La forma de la partícula adecuada, el tamaño y la distribución del tamaño y la selección cuidadosa y la mezcla son necesarios para obtener una parte comprimida satisfactoria. Las mejores ligas se obtienen entre partículas abruptas, pero las partículas redondas fluyen mejor en el molde y bajo presión. La forma en que el polvo llena el dado determina la velocidad de operación. Puede agregarse estearato de zinc para lubricar el dado y las partículas para disminuir el desgaste y ayudar en la compactación. Se volatiliza en el sinterizado y ayuda a mantener conectados los poros.

El metal en polvo comúnmente se comprime en una cavidad de dado para tomar la forma de la parte mediante uno o más punzones. La calidad depende de empacar con uniformidad el material. El metal en polvo no fluye con facilidad en las esquinas y los recesos como los fluidos. La fricción es alta entre las partículas





y las paredes del dado. Por lo tanto, un solo punzón no puede compactar uniformemente cualquier parte, sino solo las más simples. Las partes que en particular tienen escalones, paredes delgadas, bridas, etc., deben comprimirse con dos o más punzones para distribuir uniformemente la presión a través de las secciones. En la **figura 5.2** se presenta un ejemplo simple. Las partes más complejas pueden requerir hasta dos movimientos superiores y tres o cuatro movimientos inferiores del punzón e incluso ciertos movimientos laterales al corazón se suministran por la prensa. Algunas partes no pueden hacerse con el equipo disponible.

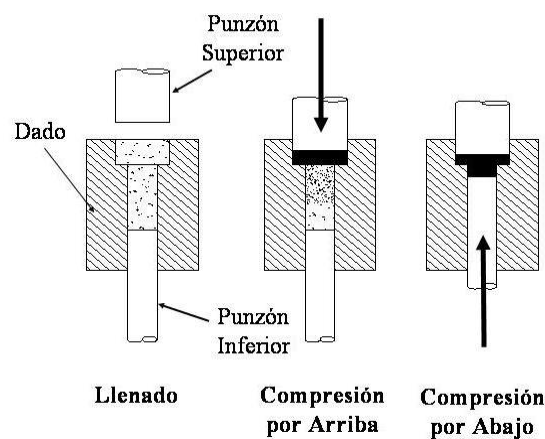


Figura 5.2 Pasos en la Compresión Simple para hacer una parte de metal. (Doyle et al, 1988)

El método convencional de compactación es el prensado, en el cual dos punzones opuestos aprietan el polvo en un dado. Los pasos del ciclo de prensado se muestran en la **Figura 5.3.**, a la parte prensada se le llama **compacto verde**, el término verde significa que la parte no está completamente procesada. Como resultado del prensado, la densidad de la parte, llamada **densidad verde**, es mucho más grande que la densidad volumétrica inicial. **La resistencia verde** de la parte cuando es prensada es adecuada para el manejo, pero mucho menor que la que se logra después del sinterizado.

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un reempacado de los polvos en un arreglo más eficiente, elimina los puentes que se forman durante el llenado, reduce el espacio entre los poros e incrementa el número de puntos de contactos entre las partículas.

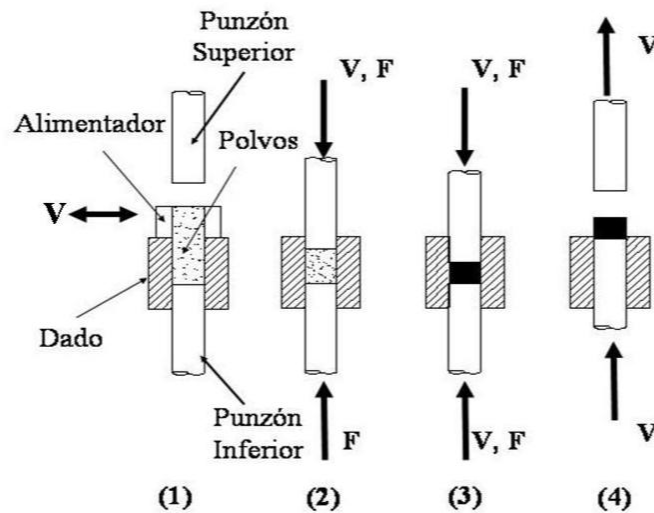


Figura 5.3 prensado método convencional de compactación de polvos metálicos en metalurgia de los polvos (1) llenado de la cavidad del molde de polvos, por alimentación automática en la producción; (2) posición inicial, (3) final de los punzones durante la compactación y (4) remisión de la parte (Groover, 1997)

Al incrementar la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto interparticular aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción posterior del volumen de poros. La progresión se ilustra en la **Figura 5.4** para partículas iniciales de forma esférica.

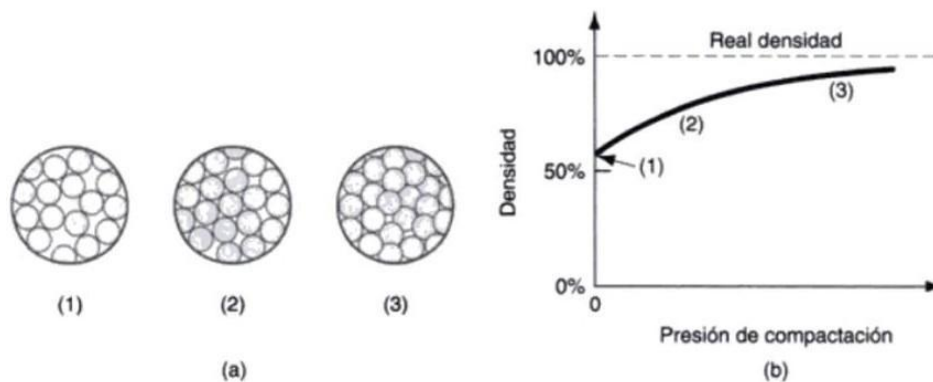


Figura 5.4 (a) Efecto de la Presión Aplicada durante la Compactación: (1) Polvos sueltos iniciales después del Llenado, (2) Reempacado y (3) Deformación de las Partículas; y (b) Densidad de los Polvos en función de la Presión. La secuencia corresponde a los pasos (1), (2) de la figura 18.9 (Groover, 1997)

También se muestra la densidad asociada, representada para las tres vistas como una función de la presión aplicada.

La densidad del comprimido verde depende de la presión aplicada **Figura 5.5**. Conforme aumenta la presión de compactación, la densidad del comprimido se aproxima a del metal en su forma sólida. Un factor importante en la densidad es el tamaño de las partículas: si todas son del mismo tamaño, siempre habrá cierta porosidad al momento de compactarlas; en teoría, una porosidad de por lo menos 24 por ciento en volumen. *Al introducir partículas mas pequeñas en la mezcla de polvo se llenan los espacios entre las partículas grandes de polvo y de esa manera se obtiene una densidad superior en el compactado.*

La fricción entre los granos del polvo y las paredes del molde reduce progresivamente la transmisión de presión y por lo tanto la densidad obtenida a lo largo de la pieza. Estos efectos se pueden minimizar con la ayuda de buenos lubricantes.

La curva de Densidad vs. Presión aplicada sigue una relación hiperbólica. Por esta relación se debe buscar la presión a la que la densidad es óptima ya que una mayor presión presentaría un efecto negativo en la densidad.

El compactado del polvo a temperaturas normales y sin un ambiente controlado es muy útil, por su bajo costo, para la fabricación de muchas piezas; sin embargo tiene grandes limitantes en materia de la densidad del compactado. Por esta razón se han desarrollados varios métodos que mejoran esta y otras propiedades del compactado.

Cuando mas alta sea la densidad de la pieza compactada, mas elevada será su resistencia y modulo elástico (**Figura 5.5.b**) la razón es que cuando mas alta es la densidad mas alta es la cantidad de metal solidó en el mismo volumen, y por lo tanto su resistencia es mayor (resistencia a fuerzas externas). Debido a la fricción entre (a) las partículas metálicas del polvo y (b) las superficies del punzón y las paredes de la matriz, la densidad en el interior de la parte puede variar de forma considerable. Esta variación se puede minimizar con el diseño adecuado del punzón y de la matriz y mediante el control de la fricción.

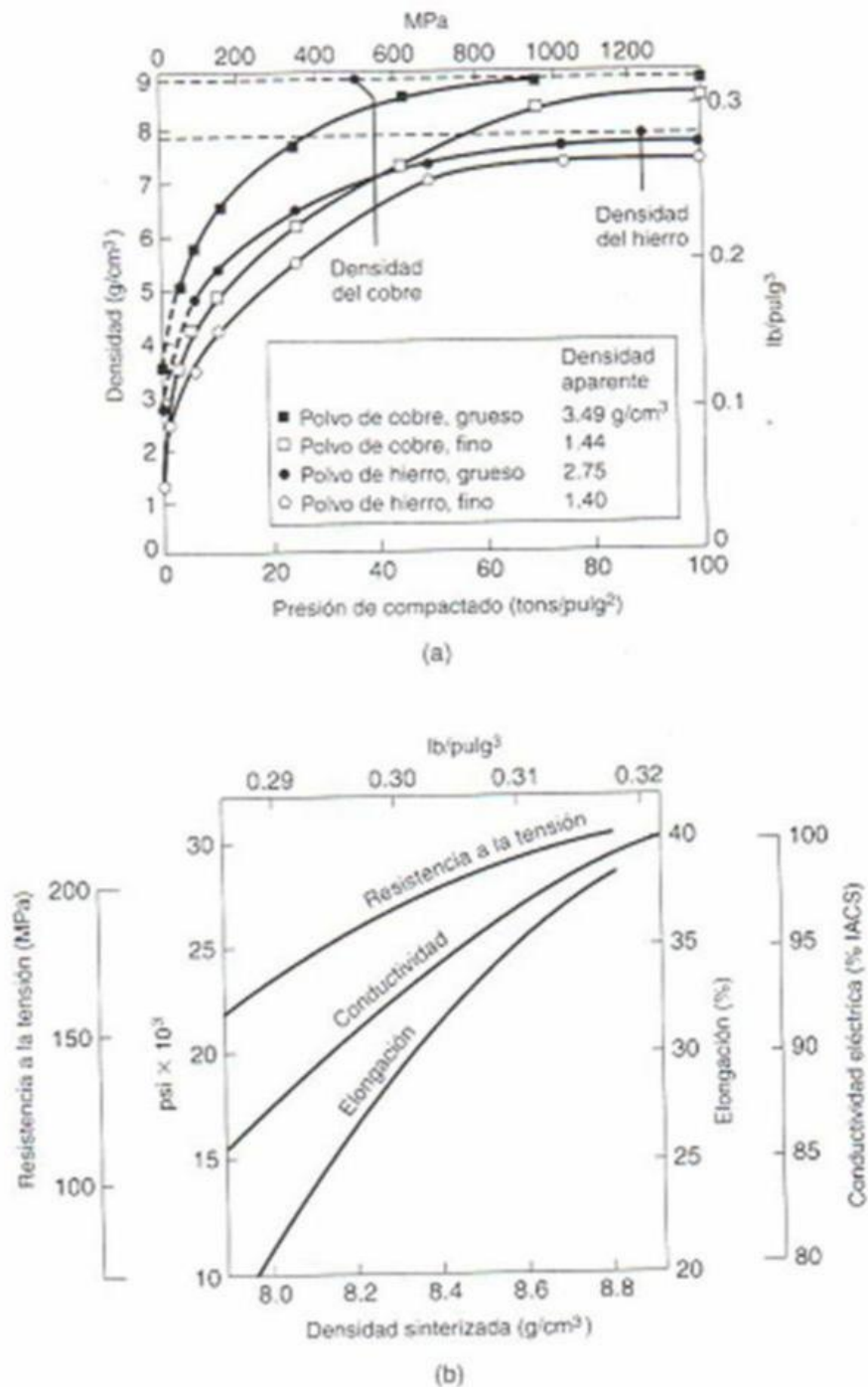


Figura 5.5 (a) Densidad de Compactado de polvo de cobre y hierro en función de la presión de compactado. La densidad influye en gran medida en las propiedades mecánicas y físicas de las partes de PM. (b) Efecto de la densidad en la resistencia a la tensión, la elongación y la conductividad eléctrica del polvo de cobre. (Kalpakjian, 2008)

Por ejemplo, podría ser necesario utilizar punzones múltiples con movimientos independientes, a fin de garantizar que la densidad sea más uniforme **Figura 5.6**. Sin embargo la variación en las densidades puede ser deseable en

componentes como engranajes, levas, bujes y partes estructurales. Por ejemplo, es posible aumentar la densidad en lugares críticos en los que son importantes la resistencia elevada y la resistencia al desgaste, y reducirla en donde no lo son.

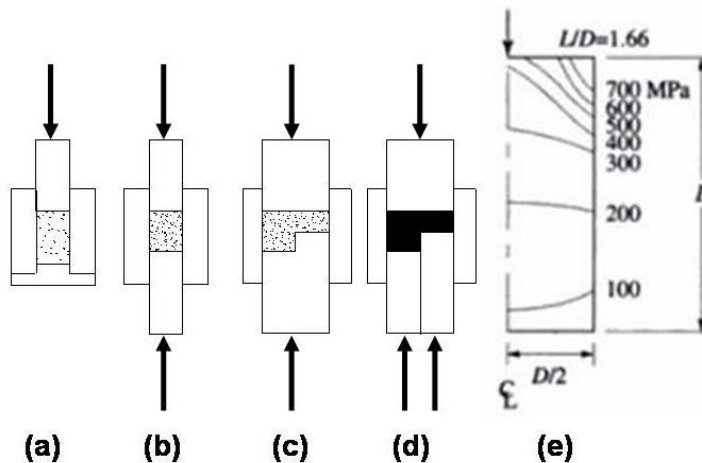


Figura 5.6 Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices. (a) Prensa de Acción Simple; (b) y (d) Prensa de Doble Acción. Obsérvese en (d) la mayor uniformidad de la densidad al prensar con dos punzones en movimiento independiente, en comparación con (e), Perfiles de Presión en polvo de cobre compactado en una prensa de Acción Simple. (Kalpakjian, 2008)

### ***Etapa de compactación.***

La forma de compactar es la que permite mayor o menor homogeneidad en la compactación. Esto va a ser muy importante para fases posteriores del proceso, ya que de esto depende la homogeneidad en la densidad por toda la pieza y consecuentemente su resistencia, las contracciones y deformaciones en el momento de la sinterización, y por lo tanto el éxito o no del proceso.

Dependiendo de la complejidad de la geometría se puede clasificar el proceso de compactación como de Nivel I, II, III o IV.

Las características de cada nivel son las siguientes:

**Nivel I:** Partes de espesor delgado con cualquier contorno pero **un solo** nivel y una sola Dirección de Compactación.

**Nivel II:** Partes de cualquier grosor y cualquier contorno pero **un solo** nivel de compactación y dos Direcciones de Compactación.

**Nivel III:** Partes con cualquier grosor y cualquier contorno pero **dos Direcciones de Compactación.**

**Nivel IV:** Partes con cualquier grosor y cualquier contorno de **múltiples direcciones de compactación y varios niveles.**

En la siguiente **figura 5.7** se ilustra un proceso de compactación donde se observa (a) el proceso con un solo punzo inferior y (b) el mismo proceso pero con dos punzones inferiores independientes. Esto significa una sola dirección de compactación y dos direcciones de compactación.

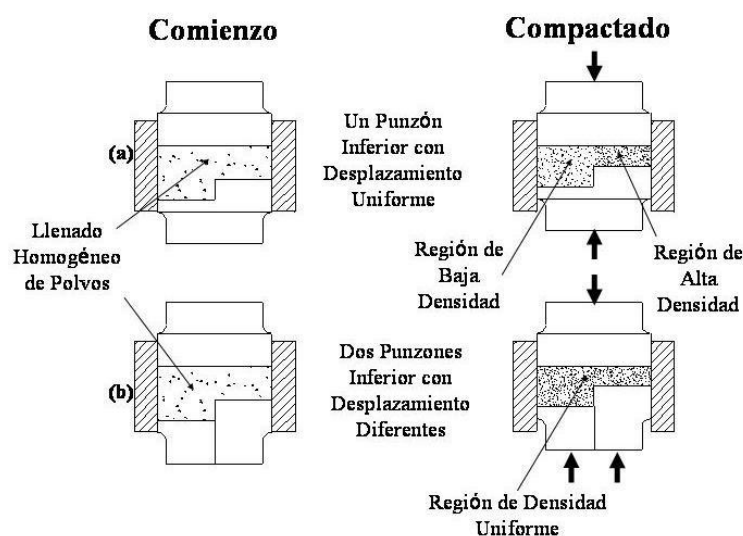


Figura 5.7 Forma de compactar debido al comportamiento de los polvos y su movimiento relativo para la compactación. (Randall, 1998)

### ***Etapa de Remoción de las Piezas y Punzones.***

Tras la compactación, será necesaria una fuerza (y por lo tanto presión) para poder eyectar la pieza de la cavidad del dado en la que se encuentra. Esto se debe a la presión radial que provocará una fricción considerable con las paredes. Por esta razón, piezas con geometrías complicadas y contornos con secciones delgadas pueden fracturarse. Para esto es necesario tener en cuenta las propiedades de los verdes o compactados que a su vez dependen del polvo elegido y el porcentaje de lubricante agregado. Entre más lubricante menor resistencia del verde, pero menor fuerza para eyectar la pieza. En la **Figura 5.8** se observa

cuantitativamente este fenómeno. Se puede asociar un modulo de Poisson para explicar el fenómeno.

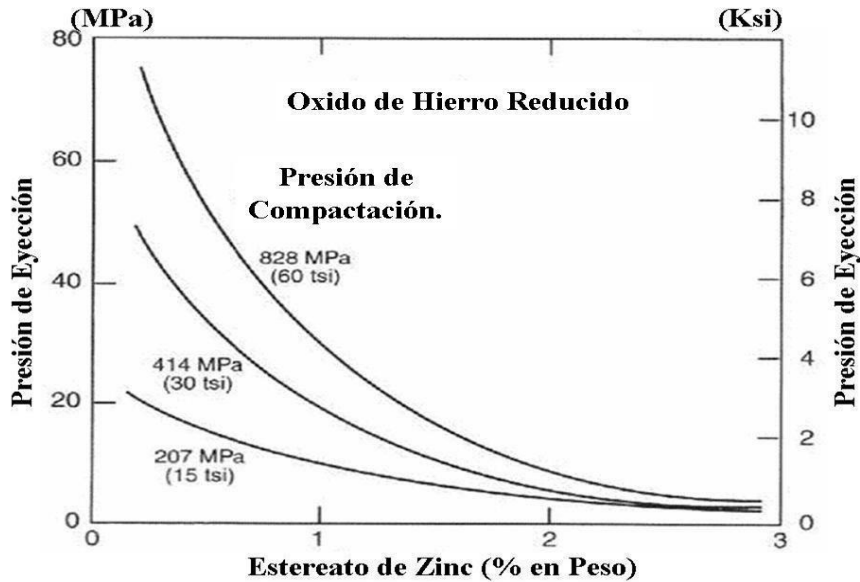


Figura 5.8 Presión de eyección para diferentes concentraciones de lubricante y presiones de compactación. (Randall, 1995)

Lo interesante, es que debido al reordenamiento y deformaciones de los polvos, el tamaño radial de la pieza será mayor que el dado, y por esta razón aparece la fuerza de eyección necesaria. Como se puede observar en la **Figura 5.9**, la diferencia de tamaños entre la pieza dentro del dado y fuera, puede generar grietas en los planos normales a la presión ejercida (plano más débil).

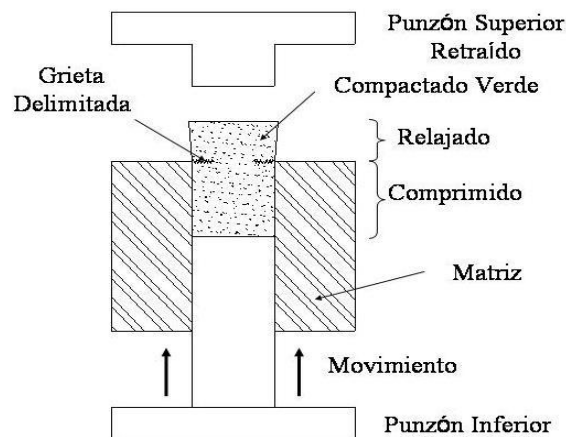


Figura 5.9 Esquema de problema crítico en el momento de remoción del verde. (Randall, 1998)



### ***Propiedades de los Compactados Verdes.***

Existe una relación muy lineal entre la densidad y las propiedades de los verdes. En las gráficas a continuación (ver Figura 5.10) se puede ver la relación con el parámetro de presión ejercida para un tipo de polvo. Esto se puede generalizar como el comportamiento para muchos polvos.

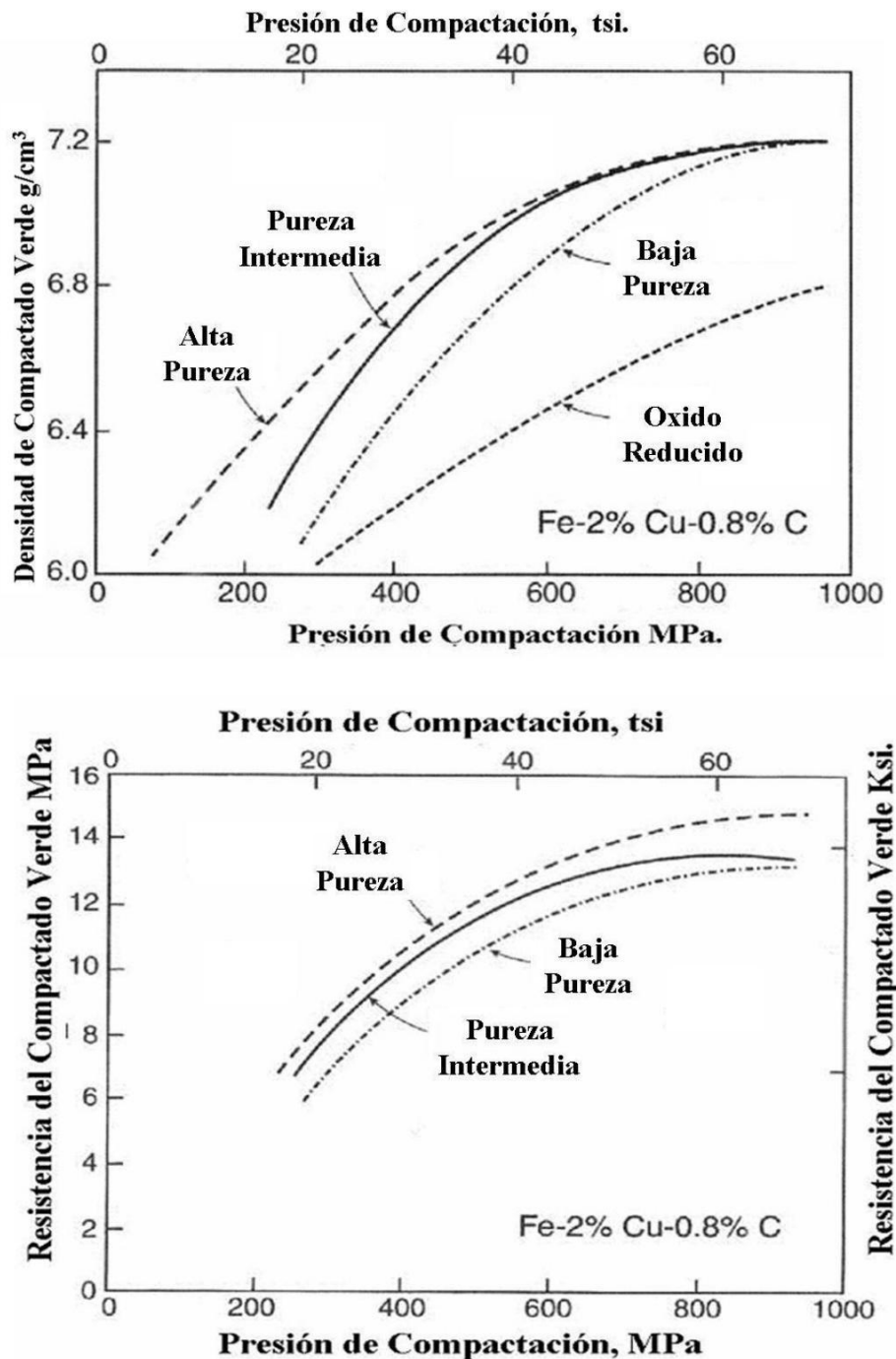


Figura 5.10 Densidad del verde para diferentes presiones y purezas del polvo. (Randall, 1998)

Como se puede ver, la pureza va a afectar las propiedades de los compactados verdes y por lo tanto generará variabilidad en el éxito de la conformación de los verdes. Como es de esperarse, existe una tendencia asintótica tanto de la densidad máxima (empaquetamiento máximo) y por lo tanto de la resistencia del verde (**Ver Figura 5.11**). Pero es importante observar que la presión radial puede llegar a crecer más que el aumento de la resistencia del verde. Por lo tanto a mayores presiones pueden empezar a aparecer grietas en los verdes, aunque mejora la homogeneidad de la densidad de la pieza.

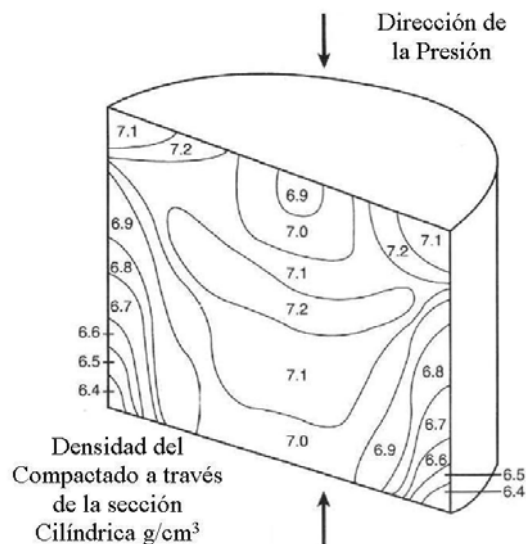


Figura 5.11 Distribución de las densidades dada una compresión en una dirección. (Randall, 1998)

Para obtener piezas de alta complejidad, es importante diseñarlas teniendo en cuenta como van a ser fabricadas en el proceso de polvos, pero tocará probar un poco en el caso que aparezcan problemas en la compactación. En ventaja existe que se pueden variar diferentes parámetros haciendo muy factible casi cualquier contorno.

### ***Compactación Semi-Caliente.***

La compactación semi-caliente nos permite aumentar la densidad del compactado considerablemente con un costo extra muy bajo. Este método utiliza

la maquinaria y el polvo metálico que se usa en el proceso convencional. Lo único que requiere es que la mezcla, el molde y toda la herramienta utilizada para la compactación sea calentada a una temperatura de 130 – 1500 °C. Un lubricante que permite bajar su porcentaje en peso en la mezcla a sólo 0.6 por ciento fue desarrollado para poder realizar la compactación semi-caliente. Además existe un incremento significativo en la fuerza del compactado, reduciendo así los riesgos de daño en su manejo. Al usar este método y una vez la pieza es sinterizada la resistencia de la pieza es incrementada más o menos en un 10 por ciento y consigue un cambio dimensional casi de cero.

### ***Compactado en Caliente.***

A temperaturas elevadas los metales son generalmente más blandos, haciendo posible generalmente que sean compactados a una densidad mucho mayor sin necesidad de elevar la presión. Después de esta operación también es requerido el sinterizado normal debido a que este, en la mayoría de los casos mejora las propiedades de la pieza. El uso de este método se ve reducido por el alto costo que demanda. Requiere moldes especiales resistentes al calor, una atmósfera controlada y las velocidades de producción se ven disminuidas significativamente. Sin embargo este método se usa para la producción de metales duros y piezas para corte hechas de diamante; estos dos materiales son costosos y por esto ameritan el tratamiento.

### ***Otros Métodos de Compactación.***

El metal en polvo puede colarse, *deslizándose en moldes*. El polvo se dispersa en el líquido que contiene químicos para mojar las partículas y ayudar a distribuir las y entonces liberar la masa del molde. El molde puede ser poroso para absorber el líquido libre y puede vibrarse para densificar el compacto. Las partes coladas por deslizamiento se sinterizan después para que tengan resistencia adecuada para muchos propósitos. Se usan agregados de fibra para absorción del sonido y de la vibración como refuerzo para los plásticos y metales. El costo del molde es bajo y el método es económico para partes que son complejas o se hacen

en pequeñas cantidades. Un ejemplo está dado por una parte de acero inoxidable que hubiera requerido un dado de acero endurecido de \$6000 en una prensa de 1200 toneladas, pero se coló por deslizamiento en un molde que costó \$30. El método es lento y no se justifica para grandes cantidades.

Otro método para polvos pesados, como el *carburo de tungsteno*, es la **compactación centrífuga**. El polvo se hace girar en un molde y se empaca con uniformidad con presiones hasta de 3 Mpa en cada partícula. Las partes deben tener secciones redondas uniformes. El costo del equipo no es muy alto.

El metal en polvo tan bien se **moldea por inyección**. Un lodo del polvo en agua o mezclado con un material termoplástico se inyecta en un dado. El aglutinamiento se remueve en el sinterizado.

Se compactan cintas continuas y varillas **rolando piezas de cobre, latón, bronce, monel, níquel, titanio o acero inoxidable o fibras**. En un proceso típico, se alimenta de una tolva polvo de acero inoxidable entre dos rodillos en un plano horizontal. El material emerge como una cinta con una densidad de 2 a 6,8 g/cm<sup>3</sup>. Se sinteriza entonces y se vuelve a rolar tres veces y se recose a una resistencia de tensión de cerca de 745 Mpa y un alargamiento de 33 por ciento. Otro proceso produce hojas porosas para filtros; se vierte una caja uniforme de polvo en una bandeja cerámica y se sinteriza entonces y se rola a la densidad deseada.

Un medio para aplicar presión para obtener densidad uniforme es encerrar el polvo en un molde con forma de plástico o hule con la forma deseada y sumergirlo en un gas o líquido en una cámara bajo presión de 70 a 700 Mpa. Esta es la **compresión isostática**, algunas veces llamada **compresión hidráulica** en un líquido. Pueden hacerse parte complicadas asimétricas y grandes con más facilidad que otras formas, se producen partes isotrópicas. Los dados de metal no son necesarios. *Para trabajos grandes, el equipo cuesta cerca de la décima parte que lo que cuesta una prensa.*

El polvo de metal, en contenedores de metal o cerámica y las preformas, se sujetan a presiones de gas tan altas como 350 Mpa a temperaturas hasta de 2200 °C (pero por lo general menos) en la **Compresión Isostática Caliente (HIP)**. Se ha encontrado que esto es efectivo para metales refractarios, cerámicas y cermets y polvos esféricos que no respondan a la compresión en frío. *Mediante la HIP pueden obtenerse densidades cercanas a las teóricas.*

Los polvos de acero inoxidable, uranio y zirconio se sellan en latas y se compactan al ser extruidos a través de dados mientras están protegidos de la contaminación. La vaina puede eliminarse para utilizar el metal base y puede dejarse para posterior protección como en el caso en las barras para reactores de uranio.

Los tubos largos pueden compactarse magnéticamente. El metal en polvo se vierte rodeando un mandril dentro de un conductor coaxial. Se pulsa una corriente de aproximadamente 1 MA a través de un conductor y se establece el campo magnético que oprime el conductor interno contra el compacto.

El formato con alta cantidad de energía (mediante prensas y explosivos) es capaz de compactar polvos a las densidades teóricas aproximadas con marcada definición de detalles y tolerancias estrechas. Como ejemplo, un disco de polvo de hierro de 0,33 m de diámetro y 9 Kg. de peso se compacta a una densidad de  $7,2 \text{ g/cm}^3$  por 270 KJ de energía en una prensa de forja de elevada cantidad de energía como la que se muestra en la **figura 5.12**, sería necesaria una prensa hidráulica de 7000 toneladas para obtener los mismos resultados.

68

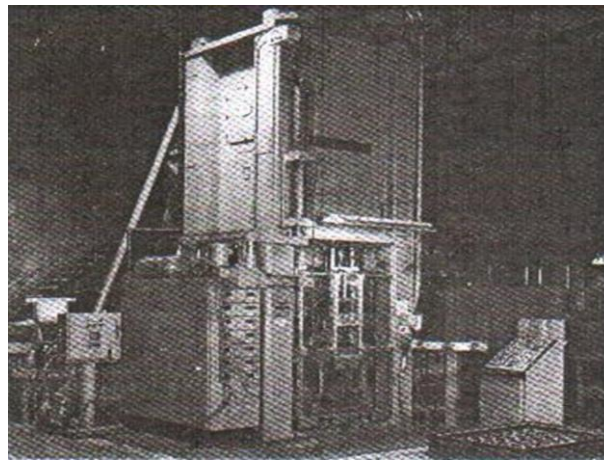


Figura 5.12 Prensa Mecánica de 7,3 MN (825 Toneladas) para compactar polvos metálicos.  
Fuente: Cincinnati Incorporated. (Kalpakjian, 2008)

### ***Equipos.***

La presión requerida para prensar polvos metálicos va desde 70 a 800 MPa para piezas de hierro de alta densidad (**ver Tabla 17.1**). La presión de compactado depende de las características y la forma de las partículas, del método de mezclado y del lubricante.

Las capacidades de prensado van desde 1,8 a 2,7 MN (200 a 300 Toneladas), aunque se usan prensas con mucha mayor capacidad para aplicaciones especiales. (Ver Tabla 5,2)

Tabla 5.2.- Presiones de Compactación para Diversos Polvos.

<i><b>Metal</b></i>	<i><b>Presión (MPA)</b></i>
Aluminio	70- 275
Latón	400-700
Bronce	200-275
Hierro	350-800
Tantalio	70 140
Tungsteno	70-140
<b>Otros Materiales</b>	
Oxido de Aluminio	110-140
Carbono	140-165
Carburos Cementados	140-400
<b>Ferritas</b>	110-165

(Fuente: Kalpakjian, 2008)

La mayoría de las aplicaciones requiere menos de 100 toneladas. Para *tonelajes pequeños* se usan *prensas mecánicas de tipo cigüeñal* (manivela) o *excéntricas*, para *capacidades superiores*, se emplean *prensas de balancín* (rotula) se pueden utilizar prensas hidráulicas con capacidades tan elevadas como 45 MN (5000 Toneladas) para partes grandes.

Las piezas producidas mediante el proceso de prensado y sinterización también están sujetas a ciertas **limitaciones**. El utillaje y el tonelaje máximo de las prensas de compactación imponen restricciones en cuanto al tamaño y la forma de

las piezas que pueden ser fabricadas. La producción anual dicta la rapidez con la que los costes de utillaje y mantenimiento pueden ser amortizados. Finalmente, la presencia de porosidad residual en las piezas implica que algunas propiedades físicas y mecánicas serán menores que las de las piezas forjadas.

La selección de la prensa depende del tamaño de la pieza y su configuración, los requisitos de densidad y la capacidad de producción. Sin embargo, cuando mas alta sea la velocidad de prensado, mayor será la tendencia de la prensa a atrapar aire en la cavidad de la matriz y, de esta manera, evitar la compactación adecuada.

### **Referencias Bibliograficas.**

Burns, Robert. "Production Presses and Tooling". ASM HandBook. Vol 7. "Powder Metallurgy". ASM International. The Materials Information Society. 5th ed. 1993. USA.

Confer, Leonard L. et al. "Shape Fundamental: Rigid Tool Compaction". ASM HandBook. Vol 7. "Powder Metallurgy". ASM International. The Materials Information Society. 5th ed. 1993. USA.

Doyle L; Keyser C; Leach J; Scharader G; Singer M. Materiales y procesos de Manufactura para Ingenieros. Tercera Edición. Pretince Hall Hispanoamericana. Méjico, 1988.

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.

Morrall F. R., Jonson Carl G., Jimeno E.. Metalurgia General, Editorial Barcelona: Reverte. España, 1982.

Randall M. German. Powder Metallurgy of Iron and Steel. John Wiley & Sons, Inc. USA. 1998.

**Preguntas de Repaso. Autoevaluacion.**

1. ¿Qué se entiende por Compactado de Polvos Metálicos?
2. ¿Qué operaciones se les realizan a los polvos metálicos antes de compactarlos?
3. ¿Cómo se le denomina a la pieza compactada?
4. ¿Qué se requiere para obtener una pieza compactada satisfactoria?
5. ¿Por qué no se recomienda el uso de un solo punzón en los procesos de MP?
6. ¿Qué se espera conseguir cuando se introducen partículas más pequeñas en la mezcla de los polvos?
7. ¿Se pueden obtener densidades diferentes en las piezas producidas por MP?
8. ¿Cuál es el rango de presión requerido para la compresión de piezas por MP?
9. ¿Qué otros métodos de compactación hay?
10. ¿Describa el método de Presión Isostática en Caliente (PIC)?



## Capítulo 6. Sinterizado de los Polvos Metálicos.

**L**a etapa de la sinterización es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la resistencia y fuerza para realizar su función para la cual se ha fabricado. El término Sinterizado tiene la siguiente definición: *“Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la base de la mezcla. Tiene el propósito de incrementar la „fuerza“ y las resistencias de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas”*

### ***Presintetizado.***

A la Pulvimetalurgia se recurre mucho para producir piezas de materiales que sean de mecanizado muy difícil. Cuando en piezas de este tipo se desee hacer algún mecanizado, frecuentemente ello puede facilitarse mediante una operación de ***presintetizado***, en la cual las piezas compactadas se calientan durante un corto periodo *a una temperatura considerablemente inferior a la de sinterización*. Esta operación comunica a las piezas una resistencia suficiente para que puedan manipularse y mecanizarse sin dificultad. Luego, reciben el sinterizado definitivo, durante el cual hay poco cambio dimensional. De este modo, el mecanizado posterior al sinterizado puede reducirse a un mínimo o eliminarse por completo.

### ***La Sinterización.***

Para describir este proceso conviene decir que ocurre una difusión atómica y las partes unidas durante el proceso de compactación se fortalecen y crecen hasta formar una pieza uniforme. Esto puede inducir a un proceso de

Recristalización y a un incremento en el tamaño de los granos. Los poros tienden a volverse redondos y la porosidad en general como porcentaje del volumen total tiende a decrecer. Esta operación, casi siempre, se lleva a cabo dentro de un ambiente de atmósfera controlada y a temperaturas entre el 60 y 90% de la temperatura de fusión del mayor constituyente.

Se debe llevar un control sobre la rata de calentamiento, tiempo, temperatura y atmósfera para obtener resultados que puedan ser reproducidos. El horno eléctrico se usa en la mayoría de los casos pero si se requieren temperaturas superiores (para incrementar la resistencia de las piezas) se puede variar a diferentes tipos de hornos, según la temperatura deseada.

El compacto crudo se calienta para obtener las propiedades finales requeridas en el curso del calentamiento tiene lugar varios cambios.

### ***Secado.***

A temperaturas bajas, los constituyentes líquidos se separan. El tiempo de residencia necesario se eleva con el incremento del espesor de la pared; el calentamiento rápido causaría la vaporización repentina y podría resultar en la desintegración del compacto. El vacío acelera el secado. Si los aglutinantes orgánicos se van a quemar, debe haber suficiente oxígeno disponible para la combustión.

### ***Sinterizado.***

A temperaturas mayores [superiores a  $0,5 T_m$  (Temperatura de Fisión) pero por lo general en el rango de trabajo en caliente, alrededor de  $0,7$  a las  $0,9 T_m$ ] ocurre el sinterizado. El compacto contiene partículas de material muy cercanas entre si. La energía del sistema disminuirá, reduciendo el área superficial total; en otras palabras, las fuerzas de accionamiento para el sinterizado es la energía superficial que se reduce al unir partículas adyacentes (**Figura 6.1**). Varios mecanismos intervienen, de los cuales la evaporación y la condensación son mucho menos importantes que la difusión sólida. Para comenzar los enlaces interatómicos se establecen entre superficies adyacentes, los cuellos crecen por el

movimiento de átomos de la superficie y de la masa de las partículas hasta ellos. El flujo plástico o viscoso también puede ocurrir y esto, junto con una mayor difusión masiva, reduce el tamaño de los poros (**Figura 6.1 b**). De esta manera, el volumen se contrae y la densidad aumenta (**Figura 6.1 a**). Para lograr la misma densidad sinterizada, la contracción es mayor para densidades en crudo menores. Si ocurren cambios de fase durante el calentamiento, la contracción puede desprenderse e incluso puede ocurrir el crecimiento. Con frecuencia es necesario determinar la contracción experimentalmente; si los pasos del proceso están estrechamente controlados, la contracción es reproducible y las partes terminales se pueden mantener dentro de tolerancias estrechas.

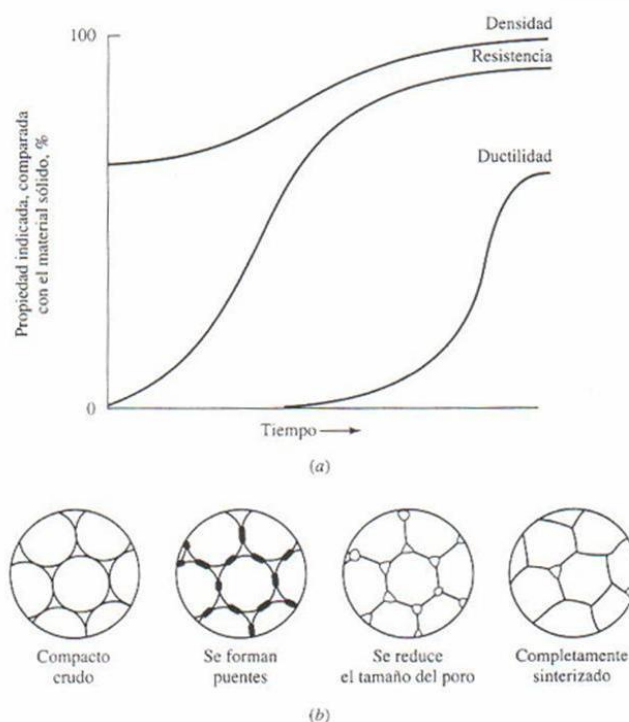


Figura 6.1 en el conjunto del Sinterizado (a) el compactado adquiere una Resistencia Permanente, mientras que el volumen se contrae (se incrementa la densidad) como resultado de (b) la eliminación de la mayoría de los poros entre las partículas (Shey, 2002)

En esta etapa la resistencia aumenta marcadamente y un material dúctil presenta un incremento en la ductilidad (**Figura 6.1a**). Sin embargo, es factible que las propiedades ante la fatiga sean inferiores si se ha dejado alguna porosidad. El calentamiento posterior no necesariamente mejora la situación, ya que las fronteras de grano comienzan a migrar, algunos granos se consumen, el tamaño

promedio de grano se eleva, con una caída consecuente en la resistencia, y los poros remanentes (dentro de los granos nuevos) se vuelven estables. Estos poros, junto con cualquier porosidad resultante de los gases atrapados, deterioran las propiedades.

El sinterizado es un proceso mediante el cual los compactados crudos o en verde se calientan en un horno de atmósfera controlada a una temperatura por debajo del punto de fusión, pero lo suficientemente elevada para permitir que se unan (fusionen) las partículas individuales. La naturaleza y resistencia de la unión entre las partículas y, por lo tanto, la del compactado sinterizado, depende de los complejos mecanismos de difusión, flujo plástico, evaporación de materiales volátiles en el compactado, recristalización, crecimiento de los granos y contracción de poros.

Las variables principales de la sinterización son la temperatura, el tiempo, y de la atmósfera del horno. Por lo general, las temperatura de sinterizado (**Ver [Tabla 6.1](#)**) se encuentran en el intervalo de 70% a 90% del punto de fusión del metal o la aleación. Los tiempos de sinterizados van de un mínimo de 10 minutos para aleaciones de hierro y cobre, hasta 8 horas para Tungsteno y Tantalio.

Tabla 6.1 Temperatura y Tiempo de Sinterización para Diversos Metales.

<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min.)</b>
Cobre, Latón y Bronce	760-900	10-45
Hierro y Hierro Grafito	1000-1150	8-45
Níquel	1000-1150	30-45
Aceros Inoxidables	1100-1290	30-60
Aleaciones de Álnico (para imágenes permanentes)	1200-1300	120-150
Ferritas	1200-1500	10-600
Carburo de Tungsteno	1430-1500	20-30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalio	2400	480

(Fuente, Kalpakjian, 2008)

El sinterizado es el tratamiento con alta temperatura que hace que se unan las partículas, reduciéndose en forma gradual al volumen de los espacios o poros

entre ellas. El sinterizado es un paso frecuente en la fabricación de componentes de cerámica (por ejemplo: alumina, titanato de bario, etc.) así como en la producción de partes metálicas mediante la Metalurgia de los Polvos, una ruta de procesamiento en la cual los polvos metálicos se prensan y sinterizan formando componentes densos y monolíticos. Se produce una variedad de materiales compuestos, como carburo de tungsteno-cobalto para herramientas de corte, superaleaciones, etc., usando esta técnica. Cuando las partículas son más finas, muchos átomos o iones están en la superficie; para ellas no se satisfacen los enlaces atómicos o iónicos. El resultado es que un conjunto de partículas finas de determinada masa tiene mayor energía que cuando forman un material cohesivo y macizo de la misma masa. En consecuencia, la fuerza impulsora del sinterizado de metales y cerámicos en estado sólido es la *reducción de la superficie total* de las partículas de polvo. Cuando un material pulverizado se compacta en una forma, las partículas de polvo están en contacto mutuo en muchos sitios, y entre ellas hay un espacio apreciable de poros. Para reducir la energía total del material, los átomos se difunden hacia los puntos de contacto y permiten que las partículas se adhieran entre sí, y al final hacen que los poros se contraigan.

La difusión reticular del grueso de las partículas hacia la región del cuello causa densificación. La difusión en la superficie, o la difusión en fase gas o vapor, y la difusión reticular desde superficies curvas hacia las zonas del cuello entre partículas no produce densificación. Si el sinterizado se hace durante largo tiempo, se pueden eliminar poros y el material se vuelve denso **Figura 6.2**. En la **Figura 6.3** se muestran las partículas de polvo de un material cerámico llamado tantalato de bario y magnesio ( $\text{BaMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ , o BMT por sus siglas en inglés). Este material se usa en la fabricación de componentes electrónicos llamados *resonadores dieléctricos* en los sistemas de comunicación inalámbricos. La microestructura de BMT se muestra en la **Figura 6.4**, estos procesos cerámicos se produjeron compactando los polvos en una prensa y sinterizando el “comprimido” a una alta temperatura (~1500 °C).

El grado y velocidad del sinterizado depende de: a) la densidad de los comprimidos. b) la temperatura. c) el tiempo. d) el mecanismo de sinterización, e) el tamaño promedio de la partícula, f) la distribución de los tamaños de las partículas de polvo. En algunos casos se forma una fase líquida en regiones localizadas del material durante el proceso de sinterizado.

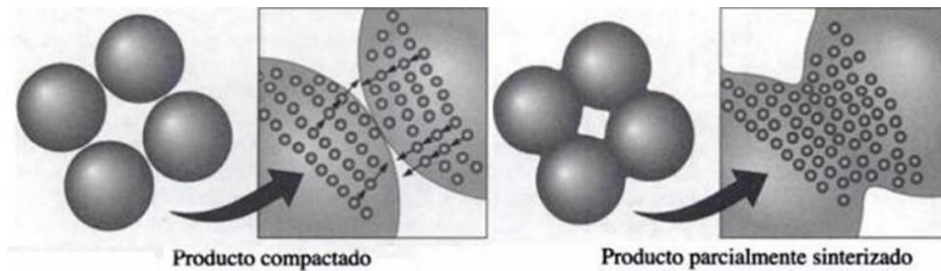


Figura 6.2 Procesos de Difusión durante el Sinterizado y la Metalurgia de los Polvos. Los átomos se difunden hacia los puntos de contacto, formando puentes y reduciendo el tamaño del poro. (Askeland, 2002)

Como la difusión de los espacios son átomos o iones, es más rápida en los líquidos que en el estado sólido, la presencia de una fase líquida puede proporcionar una forma cómoda de acelerar la sinterización de muchos metales refractarios y formulaciones de cerámicos. El proceso en el que una pequeña cantidad de líquido ayuda a la densificación se llama **sinterizado en fase líquida**.

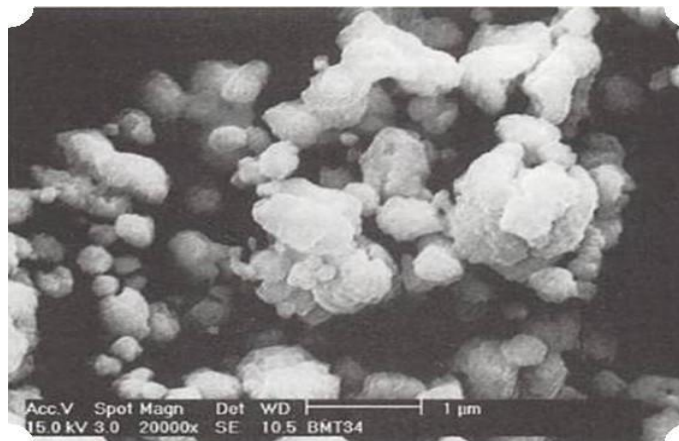


Figura 6.3 Partículas de polvo de Tantalato de Bario y Magnesio (BMT,  $\text{Ba}(\text{Mg } 1/3 \text{ Ta}2/3)\text{O}_3$ ). Este material cerámico se usa en la fabricación de componentes electrónicos llamados resonadores dieléctricos que se utilizan en las comunicaciones inalámbricas (Cortesía de H. Shirey.)

Para que la fase líquida sea efectiva en ampliar el sinterizado, es importante que el fluido pueda “humectar” los granos, en forma parecida a como el agua humecta una superficie de vidrio. Si el líquido no humecta, como el caso

del mercurio que no humecta al vidrio, la fase líquida no ayudara a aumentar el sinterizado.

En algunos casos, se agregan compuestos a los materiales para que formen la fase líquida a temperaturas de sinterizado. En algunos otros casos las impurezas pueden reaccionar con el material y causar la formación de una fase líquida. En la mayoría de las aplicaciones se desea que la fase líquida sea transitoria o que se convierta en un material cristalino durante el enfriamiento. Es la causa de que una fase vítrea, frágil y amorfa no permanezca en los límites de grano.

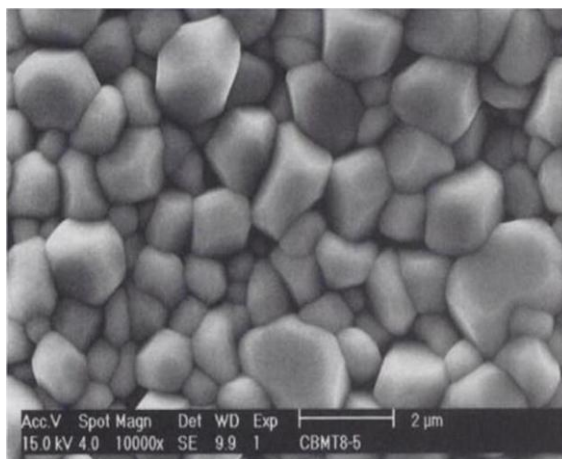


Figura 6.4 Microestructura de Cerámico BMT obtenida por Compactación y Sinterizado de Polvos de BMT (Askeland, 2004)

### ***Sinterizado en fase líquida.***

En ocasiones cuando el proceso de sinterización se efectúa a una temperatura superior a la de fusión de uno de los constituyentes secundarios-como en partes estructurales de Hierro/Cobre, Carburo de Tungsteno/Cobalto, etc. Al hacer el proceso a una temperatura superior a la temperatura de fusión de un constituyente, se esta haciendo un sinterizado con presencia de fase líquida. Por esto es esencial controlar la cantidad de fase líquida que se presenta durante el proceso para poder asegurar paridad en la forma de la pieza.

El proceso se acelera cuando uno de los constituyentes se funde y envuelve al constituyente con temperatura de fusión mas elevada. Un líquido que moja las partículas sólidas ejerce presiona físicamente a las partículas al parejo para una

densidad mejor. Es posible determinar las fases formadas por medio de los diagramas de fase aplicables, la mejor aglutinación se consigue cuando existe solubilidad mutua. Cuando los polvos elementales se mezclan y las fases transitorias de baja temperatura de fusión se forman, antes de la difusión cree una aleación homogénea (como las aleaciones de Al, Latones y Bronces), se forma una fase líquida en la superficie de las partículas. La densidad puede alcanzar la densidad teórica.

Cuando se necesitan densidades excepcionalmente altas, se aplica presión (sea axial o isostática). Estas técnicas se llaman **prensado en caliente**, cuando la presión es unidireccional, o prensado isostático en caliente (HIP por sus siglas en inglés), cuando la presión es isostática, es decir se aplica en todas direcciones. Con esas técnicas se producen muchas superaleaciones y cerámicos, como el titanato de plomo, zirconio y lantato (PLZT, por sus siglas en inglés) el prensado isostático en caliente produce materiales de alta densidad con propiedades isotrópicas.

La *Sinterización en Fase Líquida*, es adecuada para mezclas de polvos con punto de fusión muy distintos. Durante la etapa de sinterizado en procesos de este tipo, uno de los componentes alcanza el punto de fusión, repartiéndose y “mojando” las partículas del otro constituyente y se obtienen productos no porosos (Fe-Cu; W-Co; Cu-Co, etc.)

### ***Crecimiento de Grano.***

Un material policristalino contiene gran cantidad de límites de grano que representan una zona de alta energía, por el empaquetamiento ineficiente de los átomos. Si se reduce la superficie de los límites de grano debido a su crecimiento, se obtiene una energía general menor en el material. **El crecimiento del grano** implica el movimiento de los límites del grano, lo que permite crecer los granos de mayores tamaños a expensa de los más pequeños (**Figura 6.5**). Si el lector ha observado la espuma, es posible que haya visto el principio del crecimiento del grano. Se parece a la forma en que las burbujas pequeñas en la espuma



desaparecen a expensas de las mayores. ¡Otra analogía es la de los peces grandes que crecen al comer los pequeños! Para que haya crecimiento del grano en los materiales, se requiere la difusión de átomos a través del límite de grano y, en consecuencia, el crecimiento de los granos se relaciona con la energía de activación necesaria para que el átomo salte a través del límite.

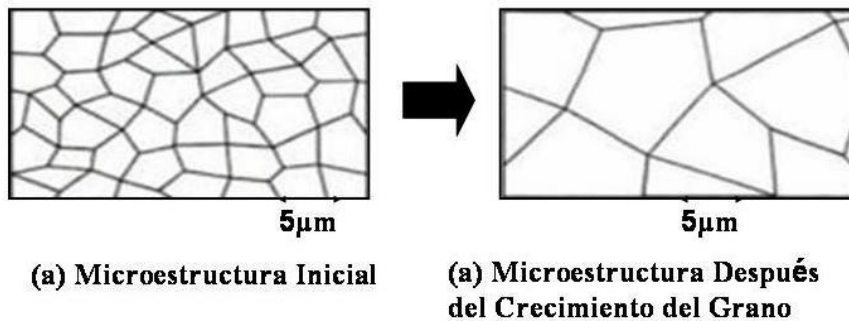


Figura 6.5 El crecimiento de grano se efectúa cuando los átomos se difunden de un grano a otro, a través del límite de grano. (Askeland, 2004)

El aumento en el tamaño del grano se puede apreciar en la secuencia de micrográficas de cerámicas de alumina **en la figura 6.6**, otro ejemplo en el que el crecimiento de grano desempeña una función es el filamento de tungsteno de una foco (bombilla).

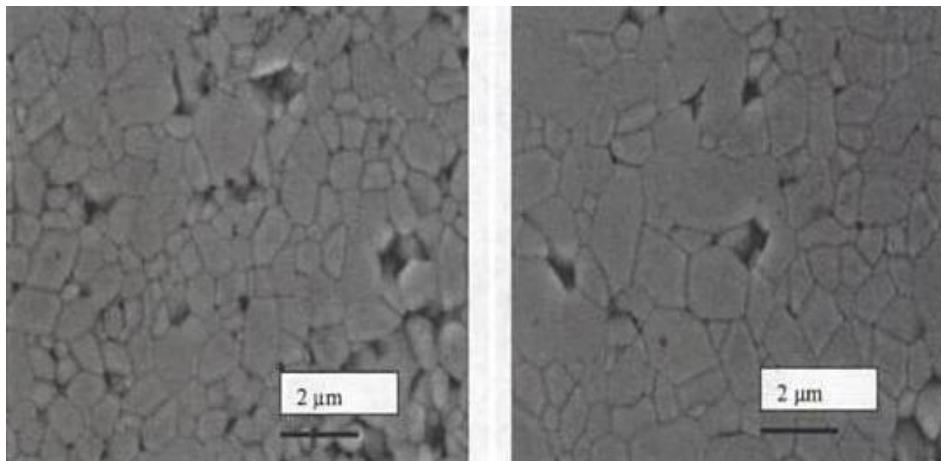


Figura 6.6 Crecimiento de Grano en Cerámico de Alumina; se puede ver con las Micrografías obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido. (a) La micrográfica de la izquierda muestra la micrografía de un cerámico de alumina sinterizada a 1350 ° C durante 15 horas. (b) la micrográfica de la derecha muestra una muestra sinterizada a 1350 ° C durante 300 horas. (Cortesía de I. Nettship y R. McAfee.) (Askeland, 2004)

Al calentarse cada vez más el filamento de tungsteno, los granos crecen y lo debilitan. Este crecimiento del grano, la evaporación del tungsteno y la

oxidación por el oxígeno residual contribuye a la falla de los filamentos de tungsteno en los bombillos.

La *fuerza impulsora* del crecimiento del grano es la reducción del área del límite de granos. Los límites de grano son defectos, y su presencia causa un aumento de energía libre del material. De este modo, la tendencia termodinámica de los materiales policristalinos es a transformarse en materiales que tienen mayor tamaño promedio de grano. Las temperaturas elevadas o energía de activación bajas aumentan el tamaño de grano. Muchos tratamientos térmicos de los metales, que incluyen sostener el metal a temperaturas altas, se deben controlar con cuidado para evitar crecimiento de grano excesivo. Esto se debe a que, a medida que crece el tamaño de grano, la superficie de los límites de grano disminuye y ahora hay menos resistencia al movimiento de las dislocaciones. El resultado es que la resistencia de un material metálico disminuye al aumentar el tamaño de grano. Este concepto lo hemos visto antes, en forma de la ecuación de Hall- Petch. En el crecimiento anormal de grano, la distribución de tamaños de grano tiende a ser bimodal, es decir, se obtienen pocos granos muy grandes y entonces quedan pocos granos relativamente pequeños. Ciertas propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas de los materiales dependen también del su tamaño de grano. En consecuencia, en el procesamiento de esos materiales se debe poner atención a factores que afectan las velocidades de difusión y el crecimiento del grano.

Las atmósferas controladas son una parte esencial en casi cualquier proceso de sinterización ya que previenen la oxidación y otras reacciones que no conviene al proceso. Algunas de las atmósferas más usadas son las compuestas con hidrógeno seco o con hidrocarburos sometidos parcialmente a la combustión. Ya si se requieren usos más especiales y que puedan soportar el incremento en el costo de la atmósfera se pueden utilizar las llamadas atmósferas sintéticas. Debido a que son producidas mezclando cuidadosamente Nitrógeno con Hidrógeno y con gas de hidrocarburos para la sinterización de aceros. Estos tipos de atmósferas tienen las ventajas de ser mucho más limpias, tener mayor adherencia al material sinterizado y un nivel muy bajo de vapor de agua.

### ***Sinterizado en Vacío.***

Este tipo de sinterizado es un tipo especial de sinterizado con atmósfera controlada y desde el punto de vista científico es probablemente la mejor. El vacío, en este proceso es difícil de mantener; haciendo que el Sinterizado en vacío sea casi imposible de automatizar elevando los costos. Este proceso es estándar para algunas aplicaciones especiales y raras (aunque su número se incrementa rápidamente) que demandan el trabajo en vacío, Se usa para Sinterizar aceros y metales de alta aleación.

### ***Contracción.***

Normalmente es necesario realizar pruebas para determinar el valor de la contracción, 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 estén presentes constituyentes volátiles en grandes cantidades).

$$\text{Masa} = (\rho_{\text{Crudo}}) (V_{\text{Crudo}}) = (\rho_{\text{Sinterizado}}) (V_{\text{Sinterizado}}) \quad (6.1)$$

$$\text{Contracción Volumétrica} = (V_{\text{Sinterizado}} / V_{\text{Crudo}}) = (\rho_{\text{Crudo}} / \rho_{\text{Sinterizado}}) \quad (6.2)$$

$$\text{Contracción Lineal} = (\rho_{\text{Crudo}} / \rho_{\text{Sinterizado}})^{1/3} \quad (6.3)$$

### **Formación de la Textura Sinterizada.**

Las partículas de polvo sueltas solo se tocan en unos pocos puntos de forma que la cohesión entre ellas es muy pequeña. Por efecto de altas presiones (40 a 80 KN/cm<sup>2</sup>) se aumenta la superficie de contacto entre las partículas de polvo, y con ello su cohesión. Calentando las piezas prensadas hasta las proximidades de la temperatura de fusión, aparece una fluencia plástica. En los límites de los granos de polvo, los átomos de las sustancias se desplazan y forman nuevos granos. La formación de dichos granos se realiza en diferentes direcciones, reduciendo los poros que existen. Las partículas se bloquean y forman una textura de sinterización igual a 1/7 aproximadamente del volumen primitivo. De esta

forma las fuerzas de adherencia entre las partículas son totalmente efectivas, la pieza se ha vuelto sólida y dura. Las propiedades de los componentes del polvo pueden mejorarse en conjunto: así por ejemplo, la resistencia al calor del tungsteno, la resistencia del titanio, la resistencia a los ácidos del cobre o del níquel, o la dureza del molibdeno.

Una característica importante de los cuerpos sinterizados es el volumen de poros existentes después del sinterizado. Dicho volumen depende de la compresión.

Tabla 6.2 Clasificación Normalizada de los productos de MP.

CLASE	% DE VOLUMEN POROSO	EJEMPLO DE ESPECIFICACIONES
Sint-A	Hasta 60%	Filtros.
Sint-B	Hasta 30%	Cojinetes de Fricción, Forros.
Sint-C	Hasta 60%	Piezas de Forma para Maquinas de coser y oficina.
Sint-D	Hasta 15%	Piezas para Maquinas. (Cementables, Soldables)
Sint-E	Hasta 10%	Piezas para Relees. (Resistencia Elevada)
Sint-F	Hasta 07%	Segmentos Dentados, Cremallera, Contactos.
Las cifras según clase, p. ej. Sint-B 30 son los índices de los componentes de la aleación.		

(Fuente: Appold, 1982)

### **Unión o Soldadura por Difusión.**

Es un proceso para unir materiales, que se lleva a cabo en tres pasos (**Figura 6.7**), el primero hace que las dos superficies se unan a una alta temperatura y presión, aplanando estas superficies, fragmentando las impurezas y produciendo un área grande de contacto de átomo con átomo. Cuando las superficies quedan comprimidas entre sí a temperaturas altas, los átomos se difunden a través de los límites de grano, hacia los huecos que quedan; los átomos condensan y reducen el tamaño de todos los huecos de la interfaz. Cuando la difusión en límites de grano es rápida, este segundo paso puede suceder con mucha rapidez. Sin embargo, al final el crecimiento del grano aísla los huecos restantes de los límites de grano. Para el tercer paso, la eliminación final de los huecos, debe haber difusión en volumen, que es comparativamente lenta. El

proceso de unión por difusión se usa con frecuencia para unir o soldar metales reactivos como titanio, o metales y materiales disímiles y para unir cerámicos.

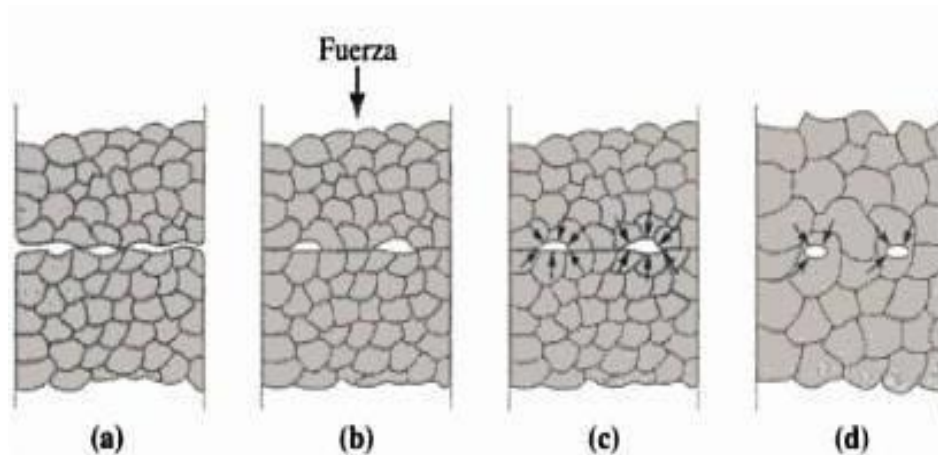


Figura 6.7 Pasos en la Unión por Difusión: (a) Al principio, el área de contacto es pequeña; (b) Al aplicar presión se deforma la superficie, aumentando el área de contacto; (c) La Difusión en límites de grano permite contraer los huecos, y (d) Para la eliminación final de los huecos se requiere difusión en volumen. (Askeland, 2004)

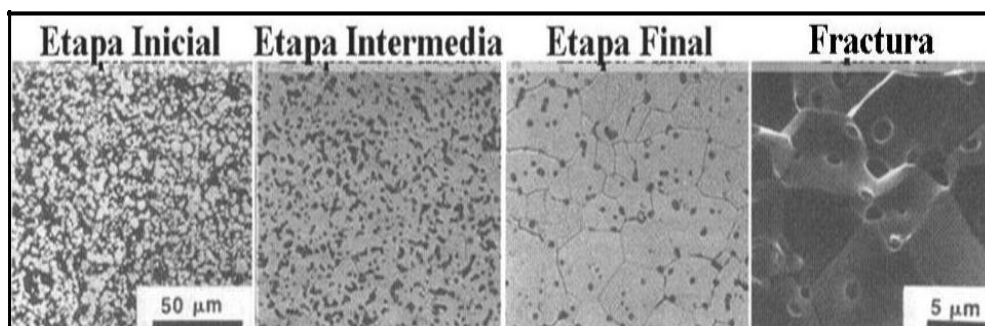
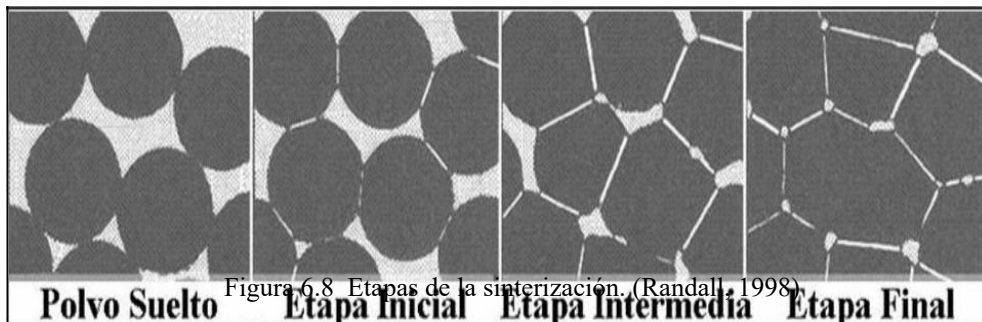
### ***Sinterizado-Endurecimiento.***

Se hace el tratamiento térmico del sinterizado y después se somete a un bajón de temperatura rápidamente. Esto se puede realizar gracias a los avances tecnológicos que se han logrado en los hornos para sinterizado que permiten descender la temperatura a grandes velocidades. El resultado de esta operación en las piezas de acero es una estructura homogénea martensítica. Además de este excelente resultado también se obtienen tolerancias dimensionales muy precisas. Estas dos propiedades adquiridas durante el proceso de Sinterización-Endurecimiento nos permiten obviar varios procesos de pos sinterización.

### ***Etapas de sinterización.***

Las etapas de sinterización se diferencian a partir de la forma y mecanismos de transporte que empiezan a dominar a medida que se evoluciona en la sinterización. Se diferencia una fase inicial donde se unen los polvos sin haber contracción. Mecanismos de transporte superficial van a ser de vital preponderancia. Usualmente se llega a un valor de equilibrio en el tamaño del grano debido a las tensiones superficiales. Posteriormente, al activarse en mayor

medida los procesos de relleno o másicos, se empieza a ver una contracción grande. Los poros toman formas cilíndricas para minimizarse, y posteriormente se llega a una etapa final donde se cierran los poros y se dispersan. En la **Figura 6.8** y **6.9** se pueden apreciar las distintas etapas en la sinterización.



Pero como en el proceso no se puede estar tomando fotos de la microestructura, se recurre a la dilatometría donde se mide durante el tiempo el tamaño de la pieza. Por sólo la expansión térmica hay dilatación de la pieza, pero cuando se empiezan a activar los distintos mecanismos de transporte se observa una contracción que es más fuerte inclusive que la expansión térmica. De esta forma se puede conocer el inicio de la etapa intermedia y llegar a la etapa final en la sinterización. (Ver **Figura 6.10**).

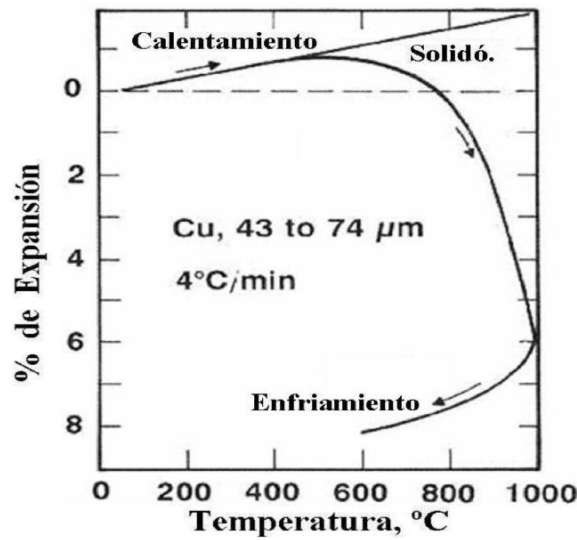


Figura 6.10 Dilatometría del cobre para observar la relación entre expansión térmica y contracción debido a la sinterización. (Randall, 1998)

## ETAPA INICIAL

En esta etapa se inicia el proceso de sinterización con un reagrupamiento de las partículas y una desaparición de la frontera al empezarse a generar un cuello en los puntos de contacto entre las partículas, es de vital importancia la tensión superficial para el crecimiento del cuello. Si  $S(v)$  describe la superficie se pueden calcular los radios principales de curvatura y la curvatura  $k$  en cada punto con las ecuaciones a continuación:

$$R_1 = y \frac{ds/dv}{dx/dv} \quad (6.4a)$$

$$R_2 = \frac{ds/dv}{\frac{d^2 y dx}{dx dv} + \frac{d^2 x dy}{dv^2 dv}} \quad (6.4b)$$

$$k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6.4c)$$

Ecuación 6 (a, b, c). Radios de curvatura para una superficie descrita por  $S(v)$  donde  $v$  es un parámetro que relaciona las coordenadas  $x$  o  $y$ . (Randall, 1998)

De esta manera, para cada mecanismo de transporte que depende de la curvatura se conoce el cambio de una fuerza asociada por ejemplo para el caso viscoso una distribución de esfuerzos. En el relleno se encuentra una distribución de concentración de vacancias.

Para cada mecanismo de transporte y su fuerza asociada, debe existir una ecuación fundamental que relacione esa fuerza con una deformación geométrica. Por ejemplo para el caso viscoso se tiene la ecuación de Newton para esfuerzos viscosos (**ver Ecuación 6.5**)

$$\sigma = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (6.5)$$

Ecuación 6.5. Relación de esfuerzos para fluidos viscosos de Newton.  $V_x$  es la velocidad generada por el esfuerzo  $\sigma$  dada una viscosidad  $\eta$  en una capa de espesor  $dy$ . (Randall, 1998)

Así se puede predecir en forma determinista para cada proceso el flujo para cada punto de la partícula. Con este flujo  $J$ , se puede calcular para cada partícula, y área total por donde puede fluir material y el cambio de volumen (**ver Ecuación 6.6**).

$$\frac{dV}{dt} = JA\Omega \quad (6.6)$$

Ecuación 6.6. Cambio de volumen en función del flujo y el área  $A$  de entrada de partículas de volumen  $\Omega$ . (Randall, 1998)

Por medio de geometría se puede encontrar una relación entre la relación de aspecto y el tiempo al resolver las **ecuaciones 6.4, 6.5 y 6.6** con la **Ecuación 6.7**

$$\sigma = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.7)$$

Ecuación 6.7. Ecuación (de Laplace) del esfuerzo superficial debido a tensión superficial con  $R_1$  y  $R_2$  radios principales de la superficie en un punto. (Randall, 1998)



Se tienen las soluciones para cada mecanismo de la forma presentada en la **Ecuación 6.8 con la Tabla 6.3.**

$$\left( \frac{X}{D} \right)^n = \frac{Bt}{D_m} \quad (6.8)$$

Ecuación 6.8. Relación de aspecto para diferentes mecanismos de transporte. Los exponentes y constantes se encuentran en la Tabla 3. (Randall, 1998)

Se puede encontrar que con  $\frac{\Delta L}{L_0} = \left( \frac{X}{2D} \right)^2$  entonces:  $\left( \frac{\Delta L}{L} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{X}{2D} \right)^2$

para los diferentes mecanismos de transporte según **la Tabla 6.3.**

Como en el proceso de sinterización y su avance se mide con el cambio del área superficial que se reduce en el proceso, se encuentra que el área específica es:

$$\left( \frac{\Delta S}{S_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (6.9)$$

Ecuación 6.9. Detrimento del área superficial en función del tiempo. (Randall, 1998)

Su proporcionalidad a t-v muestra como decrece. Debido a que para la reducción del área superficial se necesita del contacto con las partículas vecinas, el número de coordinación va a ser determinante. Como se observa en la **Figura 6.11** hay mayor disminución del área a medida que hay mayor número de coordinación.

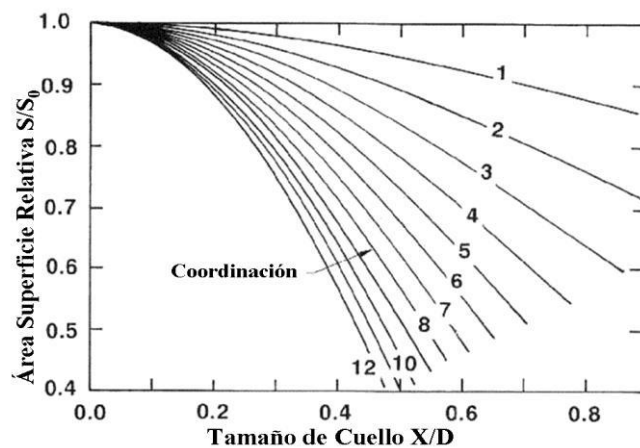


Figura 6.11 Cambio del área superficial en función del número de coordinación. (Randall, 1998)

Era de esperarse ya que en forma simultánea crecen más cuellos por partícula en la misma medida (ver Ecuación 6.8) al aumentar el número de coordinación, generando una mayor disminución en el área superficial.

Mostrando en una forma más generalizada, teniendo en cuenta los distintos mecanismos de transporte, y observando que hay un aumento en el número de coordinación debido a la atracción entre las partículas, en el tiempo se conocerá la relación de aspecto  $X/D$ , y la disminución del área. Como es de suponerse, a mayor temperatura los mecanismos de transporte estarán más activados aumentando la velocidad de la sinterización (ver Figura 6.12).

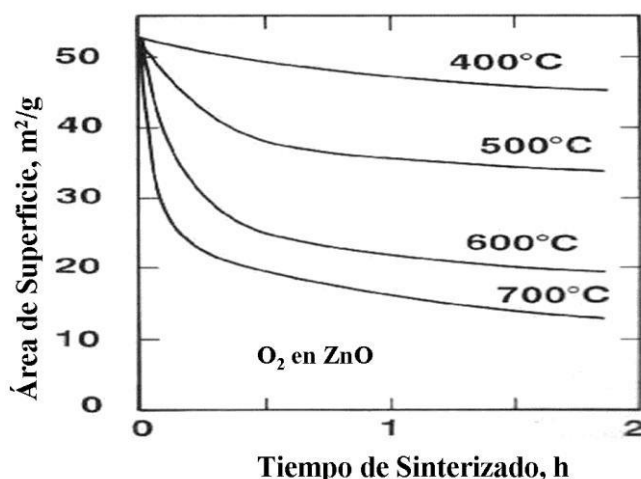


Figura 6.12 Cambio del área con respecto al tiempo y temperatura. Se observa una rápida disminución en los primeros momentos donde se percibe la primera etapa de la sinterización. (Randall, 1998)

Tabla 6.3 Valores de los exponentes para modelos  $(X/D)$  de la relación de aspecto.

<b>Ecuaciones para Esferas, etapa inicial de Sinterizado. <math>(X/D)^n = Bt/D^m</math></b>			
<b>Mecanismo</b>	<b>N</b>	<b>m</b>	<b>B<sup>a</sup></b>
Flujo Viscoso	2	1	$3\gamma/\eta$
Flujo Plástico	2	1	$9\pi\gamma b D_1/kT$
Evaporación- Condensación	3	2	$(3\rho\gamma/\rho^2)(\pi/2)^{1/2}(M/kT)^{3/2}$
Difusión Volumen	5	3	$80D_a\gamma\Omega/kT$
Difusión de Limite de Grano	6	4	$20\delta D_b\gamma\Omega/kT$
Difusión de Superficie	7	4	$56\delta D_c\gamma\Omega^{4/3}/kT$
<b>Símbolos:</b>			
$\gamma$ : Energía de Superficie	$D_v$ : Volumen de Difusividad		(Randall, 1998)
$\eta$ : Viscosidad	$D_s$ : Superficie de Difusividad		
$b$ : Vector de Burgers	$D_\delta$ : Difusividad de Limite de Grano		
$k$ : Constante de Boltzmann	$P$ : Presión de Vapor		
$T$ : Temperatura Absoluta	$M$ : Peso Molecular		
$\rho$ : Densidad Teórica	$\Omega$ : Volumen Atómico.		
$\delta$ : Ancho de Limite de grano			

### ETAPA INTERMEDIA.

En la etapa intermedia, los poros se han reducido debido al crecimiento del cuello (relación de aspecto  $X/D$ ) de la etapa inicial. De aquí en adelante, es muy importante el flujo de materia de una partícula a otra. Por esta razón, se vuelve importante el flujo de materia de relleno (bulk) y se va a observar una gran contracción comparativamente con las otras etapas. Los poros se reorganizan para poder dejar maximizada el área de contacto de una partícula con las otras partículas obteniéndose una estructura de poros como la que se observa en la **Figura 6.13**.

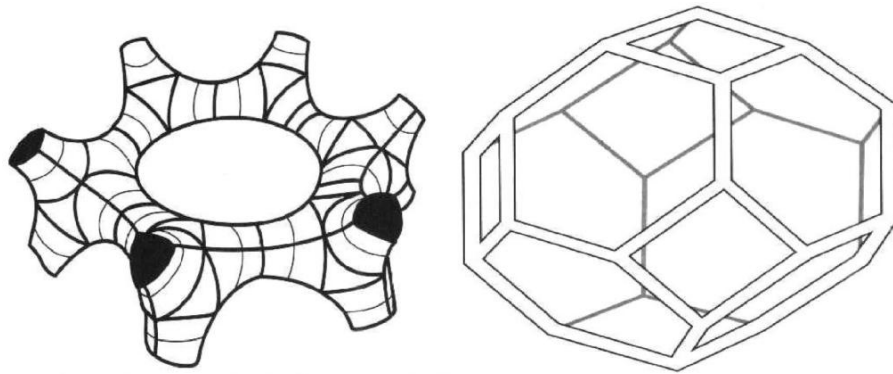


Figura 6.13 Forma de las interconexiones entre los poros en la etapa intermedia (que toman forma cilíndrica). (Randall, 1998)

La eliminación de los poros se empieza a generar debido a la difusión de las vacancias de este (se absorbe el poro). Por lo tanto hay un flujo de vacancias, debido a un gradiente en la concentración de vacancias (ver Ecuación 32).

$$V_s + V_p = 1 \quad (6.10a)$$

$$V_p = \pi \left( \frac{d}{G} \right)^2 \quad (6.10b)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = -JAN\Omega \quad (6.10c)$$

$$\ln \left( \frac{C}{C_0} \right) = \frac{2\gamma_{sv} \Omega D_v}{KTd_p} ; \quad \frac{dV_s}{dt} = \frac{g\gamma_{sv} \Omega D_v}{KTG} ; \quad G^3 = G_0^3 + kt \quad (6.10d)$$

Ecuación 6.10 Expresiones que gobiernan el la concentración de vacancias, incremento del volumen y diámetro (por lo tanto).  $G$  es el diámetro. (Randall, 1998)

Integrando de las expresiones en la Ecuación 6.10 se obtiene una expresión para el volumen específico  $V_s$  (ver Ecuación 6.11).

$$V_s = V + B \ln \left( \frac{t}{t_i} \right) \quad \text{y} \quad \frac{ds}{dt} \propto S^\alpha \quad (6.11)$$

Ecuación 6.11. Expresiones para el volumen en función del tiempo y el área. (Randall, 1998)

Con la combinación del flujo, las distancias características, y la difusividad  $D_v$  volumétrica de las vacancias se obtiene una expresión para el tiempo del tamaño de la partícula como  $G \sim t^{1/3}$ .

Por lo tanto, teniendo en cuenta el flujo de vacancias para reducir los poros (absorberlos), se entienden los mecanismos más preponderantes en la etapa intermedia, y por lo tanto la contracción que se observa en la sinterización.

## **ETAPA FINAL.**

Pasando a una etapa final, donde los poros entran en un estado de inestabilidad (debido a las fuerzas de tensión superficial), estos prefieren dividirse y esparcirse homogéneamente por el material.

La condición para la inestabilidad de un poro depende de sus medidas más larga y más corta tal que para un poro cilíndrico (que vienen de la etapa intermedia) se obtiene:

$$V_p = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \left( \frac{d_p}{2l} \right)^3 ; \quad l \geq d_p \quad (6.12)$$

Ecuación 6.12. Volumen específico de la porosidad dados una geometría de los poros cilíndrica y organizada en forma tetrakadecahédrica. Condición de estabilidad (donde se fraccionan los poros) en función de sus parámetros geométricos para poros cilíndricos. (Randall, 1998)

De esta forma, a medida que se siguen absorbiendo los poros se empiezan a dividir y por lo tanto a cerrar, pero adjunto a esto, los poros se empiezan a mover a regiones de menor energía (intentan despegarse de la frontera).

Asociado a la cantidad de energía que se necesita para mover los poros se introduce el concepto de movilidad (**ver Ecuación 6.13**).

$$M_p = \frac{A}{d_p} \quad (6.13)$$

Ecuación 6.13. Definición de Movilidad de los poros. W=1 para difusión superficial, w=2 para difusión volumétrica y w=3 para evaporación-condensación. A es una constante que depende del medio. (Randall, 1998)

Los granos también tiene asociada una movilidad MG que si es mucho mayor que la de los poros MP implica que los poros casi no se van a mover en comparación con los granos. Es decir, el grano absorbe al poro, y este queda dentro del grano. Ya no tiene acceso a un mecanismo de difusión de vacancias que permita la reducción del poro y por lo tanto no se observará una densificación. Si por el contrario la movilidad del poro es grande en comparación a la del grano, así se mueva el grano, el poro seguirá unido a la frontera de grano y continuará su contracción.

Como se puede ver en la **Figura 6.14**, cuando hay un movimiento del grano y de los poros, aparecen fuerzas asociadas al movimiento (o movimiento asociado a las fuerzas) sobre la frontera del grano y sobre el poro. Para que el poro siga en la frontera se necesita la condición de la **Ecuación 6.14**.

$$\frac{M_p F_p}{NM_g} > \frac{F_g}{N} - F_p \quad (6.14)$$

Ecuación 6.14. Condición para que los poros se queden por las fuerzas debido a la tensión superficial entre sólido-vapor Fp (depende de la curvatura del poro) y la fuerza debido a la frontera del grano FG, en la frontera (depende de la curvatura de la frontera de grano). (Randall, 1998)

En la etapa final entonces, hay un último crecimiento del grano que está relacionado con las movilidades de los poros y granos como se tiene en la Ecuación 37.

$$\frac{dG}{dt} = \frac{4k_g \gamma_{sv} M_p}{\left[ \frac{M}{G} \right]^{p+1} M_g} \quad (6.15)$$

Ecuación 6.15. Aumento del tamaño (diámetro G) de los poros en el tiempo. Kf es una constante. Ref. [1].

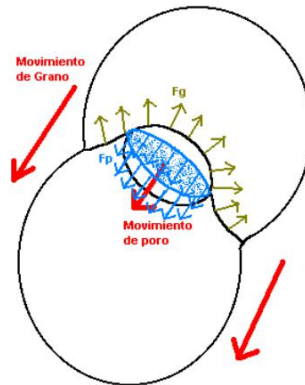


Figura 6.14 Fuerzas y movibilidades para dos partículas. (Randall,1998)

Para poder determinar si los poros desaparecerán o hay un tamaño crítico de los poros, se define la razón de aumento del tamaño de los poros con respecto a la densificación. Debe depender de las difusividades de la superficie (mide la movilidad de los poros con  $D_s$ ) y de la frontera  $D_b$  que mide la capacidad de encogimiento de los poros.

$$\Gamma = \frac{1}{300} \frac{D_s}{D} \frac{\gamma_{ss}}{\gamma_{sv}} \quad (6.16)$$

Ecuación 6.16. Razón entre aumento de tamaño de los poros y la densificación. (Randall, 1998)

Es posible obtener densidad del 100% con respecto a la teórica si.

### ***Densificación y crecimiento de grano.***

En esta sección, con base en la anterior se va a discutir la diferencia entre cuándo hay densificación, y cuando hay crecimiento de grano. El concepto clave en esta sección es entender que cuando un poro se aísla y queda dentro del grano, este ya no tiene por donde liberar el gas que tiene internamente, y tan sólo puede comprimirlo y llegar a un tamaño estable.

Existe una relación entre el tamaño del grano y el tamaño del poro. Esta debe depender de la porosidad ( $V_p$ ), ya que a medida que hay más porosidad, si ya hay un número determinado de poros, la relación  $G/d_p$  cambia inversamente proporcional a la porosidad. En la etapa final, si crece el grano o disminuyen los

poros, disminuye la porosidad. Es importante tener en cuenta que los únicos poros que entran dentro de la cuenta de este cambio, son aquellos que están en la frontera, por esto se introduce un factor R quedando una expresión para  $G/d_p$  como se ve en la **Ecuación 6.16**

$$\frac{G}{d_p} = \frac{g}{RV_p} \quad (6.17)$$

Ecuación 6.16. Relación tamaño del polvo (grano) y tamaño del poro.  $g$  es una constante,  $R$  es la relación de agrupamiento (cuenta el número porcentual de los poros que están en la frontera). Ref. [1].

En la etapa final, se encuentra una expresión para la disminución del tamaño de los poros lineal con el tiempo (**ver Ecuación 6.18**).

$$d_p = d_{p0} - \gamma_{sv} \frac{t}{\eta} \quad (6.18)$$

Ecuación 6.18. Detrimiento del tamaño del poro en función del tiempo, viscosidad y tensión superficial. (Randall, 1998)

Se observa que esta relación es de carácter de flujo viscoso y tensión superficial. Esta expresión tiene sentido si el mecanismo de transporte es flujo viscoso. En etapas finales, se encuentra que este es el mecanismo de mayor importancia, y por esto es que los poros se pueden partir y fluyen a través del material.

La densificación debida a la difusión volumétrica se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{12\gamma_{sv}}{KTG} \left( \frac{4\gamma_{sv}}{dp} - P_g \right) \quad (6.19)$$

Ecuación 6.19. Cambio del volumen específico en función del tiempo. Depende de la presión del gas, tamaño del poro y tensión superficial existiendo un valor de estabilidad. (Randall, 1998)

Es importante anotar que existe un punto donde  $dV_s/dt$  es cero, cuando  $4\gamma/dp = P_g$ , es decir, cuando la presión del gas atrapado en el poro iguala la fuerza

---

de tensión superficial. En este punto se puede encontrar de qué tamaño serán los poros en la etapa final si se conoce el tamaño del poro y la presión en el momento que se cierran los poros. Con base en esto se entiende que si no se quieren porosidades, hay que sacar el gas ya sea con vacío o atmósferas que diluyan el gas también sacándolo.

A continuación se presenta una ilustración de la diferencia entre la densificación o no, y el crecimiento de grano. En la sinterización, si las fuerzas para mover los granos son altas pero estos son muy fluidos, su movilidad será alta en comparación a los poros. Debido a esto se unirán los poros y no habrá densificación. Para que los granos sean menos fluidos, se necesita una mayor tensión superficial. Esto se puede lograr con partículas o inclusiones que mantengan los granos divididos, o aditivos. Existen partículas que son segundas fases generadas debido a la temperatura que permiten que no se agrande el grano. Los aditivos disminuyen la velocidad del crecimiento del grano aumentando su movilidad. (Ver Figura 6.15).

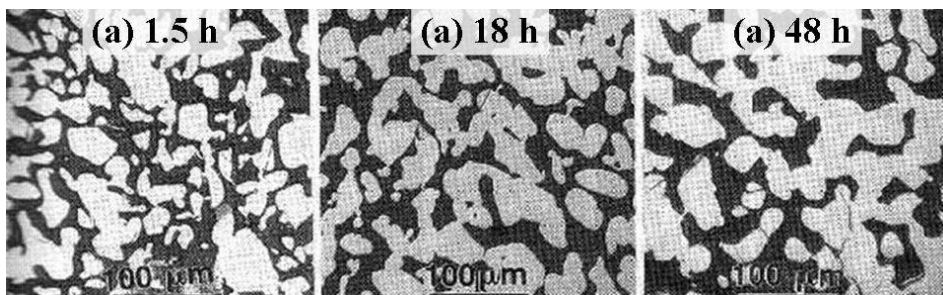


Figura 6.15. Crecimiento de grano sin densificación a diferentes tiempos del proceso de sinterización. (Randall, 1998)

### ***Cálculos e importancias de los mecanismos de transporte.***

Para poder determinar el crecimiento del cuello, o cualquier parámetro en la sinterización, por falta de modelos exactos, se encuentra una buena aproximación con que el cambio de cualquier parámetro en total, es igual a la suma del cambio de este debido a cada mecanismo de transporte. Se expresa en la **Ecuación 6.20**.



$$\left. \frac{dX}{dt} \right|_{total} = \sum \frac{dX}{dt} \quad (6.20)$$

Ecuación 6.20. Aproximación de las diferentes contribuciones dependiendo del mecanismo de transporte. (Randall, 1998)

Por esta razón se generan gráficas que muestran la importancia de cada mecanismo de transporte en la sinterización en función a la temperatura. Se encuentra que hay unos que tiene más importancia que otros (siendo mayoritaria) para cada rango de temperatura. Por lo tanto, inicialmente, con temperaturas bajas, la adhesión y el flujo plástico son los mecanismos de transporte importantes. Hay reagrupamiento. Posteriormente es la difusión por la superficie, y en últimas es la difusión de frontera de grano. Por esta razón se permite clasificar la sinterización en tres etapas que dependen del tamaño del cuello y la temperatura.

(Ver Figura 6.16).

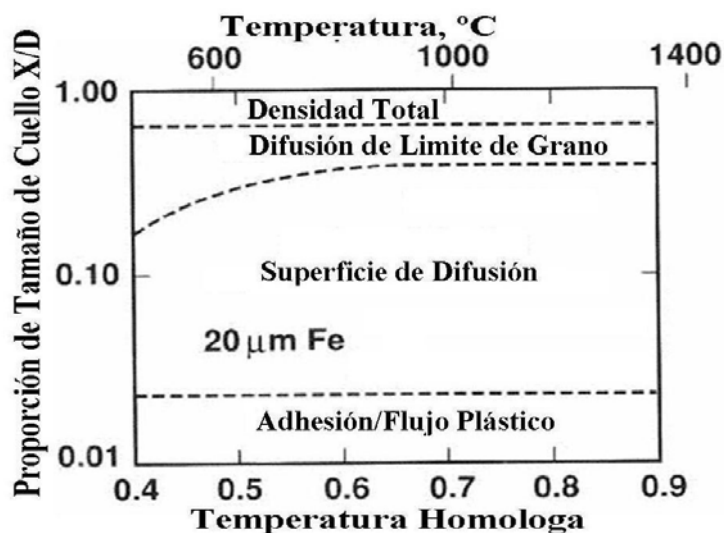


Figura 6.16 Mapas de Sinterización para observar la importancia de ciertos mecanismos de transporte. La temperatura homóloga es la relación de la temperatura y la temperatura de fusión del material a sinterizar. (Randall, 1998).

### ***Hornos de Sinterizado.***

Son del tipo lote o de tipo continuo. Los hornos continuos tienen una zona de precalentamiento (secado o quemado), una zona de calor elevado (sinterizado) y una zona de enfriamiento. Excepto en los polvos de densidad elevada, cubiertos con un óxido protector (como el aluminio), todo el sinterizado se realiza en

atmósfera elegida para proporcionar un ambiente neutro, no oxidante o reductor. Entre los gases extensamente utilizados, el nitrógeno es neutro. El sinterizado en un horno de vacío también proporciona un medio neutro, pero a temperaturas elevadas favorece la desoxidación de muchos metales. El hidrogeno es un agente reductor muy efectivo, aunque se deba manejar con precaución para evitar explosiones. Los gases que frecuentemente se emplean son: nitrógeno con 10% de hidrogeno y metano, amoniaco disociado y gas hidrocarburo parcialmente quemado (exotérmica o endotérmicamente). Al sinterizar el acero, el contenido de carbono también controla y, en algunos casos, los aceros se carburizan en una atmósfera que contiene CO (monóxido de Carbono).

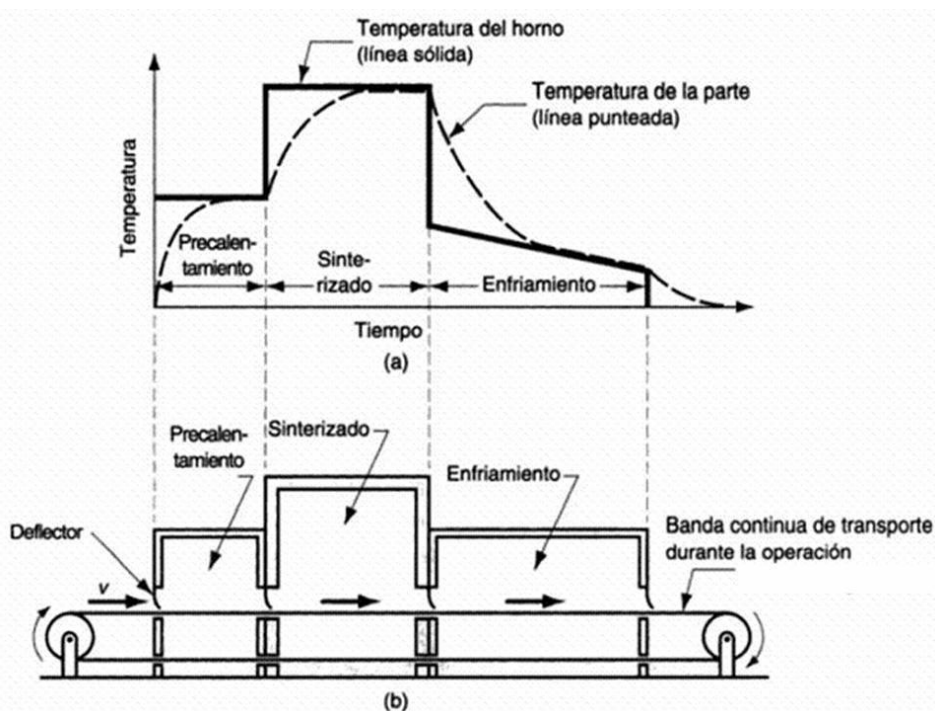


Figura 6.16 (a) Ciclo Típico de Tratamiento Térmico durante el Sinterizado y (b) Sección Transversal Esquemática de un Horno Continuo de Sinterizado. (Groover, 1997)

Cabe destacar que existen otros procesos de conformado de polvos, además de la sinterización convencional, como serian:

**El Prensado Isostático.** Proceso en el que la presión se aplica en todas direcciones. Si se realiza en caliente (HIP, Hot Isostatic Pressing), el mismo calor de prensado permite la sinterización.

***El Moldeo por Inyección de Polvos (MIP).*** En el que forman pellets granulares con el polvo mezclado, que se calientan y se inyectan a presión en la cavidad. La presión de inyección permite adoptar la forma final y posteriormente se sinteriza el conjunto.

***El laminado de polvos.*** De forma semicontinua, que es un proceso de compactación de polvos en frío mediante dos rodillos que se encuentran a la salida de las tolvas que los contienen. La tira que se obtiene se vuelve compactar con una segunda serie de rodillos y se sinteriza. Este proceso permite elaborar compuestos largos y almacenar tiras compactadas en bobinas.

***La Extrusión de Polvos.*** En la cual la mezcla de polvos se coloca dentro de un recipiente en el que se hace vacío para que la mezcla se proyecte sobre las paredes. En ocasiones, esta proyección de polvo se realiza mediante la acción de explosivos y, en cualquier caso, se obtienen componentes con grados de densificación muy elevados.

---

### Referencias Bibliograficas

---

Appold H. Tecnología de los Metales. Editorial Reverte, S.A. ISBN 84-292-6014-0, España, 1982.

Askeland Donald R., Phule Pradeep P., Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Internacional Thomson Editores, S.A. México, 2004.

Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.

Salán Ballesteros Nuria Maria. Tecnología de Proceso y Tecnologías de Materiales. Ediciones UPC, España, 2005.

Schey John A. Procesos de Manufactura. Mc Graum Hill/Interamericana Editores, Tercera Edición, México, 2002.

German, Randall M. Sintering Theory and Practice. John Wiley&Sons, Inc. USA. 1996.

German, Randall M. Powder Metallurgy of Iron and Steel. John Wiley & Sons, Inc. USA. 1998.

***Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.***

1. ¿Defina el proceso de Presintetizado en la MP?
2. ¿Qué es el sinterizado en el Proceso MP?
3. ¿De que depende el grado y velocidad de Sinterizado?
4. Defina el Proceso de sinterizado en Fase liquida
5. Describa el proceso de Crecimiento de Grano en los Procesos MP?
6. Diga que se entiende por Contracción en el Proceso de Sinterizado
7. ¿Cuáles son los Tipos de Hornos para el proceso de Sinterizado?
8. ¿Qué se entiende por Moldeo por Inyección de Polvos?
9. ¿Qué se entiende por Moldeo por Extrusión de Polvos?
10. ¿Qué se entiende por Moldeo por Laminado de Polvos?

## Capítulo 7. Acabado fina de las Piezas de Metalurgia de los Polvos.

**A**unque la pieza hecha por presión puede tener una calidad de tolerancias dimensionales muy alta, estas se pueden ver afectadas por la etapa de sinterización. Una nueva etapa de compactación puede servir para mejorar los niveles de las tolerancias dimensionales.

Fuera de las etapas del proceso normal, los tratamientos térmicos pueden llevar a drásticos cambios en las dimensiones. Por esto hay que tener conciencia, al diseñar el proceso, de los tratamientos térmicos y del uso final de la pieza.

En ocasiones, se realizan operaciones posteriores a la etapa de sinterización, como el reprensado localizado (Densificación) la introducción de lubricantes (impregnación), o el relleno de espacios entre partículas con algún material de bajo punto de fusión (Infiltración), Esta operación proporciona compuestos no porosos y con propiedades mecánicas notables. En **la tabla 7.1** se recogen las principales propiedades mecánicas de un acero pulvimetalúrgico, con diferentes grados de densidad, y se comparan con las que presenta un acero equivalente obtenido por fusión.

La porosidad de una pieza completamente sinterizada aun es importante (de 4 a 15%), dependiendo de las características del polvo, la presión de compactación, la temperatura de sinterizado y el tiempo. La densidad se mantiene intencionalmente baja para preservar la interconectada para cojinetes, filtros, barreras acústicas y electrodos de baterías, o cuando los componentes se van a infiltrar. La MP ofrece oportunidades únicas para adoptar propiedades a las

necesidades; al presionar secciones diferentes de una pieza a diferentes densidades, la resistencia y la porosidad se pueden ajustar localmente. La porosidad residual vuelve más rugosos a los compactos sinterizados que la matriz de compactación. Las propiedades de impacto y fatiga son menores que en un material forjado, pero es posible mejorarlas. El tratamiento térmico es una de las posibilidades; otros procesos son únicos.

Tabla 7.1 Propiedades Mecánicas para un Acero según diferentes Técnicas.

Material	Limite Elástico. (MPa)	Alargamiento. (%)
Acero Laminado en Caliente	331	30
A Sinterizado (16% Porosidad)	214	02
Acero Sinterizado y Repensado (5% Porosidad)	283	25

(Fuente: Salan, 2005)

### ***Densificación y Dimensionamiento.***

Numerosas operaciones secundarias se ejecutan para aumentar la densidad y mejorar la precisión, o para lograr formas adicionales en las partes sinterizadas.

#### **El Repensado.**

Es una operación de prensado en la cual se aprieta la parte en un dado cerrado para *aumentar la densidad y mejorar las propiedades físicas.*

#### **El Dimensionamiento.**

Es la compresión de una parte sinterizada para mejorar su precisión dimensional.

#### **El Acuñaado.**

Es una operación de prensado sobre una parte sinterizada para imprimir detalles en su superficie.

Algunas parte sinterizadas requieren de un maquinado posterior, rara vez se usa el maquinado para dimensionar las partes, mas bien se usa para crear

características geométricas que no se puedan lograr por prensado, como son cuerdas internas o externas, perforaciones laterales y otros detalles.

### ***El Reimpactado en Frió. (Acuñado o labrado)***

Es casi inevitable que las piezas sufran un cambio dimensional en el sinterizado. Para contrarrestar este efecto negativo y en algunos casos para incrementar la densidad de la pieza, se usa el Re-Compactar. Como su nombre lo indica consta de volver a compactar la pieza, devolviéndole sus dimensiones iniciales y aumentando la densidad (sólo se aumenta un poco). Esta última propiedad es vital para cuando se necesitan piezas con propiedades mecánicas óptimas, en estos casos también se recomienda volver a hacer un Sinterizado.

El compactado sinterizado eleva su densidad y mejora las tolerancias dimensionales. Al resinterizar el compactado reprensado (**Figura 7.1**) se consigue una mayor densificación y el perfeccionamiento de la resistencia. Con frecuencia se realiza el tratamiento térmico.

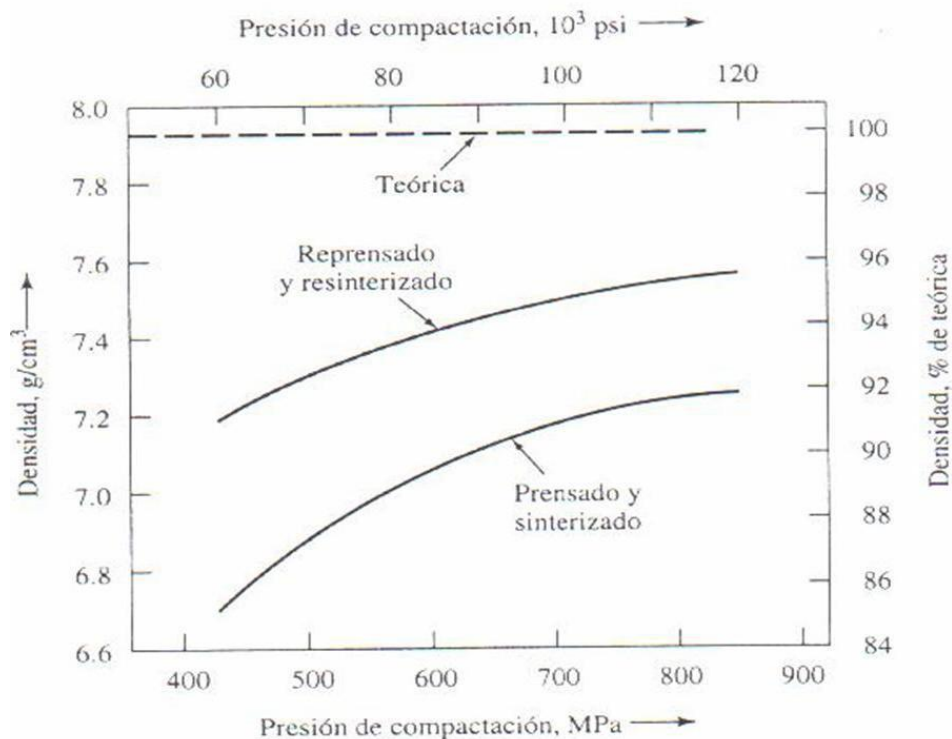


Figura 7.1 La densidad de un compacto de hierro pulverizado se puede elevar reprensado a 700 MPa y resinterizando a 1120 °C durante una hora (Metals Handbook. 8ª. Ed, Vol. 4, ASM Internacional 1969) (Shey, 2004)

En algunos casos también se puede hacer el Re-Compactado en caliente, dándole así más densidad lo que mejora aun más las propiedades mecánicas. Tiene el problema que su control de dimensiones finales no es bueno.

### ***La porosidad.***

Es una característica inherente a las tecnologías de metalurgia de los polvos. Esta se puede aprovechar para crear productos especiales, llenando el espacio disponible en los poros con aceite, polímeros o metales que tienen un punto de fusión más bajo que la base del metal en polvo.

### ***Impregnación e Infiltración.***

#### **Impregnación.**

Es el término que se usa cuando se introduce aceite u otro fluido dentro de los poros de una parte sinterizada. Los productos más comunes son los rodamientos impregnados en aceite, los engranajes y componentes similares de maquinaria. Los rodamientos auto lubricados, fabricados de bronce y hierro con 10% a 30% de aceite en volumen, se usan ampliamente en la industria automotriz. Los tratamientos se realizan mediante inmersión de las partes sinterizadas en un baño de aceite caliente.

La impregnación de un compuesto sinterizado de porosidad interconectada puede obtenerse mediante la inmersión en caliente en aceite. La acción capilar distribuye el aceite; la aplicación de vacío ayuda mucho el proceso.

La **Infiltración** es la impregnación con un metal (por ejemplo, Cu para partes ferrosas), llevada a cabo por inmersión en el metal fundido, o al colocar el metal de infiltración en forma de una lamina arriba o debajo del compactado de un horno; de nuevo la acción de capilaridad llena los poros.

Es una operación en la cual se llenan los poros de las partes de PM con un metal fundido. El punto de fusión del metal de relleno debe ser menor que el de la parte. El proceso implica calentar el metal fundido en contacto con el componente



sinterizado de manera que la acción de capilaridad haga fluir el relleno dentro de los poros. La estructura resultante es relativamente no porosa y la parte infiltrada tiene una densidad más uniforme, así como la tenacidad y resistencia mejoradas. Una aplicación de este proceso es la infiltración con cobre de las partes de hierro sinterizado.

Este es un método para mejorar la resistencia de materiales porosos que consiste en llenar los poros superficiales con un metal líquido que tenga menor punto de fusión. No necesita presión y se usan bastante con piezas ferrosas y utilizando cobre como infiltrante. Este método también es utilizado para producir materiales compuestos con propiedades eléctricas especiales como Tungsteno/Cobre y Molibdeno/ Plata.

#### **Referencias Bibliograficas.**

---

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Salán Ballesteros Nuria Maria. Tecnología de Proceso y Tecnologías de Materiales. Ediciones UPC, España, 2005.

Schey John A. Procesos de Manufactura. Mc Graum Hill/Interamericana Editores, Tercera Edición, México, 2002.

#### **Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.**

---

1. ¿Por qué se requieren los procesos de acabado en los PM?
2. Diga la función del proceso de Densificación y Dimensionamiento?
3. Explique el fenómeno de la Porosidad en la MP.
4. Describa el proceso de Impregnación en los procesos de MP.
5. Describa el proceso de Infiltración en los procesos de MP.
6. Describa el proceso de Reimpactado en frío en los procesos de MP.

## Capítulo 8. Tratamientos Térmicos.

**E**n Pulvimetalurgia aplican los mismos tratamientos térmicos, Temple, Recocido, Revenido, envejecimiento y otros. Los principios se diferencian en algunos matices. Limitándonos al caso de los aceros al carbono, el diagrama transformación, temperatura y tiempo (TTT) esta influido por la microestructura, por el tamaño de la pieza y por la severidad del medio, pues la microestructura de los aceros convencionales, en principio, es distinta de los aceros pulvimetalurgicos y la posición de las curvas de transformación se ve afectada por este detalle. Tan bien hay diferencias en la práctica del tratamiento térmico; por ejemplo, la porosidad superficial de las piezas sinterizadas impide emplear baños de sales, ya que estas se introducen en los poros ocasionando efectos corrosivos.

Persiguen la transformación metalúrgica de la microestructura de la aleación con el objetivo de incrementar las propiedades mecánicas como la dureza, resistencia, alargamiento u otras. Aunque muchos, quizás la mayoría de los componentes estructurales pulvimetalurgicos son empleados en estado de sinterizado o sinterizado y reprensado, una gran cantidad de piezas base hierro, concretamente aceros, se suministran en estado de temple o endurecidos. Para ello se emplean tratamientos y procesos de endurecimiento convencionales; sin embargo, debida a la porosidad inherente a las piezas sinterizadas, no debe llevarse a cabo su inmersión en líquidos corrosivos (baños de sales, agua o salmuera debido a la dificultad que plantea su eliminación o extracción de los poros en este tipo de materiales.

### ***Endurecimiento superficial.***

La cementación y carbonitruración son tratamientos extensamente aplicados para la realización de transformaciones metalúrgicas y termoquímicas en la superficie de piezas sinterizadas con el objetivo de alcanzar determinadas propiedades mecánicas y resistencia al desgaste. Para ello es necesario el empleo de atmósferas adecuadas (endogás, amonía) así como su enfriamiento rápido en aceite.

### ***Tratamiento al vapor.***

Este proceso, específico de la ruta pulvimetalúrgica, implica el tratamiento de las piezas con vapor de agua a alta presión a temperaturas próximas a los 500 °C. El objetivo es la transformación termoquímica de la capa superficial de Fe en Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (óxido de hierro, magnetita). Como resultado se ven beneficiadas numerosas propiedades como la dureza y la resistencia al desgaste. En primer lugar se incrementa la resistencia a corrosión mediante el cierre de la porosidad; como consecuencia de esta reducción de la porosidad superficial se produce un incremento en la resistencia a compresión y, finalmente, la capa de óxido superficial incrementa la dureza y más significativamente la resistencia al desgaste.

Según sea la composición de los materiales sinterizados estos podrán ser tratados posteriormente para mejorar determinadas propiedades, así como por ejemplo en el acero sinterizado podrá mejorarse la resistencia a la tracción mediante un enfriamiento brusco y en el hierro sinterizado podrá mejorarse la resistencia al desgaste y a la corrosión mediante revenido en vapor de agua recalentado a 200 °C. Tanto el acero como el hierro sinterizado pueden cementarse y templarse superficialmente. Los bronce sinterizados se impregnan con aceite para obtener buenas propiedades de deslizamiento y de marcha en condiciones precarias; el latón sinterizado es apropiado para el tratamiento galvanico de la superficie.

Los componentes de polvos metálicos pueden tratarse térmicamente y terminarse (electrodeposición y pintura) por la mayoría de las operaciones que se usan en las partes fabricadas por fundición y otros procesos de trabajo de metales. Los mismos tratamientos térmicos se usan para endurecer y hacer más resistentes las partes.

Se pueden aplicar a las partes sinterizadas operaciones de chapeado y recubrimientos con fines de apariencia y resistencia a la corrosión. Se debe tener cuidado para evitar que las soluciones químicas queden atrapadas en los poros, frecuentemente se usan la impregnación y la infiltración para este propósito. Los chapeados comunes para partes sinterizadas incluyen cobre, níquel, cromo, zinc y cadmio.

Esta operación se efectúa en una atmósfera controlada en las partes sinterizadas para aumentar su resistencia al desgaste y a los golpes, firmeza, dureza, tenacidad etc. También mejora el tamaño del grano y evita la oxidación de las estructuras internas. El relevado de esfuerzos, carbonitrurado, carburado, endurecimiento por inducción, endurecimiento total y nitrurado son algunas de las operaciones de tratamiento térmico que se aplican a los componentes sinterizados.

### ***Chapeado.***

Los componentes sinterizados se chapean para protegerlos de la corrosión, mejorar la resistencia al desgaste y la fricción y aumentar las características de dureza y conductividad eléctrica, así como impartirles una apariencia agradable.

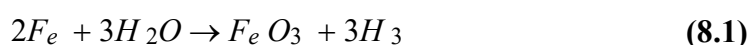
Por lo general sobre los componentes sinterizados se realiza chapeado con cromo, níquel, estaño, cobre, cobalto y cadmio. Antes del chapeado, el componente se impregna con resina plástica para que el electrolito no quede atrapado en los poros del componente.

### ***Pavonado.***

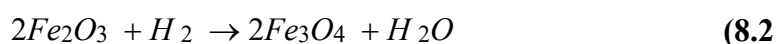
Es una operación de protección, que tiene por objeto producir la oxidación superficial del componente metálico por calentamiento de la atmósfera oxidante.

El pavonado produce un recubrimiento de magnetita, óxido ferroso-férrico de color negro, que forma una capa impermeable y adherente al metal base, con un coeficiente de dilatación muy parecido al acero.

Un procedimiento más corriente para pavonar piezas pulvimetalúrgicas consiste en inyectar vapor de agua sobrecalentado (550 °C) en un tanque que contenga las piezas que se quieren proteger. Las reacciones que tienen lugar comienzan con la formación del óxido de hierro (III):



Al aumentar la concentración en hidrógeno, el óxido rojo se convierte en óxido negro:



El diagrama de equilibrio hierro-oxígeno, de la **Figura 8.1** indica que, cuando hay poco oxígeno se forma una mezcla de hierro más Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, cuya composición en peso es de 74,4 % en hierro. El FeO a temperatura ambiente es termodinámicamente inestable.

Otro procedimiento de Pavonado en fase vapor, por tanto, adecuado para aplicar a las piezas obtenidas pulvimetalúrgicamente, consiste en oxidar el hierro en atmósfera de dióxido de carbono, con un pequeño porcentaje de monóxido de carbono, calentando a unos 600 °C. Este procedimiento se justifica, teóricamente en los diagramas hierro-temperatura-composición CO<sub>2</sub>-CO, de Baudour-Chaudron (**figura 8.1**)

### ***El recubrimiento Electrolítico.***

Este acabado presenta un inconveniente, a saber: la dificultad que las piezas de MP ofrecen al recubrimiento electrolítico, lo cual deriva de su porosidad. La solución está en la oxidación controlada de los poros o en la impregnación con silicona o con resinas termoendurecibles. La silicona actúa por su efecto repelente del agua. Por este motivo, las disoluciones iónicas de los baños

galvánicos no mojan al poro tapado con silicona y que no se recubre al aplicar las condiciones de deposición electroquímica.

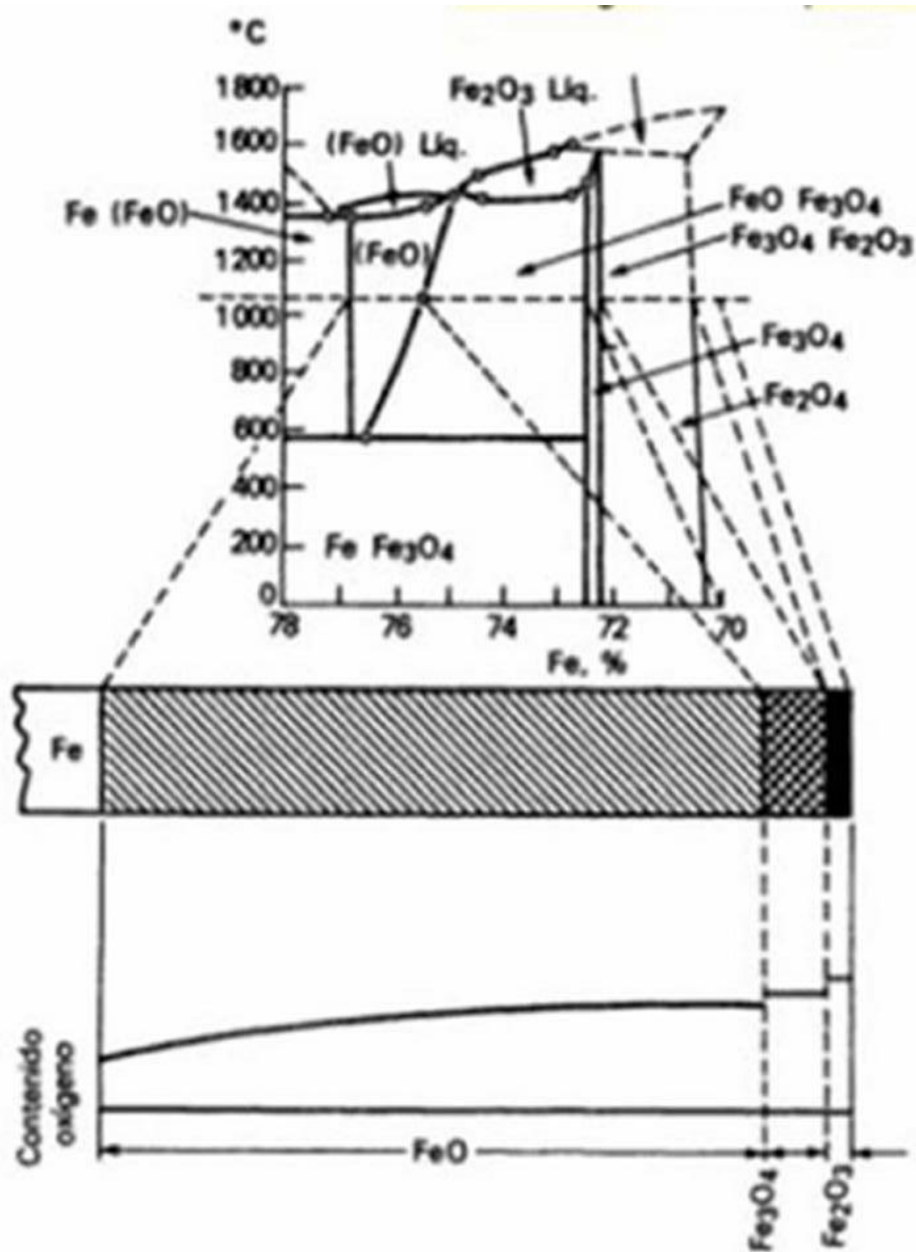


Figura 8.1 Diagrama de equilibrio Hierro Oxígeno. (Morrall et al, 1982)

### ***Normalizado de los Materiales Sinterizados.***

Los materiales sinterizados están normalizados por las hojas de los materiales de la Asociación Profesional de la Metalurgia de los Polvos. Se

distinguen: Materiales de filtrado altamente porosos, materiales porosos para cojinetes, materiales sinterizados para piezas de precisión, ordenados según material básico, grado de relleno del espacio y densidad, así como materiales impregnados.

Los símbolos empleados para designarlos (**Figura 8.2**) constan de la sílaba Sint-, de las letras A hasta la F y una cifra de dos guarismos. La letra del símbolo designa el grado de relleno o el volumen de los poros, el primer guarismo la composición del material y el segundo la numeración correlativa en el caso de propiedades físicas variables.

Así por ejemplo, Sint - D 10 representa un acero sinterizado con alto grado de relleno del volumen ocupado y contiene cobre, y Sint - A 50 un bronce símbolo o de sinterizado con gran volumen de poros y que por su composición es comparable al G- CuSn 10 (G-SnBz 10).

Del símbolo (o designación abreviada) no se deducen sin más explicaciones la clase o la composición del material sinterizado en cuestión y los valores hay que irlos a buscar a las hojas de normas.

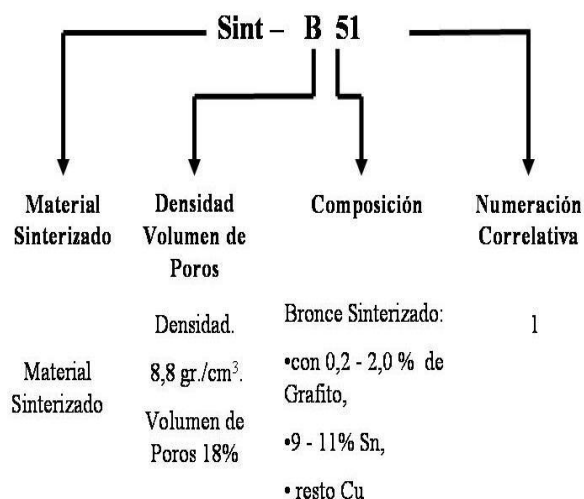


Figura 8.2 Constitución de un símbolo para la designación de materiales Sinterizados (Fuente: Leyenmetter, 1990)

En las hojas de normas relativas a materiales se hallan resumidos los grupos A hasta F, los materiales sinterizados según sus propiedades físicas y con

ello, al mismo tiempo y ampliamente, según sus aplicaciones, sin tener en cuenta el metal básico de que esta compuesto el polvo a prensar. Si se clasifican los materiales sinterizados de acuerdo con el nombre de su aleación se distingue el hierro, el acero, el bronce, el latón y la alpaca (plata alemana o Meneses) sinterizados.

---

### Referencias Bibliográficas.

---

Appold H. Tecnología de los Metales. Editorial Reverte, S.A. ISBN 84-292-6014-0, España, 1982.

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Layensetter A., Wurtemberger G., Sáenz de Magarola Carlos. Tecnología de los Oficios Metalúrgicos. Editorial Reverte S.A, España, 1990.

---

### Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.

---

1. ¿Cuáles Tratamientos Térmicos se aplican MP?
2. ¿Por qué los Bronces se impregnan en aceite en los procesos en la de MP?
3. ¿En que consiste el Pavonado en la MP?
4. Describa el proceso de Recubrimiento Electrolítico.
5. ¿Cual es la finalidad de los tratamientos termicos?.
6. Mencione algunos tratamientos térmicos en piezas de PM
7. ¿Que significa el normalizado de los procesos de Sinterizado?
8. Describa el recubrimiento electrolítico en la MP.
9. ¿Cuál es el significado de Chapeado en la MP?.



## Capítulo 9. Aplicaciones de la Metalurgia de los Polvos.

La fabricación de piezas sinterizadas tiene lugar, según las propiedades perseguidas, en las etapas de Obtención de Polvo; Prensado del Polvo (para formar las piezas) Sinterizado de las Piezas; Prensado Posterior y Calibrado de las piezas sinterizadas; así como Tratamientos Térmicos (Templado, Cementado o Impregnación de Aceite). Para conocer todo el proceso de producción por MP en la **figura 9.1** se presenta un esquema general del diagrama de proceso y las áreas de una planta con una producción mensual de alrededor a 500.000 unidades.

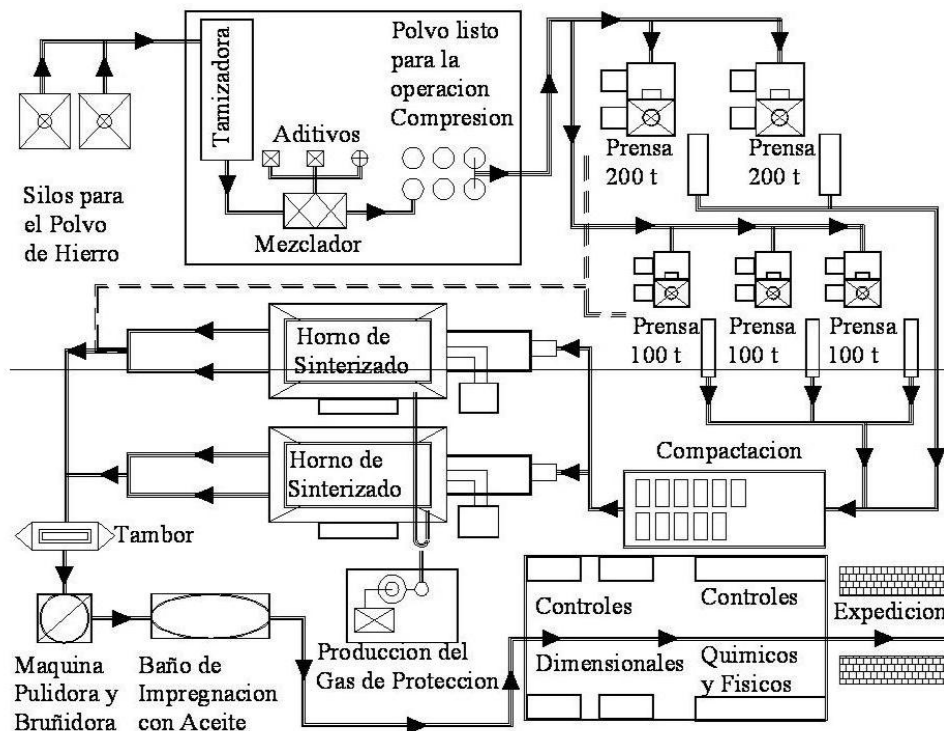


Figura 9.1 Representación esquemática de una Instalación de Sinterización con una producción mensual de 500.000 piezas de un peso unitario de 50 g (según Industrie-Anzeiger, Vol. 82, num. 70) (Gerling, 1979)

### ***Proyecto de piezas sinterizadas.***

Al proyectar piezas fabricadas por MP debe recordarse que se trata de un proceso especial y prever un número de factores específicos del mismo. Para

proyectar piezas sinterizadas la Powder Metallurgy Parts Asociación recomienda seis reglas básicas.

1. La forma de la pieza debe permitir su expulsión de la matriz.
2. La forma de la pieza debe ser tal que el polvo no deba fluir entre paredes finas, ranuras estrechas ni esquinas agudas.
3. La forma de la pieza debe permitir la construcción de un utillaje robusto.
4. La forma de la pieza debe tener en cuenta el espesor al cual pueden compactarse las piezas delgadas.
5. La pieza debe proyectarse con los mínimos cambios de sección posibles.
6. Aprovechar el hecho de que ciertas formas de obtención imposibles, poco prácticas o antieconómica por otros métodos, son susceptibles de producción por Pulvimetalurgia.

Para que la resistencia mecánica sea uniforme la densidad debe ser uniforme; por lo tanto, las piezas hay que diseñarlas con un espesor reducido en comparación con la sección transversal. Así, el cociente entre los espesores no prensado y final debe mantenerse, siempre que se pueda, por debajo de 2. Deben eliminarse los diámetros escalonados, agujeros cóncavos, ranuras y entallas. Hay que evitar los cambios bruscos de sección y los ángulos internos sin acuerdos generosos. Pueden moldearse sin dificultad estriados rectos, pero no moleteados

cruzados. El plano de encuentro entre los machos del molde debe estar en una superficie plana o cilíndrica, nunca en una esfera. Deben evitarse las acanaladuras angostas y profundas.

Los usos para las piezas de metal de polvo son virtualmente ilimitados en alcance. Mientras que los usos comerciales para el proceso extienden de nuevo un número de nuevas e interesantes adaptaciones. **La Figura 9.2** ilustra algunos usos típicos del producto.

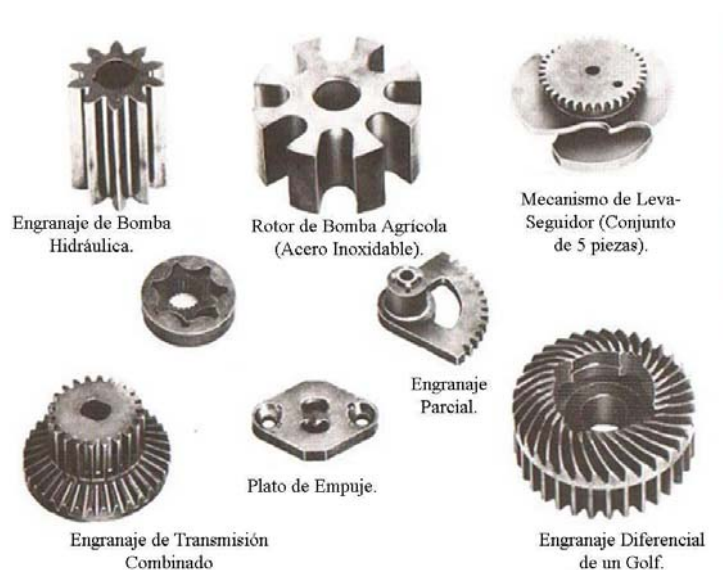


Figura 9.2 Partes Típicas producidas por Metalurgia de los Polvos (Cortesía de Burgess-Norton Mfg. Co.; Yankee, 1979)

Las siguientes son aplicaciones de la Metalurgia de los Polvos:

### ***Piezas porosas.***

El P.M. es el único método práctico de producir partes con porosidad controlada. Estructuras metálicas y las no metálicas se pueden obtener con una red uniformemente espaciada de poros, como la producción de pantallas especiales y de filtros usados en controlar el flujo de gases y de líquidos. Tales piezas se hacen con las porosidades de hasta el 80% del volumen. Las estructuras Menos-porosas se crean para el cojinete auto lubricado, tiras de la diapositiva, placas de la extensión, engranajes, levas, y así sucesivamente. Las partes de esta clase se

sinterizan con una porosidad de el hasta 40% del volumen total seguido por la impregnación con un lubricante conveniente.

*Cojinetes Porosos.* A los artículos que se producen mediante la Metalurgia de los Polvos se les puede dar cualquier grado deseado de porosidad mediante el control de tamaño de las partículas, su distribución y presión durante la compactación. Los cojinetes porosos auto lubricados de latón, cobre, estaño, grafito y hierro se fabrican mediante la metalurgia de los polvos. Dichos cojinetes de porosidad controlada se utilizan en las placas de acumuladores eléctricos de gran capacidad, filtros, engranajes de bombas de aceite, trinquetes de puerta, levas. Bloques guías de rondanas, sierras mecánicas, etc.

*Hojas Metálicas Porosas.* Los polvos metálicos como el cobre, latón, bronce, monel y acero inoxidable se rolan en hojas porosas que tienen porosidad controlada. Por lo general se utilizan dos métodos para rolar las hojas; Sinterizado por Gravedad y Rolado.

El método de rolado por Gravedad se utiliza en polvos de acero inoxidable. En este proceso se esparce una capa de espesor uniforme sobre bandejas cerámicas. Se sinteriza a alta temperatura por 40 horas en una atmósfera de amoniaco disociado. Para obtener un espesor uniforme y un mejor acabado superficial, las hojas se rolan y se fabrican en formas adecuadas.

Estas hojas de acero inoxidable son resistentes a la corrosión y se utilizan como filtros para gasolina, aceite, petróleo y productos químicos.

El proceso de rolado se utiliza para fabricar hojas de latón, cobre, bronce y monel a partir de polvos. El polvo metálico se alimenta a una tolva y se le permite caer entre dos rodillos metálicos, que lo comprimen como una hoja metálica. El componente se sinteriza en un horno especial y se rola nuevamente a su tamaño definitivo. Durante la compresión, las partículas se entrelazan, lo que produce una resistencia suficiente. La resistencia y la porosidad se controlan mediante las presiones adecuadas. El resultado de este proceso son propiedades mecánicas uniformes y porosidad controlada.

### ***Cojinetes de babbit para automóviles.***

Los cojinetes principales y los de las varillas de conexión para automóviles se producen mediante las técnicas de MP. Durante este proceso se aplica una mezcla de polvo de cobre y níquel a una pieza de respaldo de acero, que se coloca en un horno de sinterizado después de comprimida. Por lo general en este proceso se usa una mezcla de 45% de níquel y 55% de cobre. Durante la sinterización se forma una unión fuerte entre el cobre y la pieza de acero de respaldo, mientras que la aleación de níquel forma un material poroso compuesto con el cobre para cojinetes.

### ***Carburos cementados.***

Las herramientas y los dados de corte hechos del carburo de tungsteno continúan siendo un producto importante del P.M. los bujes resistentes al desgaste con una capa del carburo también se incluyen en esta categoría. Por lo general, los carburos de tungsteno, molibdeno, titanio y tantalio se utilizan para fabricar herramientas de corte.

Todos estos metales tienen puntos de fusión muy elevados. El carburo de tungsteno se produce mediante el calentamiento de óxido de tungsteno con negro de humo en una corriente de hidrógeno a 1600 °C por muchas horas. El polvo de cobalto se produce de manera similar. El cobalto se utiliza como aglutinante en el polvo de tungsteno. Los dos polvos se mezclan en proporciones iguales, se comprimen a 48 Kg/cm<sup>2</sup> y se sinterizan en dos etapas. La primera se lleva a cabo a una temperatura de 900 °C. Después se maquina en componente a las dimensiones exactas. La sinterización final se lleva a cabo a una temperatura de 1300 °C por dos horas y el componente está listo para ser utilizado.

*Piezas de la fricción:* Varias combinaciones de metal y cerámica se utilizan para producir las guarniciones del freno y de embrague, los discos de fricción, y las otras piezas especiales de la fricción, tales como rodillo, espaciadores, y resbaladores.

### ***Tungsteno dúctil.***

El tungsteno tiene un punto de fusión muy elevado y es muy difícil de fundir. El Dr. W. D. Coolidge fue el primer científico que desarrolló el polvo de tungsteno mediante la reducción de óxido de tungsteno con hidrógeno. El polvo se comprime, presintetiza y se sinteriza para obtener tungsteno dúctil. Se aplica la operación de estampado y estirado para formar fuertes alambres dúctiles de casi 0,2 mm de diámetro pasándolo a través de discos de carburo de tungsteno o de diamante. El acabado final del alambre se efectúa a 1000 °C. Este alambre tiene una resistencia que es más del doble de la del acero más duro y se utiliza como filamento en la industria de las lámparas incandescentes. El alambre de tungsteno se emplea para diversas aplicaciones industriales que requieren de un alto valor de resistencia y dureza.

### ***Piezas estructurales y de la máquina.***

Algunas piezas, especialmente usadas en la industria aeroespacial, tienen una elevada exigencia a la resistencia al calor, a la corrosión, o requisitos de la dureza. Las combinaciones especiales de polvo de metal solucionan estas demandas del servicio. De hecho, el polvo se puede combinar para producir piezas de los materiales que no se obtendrían por ningún otro método. En algunos casos, la parte se puede hacer de los materiales muy duros o frágiles para procesar por métodos convencionales. Puesto que el proceso es adaptable a la producción de formas complicadas a un tamaño exacto de la parte y a un final superior.

Los engranajes por MP y la gran variedad de las otras partes, tales como limpiador de parabrisas e interruptores, se utilizan en la industria del automóvil. Los artículos del hardware o las piezas de muchos aparatos electrodomésticos, equipo industrial, herramientas eléctricas, máquinas de negocio, granja y de jardín, y en las varias herramientas de máquinas son producidos con frecuencia por MP.

*Rotores para Bombas y Engranajes.* Los rotores de bombas y los engranajes utilizados en la industria del automóvil se fabrican mediante el proceso de MP. Se mezcla hierro puro en polvo con suficiente grafito para proporcionar el contenido de carbono deseado al producto. Posteriormente el polvo se comprime en moldes para dar las dimensiones exactas y después se sinteriza. A continuación estos componentes se impregnan en aceite después de ser sinterizados para reducir el desgaste normal y el ruido durante la operación. Este proceso es particularmente adecuado para fabricar engranajes de forma y tamaño. Las propiedades de los componentes que se fabrican mediante el proceso son similares a las de la fundición de hierro gris, con la ventaja de que con este proceso tienen 20% de porosidad.

*Escobillas de Motores.* Las escobillas de motores también se fabrican por MP. Para elaborarlas se mezclan polvos de cobre y grafito en las cantidades requeridas y se sinterizan. El compactado combina la alta conductividad del cobre con el peso ligero y las propiedades lubricantes del grafito. Se agregan pequeñas cantidades de estaño y de cobre para aumentar la resistencia al desgaste de las escobillas.

### ***Material refractario compuesto.***

El material refractario debe ser capaz de soportar una temperatura mínima de 1580 °C. Estos materiales solo se pueden producir por el método de MP y también se les denomina “cerámicas” (Cermets); son entre otros, el óxido de magnesio, carburo de sílice, grafito, óxido de cromo, molibdeno, tantalio y platino. Se producen mediante rectificado, mezcla, compactación y sinterizado de polvos metálicos.

### ***Filtros metálicos.***

Mediante la técnica de la MP se pueden producir partes hasta con 80 % de porosidad. Los filtros se utilizan en la industria para retirar impurezas de aceite, líquidos y gases. Estos materiales también son resistentes al impacto. Por lo general en los filtros se utiliza níquel, plata, bronce y monel. El polvo metálico se

---

tritadura, se mezcla con las propiedades adecuadas con material aglutinante, se comprime y se sinteriza para formar filtros. Por medio de este proceso se producen poros que oscilan de 1 a 50 micras. Actualmente, los filtros de acero inoxidable que más se utilizan se producen con este método.

### ***Herramientas de diamante.***

Se fabrican puntas de diamante para herramientas mediante la mezcla de 30% de diamante con polvo de hierro. La compresión del compactado se lleva a cabo de 8 a 10 Kg/cm<sup>2</sup> y después la sinterización se efectúa a 1000 °C. Estas herramientas se utilizan para cortar materiales duros como la porcelana y el vidrio.

### ***Núcleos y electrodos.***

Con frecuencia, las combinaciones metálicas que tienen puntos de fusión ampliamente diferentes, como el tungsteno-cobalto, plata-molibdeno y plata-tungsteno se utilizan para formar núcleos y electrodos. Los metales como el tungsteno y el molibdeno pueden resistir el efecto del arco y se emplean para fabricar tableros eléctricos. Estas partes son resistentes al desgaste. Los núcleos de tungstenos sinterizados se utilizan en telegrafía, radios y televisiones. También son adecuados para aplicaciones de alta frecuencia y magnéticas.

### ***Piezas e imanes eléctricos.***

Otros usuarios importantes de los productos de la P.M. son las áreas eléctricas o electrónicas para las partes tales como cepillos del motor o del generador y otros contactos eléctricos. Una combinación de polvo del grafito y del cobre se emplea generalmente para tales piezas. De la considerable importancia también están los imanes son corazones integrados por el hierro conjuntamente con polvos del aluminio, del níquel y del cobalto. Muchos componentes electrónicos son hechos por este proceso.

*Magnetos.* Los pequeños magnetos, conocidos como álnicos, una mezcla de polvos de aluminio, de níquel y de cobre, se producen mediante la MP. Estos magnetos tienen mejores propiedades que los magnetos fundidos. Poseen una



estructura homogénea, tamaño fino de grano y no tiene defectos internos. Los magnetos que se emplean en los instrumentos científicos se producen mediante la P porque poseen buenas características magnéticas.

### ***Sellos de vidrio metálico.***

Se producen con la técnica de la MP mediante combinación de metales refractarios. Estos materiales tienen la ventaja de presentar bajo coeficiente de expansión o de contracción térmica y dan mejores resultados que las fundiciones.

### ***Recubrimiento metálico.***

Es un proceso de deposición de una capa delgada de un material sobre la superficie de otro se deposita una cubierta metálica de cobre sobre utensilios de cocina de acero inoxidable para producir una temperatura perfectamente uniforme a toda la gama. Los materiales termostáticos dobles se fabrican mediante la MP, en los que capas de diferentes materiales se latonan una sobre la otra. Los contactos de platino con respaldo de hierro de las placas metálicas del interruptor de mercurio Payne se fabrican mediante compresión y calentamiento en una atmósfera de hidrógeno, se trata de una técnica pura de MP.

### ***Otras aplicaciones de la MP.***

1. Ruedas laminadas de diamante para corte.
2. Aglutinantes para frenos.
3. Electrodo para soldadura.
4. Electrodo de grafito que se utilizan en hornos de arco.
5. Superficies de fricción de embragues que contienen Cu, Sn, C, Pb, etc.
6. Pinturas y pigmentos.
7. También se agregan productos metálicos a los plásticos.
8. Brocas para pozos petroleros.
9. Afiladores de ruedas para rectificadores.
10. Materiales compuestos para contacto eléctrico tales como Cobre / Tungsteno, Plata / Óxido de Cadmio.

11. Metales duros, usados para herramientas de corte y forjado de metales. Estos incluyen Ni, Ni-Co, Ni-Cr, en general superaleaciones en base de Níquel y aceros complejos.
12. Herramientas de corte especial hechas de diamante dispersado en una matriz metálica.

Tabla 9.1 Aplicaciones de la MP en relación al % de Volumen Poroso.

<b>Clase</b>	<b>Volumen Poroso (%)</b>	<b>Ejemplo de Aplicaciones</b>
SINT-A	Hasta 60%	Filtros
SINT-B	Hasta 30%	Cojinetes para Fricción, Forros.
SINT-C	Hasta 20%	Piezas para maquinas de coser y oficina.
SINT-D	Hasta 15%	Piezas para Maquinas (Cementables, Soldables)
SINT-E	Hasta 10%	Piezas para Relés (Resistencia Elevada)
SINT-F	Hasta 7%	Segmentos Dentados, cremalleras, contactos.

Las cifras según la Clase. Por Ejemplo: SINT-B son los índices de los componentes de la aleación.

Fuente: Appold, 1982

## ***Superaleaciones.***

La inactividad química de algunas aleaciones cobalto-cromo encuentra aplicación idónea en prótesis, para reparar huesos rotos del cuerpo humano y en odontología. La aleación mas utilizada para estas finalidades son denominas superaleaciones convencionales (hasta 950 °C) y especiales (hasta 1200 °C).

Son “aleaciones” base hierro, base cobalto y base níquel con elevado porcentaje de cromo y otros elementos. Las superaleaciones se conforman por moldeo y por Pulvimetalurgia por el método convencional o por Compactación Isostática (Caliente o Frió).

## ***Superaleaciones base hierro.***

El hierro es el elemento mayoritario de estas superaleaciones y los valores elevados de dureza, resistencia a la tracción y límite elástico, suele ser debido a la precipitación en los límites de grano, de carburos de fórmulas que van desde  $M_{23}C_6$  al  $M_6C$  y a la formación, dentro de los granos, de fases tales como sigma, la mu, la chi y la de Laves. El níquel, aluminio, el titanio y el niobio contribuyen a la precipitación de las citadas fases, de composición química más bien definida, de gran dureza y poca tenacidad.

### ***Superaleaciones base cobalto.***

Ninguna superaleación de cobalto es monofásica, pues en la microestructura de todas ellas se aprecian carburos precipitados ( $M_6C$ ;  $M_{23}C_6$  al  $M_2C_3$  o  $MC$ ) o compuestos intermetálicos. Todos estos compuestos y carburos actúan sobre el conjunto de modo que endurecen y disminuyen la ductilidad del metal.

### ***Superaleaciones base níquel.***

Las superaleaciones base níquel presentan mayor resistencia a la corrosión a elevada temperatura que los aceros inoxidable. Suelen contener de un 30 a un 75% de níquel y un 30% de cromo. A veces contienen pequeños porcentajes de aluminio, titanio, niobio, molibdeno u tungsteno.

### ***Casos prácticos de piezas fabricadas por MP.***

La metalurgia de polvos consiste en una serie de procesos que ordenados y controlados permiten la obtención de piezas mecánicas de buena calidad y alta producción.

La selección y aplicación de un polvo en un proceso es dependiente de material, tamaño, forma, etc., ya que serán estas las propiedades necesarias para poderlo manipular en el proceso. Por esto, dependiendo del objeto que se requiera, el polvo debe estar dentro de un rango de tamaño, una forma en particular, etc.

La metalurgia de polvos es un proceso que utiliza muchos procesos en serie ya conocidos en la industria. De esta manera, la articulación del

conocimiento de estos procesos permite el control y conocimientos de la metalurgia de polvos. Por lo tanto, un proceso utilizado en todos los países industrializados para producir volúmenes de piezas metálicas altos, no está fuera de nuestras posibilidades. Lo importante será desarrollar esta tecnología así como lo han hecho en los países desarrollados.

A continuación se presentan una serie de piezas fabricadas por la tecnología de la metalurgia de los polvos, se estima que se fabrican mas de 100 piezas de los automóviles en la actualidad.

### 1.- Sierra de la Cadena de Embrague.



**Fabricante: Callo AB.**

**Función:** Al subir las rpm sobre la sierra de la zapata, esta centrifuga y dirige la cadena, cuando bajan las rpm un muelle la retrae la cadena se para.

La pieza es muy crítica porque debe ajustar perfectamente, ya que si no el muelle al retraerse puede hacer que la cadena no se pare correctamente.

**Innovación PM:** Pieza compleja hecha por Compactación en Caliente (warm compaction) y mecanizado en verde.

**Alternativa a la PM:** Se puede realizar por forja y mecanizado. Por PM el coste es dos veces menor.

**Etapas de fabricación:** El embrague se monta con dos productos PM (un cubo y dos zapatas) y dos muelles no PM.

Ambas piezas Polvos aleados por difusión (Ni 4%, Cu 1,5%, Mo 0,5 % C 0,15% resto. Fe, listo para prensar por Compactado en Caliente, Sinterizado a 1120 y Tratado Térmicamente.

El proceso de Compactado en Caliente utiliza menores presiones en las herramientas y permite mecanizar en verde.

**Cubo:** Pieza de dos niveles con transferencia de polvo. Mecanizada en verde.

**Zapata:** Pieza de 2 niveles con transferencia de polvo.

### **HOJA COMPLETA DE DATOS**

**Nombre de la Pieza PM:** Sierra de la Cadena de Embrague Compactada en Caliente.

**Empresa Usuario Final:** Husqvarna AB

**Composición de la Pieza de MP:** Ni 4%, Cu 1,5%, Mo 0,5 % C 0,15% Bal Fe (Distaloy AE as Densmix, Höganäs AB)

**Peso Inicial de los Polvos:** 149

**Peso de la Pieza Terminada:** 147,5 g

**Técnica de Consolidación del Polvo:** Compactación en Caliente

**Herramientas Utilizadas:** Tool Steel

**Presión de Consolidación:** 500 MPa

**Densidad del Compactado Antes del Sinterizado:** 7 g/cm<sup>3</sup>

**Temperatura para Sinterizado u otro método de Consolidación en Caliente:** 1120 °C.

**Densidad Final de la Pieza (g/cm<sup>3</sup>):** 7,0 g/cm<sup>3</sup>

**Porcentaje de contracción desde el compactado hasta la forma final:**  
0,1 %

**Densidad relativa como porcentaje de la densidad teórica:** 89 %

**Detalle de alguna operación de acabado adicional usado: Por ejemplo, Maquinado, Tratamiento Térmico, Impregnación, recubrimiento etc.:** Mecanizado del Compactado Verde a ambas piezas con Carbonituration.

**Densidad (g/cm<sup>3</sup>):** 7

**Esfuerzo de Tensión (N/mm<sup>2</sup>):** 900

**Esfuerzo de Fluencia (=0.2% N/mm<sup>2</sup>):** 650

**Dureza:** 700 Hv 0,1

**Elongación:** 0,5:

**Tratamiento Térmico:** Si

**Fecha de la producción PM comenzada antes de:** 29/Par/2003

#### - Cubo Sincronizador.



**Fabricante:** Miba AG

**Función:** Los cubos sincronizadores se usan en las cajas de cambios manuales de los automóviles. Sincronizan los procesos de encaje entre los distintos engranajes. Cada cubo se encuentra entre dos engranajes y normalmente hay un cubo por marcha. Son piezas que actúan de forma dinámica y su fallo encierra un accidente grave. Son materiales que deben asegurar un producto libre de grietas.

**Innovación PM:** Fue la primera pieza pulvimetalúrgica para una aplicación de fatiga de alta amplitud en una caja de cambios. La durabilidad

estructural para, al menos 300.000 Km., se consiguió sustituyendo la pieza obtenida por doble prensado/doble sinterización por warm compaction y aleaciones libres de Ni, obteniéndose, además un producto más barato.

**Alternativa PM:** Se pueden fabricar por forja y mecanizado severo.

**Secuencia de fabricación.**

Compactación en Caliente a 800 MPa.

Sinterización a 1120 °C.

Enfriamiento rápido, mecanizado y revenido.

**HOJA DE DATOS COMPLETA**

**Nombre de la Pieza PM:** Cubo Sincronizador

**Empresa Usuario Final:** PSA (Peugeot – Citroen)

**Composición de la Pieza de MP:** Cr 3%, Mo 0,5 % C ?% Bal Fe (Astaloy CrMo + C – Warm powder compaction premix , Höganäs AB)

**Peso Inicial de los Polvos:** 164 g

**Peso de la Pieza Terminada:** 161 g

**Técnica de Consolidación del Polvo:** Compactación en Caliente.

**Herramientas Utilizadas:** Multiplaten

**Presión de Consolidación:** 800 MPa

**Densidad del Compactado Antes del Sinterizado:** 7.1 g/cm<sup>3</sup>

**Temperatura para Sinterizado o otro método de Consolidación en Caliente:** 1120°C

**Densidad Final de la Pieza (g/cm<sup>3</sup>)::** 7.1 g/cm<sup>3</sup>

**Porcentaje de contracción desde el compactado hasta la forma final:**  
0,0 %

**Densidad relativa como porcentaje de la densidad teórica:** 90 %

**Detalle de alguna operación de acabado adicional usado:** Por ejemplo, Maquinado, Tratamiento Térmico, Impregnación, recubrimiento etc.:  
Enfriamiento Rápido + maquinado en los extremos + tempering.

**Densidad (g/cm<sup>3</sup>) :**7.1

**Densidad (g/cm<sup>3</sup>) :** 1050

**Esfuerzo de Fluencia (=0.2% N/mm<sup>2</sup>):** 900

**Dureza:** 350 HV 5

**Limite de Resistencia a la Fatiga (N/mm<sup>2</sup>):** 360 (fully reversed bending)

**Esfuerzo de Rotura (N/mm<sup>2</sup>):**

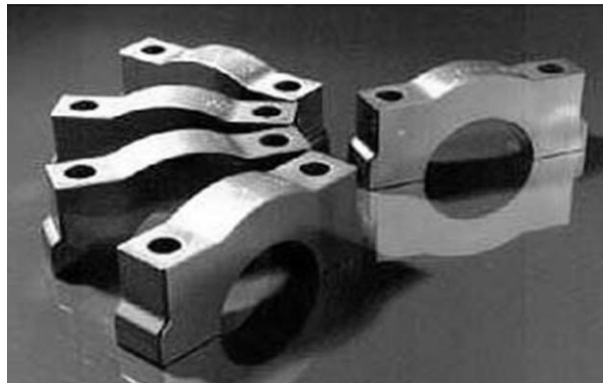
**Tratamiento Térmico:** Si

**Fecha de la Producción PM comenzada antes de:** Final del 2003

**Producción Anual Cantidad :** 350.000

**Fecha de la producción PM comenzada antes de:** 29/Apr/2003

### 3.- Tapa de Cojinete Cigüeñal.



**Función:** La tapa del cojinete del cigüeñal de un motor de gasolina de cuatro cilindros. Tiene la misma maquinabilidad que la fundición pero mayor Resistencia.

**Innovación PM:** Es mucho más barata que las originales de fundición, menos peso, mayor Resistencia y menor coste de mecanizado. Además la PM da una gran precisión dimensional.

**Alternativa PM:** Fundición.

### 4.- Árbol de Levas. (con Lóbulos PM)





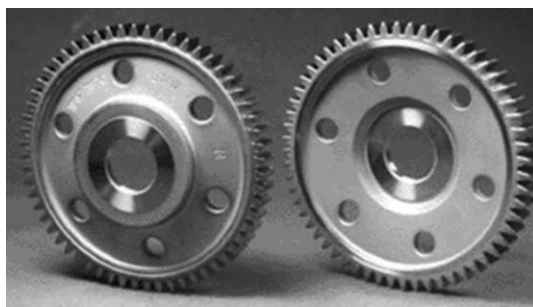
**Función:** El árbol de levas compuesto con lóbulos PM está hecho para el motor del Rover MG F deportivo.

**Innovación PM:** El árbol de levas compuesto de PM de acero sinterizado que se acopla a una estructura tubular hueca, ofreciendo una reducción de peso del 40% comparado con los convencionales, con una mejora de propiedades mecánicas.

**Alternativa PM:** Forja.

**Secuencia de fabricación:** Los lóbulos sinterizados se hacen por sinterización con fase líquida de Astaloy E con 2.5% C, 5% Cr, 1% Mo, 2% Cu, 0.5% P y 1% Si. El compuesto situado al final del cigüeñal de hierro suave, está unido por brazing al tubo de acero y actúa de sensor.

### 5.- Engranaje de Dirección de Árbol de Levas.



**Fabricante:** MIBA AG

**Función:** Engranaje de dirección del árbol de levas de un motor de combustión interna.

**Innovación PM:** El engranaje sinterizado trabaja a un nivel de prestaciones igual al correspondiente forjado. Tiene un endurecimiento superficial, tanto en los flancos como las raíces del engranaje, dando prestaciones similares al acero convencional 16Mn Cr5. Es la primera aplicación de un engranaje sinterizado para esta aplicación, siendo que ya existían otros muchos engranajes en otras aplicaciones de producción en masa.

**Alternativa PM:** Acero forjado.

**Secuencia de Fabricación:** Composición: SINT C11(Fe-Cu-C).  
Densidad: 6.6g/cm<sup>3</sup>. Dureza: 110 HB.

#### 6.- Piezas para Amortiguadores.



**Fabricante:** GKN SinterMetals

**Función:** Muelles de gas y amortiguadores hidráulicos: pistones para amortiguadores, guías y aplicaciones de alto sellado, guías con formas muy complejas, pistones con bandas con recubrimientos especiales antifricción, cilindros finales para aplicaciones convencionales y especiales.

**Innovación PM:** La PM ofrece una fabricación limpia, un flujo de aceite altamente reproducible, buenas características de amortiguación, menor peso y perfiles que admiten nuevas válvulas.

**Alternativa PM**

**Secuencia de fabricación:** Prensado y sinterizado, tratamiento al vapor

**6.- Anillos Sincronizadores en Cambio Manual.**



**Fabricante:** GKN Sintermetals

**Función:** Componentes sincronizadores para sistemas de cambio manual de vehículos ligeros y camiones pesados.

**Innovación PM:** Componentes listos para el ensamblaje. Diseño optimizado y reducción de peso. Alta densidad de compactación y altas prestaciones. Fabricación de coste efectivo y ausencia de mecanizado.

**Alternativa PM:** Forja y mecanizado.

### Referencias Bibliográficas.

Appold H. Tecnología de los Metales. Editorial Reverte, S.A. ISBN 84-292-6014-0, España, 1982.

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

Gerling Heinrich, Moldeo y Conformación. Editorial Reverte, S.A. España, 1979. ISBN 84-291-6051-5.

Pere Mollera Sola, Metales Resistentes a la Corrosión Editorial Marcombo. ISBN 86-267-0772-6. 1990. Barcelona, España.

Yankee Hebert, Manufacturing Process, Editorial Prentice Hall, United States of America, 1979.

### Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.

---

1. ¿Cuáles son las Aplicaciones más comunes de la MP?
2. ¿Cuáles son las reglas básicas que recomienda la Powder Metallurgy Parts Association?
3. ¿Cuál es la relación entre la resistencia uniforme y la densidad uniforme en los procesos de MP?
4. ¿Qué se entiende por Piezas Porosas?
5. ¿Qué son los Carburos cementados producidos por MP?
6. ¿Cuál el proceso para producir Tungsteno Dúctil?
7. ¿Cuáles son las otras aplicaciones de la MP?
8. ¿Qué se entiende por Súper Aleaciones en la PM?

## Capítulo 10. Ventajas de la Metalurgia de los Polvos

### **V**ventajas de la Metalurgia de los Polvos.

Las ventajas que presenta la metalurgia de los polvos son:

1. Alta capacidad de producción. Los niveles de temperatura son menores que los procesos convencionales por lo tanto las piezas se enfrían más rápido.
2. La precisión dimensional y el acabado superficial del componente son buenos y elimina la operación de maquinado.
3. Por medio de este método se pueden fabricar artículos de cualquier forma característica, pero de tamaño limitado.
4. Se pueden fabricar componentes de la porosidad deseada mediante el control de la composición de los constituyentes y la presión de compactación (Rodamientos Filtros y Engranajes), y posibilita que puedan absorber vibraciones.
5. Se pueden mezclar dos o más metales en la proporción que se requiera para dar las propiedades deseadas, lo que es difícil de lograr mediante fundición.
6. La operación es más limpia y rápida y la vida útil del componente es mas larga.
7. Mediante este proceso también se fabrican puntas muy duras para herramientas de carburo de tungsteno.
8. No existe desperdicio de materias primas, como en el caso de la fundición. **(ver Figura 10.1)** En este proceso, se utiliza casi todo el material (el 97 por ciento se convierte en producto).
9. Se obtiene una estructura relativamente mas uniforme, sin defectos.

10. Se pueden mezclar metales y no metales en cualquier proporción y fabricar componentes con ellos.
11. Se pueden producir partes con amplias variaciones en la composición del material.
12. Solo mediante este método es posible la producción de herramientas impregnadas con diamantes.
13. Por medio de este método se producen materiales para contactos eléctricos y magnéticos.
14. Mediante este método se pueden producir aleaciones de metales que tienen puntos de fusión y densidades ampliamente diferentes.
15. No se requiere mano de obra altamente capacitada y calificada.
16. La producción de aleaciones de cobre y plomo (cojinetes) es posible gracias a la técnica de la MP.
17. Se consigue un importante ahorro energético, ya que nunca se alcanzan las condiciones de fusión del material.
18. Permite el conformado de materiales con puntos de fusión muy elevados, no adecuados para fusión y moldeo.



Figura 10.1 Comparación entre la obtención de un primordio de engranaje y el engranaje por forja y por MP. Arriba se ven el material en bruto cortado, la pieza tras la primera forja, el primordio

formado y el recorte sobrante. Con una preforma sinterizada (abajo), se obtiene el engranaje terminado sin material sobrante (DeGarmo, 1988)

### ***Desventajas de la Metalurgia de los Polvos.***

Las desventajas de la metalurgia de los polvos son:

1. Muchas formas complicadas que se pueden producir mediante fundición son imposibles de elaborar por medio de la MP.
2. Los componentes fabricados mediante la MP no poseen tan buenas propiedades físicas como las partes fundidas o forjadas.
3. El procedimiento de fabricación de polvos, al igual que el de compactación y sinterización es costoso, es decir los polvos metálicos son caros.
4. El costo inicial de las matrices es elevado.
5. Mediante esta técnica no se pueden producir componentes de gran tamaño.
6. Los polvos metálicos poseen mayor volumen, son difíciles de almacenar y se oxidan o se deterioran si se almacenan mucho tiempo.
7. Los artículos producidos por este método tienen ductilidad deficiente.
8. El maquinado de los componentes es difícil.
9. Debido a que las matrices se utilizan bajo presiones muy grandes, su desgaste normal es alto.
10. Este proceso no es económico para producir componentes de menos de 35000 piezas.
11. No se puede producir un producto altamente denso.
12. Puede ser difícil obtener polvo de alguna aleación en particular.
13. Existen límites de diseño en el caso de las partes que se producen mediante esta técnica, es difícil comprimir algunos metales.
14. Las partes que se comprimen desde la parte superior tienden a ser menos densas en la parte inferior, la forma de los componentes se limita a geometrías que puedan elaborarse mediante una matriz de compactación, ya que el polvo no fluye lateralmente.

15. los equipamientos son muy costosos y se requiere inversiones iniciales importantes, que tan solo se amortizan con niveles de producción muy elevados.
16. La obtención y el almacenaje es un proceso costoso, que encarece notablemente los componentes pulvimetalúrgicos.
17. Las dimensiones de las piezas obtenidas por esta técnica están limitadas y no suelen superarse secciones de  $150 \text{ cm}^3$  ni alturas mayores de 80mm.
18. algunos metales presentan oxidaciones muy rápidas y exotérmicas. Lo cual dificulta en gran manera su almacenaje, por ejemplo Al, Mg.
19. Debido a la porosidad la resistencia mecánica de los componentes pulvimetalúrgicos suele ser inferior a la de los componentes elaborados por fusión y moldeo.
20. Es posible que la compactación no sea igualmente eficaz entre dos regiones con espesores distintos, lo que obliga a realizar operaciones de recalados posteriores.

### ***Seguridad en la Producción de la Metalurgia de los Polvos.***

La *seguridad industrial* es requerida en todos los procesos productivos de la empresa moderna, el avance que ha tenido esta rama industrial en los últimos años ha sido determinante, no se concibe una actividad productiva sin el análisis de los especialistas en seguridad industrial. Pero aun, sin embargo las estadísticas presentan resultados, que a veces no reflejan el esfuerzo de los equipos de seguridad en la disminución de los riesgos y prevención de los accidentes.

Por razones *culturales, sociales y económicas* el trabajador no ve la seguridad industrial como un aporte a su *integridad personal*. Además en ocasiones se antepone la producción ante la seguridad, omitiéndose las normas básicas de seguridad industrial y por consiguiente aumentan el riesgo al trabajador de sufrir accidentes.

La *formación en Seguridad Integral* es un compromiso de todas las instituciones que forman el personal técnico de las empresas del sector industrial como por ejemplo: *Escuelas Técnicas, Institutos Tecnológicos Universitarios,*



*Universidades Públicas o Privadas y cualquier organización que “entrene y adiestre” personal para desempeñar un oficio. Afortunadamente se está avanzando mucho en los últimos años. Se ha tomado conciencia que el problema de la seguridad industrial “es un problema de todos.”*

En muchas empresas se ha logrado que los trabajadores utilicen sus equipos de seguridad con menos resistencia, y que sigan las normas establecidas sin evadirlas.

Como la seguridad industrial está presente en todos los ámbitos de los complejos productivos, es necesario crear la cultura de la seguridad en los mismos trabajadores, de donde han surgido en muchas ocasiones, soluciones ingeniosas a condiciones inseguras.

En el caso específico se prestará atención su incidencia de las normas básicas de seguridad industrial en las operaciones de la Metalurgia de los Polvos (Pulvimetalurgia).

Antes de utilizar cualquier máquina, el operador debe saber usar correctamente sus controles, para lo que son y como trabajan. También debe conocer los riesgos potenciales que existen tanto para el como para la máquina, si no la maneja adecuadamente. Además cuando las materias primas son de alto riesgo para los seres vivos se deben incrementar los cuidados al respecto de la salud y seguridad de los trabajadores.

Una máquina es segura solo si el operador está conciente de los riesgos que implica su operación. En los procesos de producción o en cualquier otra parte, el individuo debe concentrarse en el trabajo para evitar accidentes. Deben desarrollarse hábitos de trabajos seguros para los montajes y el empleo de todos los dispositivos de protección. Se han establecido normas de seguridad como lineamientos de guía para ayudar al participante a eliminar las prácticas inseguras y los procedimientos inseguros en los procesos. A continuación se describen algunos de los riesgos.

### **RIESGOS.**

Debido a la alta relación de área de superficie y volumen, los polvos metálicos pueden ser explosivos, en especial el aluminio, magnesio, titanio,

zirconio y torio. Es necesario tener mucho cuidado durante su mezclado, almacenamiento y manejo. Algunas precauciones incluyen: (a) *conexión del equipo a tierra*, (b) *evitar las chispas* (utilizando herramientas que no las produzcan), y la fricción como fuente de calor, y (c) *evitar nubes de polvo*, las llamas descubiertas y las *reacciones químicas*.

### **Referencias Bibliográficas.**

De Garmo E.P. et al, Materiales y Procesos de Fabricación. Editorial Reverse S.A. Segunda Edición. ISBN 84-291-4822-1. 1988, España.

Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.

### **Preguntas de Repaso. Auto Evaluación.**

1. Mencione diez Ventajas de la Metalurgia de los Polvos.
2. Mencione diez Desventajas de la Metalurgia de los Polvos.
3. Describa detalladamente cinco ventajas de la Metalurgia de los Polvos.
4. Describa detalladamente cinco ventajas de la Metalurgia de los Polvos.
5. Describa su criterio en relación a la tecnología de la Metalurgia de los Polvos.

## GLOSARIO.

**Aglutinantes.** Que se requieren en algunos casos para lograr una resistencia adecuada en las partes prensadas pero no sinterizadas.

**Aleación mecánica.** Se mezclan polvos de dos a más metales puros en un molino de bolas.

**Babbitt.** Aleación de Metal antifricción de bajo punto de fusión, es decir se emplea para disminuir la fricción de los cojinetes. Esta formado por estaño, antimonio y cobre.

**Cerámicas.** Productos manufacturados, de materia sólida, inorgánica, no metálica, conformado en frío y consolida por medio de calor.

**Cermets.** Es un material compuesto en el cual un cerámico es contenido en una matriz metálica (Carburos Cementados; Cermets basados en óxidos).

**Chapeado.** Se realiza un recubrimiento con cromo, níquel, estaño, cobre, cobalto y cadmio para protegerlos de la corrosión, mejorar la resistencia al desgaste y la fricción y aumentar las características de dureza y conductividad eléctrica, así como impartirles una apariencia agradable.

**Cojinetes Porosos.** Los cojinetes porosos auto lubricados de latón, cobre, estaño, grafito y hierro se fabrican mediante la metalurgia de los polvos. Dichos cojinetes de porosidad controlada se utilizan en las placas de acumuladores eléctricos de gran capacidad, filtros, engranajes de bombas de aceite, trinquetes de puerta, levas. Bloques guías de rondanas, sierras mecánicas, etc.

**Compactación Semi-Caliente.** Permite aumentar la densidad del compactado considerablemente con un costo extra muy bajo. La compactación sea calentada a una temperatura de 130 – 1500 °C. Incrementa la fuerza del compactado 10% con un cambio dimensional casi de cero.

**Compactado en Caliente.** A temperaturas elevadas los metales son compactados a una densidad mucho mayor sin necesidad de elevar la presión. Después se requiere el sinterizado normal. Es de un costo alto, y requiere moldes especiales resistentes al calor, una atmósfera controlada y las velocidades de producción se ven disminuidas significativamente. Se usa para la producción de metales duros y piezas para corte hechas de diamante.

**Compresión Isostática Caliente (HIP).** Se ha encontrado que esto es efectivo para metales refractarios, cerámicas y cermets y polvos esféricos que no respondan a la compresión en frío. *Mediante la HIP pueden obtenerse densidades cercanas a las teóricas.*

**Compresión isostática** Un medio para aplicar presión para obtener densidad uniforme es encerrar el polvo en un molde con forma de plástico o hule con la forma deseada y sumergirlo en un gas o líquido en una cámara bajo presión de 70 a 700 Mpa.

**Contracción.** Considerando la contracción uniforme en todas direcciones y que la masa no cambia (a menos que estén presentes constituyentes volátiles en grandes cantidades). Es la reducción de volumen de la pieza en el proceso MP.

**Crecimiento de Grano.** Implica el movimiento de los límites del grano, lo que permite crecer los granos de mayores tamaños a expensa de los más pequeños

**Densidad aparente.** Es el peso de una unidad de volumen de polvo cuando se compacta con flojedad.

**Desfloculantes.** Que inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar las características de flujo durante la alimentación.

**El Acuñado.** Operación de prensado sobre una parte sinterizada para imprimir detalles en su superficie.

**El factor de flujo o capacidad de flujo.** Se define como la rapidez a la que el polvo metálico fluye bajo la acción de la gravedad de un contenedor a través de un orificio, con forma y acabado estándar.

**Método de elutriación de aire.** Método de separación de partículas basado en la diferencia de velocidad de sedimentación que puede existir entre ellas, cuando se encuentran suspendidas en un fluido en movimiento.

**El mezclado.** Se refiere a la mezcla de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula.

**El Reprensado.** Operación de prensado en la cual se aprieta la parte en un dado cerrado para *aumentar la densidad y mejorar las propiedades físicas.*

**Hojas Metálicas Porosas.** Los polvos metálicos como el cobre, latón, bronce, monel y acero inoxidable se rolan en hojas porosas que tienen porosidad controlada. Por lo general se utilizan dos métodos para rolar las hojas; Sinterizado por Gravedad y Rolado.

**Impregnación.** Se realiza mediante la inmersión de la pieza sinterizada en un baño de aceite caliente. La impregnación de un compuesto sinterizado de porosidad interconectada puede obtenerse mediante la inmersión en caliente en aceite. La acción capilar distribuye el aceite; la aplicación de vacío ayuda mucho el proceso.

**La Atomización.** El metal fundido se vierte a través de un embudo refractario en una cámara de atomización, haciéndolo pasar por chorros de agua pulverizada. Es decir que el chorro de metal líquido estalla y forma minúsculas partículas esféricas. Estas se solidifican rápidamente y se acumulan como polvo en el piso de la máquina de pulverización...

**La combinación.** Se refiere a la mezcla de polvos de diferente composición química en los procesos Pulvimetalurgicos.

**La compactación centrífuga.** El polvo se hace girar en un molde y se empaqueta con uniformidad con presiones hasta de 3 Mpa en cada partícula. Las partes deben tener secciones redondas uniformes. El costo del equipo no es muy alto.

**La compactación** Es la etapa donde se presan los polvos mezclados para darles formas dentro de las matrices para obtener forma, densidad y contacto de partícula con partícula necesarios y hacer que la pieza tenga suficiente resistencia para su proceso posterior.

**La infiltración.** Es la impregnación con un metal por inmersión en el metal fundido, o al colocar el metal de infiltración en forma de una lámina arriba o debajo del compactado de un horno; de nuevo la acción de capilaridad llena los poros. La acción de capilaridad haga fluir el relleno dentro de los poros.

**La reducción Química.** Comprende una serie de reacciones químicas que reducen los componentes metálicos a polvos metálicos elementales (*es decir, la eliminación del oxígeno*)

**Lubricantes.** Reducen *la fricción* entre las partículas y en las paredes del dado durante la compactación. Por Ejemplo, el estereato de zinc y el aluminio

**Matriz.** Molde en que se funden objetos de metal.

**Mecanizado.** Proceso de elaboración mecánica donde se modela las caras exteriores de una pieza.

**Metales.** Elementos químicos caracterizados por ser buenos conductores del calor y la electricidad, poseen alta densidad, y son sólidos en temperaturas normales sus sales forman iones electropositivos (cationes) en disolución. El concepto de metal refiere tanto a elementos puros, así como aleaciones

**Moldea por inyección.** Un lodo del polvo en agua o mezclado con un material termoplástico se inyecta en un dado, emergiendo como una cinta (2 a 6,8 g/cm<sup>3</sup>) Se sinteriza y se vuelve a rolar tres veces y se recose a una resistencia de tensión de cerca de 745 Mpa y un alargamiento de 33 por ciento.

**Pavonado.** Produce la oxidación superficial de la pieza metálica por calentamiento de la atmósfera oxidante (recubrimiento de magnetita, óxido ferroso-ferrico de color negro) que forma una capa impermeable y adherente al metal base, con un coeficiente de dilatación muy parecido al acero.

**Piezas de la fricción.** Guarniciones del freno y de embrague, los discos de fricción, y las otras piezas especiales de la fricción, tales como rodillo, espaciadores, y resbaladores.

**Piezas Porosas.** Piezas obtenidas con estructura metálica o no metálica con una red uniformemente espaciada de poros, hasta del 80% del volumen.

**Presintetizado.** Las piezas compactadas se calientan durante un corto periodo a una temperatura considerablemente inferior a la de sinterización, Cuando se desee hacer algún mecanizado.

**Pulvimetalurgia.** Proceso de fabricación que, partiendo de polvos finos y tras su compactación para darles una forma determinada (compactado), se calientan en atmósfera controlada (sinterizados)) para la obtención de la pieza.

**Rolado por Gravedad.** En este proceso se esparce una capa de espesor uniforme sobre bandejas cerámicas. Para obtener un espesor uniforme y un mejor acabado superficial, las hojas se rolan y se fabrican en formas adecuadas. Estas hojas de acero inoxidable son resistentes a la corrosión y se utilizan como filtros para gasolina, aceite, petróleo y productos químicos.

Secado. A temperaturas bajas, los constituyentes líquidos se separan, varía con el espesor. El vacío acelera el secado. Si los aglutinantes orgánicos se van a quemar, debe haber suficiente oxígeno disponible para la combustión.

**Sinterizado en fase líquida.** Se efectúa a una temperatura superior a la de fusión de uno de los constituyentes secundarios, con presencia de fase líquida, es esencial controlar la cantidad de fase líquida.

**Sinterizado** Tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la base de la mezcla. Tiene el propósito de incrementar la fuerza y las resistencias de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

**Sinterizado-Endurecimiento.** Se hace el sinterizado y después se baja a temperatura rápidamente, para obtener una estructura homogénea martensítica, tolerancias dimensionales muy precisas.

**Tungsteno Dúctil.** El polvo de tungsteno se comprime, presintetiza y se sinteriza para obtener tungsteno dúctil. Se aplica la operación de estampado y estirado para formar fuertes alambres dúctiles. El alambre de tungsteno se emplea para diversas aplicaciones industriales que requieren de un alto valor de resistencia y dureza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Appold H. Tecnología de los Metales. Editorial Reverte, S.A. ISBN 84-292-6014-0, España, 1982.

Askeland Donald R., Phule Pradeep P., Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Internacional Thomson Editores, S.A. México, 2004.

Bawa H.S. Procesos de Manufactura, Mc Graum-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007'

Burns, Robert. "Production Presses and Tooling". ASM HandBook. Vol 7. "Powder Metallurgy". ASM International. The Materials Information Society. 5th ed. 1993. USA.

Confer, Leonard L. et al. "Shape Fundamental: Rigid Tool Compaction". ASM HandBook. Vol 7. "Powder Metallurgy". ASM International. The Materials Information Society. 5th ed. 1993. USA.

De Garmo E.P. et al, Materiales y Procesos de Fabricación. Editorial Reverse S.A. Segunda Edición. ISBN 84-291-4822-1. 1988, España.

Doyle L; Keyser C; Leach J; Scharader G; Singer M. Materiales y procesos de Manufactura para Ingenieros. Tercera Edición. Pretince Hall Hispanoamericana. Méjico, 1988.

Gerling Heinrich, Moldeo y Conformación. Editorial Reverte, S.A. España, 1979. ISBN 84-291-6051-5.

Groover P. Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Traducción de la Primera Edición México, 1997.

Kalpakistan S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.

Kibbe R, Neel J, Meyer R y White W. Manual de Maquinas Herramientas. Quinta Edición. Editorial Limusa, S.A. Méjico, 1990

Krar f.Steve, Check F. Albert. Tecnología de las Maquinas Herramientas. Alfaomega Grupo Editor, S.A. Quinta Edición. México, 2006.

Layensetter A., Wurtemberger G., Sáenz de Magarola Carlos. Tecnología de los Oficios Metalúrgicos. Editorial Reverte S.A, España,1990.

Morrall F. R., Jonson Carl G., Jimeno E.. Metalurgia General, Editorial Barcelona: Reverte. España, 1982.

Pere Molera Sola, Metales Resistentes a la Corrosión Editorial Marcombo. ISBN 86-267-0772-6. 1990. Barcelona, España.

Randall M. German. Powder Metallurgy of Iron and Steel. John Wiley & Sons, Inc. USA. 1998.

Rodríguez J. et al. Procesos Industriales para Materiales No Metálicos. Publicaciones Visión Net, 2<sup>da</sup> Edición. España. ISBN 84-9821-319-3.

Salán Ballesteros Nuria Maria. Tecnología de Proceso y Tecnologías de Materiales. Ediciones UPC, España, 2005.

Schey John A. Procesos de Manufactura. Mc Graum Hill/Interamericana Editores, Tercera Edición, México, 2002.

Schrader George F., Singer Morse B. Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros. México, 1988.

Yankee Hebert, Manufacturing Process, Editorial Prentice Hall, United States of America, 1979.