

## OBTENCIÓN DE PIEZAS METÁLICAS MEDIANTE LA PULVIMETALURGIA

Segundo Manuel Espín L

Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador  
mespin@uta.edu.ec

### RESUMEN:

Se ha producido polvo de chatarra de aluminio mediante atomización de aluminio fundido, con tres chorros de agua a presión con un equipo diseñado y construido en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. Se realizó la caracterización de las probetas obtenidas por pulvimetalurgia, determinándose los parámetros para conformar y sinterizar piezas cilíndricas a partir de polvo de aluminio, así como también la densidad, dureza, y metalografía tanto de probetas obtenidas en verde y sinterizadas.

**Palabras clave:** Pulvimetalurgia, polvo de chatarra de aluminio, atomización, sinterizado, piezas metálicas.

### ABSTRACT:

Aluminum scrap powder was obtained by spraying cast aluminum, with three pressurized water jets of a machine designed and built at the Faculty of Civil and Mechanical Engineering at Universidad Técnica de Ambato. The characterization of the samples, made by powder metallurgy, was performed in order to determine parameters for forming and sintering cylindrical pieces from aluminum powder, as well as density, hardness and metallographic of both green and sintered specimens.

**Keywords:** Powder Metallurgy, aluminum scrap powder, spray, sintering, metal pieces.

### 1. Introducción

En la época actual se han desarrollado varias técnicas para la obtención de piezas metálicas como la fundición, el mecanizado, procesos de conformado, etc.; pero a pesar de ser buenas técnicas, tienen sus limitaciones, por lo que hemos recurrido a la Pulvimetalurgia que es una tecnología nueva en nuestro país la que nos ayudará a superar estas limitaciones.

Algunas Universidades del mundo se han dedicado a la investigación de la Pulvimetalurgia, que consiste en la obtención de piezas metálicas a partir de metal en polvo, que en nuestro caso la obtuvimos de chatarra de aluminio, es decir que la reciclamos.

**Artículo Recibido:** 1 de julio de 2013

**Artículo Aceptado:** 25 de septiembre de 2013

Este proceso tiene tres etapas: la primera es la obtención de polvo metálico a partir de metal líquido o metal fundido. La segunda es la elaboración del molde y compactación de la pieza en verde, y la tercera es la sinterización de la pieza en el horno a temperaturas próximas a la temperatura de fusión del metal.

### 1.1 Características de los Polvos metálicos

Las características importantes de los polvos metálicos son: pureza, tamaño de partícula, distribución por tamaño de partícula, densidad, relación de compresión y forma de la partícula. Los polvos metálicos tienen varias formas: esférica, angular, redonda y acicular. Las partículas esféricas tienen excelentes propiedades de sinterización, mientras que las partículas irregulares tienen propiedades de moldeo superiores, (ver figura 1.1).



Figura. 1.1. Forma de las partículas en la metalurgia de polvos y procesos por los cuales se producen. Los polvos de hierro se elaboran por medio de muchos de estos procesos. Fuente: Cortesía de P.G. Nash; Illinois Institute of Technology, Chicago.

### 1.2 Métodos para la producción de polvos

Existen diversos métodos para producir polvos metálicos, la mayoría de los cuales se pueden elaborar mediante más de un método. La elección depende de los requisitos del producto final. La microestructura, las propiedades de la masa y de la superficie, la pureza química, la porosidad, la forma y distribución del tamaño de las partículas dependen del proceso específico que se usó (figura 1.2).

Estas características son importantes, porque afectan de manera significativa el flujo y la permeabilidad durante la compactación y en las operaciones posteriores de sinterizado. El tamaño de las partículas producidas va de 0.1 a 1000 µm (4 a 0.04 pulgadas).

### 1.3 Mezcla de polvos metálicos

Para lograr resultados exitosos en la compresión y la sinterización, los polvos metálicos deben estar bien homogeneizados de antemano. Los términos homogenización y mezclado son ambos usados en este contexto. La homogenización se refiere a cuando los polvos son de la misma composición química pero con tamaños de partícula diferentes son posiblemente entremezclados. Partículas de diferentes tamaños a menudo son mezcladas para reducir la porosidad. La mezcla se refiere a la combinación de polvos de diferente composición química.

Otros ingredientes son usualmente añadidos a los polvos metálicos durante la homogenización y/o mezclado.

Estos aditivos incluyen (1) lubricantes, algo semejante como estearatos de cinc y aluminio, en pequeñas cantidades para reducir fricción entre partículas y en la pared del dado durante la compresión; (2) agavilladores, los cuáles son requeridos en algunos casos para lograr la fuerza adecuada en la compactación de la pieza; y (3) defloculantes, que inhiben la aglomeración de polvos para las mejores características de flujo durante el subsiguiente procesamiento. (Figura 1.3).

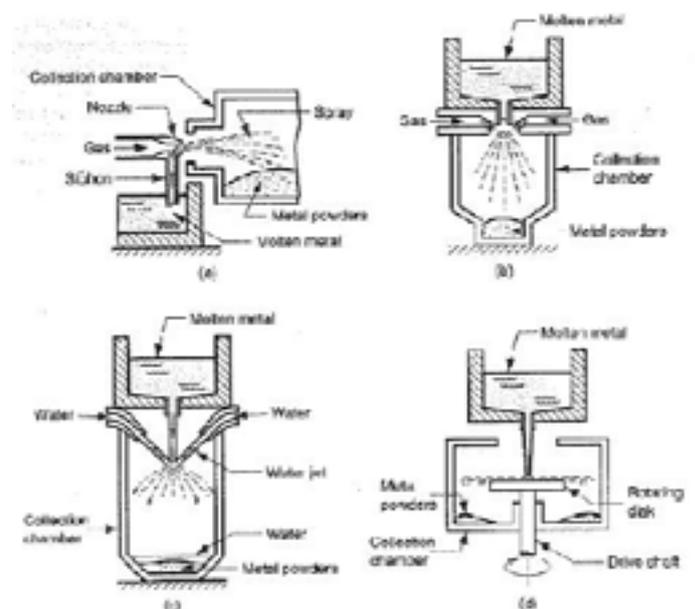


Figura. 1.2. Métodos de producción de polvos metálicos por atomización: (a) y (b) dos métodos de atomización por gas; (c) atomización por agua, (d) atomización centrífuga con un disco giratorio. Fuente: M. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes, and Systems, Tercera Edición, 2007, pp. 344.

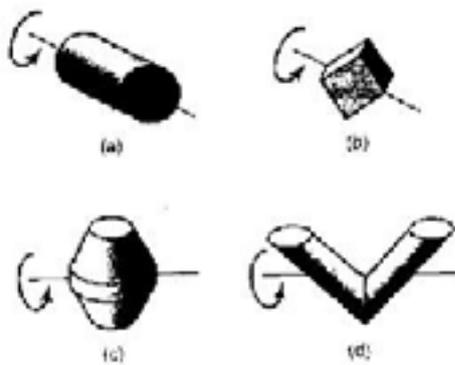


Figura 1.3. (a) a (d) Algunas figuras comunes de recipientes para combinar o mezclar polvos. Dado que éstos son abrasivos, los mezcladores se basan en la rotación o volteado de figuras cerradas, al contrario del uso de agitadores agresivos. Fuente: Cortesía de Kemutec Group, Inc.

### 1.4 Compactación de los polvos metálicos

La compactación es el paso en el que se presan los polvos mezclados para darles diversas formas dentro de las matrices, como se muestra en la figura 1.4. Los propósitos de la compactación son obtener la forma, densidad y contacto de partícula con partícula necesarios y hacer que la pieza tenga suficiente resistencia para su proceso posterior.

El polvo (materia prima) es introducido en la matriz mediante una zapata de alimentación y el punzón superior desciende hacia el interior de la matriz.

Las prensas utilizadas son las accionadas por medios hidráulicos o mecánicos y, por lo general, el proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque puede efectuarse a temperaturas elevadas, para el caso de aluminio y aleaciones se utilizan presiones que oscilan entre 70 y 275 MPa.

Al polvo prensado se le conoce como comprimido crudo o compactado en verde, porque tiene una resistencia baja. Las partes crudas o en verde son muy frágiles y se pueden desmoronar o dañar con mucha facilidad; esta situación se agrava por medio, de prácticas deficientes de prensado.

Para obtener resistencias más 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. [4]

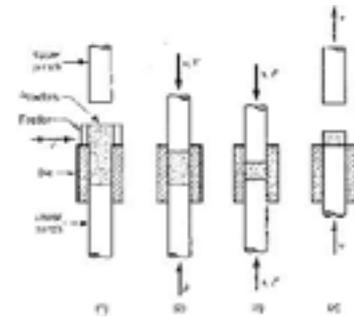


Figura 1.4. Prensado, el método convencional de compactación de polvos metálicos en PM: (1) llenado de la matriz con polvo, realizado por alimentación automática, (2) posición inicial, y (3) final del punzón superior e inferior durante la compactación, y (4) extracción de la pieza. Fuente: M. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes, and Systems*. Tercera Edición, 2007, pp. 347.

### 1.5 Sinterizado

Después del prensado, el compactado en verde carece de resistencia y dureza; por lo que es fácil que se rompa por pequeños esfuerzos. La sinterización es un tratamiento térmico para unir las partículas metálicas. El tratamiento es usualmente efectuado en las temperaturas entre 0,7 y 0,9 del punto de fusión del metal (escala absoluta). La serie de croquis en la Figura 1.5 demuestra a una escala microscópica los cambios que ocurren durante el sinterizado de polvos metálicos. La sinterización involucra el transporte de masa para crear los cuellos y transformarlos en linderos del grano.

El mecanismo principal por el cual ésta ocurre es la difusión; otros posibles mecanismos incluyen el flujo plástico [1].

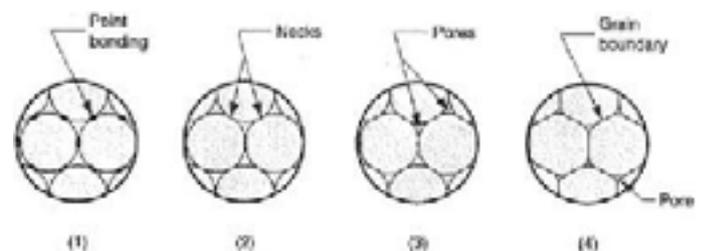


Figura 1.5 Prensado, el método convencional de compactación de polvos metálicos en PM: (1) llenado de la matriz con polvo, realizado por alimentación automática, (2) posición inicial, y (3) final del punzón superior e inferior durante la compactación, y (4) extracción de la pieza. Fuente: Groover M. (2007). *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes, and Systems*. Tercera Edición. pp. 347.

## 2. Metodología y Materiales /

### 2.1 Obtención del polvo de Aluminio

Primero se procedió a fundir la chatarra de aluminio en un horno de inducción de 5 Kg de capacidad, adquirido para el desarrollo de este proyecto, luego el polvo de aluminio se obtuvo a partir del aluminio fundido, mediante atomización con tres chorros de agua a presión, obteniendo partículas de aluminio de 425 μm, 600 μm y 1180 μm . En la figura 2.1 se muestra el proceso de atomización del polvo de aluminio y en la figura 2.2 se muestra el polvo de aluminio de 425 μm.



Figura. 2.1. Proceso de atomizado aluminio líquido.



Figura 2.2. Polvo de aluminio 425 μm. (Los investigadores)

### 2.2 Mezclado del polvo de aluminio

Con el propósito de homogenizar y lubricar el polvo de aluminio se combinó con 0.1 % de lubricante (bórax), utilizando el mezclador en V, diseñado y construido por estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la UTA, el mismo que se indica en la figura 2.3.



Figura 2.3. Mezclador de polvos en V.  
Fuente: Los investigadores

### 2.3 Compactación del polvo de Aluminio

La presión recomendada de compactación es de 70 Mpa para el aluminio y aleaciones, el diámetro del punzón es de 24 mm con la que se calculó la fuerza de compactación mediante la siguiente ecuación:

$$F = P * A \tag{1}$$

Dónde:

F = Fuerza de compactación.

P = Presión de compactación.

A = Área de la sección transversal.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \tag{2}$$

$$A = \frac{\pi(24 \text{ mm})^2}{4} = 452.39 \text{ mm}^2$$

$$A = 4.5239 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = 70 \text{ MPa} * 4.5239 * 10^{-4} \text{ m}^2 = 31667.3 \text{ N}$$

$$F = 31337.3 \text{ N} = 7109 \text{ lbf}$$

El polvo de aluminio fue compactado utilizando un punzón y un tubo guía hasta llegar a la fuerza necesaria de compactación, en la máquina universal de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, como se muestra en las figuras 2.4 y 2.5.



Figura 2.4. Máquina Universal.  
Fuente: Cortesía FICM-UTA



Figura 2.5. Probetas de aluminio  
Fuente: Los investigadores

### 2.4 Sinterización de las probetas

Al no disponer de un horno de atmósfera controlada, para evitar la oxidación de las probetas, primero fueron introducidas en un tubo con arena y luego colocadas en el horno eléctrico, a una temperatura de 600°C durante una hora, y posteriormente enfriadas al ambiente.



Fig. 2.6. Colocación de probetas en el Horno eléctrico  
Fuente: Los Investigadores

### 2.5 Caracterización.

Se procedió a determinar la dureza, densidad, y estructura metalográfica de las probetas cilíndricas, tanto en verde como sinterizadas; obtenidas con distintos tamaños de partículas. La dureza se determinó en un durómetro de la FICM en escala Brinell, la densidad y la microestructura se determinó experimentalmente en el laboratorio de materiales de la Carrera de ingeniería Mecánica de la FICM.

## 3. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el proceso de investigación.

### 3.1 Tamaño de partículas obtenidas por Atomización mediante presión de agua

El tamaño de partículas se expresa en micrómetros, tanto para partículas 1,2,y 3, como se detalla en el siguiente gráfico.

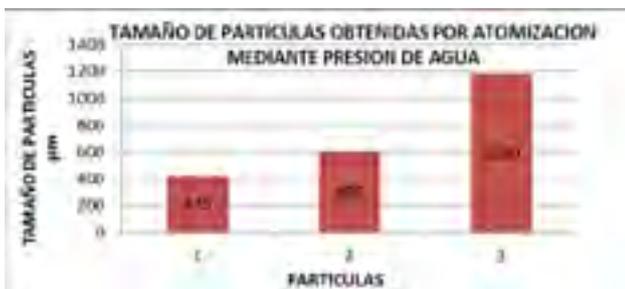


Figura 3.1. Tamaño de partículas por atomización mediante presión de agua

### 3.2 Datos de carga aplicada



Figura 3.2. Probetas VS carga aplicada

### 3.3 Dureza de probetas



Figura 3.3. Probetas VS Dureza

### 3.4 Dureza de Probetas en Verde en Función de la Carga Aplicada



Figura 3.4. Dureza en función de carga aplicada

### 3.5 Dureza de Probetas Sinterizadas en Función de la Carga Aplicada



Figura 3.5. Dureza de probetas sinterizadas en función de carga aplicada

### 3.6 Densidades

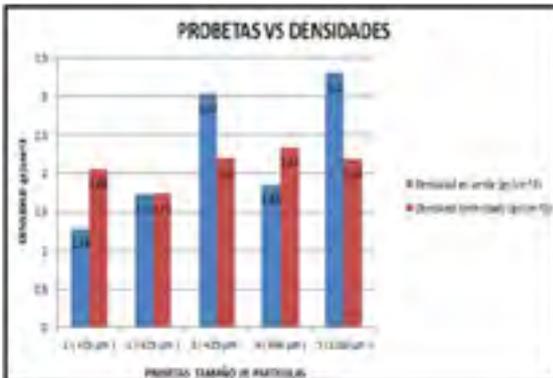


Figura 3.6. Densidades en función de tamaño de partícula

### Microestructuras obtenidas

CARACTERÍSTICA	FORMA DE PARTÍCULA	PROBETA EN VERDE	PROBETA SINTERIZADA
PROBETA 1 (425 µm)			
PROBETA 2 (475 µm)			
PROBETA 3 (425 µm)			
PROBETA 4 (600 µm)			
PROBETA 5 (1180 µm)			

### 4. Discusión

La atomización de la chatarra de aluminio fundido se lo realizó con tres chorros de agua a presión, se obtuvieron tres tamaños de partículas 425 µm, 600 µm, y 1180 µm, esto se consiguió variando el diámetro del chorro del aluminio líquido de 1mm a 1.5 mm, respectivamente.

Las partículas de aluminio de 425 µm, fueron compactadas con cargas de 14001.9 Kg, 18161.7 Kg, y 20291.7 Kg, las partículas de 600 µm se compactó con una cargas de 19082.9 Kg y las partículas de 1180 µm se compactó con una carga de 17343.7 Kg.

La dureza en las probetas sinterizadas disminuye con relación a las probetas en verde, y mientras mayor es la carga aplicada mayor es la dureza en verde.

La densidad tiende a aumentar en las probetas sinterizadas, esto se debe a la unión atómica debido al proceso de sinterizado, donde se eliminan espacios intersticiales y porosidades de la probeta en verde, con excepción de la probeta con tamaño de partícula 1180 µm.

Del análisis metalográfico se determina que las probetas con tamaño de partícula de 425 µm, presenta una forma alargada y al ser compactada a 18161.7 Kg (probeta 2) y 20291.7 Kg (probeta 3), presentan una microestructura regular sin porosidades y la matriz es completamente uniforme a pesar que en verde tienen espacios entre grano y grano de 13 µm como mínimo y 43.42 µm como máximo.

La probeta 4 metalográficamente presenta espaciamientos entre grano y grano de 15 µm como mínimo y 82.38 µm como máximo, obteniendo una microestructura irregular y un contorno de grano grande lo que ocasionaría la posible falla de la pieza de aluminio obtenida por pulvimetalurgia.

La probeta 5 metalográficamente presenta espaciamientos entre grano y grano de 58.03 µm como mínimo y 210.8 µm como máximo, obteniendo una microestructura muy irregular y un contorno de grano demasiado grande lo que ocasionaría la falla de la pieza de aluminio obtenida por pulvimetalurgia.

## 5. Conclusiones /

La probeta cilíndrica número dos fue la que brindó mejores características metalográficas y mecánicas, cuyos parámetros fueron: diámetro de chorro de metal líquido 1 mm, tamaño de partícula 425  $\mu\text{m}$ , carga de compactación aplicada 18161.7 Kg, temperatura de sinterizado 600  $^{\circ}\text{C}$ , dureza en verde 25.50 HB, dureza después de sinterizado 21.73 HB, densidad 1.74  $\text{gr}/\text{cm}^3$ , microestructura uniforme sin porosidades y discontinuidades y átomos perfectamente unidos por sinterizado.

Con los parámetros anteriores, se puede obtener cualquier pieza de aluminio partiendo de chatarra, todo dependerá de la forma del molde y la necesidad de producción.

Los parámetros determinados en esta investigación, servirán como base para las empresas fundidoras, y metalme-cánicas de la provincia de Tungurahua y del país que estén interesadas en la producción de piezas metálicas de aluminio por pulvimetalurgia, así como también servirá para capacitar a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en procesos de fabricación mediante la pulvimetalurgia.

Con este proyecto nos permitió crear un proceso tecnológico de producción de piezas por Pulvimetalurgia, para cubrir con las necesidades del sector industrial y al mismo tiempo reciclar chatarra de aluminio reduciendo de esta manera el grado de contaminación ambiental.

Si comparamos una pieza obtenida por el proceso de fundición normal y una pieza obtenida por pulvimetalurgia, determinamos que la pieza por fundición presenta muchas porosidades e inclusiones tanto superficialmente como internamente, mucha separación en el contorno de grano y requiere de un maquinado posterior, lo que eleva el costo con relación al obtenido por pulvimetalurgia.

## Referencias /

- [1] H. Bawa, (2007) Procesos de Manufactura. Primera edición. McGraw-Hill, India.
- [2] W. Callister, (2007) Materials Science and Engineering an Introducción. Seventh Edition.
- [3] M. Groover, (2007) . Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes, and Systems, Tercera Edición, , 345-351.
- [4] S. Kalpakjian, S. Schmid (2008). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. Mexico.
- [5] W. Smith W. (2004), Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Cuarta Edición. Editorial Mc Graw Hill,
- [6] Powder Metallurg (1984) 9th edición, Vol 7, American Society for Metals, Metals Park, Metals Handbook.