

# Evaluación de la tenacidad de fractura en aceros sinterizados de alta densidad

Jorge Bris\*, Luis Llanes\*\* y José Calero\*\*\*

---

## Resumen

*Este trabajo muestra la metodología para determinar el comportamiento a fractura en un acero sinterizado. Se ha evaluado la tenacidad a fractura y la porosidad en un acero sinterizado de composición química Fe-4.0Ni-1.5Cu-0.5Mo-0.5C en el rango de densidad de 7.20 a 7.51 g/cm<sup>3</sup>. Los niveles más altos de densidad se alcanzaron por medio de la doble compactación y sinterización de polvos precalentados. Los resultados muestran un incremento en la tenacidad de fractura con la densidad debido al aumento de la esfericidad de los poros, la reducción del tamaño medio de éstos y su mejor distribución. A pesar de utilizar tres tipos de lubricantes diferentes para la compactación del polvo, los resultados sólo dependen del nivel de densidad de sinterizado.*

**Palabras claves:** Tenacidad de fractura, acero sinterizado, alta densidad.

## Abstract

*This paper shows the methodology to assess fracture behaviour in sintered steels. Fracture toughness and the microstructure of PM steel (Fe-4.0Ni-1.5Cu-0.5Mo-0.5C) have been studied as a function of sintered density in a range from 7.20 to 7.51 g/cm<sup>3</sup>. Highest densities were achieved by warm compaction and double pressing-double sintering using three different lubricants. A quantitative analysis of microstructure was correlated with fracture behavior to assess the influence of pore morphology on mechanical properties. Fracture toughness increased with density, being this performance a remarkable advantage over wrought steels. Results showed that the enhanced behavior of the denser samples is due to improved distribution of more spherical porosity. In spite of using different lubricants, the final results depend solely on sintered density reached by each processing route.*

**Key words:** Fracture toughness, sintered steel, high density.

Fecha de recepción: 9 de marzo de 2005  
Fecha de aceptación: 3 de mayo de 2005

---

\* Ingeniero Mecánico, Universidad del Norte. Candidato a Doctor, Universidad Politécnica de Cataluña (España). Grupo de Investigaciones en Materiales y Procesos, Universidad del Norte. [jbrix@uinorte.edu.co](mailto:jbrix@uinorte.edu.co)

Dirección: Universidad del Norte, Km 5 vía a Puerto Colombia, A.A. 1569, Barranquilla (Colombia).

\*\* Ingeniero de Materiales, Universidad Simón Bolívar (Venezuela). Ph.D. Materials Science and Engineering, Universidad of Pennsylvania (USA). Catedrático, Universidad Politécnica de Cataluña (España). Grupo de Investigación en Fatiga y Fractura. [luis.miguelllanes@upc.edu](mailto:luis.miguelllanes@upc.edu)

\*\*\* Doctor en Ingeniería y Metalúrgica, Universidad de Barcelona (España). Director del departamento de Investigación - AMES S.A. [jacalero@alme.ames.es](mailto:jacalero@alme.ames.es)

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de la pulvimetalurgia (PM) se han incrementado debido a su bajo costo en producción de grandes series. Este beneficio se sustenta en la eliminación de procesos de acabado y en la reducción de desechos de materia prima. En los últimos años se han encontrado múltiples aplicaciones de los aceros PM, en las que éstos son sometidos a cargas elevadas, ya sea estáticas o cíclicas. Esto demanda un mejor conocimiento del comportamiento de este tipo de materiales de cara a optimizar los diseños.

Las propiedades mecánicas de los materiales sinterizados están influenciadas por muchos factores, entre los cuales la porosidad y la estructura interna de los poros juegan un papel determinante [1-4]. Estos factores, a su vez, están determinados por el tipo de polvo y la ruta de compactación y sinterizado utilizada en el procesamiento.

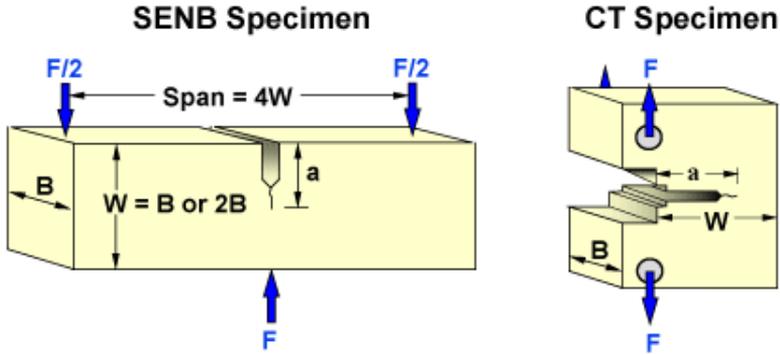
Numerosas investigaciones han estudiado la relación entre la densidad y las propiedades mecánicas de los aceros sinterizados [p.ej. 5-6]. Algunos autores han evaluado la tenacidad de fractura de aceros PM [7-12] con densidades relativas hasta de un 92%. Estos trabajos reportan la imposibilidad de cumplir la norma ASTM E-399 para la evaluación de la tenacidad de fractura, principalmente por la dificultad de asegurar un estado de deformación plana en la probeta durante el ensayo.

El propósito de este trabajo ha sido la evaluación de la tenacidad de fractura de un acero sinterizado en el rango de alta densidad, e incluye la comprobación de la validez de la metodología empleada. Se pretende, asimismo, comparar los resultados, en función de la densidad, con el comportamiento de los aceros macizos (procesados por métodos convencionales como la fundición, la forja, etc.).

## 2. TENACIDAD DE FRACTURA

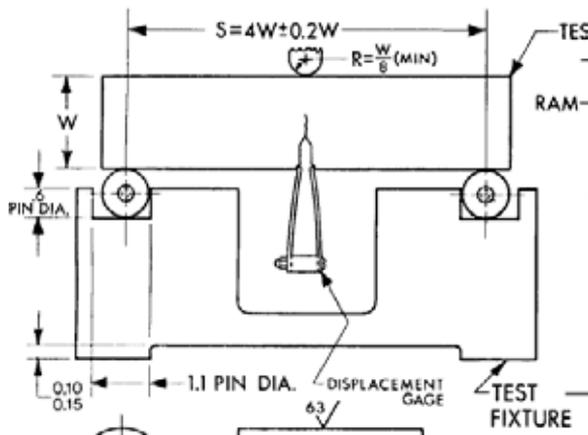
La tenacidad de fractura,  $K_{IC}$ , está definida como la resistencia del material a la propagación inestable de grietas [13]. Este parámetro debe evaluarse de acuerdo con la norma ASTM E-399 [14], garantizando un estado de deformación plana por delante de la punta de la grieta, lo cual produce una zona plástica pequeña y por tanto cumple con los supuestos de la Mecánica de Fractura Elástico-Lineal (MFEL).

La norma citada propone varios tipos de probetas, entre las cuales las más utilizadas son la compacta de tracción (CT) y la de flexión (SENB), cuyas geometrías deben cumplir las relaciones  $B/W = 0.5$  y  $0.45 < a/W < 0.55$  (figura 1).



**Figura 1**  
Esquema de las probetas utilizadas en los ensayos de tenacidad a fractura

Con el objetivo de generar una grieta aguda, se somete la probeta entallada a solicitaciones cíclicas y, una vez prefisurada, se ensaya a tracción o a flexión, registrándose la carga ( $P$ ) en función de la abertura de la grieta medida en la boca de la entalla (*Crack Opening Displacement, COD*) mediante un extensómetro, como se ilustra en la figura 2.



**Figura 2**  
Montaje de probeta y extensómetro para ensayos de tenacidad a fractura

La entalla debe ser suficientemente aguda para asegurar que la grieta se pueda nuclear con cargas de fatiga relativamente bajas, y la extensión de la fisura inducida debe ser convenientemente grande para evitar la posible influencia del campo de tensiones asociado a la entalla macroscópica. Se debe asegurar también un frente de grieta recto.

Para garantizar deformación plana, se propone que la longitud de la grieta,  $a$ , el ligamento,  $b$ , y el espesor de la probeta,  $B$ , cumplan la siguiente condición:

$$a, b, B \geq 2.5 \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (\text{ecuación 1})$$

### 3. APLICACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA AL DISEÑO

La tenacidad de fractura es la propiedad del material que, combinada con la tensión de diseño y el tamaño del defecto fisura existente en el componente, controla su comportamiento a fractura. Así, el criterio de fractura dado por

$$K_I = K_{IC} = Y \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{ecuación 2})$$

puede ser utilizado con el objetivo de prevenir la rotura del componente de acuerdo con diversas directrices: selección del material (tenacidad), sollicitación mecánica y dimensiones mínimas del componente (esfuerzo de diseño) o detección de defectos y mantenimiento o reparación (tamaño de fisura).

Es importante destacar la tendencia de la tenacidad de fractura, y del tamaño máximo tolerable de fisura, que disminuye significativamente a medida que se aumenta el límite elástico del material. Dicha observación implica que la precaución en el diseño debería ser cada vez mayor en la medida en que los materiales por emplear exhiban progresivamente una mayor resistencia mecánica.

## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. Material evaluado

El material seleccionado para el estudio es un polvo prealeado tipo *Distaloy AE* con composición Fe-4.0Ni-1.5Cu-0.5Mo-0.5C, y se utilizó por ser de amplio uso en la fabricación de componentes estructurales. Se han obtenido

seis diferentes niveles de densidad compactando a través de diferentes rutas de procesamiento, que se resumen en la tabla 1, y utilizando tres tipos de lubricante. Los niveles de densidad más altos fueron obtenidos por medio de la compactación de polvo precalentado (wc- *Warm Compaction*) y el doble prensado-doble sinterizado (2P2S).

**Tabla 1**  
Material y rutas de procesamiento evaluadas

Nº	Polvo base	Lubricante	Compactación	Sinterizado (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1	Distaloy AE + 0.5%C	0.6% Cera	1P1S - CC	1120 °C	7,22
2			2P2S - CC	800 / 1120 °C	7,40
3	Densmix Distaloy AE + 0.5%C	Premezclado	1P1S - WC	1120 °C	7,29
4			2P2S - WC	800 / 1120 °C	7,51
5	Distaloy AE + 0.5%C	0.58%PE + 0.02% Ad	1P1S - WC	1120 °C	7,25
6			2P2S - WC	800 / 1120 °C	7,48

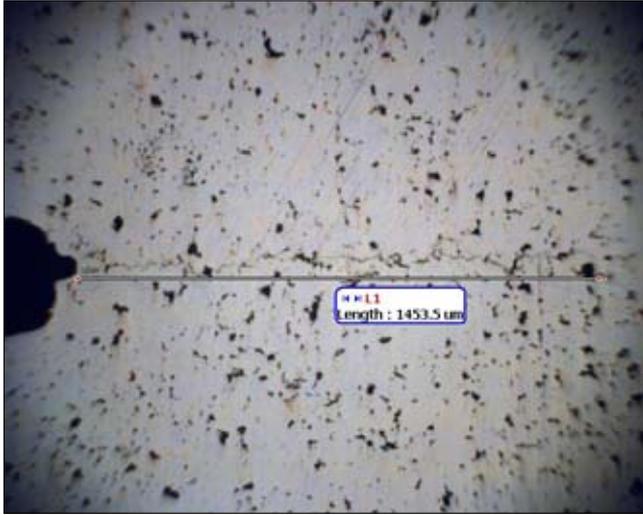
**1P1S:** 1 etapa prensado-sinterizado; **2P2S:** 2 etapas prensado-sinterizado; **CC:** Compactación en frío (Cold Compaction - 25°C); **WC:** Compactación de polvo precalentado (Warm Compaction - 120°C).

En las rutas 2P2S, el primer sinterizado se realiza a 800°C por 20 minutos, y el segundo a 1.120°C por 30 minutos.

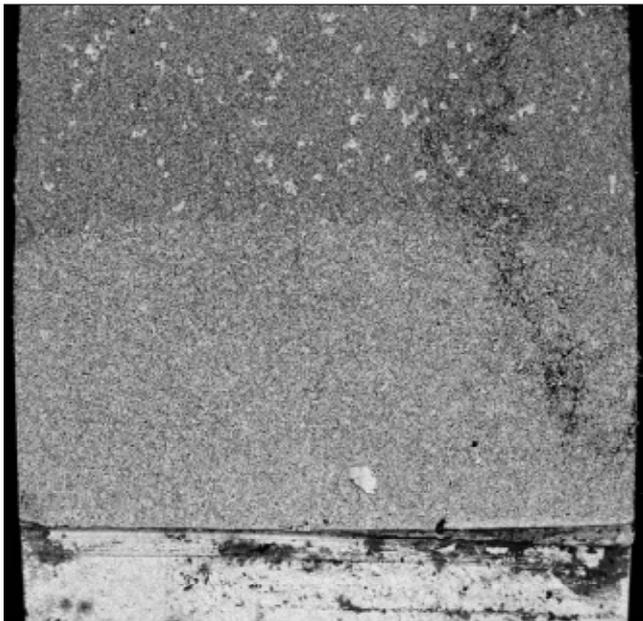
#### 4.2. Ensayos de tenacidad de fractura

La tenacidad de fractura fue evaluada por modo I de carga en ensayos de flexión a tres puntos de acuerdo con la norma ASTM E399-90, con probetas tipo Charpy de dimensiones 5x10x55 mm. La entalla inicial de profundidad 2 mm se fabricó por corte con disco de diamante de 0,3 mm de espesor, y posteriormente se agudizó la punta con una cuchilla de 0,1 mm. La posterior prefisura (figura 3) se generó por fatiga con una relación de carga  $R=0.1$  (esfuerzo máximo/esfuerzo mínimo) en una máquina de resonancia con una frecuencia alrededor de 100 Hz.

La fractura final fue producida aplicando carga en el punto central de la probeta a razón de 100 N/seg. La abertura de la punta de la grieta fue medida utilizando un extensómetro tipo COD (figura 2). En cada probeta se comprobó la obtención de un frente plano en la prefisura (figura 4).



**Figura 3**  
Prefisura generada por cargas cíclicas  
a partir de entalla aguda



**Figura 4**  
Fractura de probeta que ilustra  
el frente plano de la prefisura

### 4.3. Microestructura de la porosidad

Por cada mezcla compactada, se seccionó una muestra, la cual fue desbastada y pulida. Con la superficie sin atacar químicamente, se observó la morfología de la porosidad con microscopía óptica y se caracterizó mediante análisis de imagen. Se calculó el tamaño medio de los poros y la esfericidad media. Esta última característica puede tomar valores desde 0 (completa irregularidad) hasta 1 (esfericidad perfecta).

## 5. RESULTADOS

A pesar de que tanto el ligamento  $b$  como la longitud de la grieta  $a$  están por debajo del valor recomendado por la norma (última columna tabla 2), la observación de las superficies de fractura muestra un frente plano en la punta de la grieta generada por fatiga (figura 4), lo cual es un indicador de la presencia de un estado de deformación plana.

Dado que las condiciones experimentales no satisfacen completamente las establecidas en la norma, el valor calculado como tenacidad de fractura se identifica como  $K_Q$  y no como  $K_{IC}$ , teniendo utilidad sólo de carácter comparativo. Sin embargo, varios estudios [p.ej. 2] han ensayado probetas de diferentes tamaños y han comprobado que para materiales PM no hay variación significativa en los valores de tenacidad calculados.

La tabla 2 contiene el resultado promedio de tenacidad de fractura de tres ensayos realizados por cada mezcla. Los resultados muestran una clara influencia positiva de la densidad sobre la tenacidad de fractura del material (figura 5).

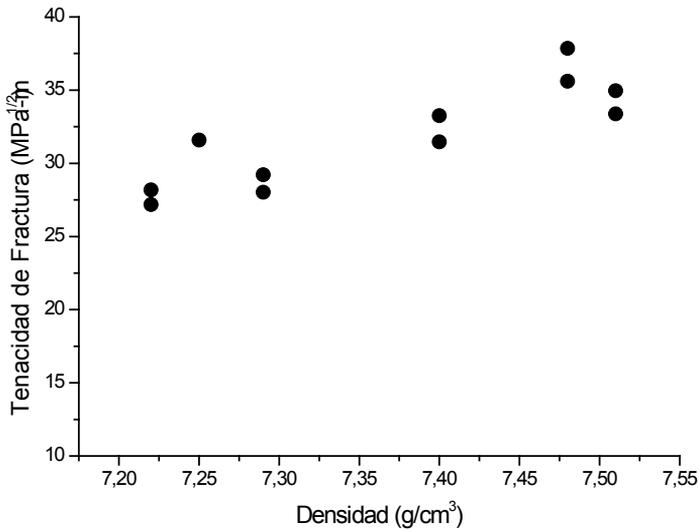
Es conocido que el aumento de la densidad conlleva a una mejora del límite elástico y de la resistencia a tracción. En materiales macizos (procesados por métodos convencionales), y de acuerdo con la Mecánica de Fractura, un aumento del límite elástico representa una disminución de la zona plástica en la punta de la grieta, lo cual facilita el avance de ésta en el interior de dicho material, ocasionando una reducción de la tenacidad de fractura.

La falla de materiales PM se produce por la rotura sucesiva de *cuellos* (material existente entre poros). El tamaño de los cuellos aumenta con la densidad, por tanto, una mayor densidad está relacionada con una mejor resistencia, pues hay mayor área resistente al esfuerzo.

**Tabla 2**  
Resultados ensayos de tenacidad a fractura

Nº	Polvo	Lubricante / Ruta	Densidad	Tenacidad de Fractura, $K_Q$	$2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y s} \right)^2$
			g/cm <sup>3</sup>	MPa m <sup>1/2</sup>	mm
1	Distaloy + 0.5%C	0.6% Cera - 1P1S	7,22	27.5	10.32
2		0.6% Cera - 2P2S	7,40	32.3	9.28
3	Densmix	Premezcl. -1P1S	7,29	28.5	8.81
4		Premezcl. - 2P2S	7,51	34.1	8.64
5	Distaloy + 0.5%C	0.58% PE + 0.02% Ad -1P1S	7,25	31.6	9.75
6		0.58% PE + 0.02% Ad - 2P2S	7,48	36.7	9.60

Los poros, además de reducir el área resistente, actúan como concentradores de esfuerzo al interior del material, siendo así precursores “naturales” de grietas.

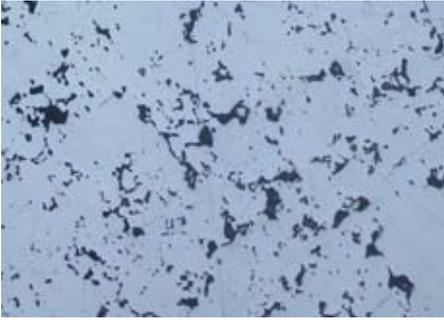


**Figura 5**  
Resultados de tenacidad a fractura en función de la densidad

De acuerdo con los resultados del análisis de la porosidad (tabla 3), el incremento de la densidad está acompañado de una disminución en el tamaño medio de los poros (figura 7a) y de un ligero aumento de su esfericidad (figura 7b), lo cual se puede comprobar observando las fotomicrografías de la figura 6. Estas dos consecuencias, por un lado, aumentan la trayectoria que debe recorrer la grieta y, de otro lado, reducen el efecto de concentrador de esfuerzo de los poros. Por consiguiente, la generación de grietas a partir de los poros y su posterior avance se dificulta, obteniéndose así una mayor tenacidad de fractura.

**Tabla 3**  
Resultados morfología de la porosidad

No	Material	Comp.	Densidad	Área total porosidad	Área promedio de poro	Esfericidad media [desviación]
			g/cm <sup>3</sup>	%	μm <sup>2</sup>	
1	Distaloy + 0.5%C	Frío	7,22	9.08	22.6	0.55 [0.19]
2			7,40	5.49	14.5	0.53 [0.17]
3	Densmix	120°C	7,29	6.79	18.6	0.56 [0.19]
4			7,51	5.87	12.4	0.59 [0.18]
5			7,30	-	-	-
6	Distaloy + 0.5%C	120°C	7,25	7.71	27.0	0.54 [0.17]
7			7,48	5.40	17.6	0.58 [0.19]



Material 1



Material 3



Material 4



Material 6

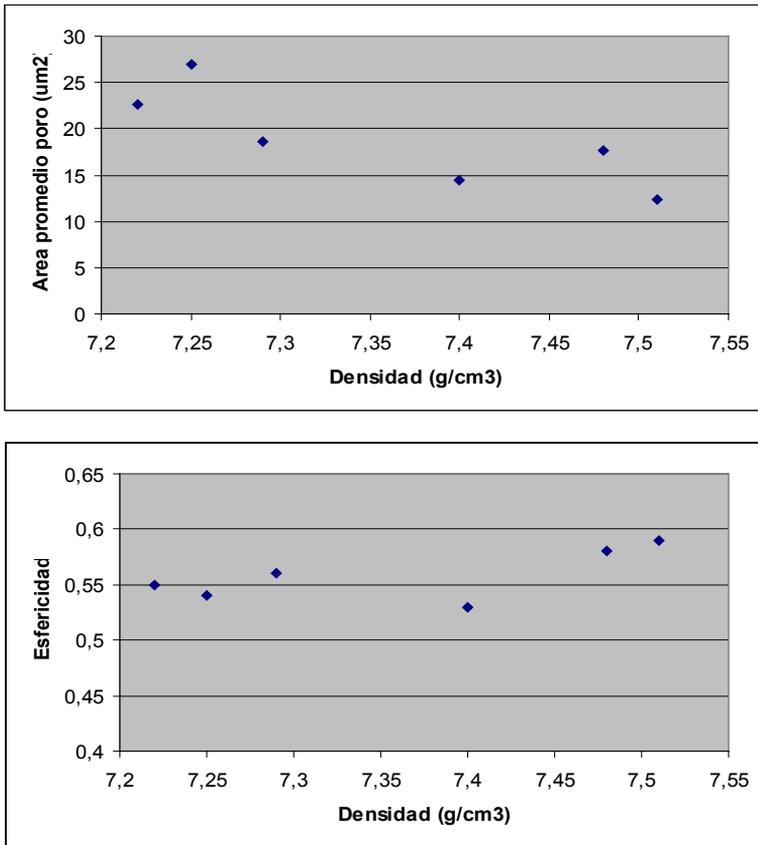
(a) área promedio de poro

(b) esfericidad

### Figura 6

Fotomicrografías de porosidad en mezclas 1, 3, 4, y 6

Debe notarse que los resultados obtenidos son independientes del tipo de lubricante utilizado y de la ruta de procesamiento seguida. Estos dos factores sólo influyen en el nivel de densidad que se puede alcanzar. En otras palabras, con rutas de procesamiento diferentes pero densidades similares es de esperarse un comportamiento mecánico equivalente. La escogencia de una ruta u otra, por tanto, vendrá determinada por factores económicos en la industria.

**Figura 7**

Resultados morfología de la porosidad en función de la densidad

## 6. CONCLUSIONES

Se ha evaluado la tenacidad de fractura de un acero sinterizado en el rango de alta densidad.

Se demuestra que, a pesar de realizar los ensayos en probetas de tamaño menor al sugerido por la norma ASTM E-399, los resultados pueden considerarse válidos al garantizar la presencia de deformación plana.

La tenacidad de fractura aumenta con la densidad del material (mayor límite elástico), contrario al comportamiento de materiales macizos, en los cuales un aumento del límite elástico conduce a una pérdida de tenacidad.

Este resultado obtenido representa una gran ventaja de cara al diseño de componentes con materiales PM, dado que es posible mejorar tanto el límite elástico como la tenacidad de fractura con la densidad.

La densidad alcanzada en una pieza está determinada por la ruta de procesamiento utilizada. A niveles similares de densidad, obtenidos por diferentes rutas, se obtienen morfologías de porosidad comparables, con lo cual la tenacidad de fractura es constante. Estos resultados se complementan con las conclusiones de Peacock y Moon [11] y Sonsino y Ratzi [15], quienes han abordado estudios similares pero por debajo del rango de alta densidad.

De lo anterior se puede concluir que la elección de la ruta de procesamiento debe basarse en el nivel de desempeño esperado (densidad) y en los factores económicos asociados (costo de lubricante, costo de energía empleada, desgaste de maquinaria, etc.).

#### AGRADECIMIENTOS

Uno de los autores (J.B.) desea agradecer el soporte económico recibido de Colciencias y la Universidad del Norte para realizar estudios doctorales.

#### REFERENCIAS

- [1] SALAK, A. y otros. The dependence of mechanical properties of sintered iron compacts upon porosity. *Powder Metallurgy International*, 6 (1974) 128-132.
- [2] FLECK, N.A. y SMITH, R.A. Effect of density on tensile strength, fracture toughness and fatigue crack propagation behaviour of sintered steel. *Powder Metallurgy*, 3 (1981) 121-125.
- [3] HADRBOLETZ, A. y WEISS, B. *International Materials Review*, 42 (1997) 1.
- [4] CHAWLA, N. y DENG, X. Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels. *Materials Science and Engineering A*, 390 (2005) 98-112.
- [5] BEISS, P. y DALGIC, M. Structure property relationships in porous sintered steels. *Materials Chemistry and Physics*, 67 (2001) 37-42.
- [6] INGELSTRÖM, N. y USTIMENKO, V. The influence of porosity and carbon content on the fracture toughness of some sintered steels. *Powder Metallurgy*, 18 (1975) 303-323.
- [7] NAVARA, E. y BENGTESSON, B. Fracture Toughness of P/M Steels. *Int. Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology*, 20 (1984) 33-43.
- [8] KE, Y.B., COTTERELL, B. y BOSWELL, K. Fracture parameters for sintered steels. *Journal of Materials Science*, 23 (1988) 2965-2970.
- [9] PHILIPS, R.A., KING, J.E. y MOON, J.R. Fracture toughness of some high density PM steels. *Powder Metallurgy*, 43 (2000) 43-48.

- [10] PEACOCK, S. y MOON, J.R. Strengths and toughnesses of some PM steels consolidated by rotary forging and sintering. *Powder Metallurgy*, 43 (2000) 49-55.
- [11] STRAFFELINI, G. Impact Fracture Toughness of Porous Iron and High-Strength Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A (2000) 1443-1451.
- [12] Anglada, M. y otros. *Fractura de materiales*. Ediciones UPC, 2002.
- [13] E 399-90. Standard Test Method for Fracture Toughness of Metallic Materials". *American Society for Testing of Materials*, Philadelphia (EEUU), 1990.
- [14] Sonsino, C.M. and Ratzl, R. Warm powder compaction substitutes conventionally double pressed and double sintered synchronizer hubs. *Powder Metallurgy*, 47 (2004) 352-357.