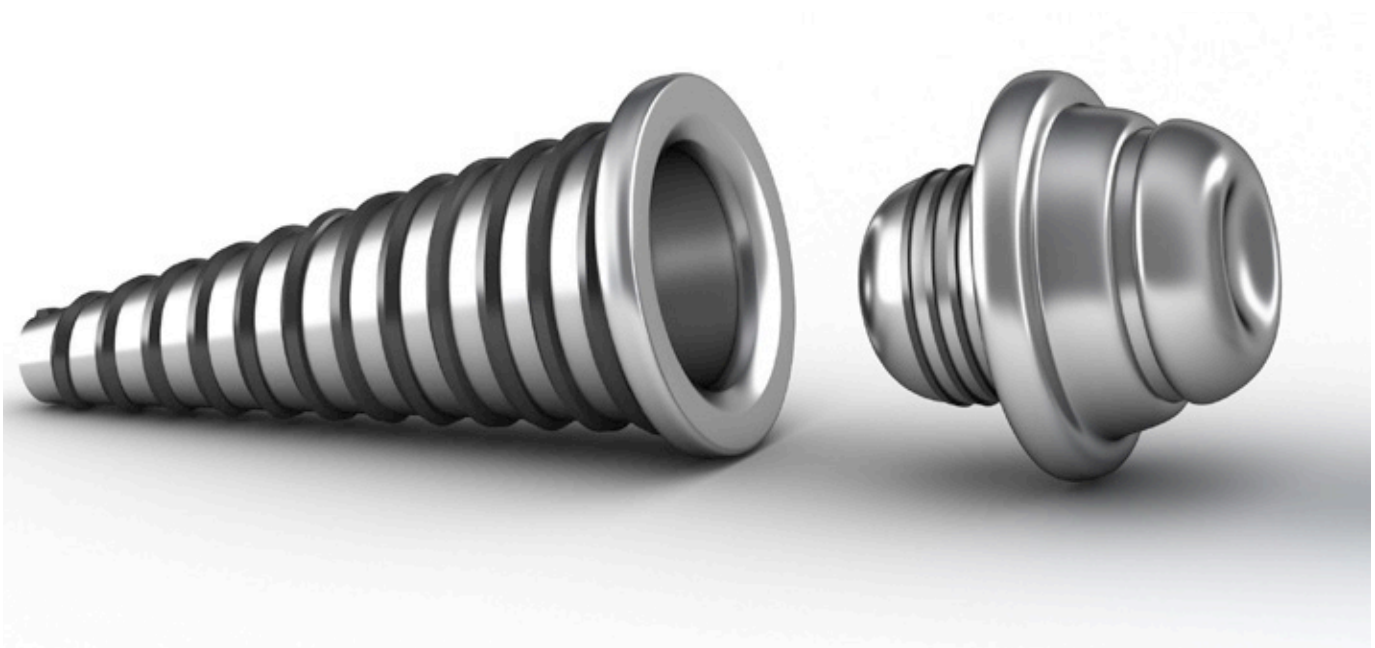


# Pulvimetalurgia de Aleaciones Base Aluminio

Juan Carlos Contreras Guzmán<sup>1, 2</sup>, M. Rodríguez<sup>1</sup>, O. Herrera<sup>1</sup>, José Guadalupe Rivera Ordóñez<sup>3</sup>



La historia del hombre ha estado dirigida en cierta medida por el uso de diversos materiales: desde la Edad de Piedra, pasando por la Edad de Bronce, la Edad de Hierro y llegando a la actualidad, con la era de los materiales compuestos, nanomateriales e incluso materiales funcionales que tienen aplicaciones en la industria moderna (Galvele, 2011). Sin embargo, en sus primeras épocas, no había un estudio a profundidad del origen de las propiedades de los materiales en función de sus procesos de fabricación, pues se trataba en gran medida de un conocimiento puramente empírico, lo cual implicaba el transcurso de un tiempo muy largo antes de que se encontrara un material que sustituyera al mejor encontrado hasta el momento. En la época actual, el estudio de los materiales, desde una perspectiva micro y macroscópica (**estructura**), ha permitido encontrar una gran cantidad de propiedades, las cuales dependen de su forma de obtención (**procesamiento**) así como los elementos de los que está constituido (**composición química**), lo cual hace que se tengan una amplia gama de posibles usos y aplicaciones (**desempeño**). A continuación se muestran los pilares de la ingeniería de materiales (Figura 1).

## Acerca de los autores...

- <sup>1</sup> División de Ingeniería Aeronáutica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.
- <sup>2</sup> Ingeniería Química Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM.
- <sup>3</sup> Consultor e investigador independiente.



Figura 1

Tetraedro de los materiales

En ese tenor, la industria actual está en constante búsqueda de nuevos materiales que satisfagan requerimientos muy específicos para cumplir con normativas del estado, incrementar su resistencia, reducir su peso, disminuir su degradación, elevar la seguridad en su operación, facilitar su proceso de mantenimiento, abatir el consumo energético e incluso ampliar los márgenes de ganancia al dar valor agregado a los productos y servicios que brindan. Un ejemplo de ello, es la industria aeronáutica.

En esta industria, los requerimientos de baja densidad, alta resistencia mecánica, así como procesos sencillos de manufactura captan el interés de los especialistas en materiales, quienes tienen las herramientas y los instrumentos para aportar sus conocimientos al desarrollo de materiales que cumplan con estas características. Ejemplo de este desarrollo ha sido el uso de materiales metálicos (como el aluminio, titanio o magnesio, que tienen baja densidad), así como compuestos de base polimérica con refuerzo de fibras.

Por otro lado, la pulvimetalurgia, una de las ramas de la metalurgia encargada de estudiar la producción, clasificación, caracterización y evaluación de propiedades de materiales en forma de polvo, es una de las opciones para la obtención de componentes que por otros métodos sería muy complejo obtener.

De esta manera, es que surgió la inquietud por estudiar las propiedades de una aleación comercial de aluminio (A356) y dos aleaciones aluminio-zinc (6 y 18 por ciento en peso) como puntos de partida para posteriormente utilizar otras aleaciones que representen menores densidades (por ejemplo, aluminio-magnesio-titanio).

Existen tres rutas principales para la obtención de polvos metálicos: la molienda, que consiste en hacer que secciones relativamente pequeñas de un metal, choquen con esferas de acero al interior de un molino rotatorio para que el metal de interés reduzca su volúmenes hasta volverse un polvo fino; otra opción es por medio de reacciones electroquímicas, permitiendo obtener partículas de un tamaño muy específico a partir del control de la corriente eléctrica que circula en un circuito de celdas con ciertos electrodos y soluciones con iones; por atomización, donde un fluido (metal fundido) es dispersado en muchas gotas muy pequeñas por medio de un cambio de presión (comúnmente generado por la aplicación de un gas a alta presión), en el caso del metal fundido, al enfriarse, se obtienen partículas sólidas que dan origen al polvo. En este caso, se utilizó el método de atomización implementado con ayuda del Mtro. José Guadalupe Rivera Ordóñez, tecnólogo independiente, que proporcionó las muestras necesarias para realizar el análisis.

Se contó con un kilogramo de cada una de las siguientes tres aleaciones: A356 (6.5 a 7.5% Si, 0.25 a 0.45% Mg, 0.2% máx. de Fe, 0.2% Cu, 0.1% Zn, 0.1 Mn%, 0.2% Ti y el resto aluminio), Al-6% Zn y Al-18% Zn. El primer paso fue determinar la distribución granulométrica de las aleaciones. En la Tabla 1 se muestran los porcentajes retenidos en cada una de las cribas (charola con un fondo hecho de una malla con aberturas cuadradas de cierto tamaño, según el número de la malla, ASTM E 11-17). De acuerdo con lo observado, el proceso de atomización está controlado como para generar distribuciones de partículas similares entre las tres aleaciones. En la Figura 2 se puede apreciar una de las muestras de polvo que se utilizó.

No. Malla (mm)	% Retenido de A356	% Retenido Al-6% Zn	% Retenido Al-18% Zn
45 (0.355)	1.70	2.10	1.89
100 (0.150)	11.94	10.91	12.34
200 (0.075)	31.21	30.14	34.65
400 (0.038)	38.80	39.23	36.92
Pan	16.35	17.62	14.20

*Tabla 1*

Porcentaje retenido de polvo en cada criba para las tres aleaciones estudiadas.



*Figura 1*

Muestra de polvo aún sin tamizar. Se puede observar una diversidad de tamaños

El polvo separado se comprimió para formar una pieza. Para ello, el polvo retenido en la malla 100 (al cual se le asignará como polvo fino PF) y malla 45 (asignado como polvo grueso PG) fue introducido a la cavidad cilíndrica de un molde de acero con fondo desmontable. Por la parte superior se colocó un punzón. Al instalar el molde junto con el punzón en la máquina universal de ensayos mecánicos, se pudo cuantificar el cambio de longitud de la probeta, así como la fuerza de compresión aplicada gradualmente hasta alcanzar un máximo establecido (25 KN).

Con esta información se pueden realizar las curvas de compresibilidad, de suma importancia para conocer el grado de porosidad que se tiene en las probetas, ya que el polvo sin compactar tiene zonas entre las partículas que contienen aire, por lo que su densidad aparente es muy baja en comparación con la densidad de la aleación si se hubiera obtenido por un método convencional (fundición). En la Figura 3 se observan las curvas de compresibilidad para cada aleación y cada tamaño de partícula. Se puede notar que después de la compresión se alcanzan densidades similares a las que se tendrían por fundición. Sin compactación, los polvos tienen cerca de un 38% a 43% de la densidad que alcanzan al final de la compactación.

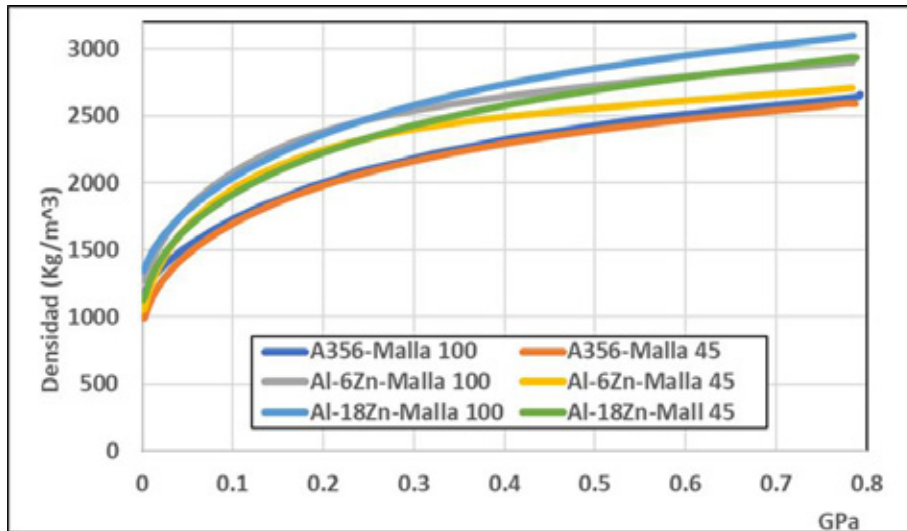
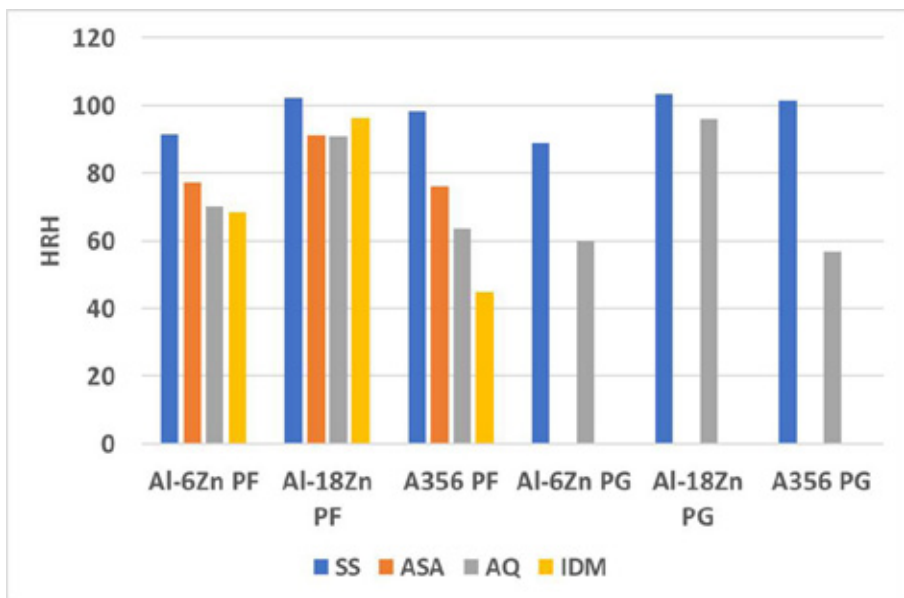


Figura 3

Curvas de compresibilidad.

Posterior a la compactación, se realiza un proceso de sinterización. Éste consiste en someter las piezas compactadas a la exposición prolongada de una alta temperatura (aproximadamente el 70% de la temperatura de fusión, que es alrededor de los 640°C) para que exista una adhesión entre las partículas por medio de la difusión entre ellas y esto brinde solidez a la pieza. En este caso, se decidió utilizar una mufla a una temperatura de 444 °C y mantener las probetas durante una hora. Las condiciones de enfriamiento determinan las microestructuras que se tienen debido a los movimientos atómicos generados al extraer energía del sistema. De esta manera, se propuso utilizar tres medios de enfriamiento: agua sin agitación (ASA), que provoca un drástico enfriamiento; aire quieto (AQ), el cual permite un enfriamiento gradual, y al interior de la mufla (IDM), donde el enfriamiento es muy lento. Aunado a esto, se dejó una probeta sin sinterizar (SS), a manera de comparativo entre las sinterizadas.

Una vez realizada la sinterización, se procedió a medir la dureza de las probetas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4, donde lo primero que se puede observar es que las propiedades no cambian si se utiliza un polvo grueso o un polvo fino. De igual modo, se percibe que las probetas con mayor dureza son aquellas que no fueron sinterizadas, mientras que aquellas con menor dureza fueron las que se dejaron al interior de las muflas. El hecho de que las probetas se sintericen, genera un efecto de reblandecimiento y relevación de esfuerzos generados durante la compactación. La Dureza Brinell (HB, por sus siglas en inglés) del aluminio A356 obtenido por fundición es de 75, equivalente a la Dureza Rockwell H (HRH) de 104. Esta dureza se alcanza sin la necesidad de hacer un sinterizado.



**Figura 4**

Dureza Rockwell H (60 kgf) para cada una de las aleaciones y medios de enfriamiento.

## Conclusiones

La pulvimetalurgia puede ser una opción para la realización de componentes que se requieran en cualquier industria por su versatilidad en el moldeo. Sin embargo, es necesario hacer estudios que permitan describir de forma más amplia los mecanismos que se ven involucrados en los procesos de sinterización para poder determinar las mejores condiciones y así obtener altas propiedades mecánicas. En este estudio, se pudo observar que en el proceso de compactación no importa el tamaño de partículas para las aleaciones A356 y Al-Zn. La dureza más alta se consigue sin la necesidad de sinterizar y las menores durezas se obtienen con enfriamientos sumamente lentos. Como un trabajo a futuro, será necesario ampliar el estudio con el análisis de las microestructuras (para determinar composición química, distribución de los microconstituyentes, así como el tamaño de grano) que brindarán información que revele si es posible mejorar las propiedades físicas o si por el contrario se han visto afectadas por los enfriamientos que sufrió el material.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento a través de la Convocatoria de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica 2017. De igual manera, se agradece el apoyo del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, institución comprometida con el impulso a la investigación en el Estado de México.

### Bibliografía

- Galvele, J. (2011). Materiales y materias primas. Los materiales y la humanidad. Capítulo 1. Guía didáctica. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Askeland, Donald R. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores.
- ASTM E11-17, (2017). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org