

# Estudio del sinterizado de polvo de bronce con virutas metálicas recicladas

## Study of the sintering of bronze powder with recycled metallic chips

Briceño, Richard\*; Tolosa, Ramón; Sarache, Luis y Gil, Roberto

Grupo de Pulvimetalurgia (GPM), Escuela de Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,

Mérida 5101, Venezuela

\* rbriceno@ula.ve

### Resumen

*Se estudió la sinterización de mezclas compactadas de polvo de bronce con virutas metálicas recicladas. Se determinó la influencia que sobre la porosidad y la dureza tienen los factores: temperatura de sinterizado, tamaños de las partículas del polvo de bronce y de las virutas, y el porcentaje de virutas en las mezclas. El polvo de bronce es esférico y las virutas obtenidas por mecanizado son laminares, estas fueron limpiadas adecuadamente y clasificadas por tamaños de sus partículas. Se fabricaron compactos utilizando la técnica de la metalurgia de polvos. La porosidad se determinó por microscopía óptica empleando análisis digital de imágenes, posteriormente se realizó la medición de la dureza. Se determinó que la porosidad se incrementa con el aumento del porcentaje y el tamaño de las virutas en las mezclas. La dureza de los compactos sinterizados es inversamente proporcional a la porosidad. Mezclas sinterizadas con polvo de bronce fino y grueso producen poros aislados e interconectados, respectivamente. La temperatura y el tiempo de sinterizado no fueron lo suficientemente elevados para lograr la unión eficiente entre el polvo y las virutas.*

**Palabras clave:** Sinterizado, polvo de bronce, virutas recicladas, diseño experimental.

### Abstract

*The sintering of compacted powder mixtures with recycled metallic chips was studied. The influence on the porosity and the hardness of the factors: sintered temperature, particles size of the bronze powder and the chips, and the percentage of the chips in the mixtures were determined. The bronze powder is spherical and the chips obtained by machining are lamellar, these were properly cleaned and classified by particle size. Compacts were fabricated using the technique of powder metallurgy. The porosity was determined by optical microscopy using digital image analysis then was realized the measure of hardness. The porosity increases with the increase in the percentage and the size of chips in the mixtures was determined. The hardness of the sintered compact is inversely proportional to the porosity. Mixtures sintered with bronze powder thin and thick, produce pores isolated and interconnected, respectively. The temperature and sintering time were not sufficiently elevated to obtain the efficient binding between the powder and chips.*

**Key words:** Sintering, bronze powder, chips recycled, experimental design

### 1 Introducción

La protección del medio ambiente es sin duda una labor que debemos realizar todas las personas, para poder así tener en el futuro una mejor calidad de vida. Una de las acciones que se puede realizar es la reutilización de materiales de desecho empleando técnicas adecuadas de reciclado. Ejemplo de esto se puede constatar en el reciclado de partes

de los automóviles en Europa, existiendo para tal fin normas de obligatorio cumplimiento para las empresas fabricantes y los estados miembros (Parlamento Europeo, 2000). Otros ejemplos se pueden encontrar en diferentes áreas del quehacer del ser humano, como lo es particularmente el reciclado de virutas metálicas resultantes de procesos industriales de fabricación las cuales normalmente son desechos que tienen un bajo costo comercial, siendo así posible su utilización sin necesidad de fundirlas para recuperar el me-

tal (Gronostajskia y col., 2002; Fogagnolo y col., 2003; Chino y col., 2004; Hu y col., 2008). Una técnica para el reciclaje en estado sólido es la metalurgia de polvos o pulvimetalurgia (P/M), mediante esta es posible fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y de alta calidad, reduciendo al mínimo la pérdida de materia prima y la energía consumida (Huppmann y Dalal, 1986; German, 1994). La P/M en esencia comprende desde la fabricación de los polvos, con ciertas características como el tamaño y la forma de sus partículas; la compactación y la subsiguiente unión de las partículas por medio del tratamiento térmico de sinterizado.

El sinterizado es un tratamiento térmico en el que los compactos verdes se someten a la acción del calor, normalmente en una atmósfera inerte, y a una temperatura entre 60 y 80 % de la temperatura del constituyente de mayor punto de fusión, con esto se confiere solidez a la pieza determinando su resistencia mecánica, así como sus características microestructurales (Neely, 2002).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el sinterizado de polvo de bronce comercial mezclado con virutas metálicas recicladas, para determinar la influencia de varios factores como temperatura, tamaño de las partículas del polvo y de las virutas, y el porcentaje de estas en las mezclas. Esto se realizó mediante la determinación de la porosidad y la microdureza de los compactos sinterizados, teniendo como guía la tabla de un diseño experimental factorial.

## 2 Procedimiento

### 2.1 Materiales

Se utilizaron dos materiales, polvo de bronce comercial y virutas metálicas recicladas; el primero es polvo esférico de bronce fosforoso obtenido por atomización con aire, fabricado por la compañía Eckart-Werke de Alemania, denominado ECKA 89/11 de composición química 89 % Cu, 10,7 % Sn y 0,3 % P, con dos tamaños de partículas como muestra la Fig. 1 (Bucarito y Córdova, 2002).

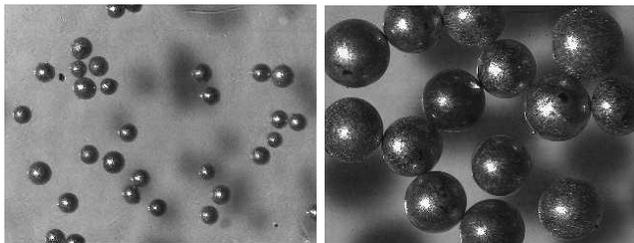
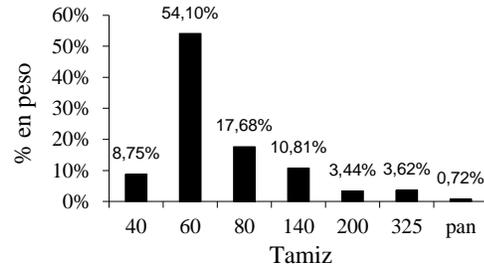


Fig. 1. Polvo de bronce con tamaño promedio de partícula: a) 168 µm, b) 544 µm

Las virutas metálicas recicladas se obtuvieron del proceso de mecanizado de llaves de cerrajería. Estas fueron inicialmente limpiadas adecuadamente con solvente industrial y luego tamizadas según normas (MPFI, 1998) obteniendo la distribución de tamaño mostrada en la Fig. 2. Se

seleccionaron los tamices 60 y 140 por existir entre ambos elevado porcentaje en peso y porque sus tamaños de abertura están bien diferenciados, 250 µm y 106 µm respectivamente. No se usó la maya 80 aunque posee aproximadamente un 7% más que la 140, ya que tiene cercanía de



abertura (180 µm) con la 60 (250 µm).

Fig. 2. Porcentaje en peso de virutas en dependencia del tamaño del tamiz

Las virutas tienen forma de hojuelas angostas alargadas, planas y curvas, tal como se muestra en la Fig. 3

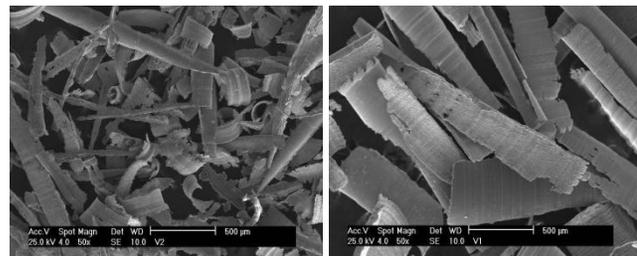


Fig. 3. Virutas metálicas de mecanizado: a) tamiz 140, b) tamiz 80

Se realizó el análisis químico de las virutas mediante la microsonda de R-X de un microscopio electrónico de barrido marca Hitachi modelo S-2500, uno de los resultados representativo de este estudio se muestra en la Fig. 4, donde se constata que las virutas están constituidas principalmente de los elementos Cu, Al y Zn, esto se corresponde con algunos tipos de materiales metálicos con los que se fabrican industrialmente las llaves de cerrajería, unas son de latón (aleación Cu-Zn) y otras de aluminio (Al).

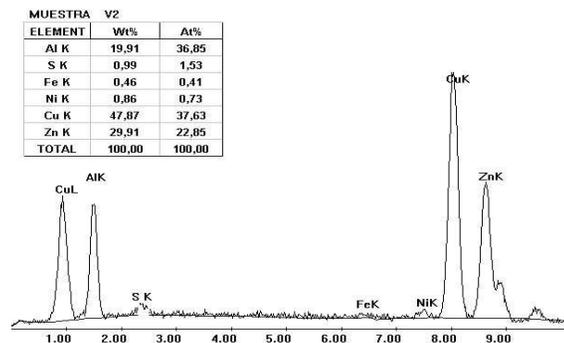


Fig. 4. Patrón de difracción de R-X del análisis químico de las virutas

2.2 Diseño experimental

Con el objeto de evaluar distintas variables y obtener el comportamiento de la porosidad y la dureza se utilizó como guía un diseño experimental factorial. Empleando este método puede estudiarse el efecto de muchas variables en forma individual o colectiva sobre la(s) respuesta(s) del proceso o fenómeno estudiado, lo cual en muchos casos es difícil incluso imposible con los métodos tradicionales, que además son demasiado costosos; por otra parte, el estudio convencional requiere de mucho tiempo y cantidad considerable de material en comparación con el método factorial (Sarache, 1999). Por ser materia de naturaleza diferente a la tratada en este trabajo, se presenta aquí sólo la tabla de experimentos para mostrar las condiciones en que se realizaron (Tabla 2), mientras que el estudio estadístico asociado al diseño se planteará en otro trabajo posterior.

La aplicación del método factorial (De la Vara y Gutiérrez, 2004; Navidi, 2006) determinó la selección para su estudio de las variables siguientes: tamaño de los polvos, tamaño de las virutas, porcentaje en peso de las mezclas y la temperatura del sinterizado; otras variables como la presión de compactación, la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia se mantuvieron constantes durante todo el proceso, esto como resultado del trabajo previo que orientaron el actual (Pino y Suárez, 2009). En la Tabla 1 se muestran las variables con sus códigos y niveles en función del diseño experimental factorial  $2^4$  empleado en este caso; mientras que en la Tabla 2 se muestran los experimentos y sus nomenclaturas.

Dentro de un recipiente cilíndrico cerrado se procedió a mezclar de forma manual mediante agitación los polvos de bronce con las virutas, adicionando un 0,2% en peso de un aceite liviano con el objeto de evitar la estratificación de los materiales, de acuerdo a recomendación existente (Bose y Mukunda, 1982), esto debido a la diferencia de las densidades aparentes de los polvos y las virutas.

Tabla 1. Variables, códigos y niveles

Variables	Código	Bajo	Alto
Polvo de bronce	P	Pf	Pg
Viruta reciclada	V	Vf	Vg
Temp. de sinterizado (°C)	T	750	800
% De viruta en las mezclas	M	5	10

f = fino(a) o pequeño(a), g = grueso(a) o grande

Las muestras se obtuvieron con 3 gr. de cada una de las mezclas y luego se compactaron en una máquina de ensayos marca Lloyd modelo MX100, con capacidad máxima de 100 KN. Se utilizó una matriz de doble orificio para dos muestras, cuyas paredes se lubricaron con estearato de zinc al 1% para disminuir el roce de los polvos.

Se construyó la curva de compactibilidad de las mezclas, mostrada en la Fig 5, de esta se seleccionó la carga de compactación de 45 KN que se corresponde con un esfuerzo de 707 Mpa total, lo que equivale a un esfuerzo para cada muestra de 353,5 Mpa, obteniéndose compactos cilíndri-

cos de 9mm de diámetro de una altura promedio de 5,79mm.

La densidad en verde promedio fue 89% de la densidad teórica del bronce (8.95 gr/cc). Algunas muestras no adquirieron buena consistencia por lo que no se pudieron manipular ni evaluar posteriormente.

Tabla 2. Experimentos

Exp.	P	V	T	M	Nomenclatura
1	Pf	Vf	750	5	PfVf5/750
2	Pg	Vf	750	5	PgVf5/750
3	Pf	Vg	750	5	PfVg5/750
4	Pg	Vg	750	5	PgVg5/750
5	Pf	Vf	800	5	PfVf5/800
6	Pg	Vf	800	5	PgVf5/800
7	Pf	Vg	800	5	PfVg5/800
8	Pg	Vg	800	5	PgVg5/800
9	Pf	Vf	750	10	PfVf10/750
10	Pg	Vf	750	10	PgVf10/750
11	Pf	Vg	750	10	PfVg10/750
12	Pg	Vg	750	10	PgVg10/750
13	Pf	Vf	800	10	PfVf10/800
14	Pg	Vf	800	10	PgVf10/800
15	Pf	Vg	800	10	PfVg10/800
16	Pg	Vg	800	10	PgVg10/800

Los compactos fueron sinterizados en un horno horizontal tubular, en atmósfera inerte con gas argón. El sinterizado se realizó a temperaturas de 750°C y 800°C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. y tiempo de permanencia de 30 min. (Neubing, 1986; Shoales y German, 1999), empleando un sistema de control electrónico computarizado (Pérez y col., 2002).

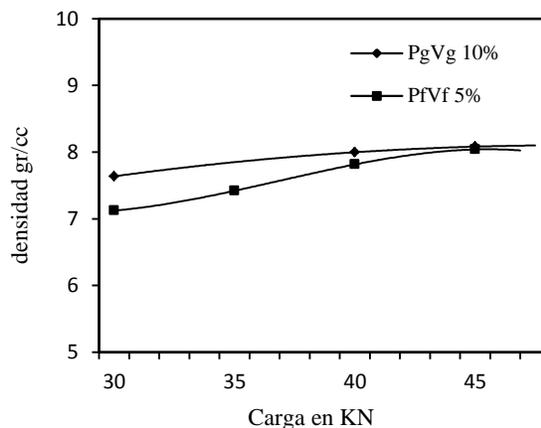


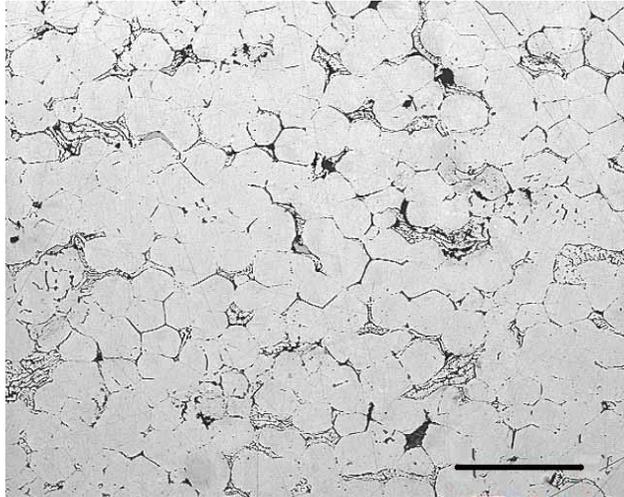
Fig. 5. Curva de compactibilidad de las mezclas

La porosidad se determinó por medio de un analizador digital de imágenes marca Leco modelo IA-3001, la observación se realizó bajo microscopía óptica con un aumento de 50X, en cada plano de observación se realizaron 6 mediciones con un área promedio de observación por muestra de 30 mm<sup>2</sup>. La dureza se determinó mediante un escleroscopio con un penetrador vickers, adaptado a un banco metalográ-

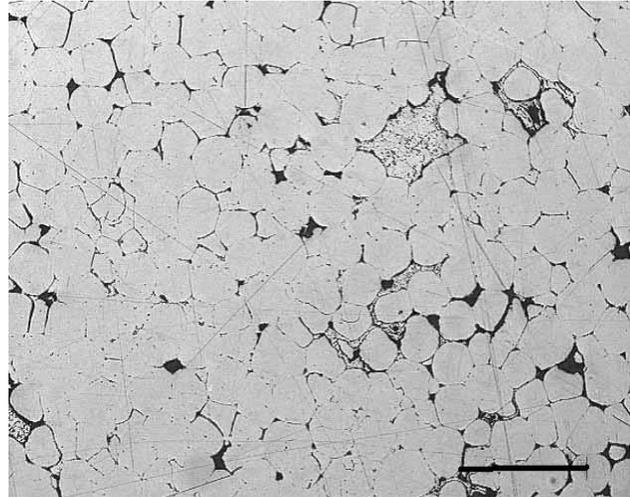
fico marca Leitz modelo MM5, la carga utilizada fue de 400 pondios. Se efectuaron 3 medidas por campo observado para un promedio por muestra de 9 ensayos.

### 3 Resultados y discusión

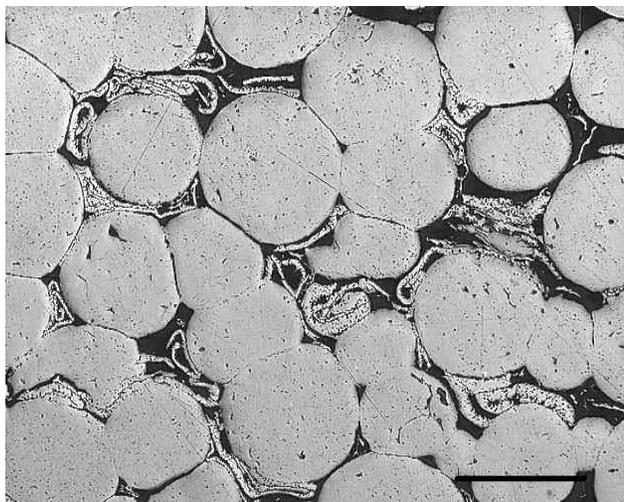
La Fig. 6 muestra la microestructura característica de los compactos sinterizados de algunas mezclas representativas. La porosidad la definen en conjunto las áreas oscuras o poros.



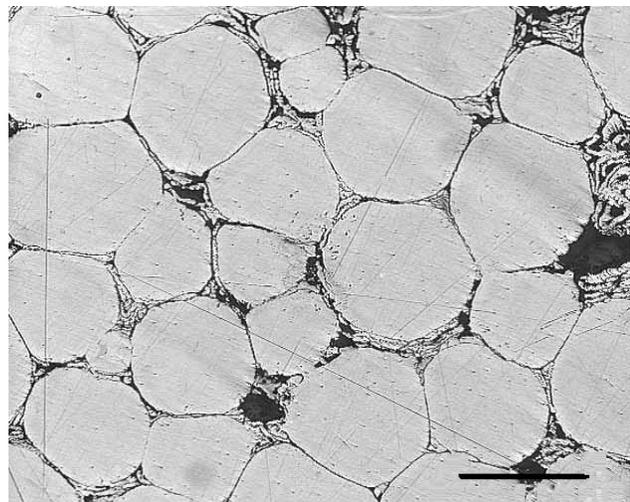
PfVf 10%



PfVg 5%



PgVg 10%



PgVf 5%

Fig. 6. Microestructura de mezclas sinterizadas representativas, se observa la porosidad creada por la presencia de las virutas.

En general se observó que independientemente de la temperatura de sinterización los poros se presentan de manera aislada y al azar en el caso de los polvos de bronce más finos, mientras que en el caso de los gruesos se presenta en forma interconectada, adyacentes entre sí. Se observó también que en algunas mezclas existe unión parcial entre las partículas del polvo de bronce mientras que no ocurre así entre los polvos y las virutas, esto debido probablemente a que la mayoría de las virutas están constituidas por latón

(Cu-Zn) quien en este caso posee temperatura de sinterización mayor que la del bronce, siendo además una aleación muy sensible a las condiciones de sinterizado ya que el cinc a temperaturas superiores a 850°C forma fase líquida y tiene tendencia a la evaporación y oxidación (Krivij y col., 1995). Debido a esto no se empleó una mayor temperatura de sinterización, evitando así formación de fase líquida entre las partículas del polvo de bronce lo que ocasionaría una gran distorsión dimensional en el compacto incluso su des-

trucción dentro del horno. Lo anterior explica porqué las mezclas con mayor contenido de virutas poseen mayor cantidad de poros interconectados, ya que al no emplear temperatura elevada no se produjo la suficiente actividad térmica necesaria para la difusión atómica entre las virutas y el polvo, lo que hubiese permitido su unión eficiente de manera continua, para lograrlo se requiere incrementar la temperatura evitando siempre formar fase líquida o mayor tiempo de permanencia durante el sinterizado.

La Fig. 7 muestra los valores promedio de la porosidad constatándose que independientemente de la temperatura se incrementa con el aumento del porcentaje de la viruta, siendo mayor cuando las virutas son gruesas, esto es algo lógico por el hecho de que el factor tamaño de las partículas es directamente proporcional a la porosidad, a mayor tamaño de las partículas mayor porosidad y viceversa. La porosidad es mayor cuando la cantidad de viruta es menor (5%) y también lo es la temperatura de sinterización (750 °C), mientras que a mayor cantidad de virutas finas (10%) es muy cercana la porosidad en ambas temperaturas, sólo levemente superior en 800 °C. En el caso del 10% de virutas gruesas y polvo grueso se observa que mayor es la porosidad cuando mayor es la temperatura. No se logró hacer mediciones de porosidad en mezclas de polvo grueso y 5% de virutas finas, porque no lograron adquirir la adecuada resistencia en verde al ser compactadas, estas se desmoronaron al salir de la matriz, igual ocurrió con los polvos gruesos sin virutas.

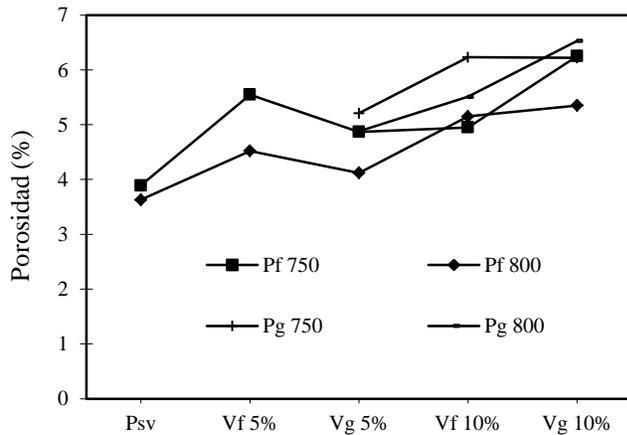


Fig. 7. Porosidad de las mezclas sinterizadas. Las muestras PsV son polvos sin virutas

La Fig. 8 muestra el comportamiento de la dureza de las mezclas sinterizadas. Se puede observar una tendencia general a disminuir la dureza en función del aumento del porcentaje y el tamaño de las virutas, con la excepción sólo con 10% de virutas gruesas y polvo fino donde se presenta un leve incremento. La mayor dureza la poseen las mezclas con polvo grueso. En relación con las temperaturas de sinterización se observa que tienden a ser cercanas entre si, incluso en algunos casos es la misma para ambas temperaturas, independientemente del tamaño del polvo de bronce,

esto puede ser motivado a la proximidad de las temperaturas del sinterizado.

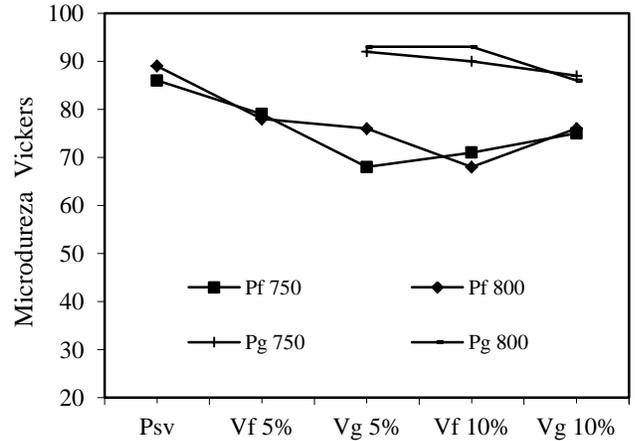


Fig. 8. Microdureza de las mezclas sinterizadas. Las muestras PsV son polvos sin virutas

Para una mejor comprensión del comportamiento de las mezclas sinterizadas, en la Fig. 9 se presentan juntos los resultados de porosidad y microdureza, en donde se puede establecer claramente la relación que existe entre ambos. Independientemente del tamaño del polvo de bronce y de la temperatura, el incremento en la cantidad de virutas, sea esta fina o gruesa, provoca disminución de la microdureza. Esta es la característica general a nivel industrial de las piezas fabricadas por P/M, las propiedades mecánicas son menores que las de las piezas fundidas, sin embargo se puede revertir esto haciendo cambios en la técnica de la P/M, por ejemplo: la doble compactación, compactación en caliente, entre otras; adicionalmente la mejora o cambio del tipo de aleación en los polvos ha hecho posible compensar el efecto negativo de la porosidad (German, 1996).

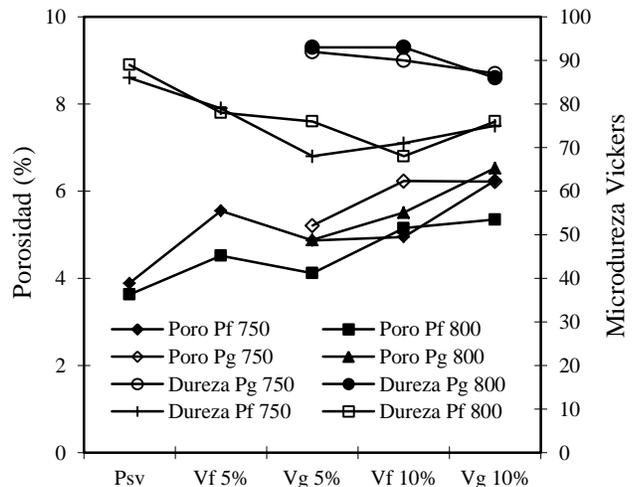


Fig. 9. Correlaciones entre porosidad y microdureza de las mezclas sinterizadas. Las muestras PsV son polvos sin virutas.

#### 4 Conclusiones

Poros aislados y al azar se encuentran mayormente en mezclas de polvos de bronce fino, mientras que en el caso de los polvos gruesos se presenta en forma interconectada, adyacentes entre sí.

La porosidad se incrementa con el aumento de la cantidad de virutas presentes en las mezclas, siendo mayor cuando las virutas son gruesas.

La dureza disminuye con el aumento de la cantidad y el tamaño de las virutas en las mezclas sinterizadas.

La dureza de los compactos sinterizados es inversamente proporcional a su porosidad.

La temperatura no tuvo efecto significativo en la dureza de los compactos sinterizados.

La sinterización no se produjo eficientemente por ser relativamente baja la temperatura utilizada.

El tiempo de sinterización no fue lo suficiente para compensar el efecto negativo de la baja temperatura.

#### Agradecimientos

Al personal del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Arquitectura por su colaboración en la fabricación de los compactos.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y Arte (CDCHTA) de la Universidad de Los Andes por el financiamiento de este proyecto de Investigación, según N° I-742-02-02-D.

#### Referencias

- Bose A y Mukunda P, 1982, A novel method for producing light and heavy duty sintered bronze bearings, Powder Metallurgy International, Vol 14, N° 4, pp. 82-84.
- Bucarito L y Córdova C, 2002, Estudio Teórico Experimental del Sinterizado del Bronce, Tesis de Grado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida. Venezuela.
- Chino Y, Iwasaki H y Mabuchi M, 2004, Solid-state recycling for machined chips of iron by hot extrusion and annealing, J. Mater. Res., Vol. 19, No. 5, pp. 1524-1530.
- De la Vara R y Gutiérrez P. 2004, Análisis y Diseño de Experimentos. McGraw-Hill Interamericana, México.
- Fognolo J, Ruiz-Navas E, Simón M y Martínez M, 2003, Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 143-144, 792-795.
- German R, 1994, Powder Metallurgy Science. Metal Powder Industries Federation.
- German R, 1996, Sintering theory and practice, John Wiley & Sons Inc, New York.

Gronostajski J, Chmura W y Gronostajski Z, Bearing materials obtained by recycling of aluminium and aluminium bronze chips, Journal of Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 483-490.

Gronostajski J, Marciniak H, Matuszak A y Samuel M, Aluminium-ferro-chromium composites produced by recycling of chips, Journal of Processing Technology, Vol. 119, pp. 251-256.

Hu M, Ji Z, Chen X y Zhang Z, 2008, Effect of chip size on mechanical property and microstructure of AZ91D magnesium alloy prepared by solid state recycling, Materials Characterization, Vol. 59, N° 4, pp. 385-389

Huppmann W y Dalal K, 1986, Metallographic Atlas of Powder Metallurgy. Verlag Schmid GMBH, Freiburg, Germany.

Krivij N, Suwardjo W y Cores A, 1995, Optimización de los parámetros tecnológicos para la obtención de piezas de latón por pulvimetalurgia, Revista de Metalurgia, Vol. 31 N° 6, pp. 395-399

MPFI, 1998, Standard Test Methods for Metal Powder Metallurgy, New Jersey, U.S.A.

Navidi William. 2006. Estadística para ingenieros y científicos. McGraw-Hill Interamericana, México.

Neely J, 2002, Metalurgia y Materiales Industriales, Limusa Noriega Editores México.

Neubing H, 1986, Properties and sintering behavior of spherical tin bronze powders for manufacture of filters, Powder Metallurgy International, vol 18, N° 4

Parlamento Europeo, 2000, Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil. Se encuentra en [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/waste\\_management/121225\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/121225_es.htm). Fecha de consulta: 15 marzo 2009

Pérez J, Tolosa R, Alba G y Briceño R, 2002, Implementación de un dilatómetro automatizado con un sistema de control y supervisión, II Simposio Internacional de Automatización y Nuevas Tecnologías, ULA, Mérida, Venezuela.

Pino Nelson y Suárez Marcos, 2009, Caracterización microestructural del sinterizado de mezclas de virutas de aluminio y de fundición. Trabajo de grado. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Sarache L, 1999, Diseño de experimentos y análisis multifactorial aplicado a la industria. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Shoales A y German R, 1999, Combined effects of time and temperature on strength evolution using integral work-of-sintering concepts. Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 30 N° 2, pp. 465-470.

*Recibido: 08 de enero de 2011*

*Revisado: 15 de diciembre de 2011*