Utilización de Ceniza Volante Aleada al Material Compuesto Hierro-Cobre-Grafito mediante un Proceso de Pulvimetalurgia

José de Souza⁽¹⁾, Clayton A. O. Motta⁽²⁾, Lirio Schaeffer⁽²⁾

(1) Instituto SENAI de Innovación – Soluciones Integradas en Metalmecánica – Dirección: BR 116, nº 3239 CP 93025000 - São Leopoldo – RS – Brasil – (e-mail: souza.jose@senairs.org.br)

(2) Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Brasil – UFRGS – Programa de Posgrado en Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales – PPGE3M – Dirección: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Barrio Agronomia – Porto Alegre – RS – Brasil – CP 91501970 – (e-mail: clayton.motta@yahoo.com.br, schaeffer@ufrgs.br)

Recibido Feb. 4, 2014; Aceptado Abr. 21, 2014; Versión final recibida May. 26, 2014

Resumen

Este trabajo tiene el objetivo de estudiar y analizar las propiedades mecánicas de la aleación que presenta en su composición *Fe-Cu-C-Ceniza ligera* obtenida por pulvimetalurgia convencional. Se determinó la densidad aparente, la curva de compresibilidad y se compactaron las muestras de los compuestos con diferentes porcentuales de ceniza. Se realizó la sinterización de las tres aleaciones generadas en atmósfera controlada por argón a temperatura de 1150°C. También se realizó ensayo de densidad, dureza y análisis micrográfico de las muestras. Analizando las propiedades presentadas, los resultados muestran que se puede utilizar la ceniza ligera en balance con la aleación *Fe-Cu-C* en concentración de 4,8%.

Palabras clave: pulvimetalurgia, ceniza ligera, materiales compuestos, hierro-cobre-grafito

Use of Light Ash Alloyed with the Composite Iron-Copper-Graphite through a Process of Powder Metallurgy

Abstract

The mechanical properties of the alloy which has in its composition Fe-Cu-C and fly ash, obtained by conventional powder metallurgy have been studied and analyzed. Fly ashes were added to balance the origin compound (Fe-Cu-C). The apparent density and the compressibility graph were determined and the samples of the composites with different percentages of ash. Sintering of the three composites generated was performed in a controlled atmosphere with argon at a temperature of 1150 °C. Tests of density, hardness and micrographic analysis after sintering were also performed on the samples. Analyses of the results show that fly ash can be used in balance with Fe-Cu-C at the rate of 4.8%.

Keywords: powder metallurgy, light ashes, compounds, iron-copper-graphite

INTRODUCCIÓN

La pulvimetalurgia es un proceso que satisface la productividad en concomitancia con las cuestiones innovadoras de las exigencias ambientales y del uso racional de recursos materiales. Consiste en un método de fabricación de piezas metálicas a partir de metales y sus aleaciones reducidas a un estado pulvurento. En el proceso de la pulvimetalurgia, los componentes de la aleación son balanceados, mezclados, compactados y sinterizados. Residuos de la quema de carbón como la ceniza volante pueden mejorar las propiedades mecánicas de varios productos (APERADOR *et al.*, 2011).

Un factor importante en el proceso de sinterización es el económico, puesto que ese método de fabricación reduce considerablemente los desperdicios de sobra de materia y de tiempo. La compresibilidad y la compactación son parámetros que indican y describen el comportamiento de los posmetálicos cuando compactados. La capacidad de densificación de un polvo está relacionada con la compresibilidad (KLAR, 2007). La sinterización es un proceso subsecuente a la compactación. Ese proceso ocurre en un horno de temperaturas elevadas y de atmósfera controlada. La sinterización se procesa generalmente en hornos continuos, caracterizado por tres zonas de operación que son el precalentamiento, la manutención de la temperatura y el resfriamiento. En cada una de las fases de sinterización es importante tener una atmósfera específica.

La sinterización se realiza en temperaturas en el orden de un 70% a un 80% de la temperatura de fusión del material que está en mayor cantidad en la aleación (DELFORGE *et al.*, 2007). La aplicabilidad de ese método de producción es extensa y variada, atendiendo casi que la totalidad de los sectores industriales, en especial el metal mecánico (KLAR, 2007). Los productos fabricados por el proceso de pulvimetalurgia dependen esencialmente de dosificación y mezcla correctas de los polvos (PANZERA, 2007). Los productos que advienen de esa tecnología son, en general, constituidos por la mezcla de los polvos metálicos o no metálicos. Hay también una adición de aditivo lubricante que, en la aleación que se ha generado, ha sido el estearato de zinc.

Los *cermets* son compuestos que ofrecen gran capacidad de resistencia térmica a elevadas temperaturas de trabajo y de atribución a elevadas resistencias mecánicas y de desgaste a un material (PANZERA, 2007). Los elementos como el SiC, entre otros cerámicos residuales, pueden promocionar mejoras en las propiedades mecánicas de los componentes que contienen la ceniza volante en balance (LEOBARDO *et al.*, 2011). El objetivo general de ese estudio es analizar las propiedades mecánicas de los compuestos con ceniza ligera y comparar al compuesto *Fe-Cu-C* sin la ceniza ligera. Los objetivos específicos han sido el análisis del compuesto desde su mezcla hasta las propiedades obtenidas de los mismos tras el proceso de sinterización. Metalografía y ensayos de dureza Brinell y microdureza Vickers han sido los análisis realizados en los compuestos generados. En la Tabla 1 se presentan los compuestos balanceados con las cenizas volantes.

Tabla 1: Porcentual de los elementos en los tres diferentes compuestos generados.

Material	Porcentual Balance Comp. A (%)	Porcentual Balance Comp. B (%)	Porcentual Balance Comp. C (%)
Hierro – Fe	55,2%	60,2%	50,2%
Cobre – Cu	34,8%	34,8%	34,8%
Grafito – C	0,2%	0,2%	0,2%
Ceniza Ligera	9,8%	4,8%	14,8%

Para todos los compuestos generados se han elegido las variaciones en los porcentuales de hierro y de ceniza, sin embargo se han mantenido inalterados los porcentuales de cobre y grafito. En la figura 1 están dispuestas las muestras.

Fig. 1: Ilustración de los compuestos generados.

Cobre y los elementos de aleación de Cobre

El cobre y sus aleaciones constituyen un grupo de materiales metálicos de utilización muy antigua y diversificada. Dichos materiales reúnen un conjunto de características que justifican el amplio espectro de su utilización, como elevada conductibilidad eléctrica y también térmica, elevada resistencia a la corrosión, buena a moderada resistencia mecánica y una relativa facilidad de someterse a diversos procesos de fabricación (CALLISTER, 2006). También según Callister (2006), muchos elementos, con grande o poca proporción, son mezclables con el cobre en el estado sólido, haciendo con que haya una solución sólida.

Materiales Compuestos

Los materiales compuestos se proyectan modo a conjugar determinadas características con dos o más materiales. La matriz de un material compuesto puede ser polimérica, mecánica o cerámica (INÁCIO, 2010). Muchos materiales compuestos se constituyen por un material de refuerzo que provee características específicas y propiedades deseadas al material. Los compuestos predominantes son del tipo fibroso o particulado.

Ceniza ligera

Las cenizas ligeras o volantes son residuos procedentes de precipitación mecánica o electrostática de los gases que salen de los exaustores de estaciones alimentadas por carbón. La ceniza volante posee formato esférico con una superficie que varía, de una forma general, de 250 m²/kg a 550 m²/kg (MARTINEZ, 2011).

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y herramientas

Los materiales utilizados en la fabricación de las muestras, que han sido sometidas a la sinterización y a un análisis posterior, han sido el polvo de cobre electrolítico, el polvo de hierro atomizado, el grafito, el estearato de zinc y la ceniza volante. Para la comparación de las muestras se ha utilizado un conjunto de herramientas que se compone de matriz, punzón superior y punzón inferior. Ya para la sinterización se ha utilizado un horno tipo pozo, con capacidad de calentamiento de 1200 °C.

Composición de los compuestos A, B y C

La elaboración de las piezas de los compuestos A, B y C presentó metal base hierro y tuvo la composición química presentada a continuación en la Tabla 2. El porcentual excedente se refiere al porcentual de lubricante añadido al compuesto. A fin de balance, no se considera dicho lubricante en el compuesto

Tabla 2. Representación en masa de los porcentuales de cada elemento químico en el compuesto A

<i>Elementos Químicos</i>	<i>Cantidad de material en gramos (g)</i>			<i>Porcentual (%)</i>		
	<i>Muestra A</i>	<i>Muestra B</i>	<i>Muestra C</i>	<i>Muestra A</i>	<i>Muestra B</i>	<i>Muestra C</i>
<i>Polvo - Cobre</i>	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8
<i>Polvo - Ceniza Mosca Ligera</i>	9,8	4,8	14,8	9,8	4,8	14,8
<i>Polvo - Grafito</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Polvo - Estearato de Zinc</i>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Polvo - Hierro</i>	55,2	60,2	50,2	55,2	60,2	50,2
<i>Total</i>	100,5*	100,5*	100,5*	100,5*	100,5*	100,5*

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Densidad Aparente

Una importante característica del material se refiere a su densidad aparente o masa específica aparente. La densidad aparente verificada para los polvos de cobre, hierro, grafito y ceniza mosca ligera se presenta en las Figuras 2 y 3.

La figura 3 muestra que hubo diferencia entre las densidades aparentes tabuladas con los datos obtenidos e presentados en esa figura. Ya para el grafito y la ceniza ligera se ha observado que las densidades aparentes no han sido muy diferentes de las especificadas en la literatura. El grafito presenta densidad aparente en el orden de 2,20 g/cm³ en media. La masa específica de la ceniza volante ha presentado, en ese trabajo, valores que también se han observado por otros autores, 1,9 g/cm³ a 2,5 g/cm³, segundo visto por (TENG, 2011).

Fig. 2. Densidad aparente de los elementos.

Fig. 3. Densidad aparente de los compuestos generados.

La Figura 3 muestra que hubo igualdad en las masas específicas aparentes de la aleación B, C y sin ceniza. Ya la aleación A ha presentado masa específica aparente inferior a los demás. Esa inconstancia puede resultar del fenómeno del área de la superficie, provocada por los elementos cerámicos presentes en la ceniza.

Ensayo de compresibilidad

La Figura 4 muestra la tendencia a la densidad en función de la Presión y Fuerza aplicada para los cuatro diferentes compuestos (A, B, C, Sin Ceniza).

Fig. 4. Compresibilidad de las aleaciones A, B, C y Sin Ceniza (SC).

Se ha notado en el gráfico de la Figura 4 que el compuesto sin ceniza (SC) y el compuesto B presentan, cuando se comparan a los compuestos A y C, una mayor densidad. Otra observación es el hecho de que los tres compuestos con ceniza volante presentan densidades inferiores al compuesto sin ceniza.

Densidad tras sinterización

En la figura 5 se presenta el resultado de las densidades obtenidas tras la sinterización a 1150 °C. Se puede notar en la Figura 5 del gráfico presentado que la densidad de los compuestos A, B y SC ha mantenido su estabilidad y sus valores tras sufrir el proceso de sinterización. Sin embargo, el compuesto C ha presentado una elevación de su densidad tras el proceso de sinterización. Dicho fenómeno se explica por la humectabilidad sufrida por la ceniza y por los elementos presentes en la misma en el proceso de sinterización.

Fig. 5. Densidad tras sinterización de las aleaciones A, B, C y Sin Ceniza (SC).

Microscopía Óptica de las Muestras Sinterizadas

Se realizó la microscopía óptica siguiendo los patrones exigidos, conforme norma regida por el patrón de preparación de muestras. Se ha ensayado una muestra de cada aleación y después se han verificado las microestructuras generadas. La Figura 6 ilustra la micrografía de las muestras ensayadas.

Fig. 6. Micrografía de las muestras de las aleaciones A, B, C y Sin Ceniza (SC) con presión aplicada de 700 MPa, ampliación (50x), atacado con Nital 2%.

La Figura 6 muestra que hubo una buena relación entre carbono y hierro tras la sinterización debido al bajo porcentual de carbono en las muestras de las aleaciones con y sin ceniza. Para las muestras A y C se verificó la presencia de poros con tamaños superiores a los observados en los demás compuestos. El cobre se difundió bien en todas las aleaciones y se pudo observar una pequeña región de coloración ceniza con tono más oscuro que se puede asociar a residuos de la ceniza disuelta en las muestras A, B y C, clasificadas como óxidos.

Verificación Microdureza Vickers

Con el propósito de obtenerse más de una información acerca de las propiedades mecánicas del material, se realizó un ensayo de microdureza Vickers en las piezas sinterizadas conforme mostrado en la Tabla 3. Por esto y por tratarse de un material que presenta porosidad, es necesaria una verificación más confiable de la dureza para evaluación en una microrregión. La microrregión analizada más relevante para el estudio propuesto fue la región de los puntos blancos o de coloración ceniza (micrografía), donde se encuentra la ceniza difusa.

Tabla 3. Resultado de la microdureza Vickers de las muestras de los compuestos A, B, C y sin ceniza.

Composite	Presión (Mpa)	Carga (kgf)	Dureza HV medio
A	800	50	129
B	800	50	105
C	800	50	130
Sin ceniza	800	50	102

En la Tabla 3, se verificó que hubo una tendencia al crecimiento de la dureza a medida que el tenor de ceniza se elevó en balance con los demás elementos del compuesto. Por tratarse de materiales sinterizados, se tuvo la cautela de considerarse las porosidades existentes, realizando, así, el ensayo en las regiones observadas, blancas o de coloración ceniza. El factor de confiabilidad de los resultados obtenidos es de un 95% para una incertidumbre de un 5%.

CONCLUSIONES

Se verificó que hay posibilidad de adición de la ceniza ligera en balance con una aleación que contenga Hierro, Cobre y Grafito. La condición para que el compuesto con ceniza presente propiedades similares al compuesto sin ceniza es la condición donde la ceniza fue balanceada, con un 4,8% en masa, con hierro un 60,2%, con cobre un 34,8% y con grafito un 0,2%. Esa aleación ternaria se mostró cuando las propiedades de resistencia presentadas próximas a la aleación sin ceniza fueron analizadas. Los resultados micrográficos evidenciaron varios tipos de sinterización de cobre con hierro. Los compuestos con mayores porcentuales de ceniza permitieron el apareamiento de regiones con mayor cantidad de inclusiones. Por tratarse de elementos con elevado número de impurezas, la ceniza en gran cantidad propicia el apareamiento de regiones porosas. Conforme mostrado en las referencias, se evaluó posible la utilización de ceniza en balance con hierro, cobre y grafito, según los porcentuales presentados por la muestra B para fabricación de productos.

REFERENCIAS

- Aperador, W., Bautista, R., Jorge, H., Delgado, A. E., Monitoreo de la Corrosión de Aceros Embebidos en Concretos obtenidos a partir de Subproductos Industriales. *Inf. Tecnol.* 24(4), 55-66. (2013).
- Callister, W. D., Materials Science and Engineering an Introduction .New York: John Wiley e Sons (2006).
- Delforge, D.Y., Ferreira, I., Silva, C. G., Paris, E. A., Marcelo, A. L., Novaes, R. H., Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? *Rev. Esc. Minas* vol. 60 nº1 Ouro Preto Jan./Mar (2007).
- González, J. A., García, C., Machado, A., Rincón, C., Villalobos, E., Martínez, K., Concentración de vanádio y níquel em cinzas volantes por combustión controlada. *Interiencia*; 29 (9) sep. (2004).
- Inácio, M. A., Desenvolvimento de Composites Cerâmicos de Al_2O_3 e ZrO_2 . Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais e Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores – INPE – (2010).
- Klar, E., Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructures, and Properties was published in 2007 of ASM Handbook (2007).
- Leobardo, H., Guillermo, A., Zabdiel, B., Marco, R., Simulación Estática y Dinámica de un Modelo Físico Del diodo Pin en Carburo de Silicio. *Información Tecnológica*, vol.21 nº. 5, (2010).
- Martinez, N. A., Bueno, J. J., Ponce, Y. G., Rubio, M. S., Zeolitas a partir de cenizas volantes generadas em las centrales carboeléctricas para el tratamiento de agua contaminada com Mn y Pb. *Revista Tecnología, Ciencia, Educación*, 26(11) (2011).
- Panzer, T. H., Desenvolvimento de um material composite cerâmico para aplicação em mancais porosos – Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – UFMG – (2007).
- Teng, C. T. Estudo da Influência do Calcário Cru e cinzas volantes nas Propriedades Físico-Químicas e Mecânicas do Cimento Portland produzido em Moçambique”. Dissertação de Mestrado em Ciências Químicas – Universidade Eduardo Mondlane (2011).