

# Caracterización de hierros sinterizados fabricados con virutas procedentes de la mecanización de piezas sinterizadas<sup>(\*)</sup>

L.E. García-Cambronero\*, J.M. Ruiz-Román\* y J.M. Ruiz-Prieto\*

## Resumen

La aplicación de las virutas de hierro como materia prima en la fabricación de piezas sinterizadas es el objetivo de presente trabajo. Su incorporación como materia prima se plantea a través de su reducción en tamaño, junto con su dilución con polvos de hierro mediante la utilización de un molino horizontal de alta energía. Los polvos obtenidos corresponden a dos mezclas: polvos de hierro comercial con 50 % de virutas molidas y polvos de una mezcla hierro+50 %viruta que han sido conjuntamente molidos. Las mezclas de polvos se caracterizaron, se consolidaron en matriz rígida y se sinterizaron a 1.150 °C durante 30 min en atmósfera de N<sub>2</sub>-5 %H<sub>2</sub>. Además de la determinación de la densidad o variación dimensional de los materiales sinterizados, se determinaron sus propiedades mecánicas. Finalmente, se analizo la influencia de la microestructura obtenida y la sinterabilidad de las mezclas de polvos obtenidos con estas propiedades.

## Palabras clave

Hierros sinterizados. Virutas de hierro. Molienda de alta energía. Metalurgia de polvos.

## Characterization of sintered irons made with swarfs from sintered parts machining

## Abstract

The objective of the present work is the iron swarfs reusing as raw material to manufacture sintered parts. Particle size reduction using Horizontal attrition milling within iron dilution is the way used to get the raw materials. Two powder mixtures were obtained: Commercial Iron+50 % milled swarfs, and the milling mixture of iron+50 %swarfs. After powder characterization, the powder mixtures were die pressing and sintering at 1150 °C during 30min under N<sub>2</sub>-5 %H<sub>2</sub> atmosphere. Density and dimensional change were determined on sintered materials. Also mechanical properties were obtained. Influence on properties from Microstructure and powder sinter ability were analyzed.

## Keywords

Sintered steels. Iron swarfs. High energy milling. Powder metallurgy.

## 1. INTRODUCCION

Entre las distintas virutas obtenidas por mecanización, aquellas procedentes de aceros<sup>[1-5]</sup> o fundiciones<sup>[6-10]</sup> son las mas importantes desde el punto de vista de volumen y cantidad producidos. Esto ha favorecido las investigaciones<sup>[11-13]</sup> para desarrollar métodos alternativos a su refusión en horno como materia prima de bajo coste en la obtención de piezas sinterizadas. Se ha estudiado la transformación o incluso la aplicación directa a piezas sinterizadas de virutas de hierro o fundición gris<sup>[5 y 9]</sup>, así como de virutas de aluminio, materiales compuestos de matriz de aluminio o aleaciones de cobre<sup>[11-13]</sup>.

La variabilidad en el tamaño de las partículas de las virutas, su baja densidad aparente, la presencia de óxidos en su superficie y la contaminación por lubricantes o refrigerantes, son las principales limitaciones para su aplicación directa como materia prima en la fabricación de componentes sinterizados. En otros casos, como son las virutas de fundición, es preciso moler las virutas, seguido de un tratamiento de recristalización<sup>[1, 2 y 5]</sup> para evitar el endurecimiento por deformación en frío y, finalmente, un tratamiento de descarburación o reducción de óxidos para mejorar las propiedades como la compresibilidad<sup>[6 y 10]</sup>. Incluso, para altos contenidos de carbono en estas virutas, se debe de

(\*) Trabajo recibido el día 10 de septiembre de 2004 y aceptado en su forma final el día 19 de noviembre de 2004.

(\*) Dept. Ingeniería de Materiales. E.T.S.I.Minas-UPM, Rios Rosas 21, 28003 Madrid.

realizar una separación física o emplear una dilución de los mismos (50/50) con polvos de hierro<sup>[10]</sup>, si bien las diluciones conducen a una microestructura heterogénea debido a la baja difusión del carbono desde las partículas de la viruta de fundición hacia las partículas de hierro<sup>[3, 5 y 9]</sup>. En general, además de la reducción del tamaño (mediante molino de alta energía<sup>[11]</sup> o molino de bolas), las virutas han de ser procesadas para disminuir el nivel de oxidación y del contenido de lubricantes<sup>[1-4 y 6-9]</sup>.

Si bien la mecanización de piezas sinterizadas es muy reducida para optimizar las ventajas de las mismas frente a técnicas alternativas, la industria de sinterización es una potencial reutilizadora de aquellas virutas que en la misma se generan, eliminándose igualmente los costes de transporte. Incluso, el volumen de estas virutas se vería aumentado si se extiende la mecanización en seco de probetas en verde de compactos de alta densidad.

En el presente trabajo se estudian las propiedades de los hierros sinterizados que incorporan un 50 % de virutas, bien tras la molienda de la mismas o que son conjuntamente molidas con los polvos de hierro empleando la molienda de alta energía. En ambos casos, sin la aplicación de tratamientos de desoxidación o eliminación de lubricantes y empleando la dilución con polvos comerciales de hierro (para disminuir el contenido de óxidos) junto con la reducción de tamaño como único tratamiento de las virutas. Los materiales sinterizados obtenidos con una composición de 50 % hierro + 50 % virutas por ambas vías se caracterizaron para conocer sus propiedades físicas, mecánicas, su microestructura y el tipo de fractura a flexión. También, se obtuvieron materiales sinterizados de hierro y de virutas, como materiales de referencia.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Características de las virutas

Las virutas empleadas poseen un tamaño variable, entre 200-800 micras (Fig. 1a), con la morfología clásica derivada de la sucesión de los planos de cizalladura generados por el proceso de mecanización (Fig. 2). En relación con su composición, se obtienen al mecanizar aceros sinterizados de baja aleación (>0,4C, <4 %Cu) fabricados por la empresa Sintermetal y presentan un residuo insoluble en ácido, del 0,6 %. En la microestructura deformada de las virutas se encuentra cementita y areolas de cobre (alrededor del 1,5%) rodeando los granos de

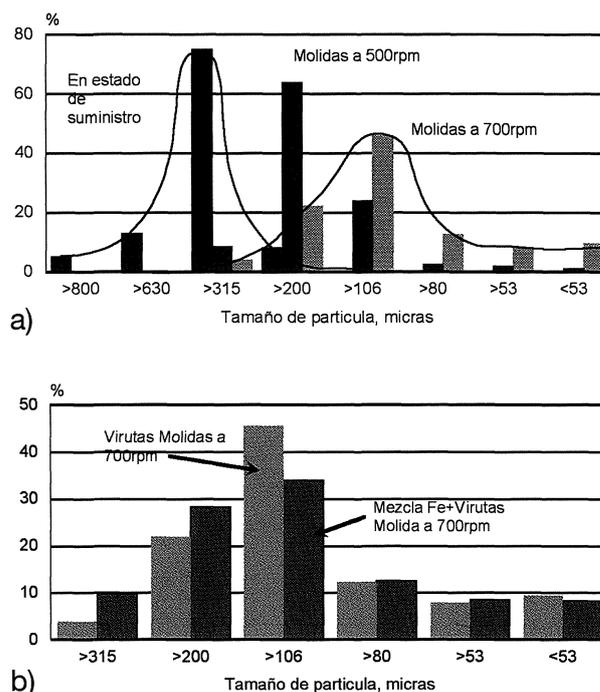


Figura 1. Distribución granulométrica (a) de las virutas en estado de suministro y después de su molienda, y (b) de la mezcla molida de hierro +50 % virutas.

Figure 1. Particle size distribution of (a) Swarfs as received and after milling and (b) milled mixture of iron +50 % swarfs.

ferrita. También, se aprecia la presencia de partículas de óxidos en la superficie de las virutas. Después de la homogenización, se analizó su comportamiento a molienda empleando dos velocidades distintas: 500 y 700 rpm durante 2 h, en cada caso, en un molino de alta energía con atmósfera de argón. Como resultado se obtienen polvos de morfología plana (Fig. 2c), con una menor reducción de tamaño de partícula cuando la velocidad de molienda es mayor (Fig. 1).

### 2.2. Obtención de las mezclas hierro-50 %virutas

Para alcanzar una materia prima con mejores propiedades que solamente las derivadas de las características de las virutas molidas a 700rpm (baja velocidad de flujo, baja compresibilidad,...) se han diluido las mismas en una relación 50/50 con polvos hierro atomizado ASC100.29 (fabricado por la empresa Hogan). Así mismo, como alternativa a la molienda de las virutas, se procedió a obtener la mezcla molida de hierro + 50 % virutas sin moler. Con este proceso se reduce la tendencia a la segregación de las virutas, que si se presenta en las mezclas con hierro atomizado con la viruta molida por

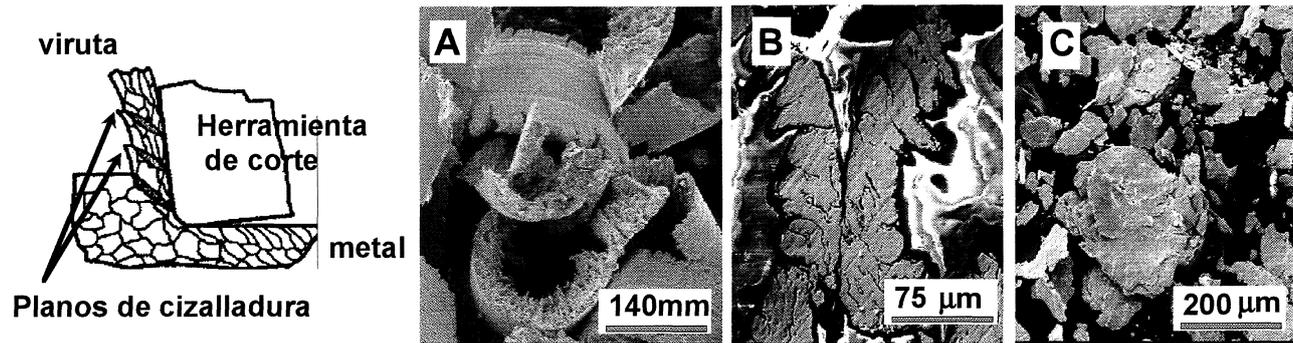


Figura 2. Esquema del mecanismo de obtención por mecanización de las virutas, (A) morfología y (B) sección de las virutas en estado de suministro, y (C) virutas molidas a 700 rpm.

Figure 2. Drawing of swarfs manufacturing, (A) swarfs morphology and (B) section, and (C) milled swarfs at 700 rpm.

la diferente morfología de los polvos. Para obtener este material (hierro+50 % Virutas) se puede partir de polvos atomizados o prerreducidos, pero al no haber importantes diferencias en las propiedades finales al emplear uno u otro polvo de hierro en los procesos donde se aplica importantes energías de molienda como la aleación mecánica<sup>[14-16]</sup>, se selecciono el hierro esponja (o prerreducido) SC100.26.(fabricado por la casa Hoganas) dado que la estructura porosa del hierro esponja favorece una más rápida reducción en el tamaño de partícula que el hierro atomizado.

La molienda de la mezcla de polvos SC 100.26+50 % virutas se realizó a 700 rpm durante 2 h, en argón, en el molino de alta energía ZoZ attritor, CM-01 2l empleando bolas de acero al cromo, de 6mm de diámetro, como cuerpos molidores en una relación bolas/carga de 20:1. Se adicionó un 1,5 % de cera como agente controlador para evitar un elevado desgaste o la soldadura de los polvos a los cuerpos molidores, pero que favorece la molienda mecánica al tratarse de un contenido en lubricante muy bajo<sup>[14 y 15]</sup>. Estas condiciones son las mismas que las empleadas en la molienda de las virutas y conducen, igualmente, a la obtención de polvos de morfología plana y con una granulometría próxima a la de las virutas molidas (Fig. 1b). Sus características de densidad aparente, velocidad de flujo y compresibilidad se ven disminuidas respecto de las del hierro esponja SC100.26.

### 2.3. Conformación, sinterización y caracterización de las mezclas

Ambas mezclas de polvos: ASC100.29 + 50 viruta molida (Fe+50 viruta) y SC100.26 + 50 viruta, molidos conjuntamente (AM-Fe/50Viruta), se

compactaron en matriz rígida a 700MPa con lubricación en paredes de la matriz para obtener compactos rectangulares (conforme a la norma UNE EN 24492) y probetas de tracción (según UNE EN-ISO 2740). Los compactos se sinterizaron a 1.150 °C, en N<sub>2</sub>-5 %H<sub>2</sub>, durante 30 min. Además de las propiedades físicas (densidad y variación dimensional) se estudio su comportamiento mecánico determinando la dureza, resistencia a tracción y alargamiento. Así mismo, se analizaron las fracturas de los materiales a flexión para determinar el grado de sinterabilidad de las mezclas de polvos.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1. Características de las mezclas de polvos

En relación con la molienda de las virutas, las condiciones empleadas conducen a la deformación plástica previa y fractura posterior, sin que se observen mecanismos de soldadura. La morfología plana de las virutas molidas confiere una baja densidad aparente (que mejora tras vibración) y velocidad de fluencia. Después de su mezcla con los polvos de hierro (Fe +50 % viruta), hay una disminución de las propiedades respecto de las presentadas por los polvos de hierro (Tabla I). Así mismo, la mezcla de polvos de hierro y virutas molidas presenta una elevada tendencia a la segregación de estas últimas.

Para la mezcla de hierro con 50 % virutas molidas conjuntamente (AM-Fe/50 virutas), conforme a las condiciones de molienda y considerado como un sistema dúctil (hierro) - dúctil (virutas), la evolución de las partículas puede clasificarse en tres etapas<sup>[14]</sup>: deformación plástica con rotura de la partícula, soldadura con deformación plástica y fractura y, por ultimo, equilibrio entre la soldadura

Tabla I. Propiedades de los polvos empleados

Table I. Properties of used powders

	Densidad g/cm <sup>3</sup>	
	Aparente	En verde
Virutas	2,21	6,50
Hierro SC 100.26	2,65	7,10
AM Fe/50%Virutas (Molienda de Hierro SC+50%Virutas)	0,89	6,06
Fe+50%Virutas (Hierro ASC 100.29+ +50% Virutas molidas a 700rpm)	-	6,70

en frío y los mecanismos de fractura. La morfología de los polvos molidos (Fig. 2) muestra que las condiciones de molienda conducen a la primera etapa del proceso de molienda sin haber alcanzado la formación de partículas equiaxiales [14 y 15], características de la última etapa de molienda y para la que precisan de mayores tiempos de molienda [14]. La morfología plana de los polvos es, por ello, el resultado del equilibrio entre la deformación plástica, la fractura y el endurecimiento por acritud de las partículas. Esta morfología disminuye su densidad aparente (Tabla I) al disminuir sus propiedades de empaquetamiento [14]. También, muestran menor densidad en verde y velocidad de flujo que los polvos de hierro.

Considerando, por otra parte, el sistema dúctil [(hierro SC100.26) – frágil (óxidos)], durante los impactos con los cuerpos moleedores, esta fase dura es molida y golpeada contra la superficie de las partículas de hierro por lo que la repetida soldadura y fractura conduce a una adecuada mezcla o aleación

mecánica [15] entre el hierro y los óxidos (fase dura). Por ello, la mezcla AM-Fe/50 % virutas es el resultado de la trituración de los polvos de hierro y de la viruta, así como la aleación mecánica entre ambos materiales dúctiles y de la aleación mecánica de los óxidos presentes en las virutas con las partículas de hierro. También, se ha producido una reducción de tamaño y dispersión de las partículas procedentes del desgaste de la herramienta de corte.

### 3.2. Sinterabilidad de las mezclas de polvos

Esta propiedad que condiciona propiedades como la densidad final o el comportamiento mecánico a flexión indica el grado de sinterización o de unión que se alcanza entre las partículas. Esta unión es baja en los sinterizados con virutas sin moler o diluir (Fig. 3), donde las uniones son fundamentalmente entre los bordes de las virutas y no a través de su superficie. Por el contrario, la unión es elevada entre las partículas de hierro SC100.26 (Fig. 4) pero no entre las de hierro y las virutas molidas (material Fe+50 % viruta), que muestran el borde inicial de la partícula. La molienda conjunta de polvo de hierro y la viruta (AM-Fe/50 viruta), disminuye sensiblemente este borde de partícula de la viruta, pero al introducir una elevada dispersión de los óxidos, no se mejora el comportamiento mecánico. El empleo de atmósferas de sinterización más reductoras [9], junto con la adición de grafito y un mayor grado de molienda se plantean como opciones para la disminución de óxidos presentes en la mezcla de polvos.

En la fractura a flexión del material AM-Fe/50 % virutas (Fig. 4c), se observa un mecanismo de

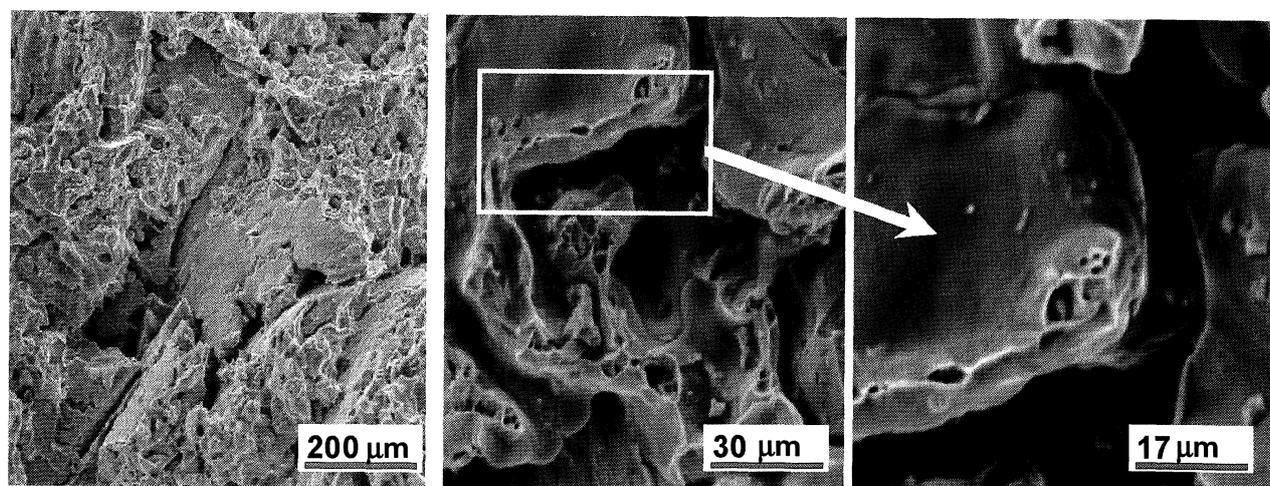


Figura 3. Superficie de fractura de las virutas compactadas y sinterizadas, a diferentes aumentos.

Figure 3. Fracture surface of pressed and sintered swarfs, at different magnifications.

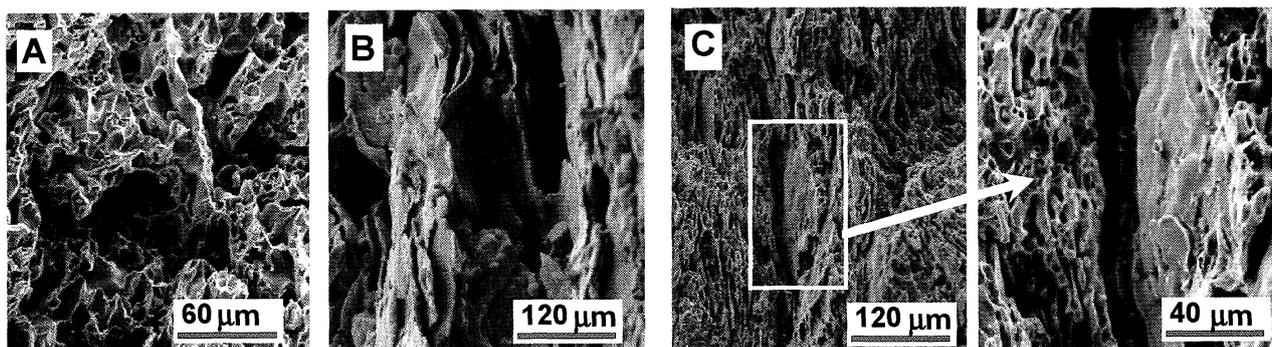


Figura 4. Superficie de fractura de los materiales sinterizados: (A) Hierro SC100.26, (B) Fe + 50 % virutas molidas y (C) AM-Fe/50 virutas.

Figure 4. Fracture surface of sintered materials: (A) SC10026. Iron, (B) Fe+50 % milled Swarfs and (C) AM-Fe/50 swarfs.

fractura interpartícula (o de despegue) en las zonas donde no hay de contacto entre partículas. En estos puntos de contacto se produce la fractura transpartícula, si bien son muy reducidos entre la viruta y el hierro (Fig. 4b y 4c).

### 3.3. Micro estructura de los materiales sinterizados con virutas

Las características de los polvos y su sinterabilidad van a condicionar la microestructura final de los materiales de hierro con virutas<sup>[3, 5 y 9]</sup>. Así, en los materiales sinterizados de Fe+50 % virutas, las partículas de virutas con su morfología plana se alinean y permanecen rodeadas de una elevada porosidad, con una baja difusión con las partículas de hierro, a excepción de los extremos de las mismas (Fig. 5A), donde la fractura favorece superficies libres de óxidos. Así mismo, hay una clara heterogeneidad microestructural por la segregación de las

partículas de viruta que también se obtiene con las virutas de fundición<sup>[5 y 9]</sup>.

En los materiales a partir de AM-Fe/50 % virutas (Fig. 5B), se obtiene una micro estructura mas uniforme pero orientada. Hay una alineación de las partículas en la dirección perpendicular a la de compactación con una porosidad alta y distribuida de forma uniforme a lo largo de la microestructura, en forma de poros de pequeño tamaño así como de poros alargados de mayor tamaño asociados a la superficie de la partícula molida. Se trataría de las superficies oxidadas de algunas de las partículas iniciales de viruta o del menor grado de empaquetamiento que poseen las partículas molidas por la acritud adquirida. Estas capas de óxidos no favorecen una total difusión del cobre o carbono presente en la viruta, por lo que se obtienen islotes de cementita gruesa, aunque no siempre asociados a las partículas iniciales de viruta. Esta distribución del carbono obedecería a la mejor difusión que se

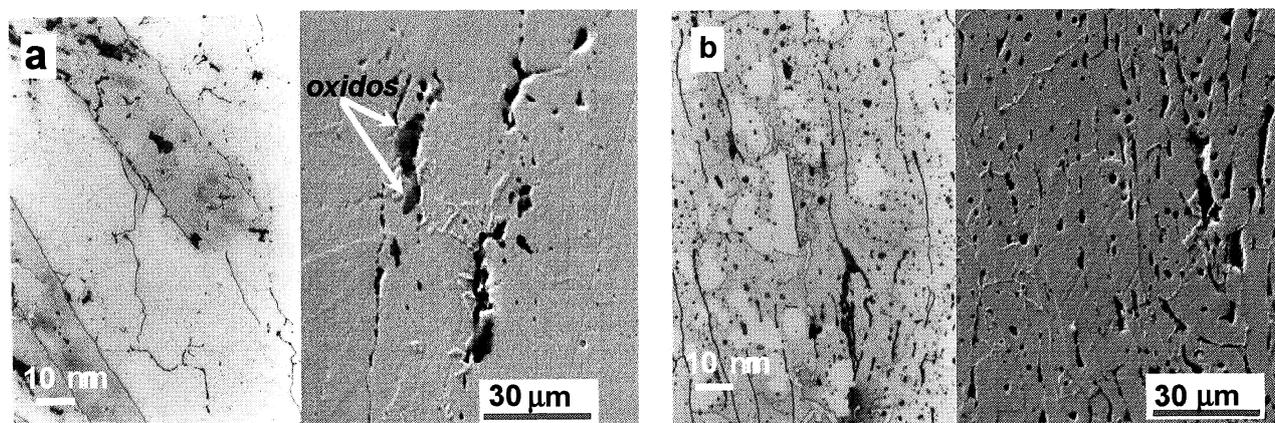


Figura 5. Microestructura óptica (izq.) y electrónica de barrido (dch.) de los materiales sinterizados (a)Fe + % 50 virutas molidas y (b)AM-Fe/50 virutas.

Figure 5. Light Optical (left) and Scanning Electron (right) microstructure of Sintered Materials: (a)Fe+ 50 %Swarfs and (b)AM-Fe/50 % milled swarfs

alcanza en los extremos de las partículas molidas al generarse superficies libres de óxidos por rotura durante la molienda que, también, se da en los materiales de hierro diluido con virutas molidas (Fig. 3). La incorporación de grafito a la mezcla de polvos, bien en el mezclador o en el molino, se plantea como vía para una reducción de los óxidos presentes en la fabricación de aceros sinterizados con virutas, así como la aplicación de una sinterización con fase líquida<sup>[5]</sup> o sinterización con presión<sup>[17]</sup> aportarían una mayor densificación del sinterizado

### 3.4. Propiedades de los materiales sinterizados

La densidad se reduce como consecuencia de una menor densidad en verde al adicionar las virutas molidas o al emplear los polvos de AM-Fe/50 virutas. Así mismo, estas bajas densidades en verde conducen a elevadas contracciones en los materiales sinterizados con virutas (Tabla II). Por ello, ambas propiedades se ven disminuidas con el empleo de virutas. Tampoco las propiedades mecánicas mejoran al incorporar virutas al hierro (Fe+50 % virutas). Solo, la dureza mejora como consecuencia de la presencia de óxidos y aleantes de las virutas, pero tiene fuertes variaciones cuando se trata de mezclas de Fe + 50 % virutas molidas, al existir segregación de estas últimas. La resistencia a tracción, RT, y el alargamiento disminuyen como consecuencia de la baja densidad y la heterogeneidad microestructural<sup>[3, 5 y 9]</sup>.

### 4. CONCLUSIONES

La aplicación directa de las virutas de mecanización de piezas sinterizadas como materia prima mantiene su limitación en el contenido en óxidos y en la morfología plana de las virutas molidas. Por ello, la baja compresibilidad y alto grado de oxidación siguen condicionando la utilización de las mismas. Debido a estas características, se obtiene una importante disminución de las propiedades de

los materiales sinterizados al incorporar las virutas. Si bien la molienda conjunta del polvo de hierro y virutas conduce a una mayor sinterabilidad y menor segregación de las partículas de viruta, la dispersión de los óxidos presentes en las virutas no favorece la mejora de las propiedades mecánicas, con excepción de la dureza, que aumenta y presenta valores más uniformes.

Las condiciones de molienda han de modificarse para incorporar un mayor contenido de superficies libres de óxidos en las virutas, actuando sobre el tiempo de molienda o la adición de agentes reductores, pero evitando una importante reducción de la compresibilidad de los mismos, que conduzca a bajas densidades finales.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa Hoganas por los polvos de hierro y a la empresa Sintermetal por las virutas de mecanización

### REFERENCIAS

- [1] T. NAGAWA Y C.S. SHARMA, *Modern Developments in PM* 9 (1977) 347-388.
- [2] S.V. ILANG Y P. RAMAKRISHMAN, *PM'90 Congress*, Paris (1990) 229-233.
- [3] L.E.G. CAMBRONERO, J.M. RUIZ ROMAN Y J.M. RUIZ, *European conference on Advanced in Structural PM component production*, Munich, (1997) 23-38.
- [4] A. CASAGRANDE, E. LANZONI, G. POLI Y M. SOLDATI, *PM'94*, London, (1994) 915-918.
- [5] S.N. NASAMOV, N. KRIVU, H.W. GUDENAU, A.I. BABICH, L.L. GARCÍA Y A. FORMOSO, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 164-171.
- [6] P. RAMAKRISHNAN S.L. PALKAR Y K. GORARAJ, *Modern Developments in PM* 15 (1985) 73-83.
- [7] T. NAKAGAWA Y F.S. DAI, *Met. Powder Report* 2 (1985) 79-83.

Tabla II. Propiedades de los materiales sinterizados

Table II. Properties of sintered materials

	RT, MPa	Alargamiento, %	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Variación dimensional, %	DUREZA HRB
Virutas	—	—	6,46	-0,42	—
Hierro	239 - 245	7,8	7,12	-0,14	31-34
AM-Fe/50Virutas	94 - 120	2,1-3,2	6,09	-1,92	46-48
Fe+50%Virutas	193 - 218	1,5-2,9	6,85-6,91	-1,84 a -2,27	40-50

- [8] F. VELASCO, J.M. TORRALBA, L.E. GARCIA CAMBRONERO Y JM RUIZ-PRIETO, *Rev. Metal. Madrid* 29 (1993) 99-111.
- [9] F. VELASCO, J.M. TORRALBA, L.E. GARCIA CAMBRONERO Y JM RUIZ-PRIETO, *J. Jpn Soc. PM* 10 (1994) 1282-1287.
- [10] C. EDIL, W. CONTRERAS Y M.L. PARUCKER, AMPT01, Leganes, Spain (2001) 1.221- 1.228.
- [11] J.B. FOGAGNOLO, E.M. RUIZ-NAVAS, M.A. SIMON Y M.A. MARTINEZ, AMPT01, Leganes, Spain (2001) 1.507-1.512
- [12] W.C. ZAPATA, M. TOMAÍNA, M.V. DONADON, *VI seminario de Tecnología da industria do aluminio*. Sao Paulo (1997) 227-290.
- [13] J.Z. GRONOSTAJKI, J.W. KAZMAN, H. MARCINIAK Y A. MATUSZAK, *J. Mat. Process. Technol.* 77 (1998) 37-41.
- [14] P.R. SONI, *Mechanical Alloying*, Ed. Cambridge Int. (2000) 35-39.
- [15] ROSS KAMP, M. OSTGATHE, F. THUMMLER, J. ENGSTROM Y E. VANMAN, *Pow. Metall.* 39 (1996) 37-43.
- [16] D.R. MATADOR Y J.M. TORRALBA, AMPT01, Leganes, Spain (2001) 1.203-1.207
- [17] J.M. MONTES, J.A. RODRIGUEZ, E.J. HERRERA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 99-106.