

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN ACERO SINTERIZADO AUTOTEMPLABLEH. D'Armas¹, L. Llanes¹, J. Peñafiel², J. Bas² y M. Anglada¹1.- Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica,
ETSEIB., Universitat Politècnica de Catalunya, 08028 Barcelona

2.- Aplicaciones de Metales Sinterizados, S.A., Sant Vicenç dels Horts, 08620 Barcelona

Resumen. En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico a tracción y la resistencia a fatiga (curvas S-N) de un acero sinterizado autotemplable sometido a diferentes tratamientos de revenido. Se observa que los cambios microestructurales inducidos por los distintos tratamientos evaluados afectan significativamente a la respuesta mecánica del material. Las relaciones determinadas experimentalmente son discutidas y racionalizadas teniendo en cuenta: 1) el hecho que los cuellos entre partículas representan las unidades estructurales de materiales sinterizados; 2) el papel que desempeñan las puntas agudas de los poros existentes en el material como microentallas en estos cuellos; y 3) el efecto de entalla a nivel local en las conexiones entre partículas, en términos tanto de resistencia mecánica, como de ductilidad y sensibilidad a fatiga, y su influencia en el comportamiento mecánico evaluado macroscópicamente para las distintas condiciones.

Abstract. The mechanical behavior of a sinterhardened steel heat-treated under different conditions has been studied in terms of hardness, tensile stress-strain response and high cycle fatigue resistance. Microstructural changes, as a consequence of the distinct post-sinterhardening treatments, are found to affect significantly the above mechanical characteristics. The experimentally determined relationships and material behavior grading have been discussed and rationalized by means of considering: 1) sintering necks as the load bearing units of sintered materials, 2) the role of pore tips as micronotchs on these connecting regions, and 3) notch effects (strength, ductility and fatigue sensitivity) at the local level of sintering necks, as critical parameters in determining the macroscopically evaluated mechanical characteristics.

1. INTRODUCCIÓN

El gran auge que está experimentando en las últimas décadas la aplicación de aceros sinterizados como componentes estructurales requiere la continua mejora de sus propiedades mecánicas. Desde este punto de vista, los materiales utilizados para las sollicitaciones más exigentes corresponden generalmente a aceros tratados térmicamente bajo operaciones convencionales tales como temple y revenido, cementación, etc. En un orden de ideas similar, aleaciones que puedan desarrollar una estructura martensítica sin la necesidad de un temple; es decir, directamente en el horno de sinterización, representan una interesante alternativa de aplicación. Éste es el caso de los llamados aceros sinterizados autotemplables, que aunque conocidos desde hace más de veinte años [1], sólo muy recientemente se han comenzado a producir a nivel industrial. Debido a la aleación relativamente alta que estos aceros contienen, su microestructura es predominantemente martensítica (al menos un 90% en la superficie) ya en condiciones de "sinterizado". Aunque para lograr la autotemplabilidad se requiere la

utilización de hornos equipados con unidades de enfriamiento acelerado, los costes implícitos a la producción de estos materiales, a nivel tanto económico como de control de calidad, mantenimiento, higiene y seguridad, son mucho más bajos que los resultantes del tradicional temple del material en aceite.

Considerando la posible aplicación estructural de los aceros sinterizados autotemplables, el hecho que estos materiales exhiban una microestructura mayoritariamente martensítica en el estado de "sinterizado", conlleva que sus propiedades mecánicas puedan, y deban, ser optimizadas mediante revenidos posteriores, según el tipo de sollicitación mecánica bajo el cual se pretendan utilizar. En este ámbito, la información existente en la literatura [2,3] se puede describir como escasa y en general se limita a la presentación de los resultados obtenidos con un análisis muy superficial de las relaciones existentes entre la microestructura y las propiedades evaluadas en estas aleaciones férreas. Es el objetivo de este estudio investigar y analizar la influencia de diferentes tratamientos térmicos de revenido sobre las características mecánicas (dureza,

parámetros de tracción y resistencia a fatiga) de un acero sinterizado autotemplable de uso comercial.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El acero estudiado se fabricó mezclando polvo atomizado base-hierro semi-aleado (1.8% Ni, 0.5% Mo, 0.2% Mn), grafito en un 0.9% y cera de lubricante (Etilen-bisesteramida). La mezcla se compactó y sinterizó durante 20 minutos a una temperatura de 1120 °C y bajo una atmósfera protectora de 5% H₂ y 95% N₂. Una vez transcurrido este período, el material se enfrió de manera acelerada dentro del mismo horno de sinterización, con el fin de inducir la transformación martensítica de un volumen elevado del material. Este fenómeno es esperado, en concordancia con el carácter autotemplable del material en cuestión. La densidad final bajo estas condiciones de sinterización fue de 7.0 g/cm³. El acero en condiciones de "sinterizado" fue subsecuentemente revenido bajo tres condiciones distintas. Los tratamientos térmicos de revenido así como la notación que será utilizada en esta investigación para denotar los materiales resultantes de cada uno de ellos se indican en la **Tabla I**.

Tabla I. Tratamientos de revenido realizados en el acero estudiado en este trabajo.

Material	Tratamiento
A	1 h, 180 °C
B	1 h, 180 °C después de enfriamiento en N ₂ líquido (subcero)
C	1 h, 250 °C

Con la finalidad de caracterizar microestructuralmente los materiales, se prepararon muestras siguiendo procesos habituales de desbaste y pulido mecánico. Las superficies así obtenidas se examinaron por microscopía óptica (MO) y electrónica de barrido (MEB). Los poros observados son muy irregulares y de tamaño muy heterogéneo, aunque uniformemente distribuidos a lo largo de la superficie observada (**Figura 1**). Mediante un equipo de análisis de imagen, se determinó un valor de un 15% para la porosidad aparente. Las fases presentes como resultado de los tres tratamientos de revenido fueron reveladas mediante ataque químico con Nital. En todos los casos se identificó una mezcla de martensita revenida y austenita retenida (**Figura 2**). Aunque no se llevó a cabo un análisis cuantitativo de estas fases, una observación detallada permitió discernir que la cantidad de austenita retenida era menor en el

material B, como era de esperar, con respecto a la observada para los materiales A y C.

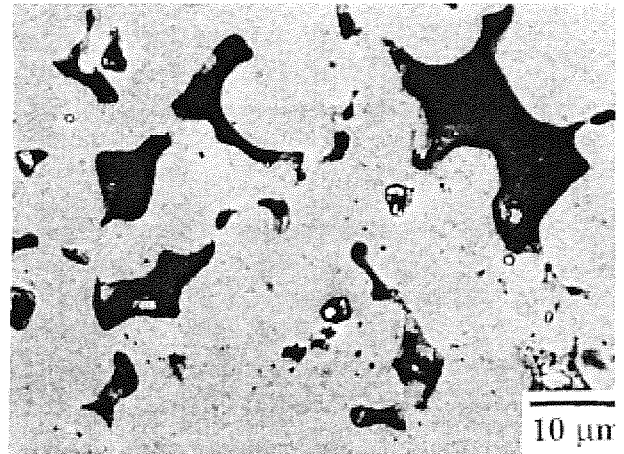


Fig. 1. Poros de tamaño variable y forma irregular en el material estudiado.

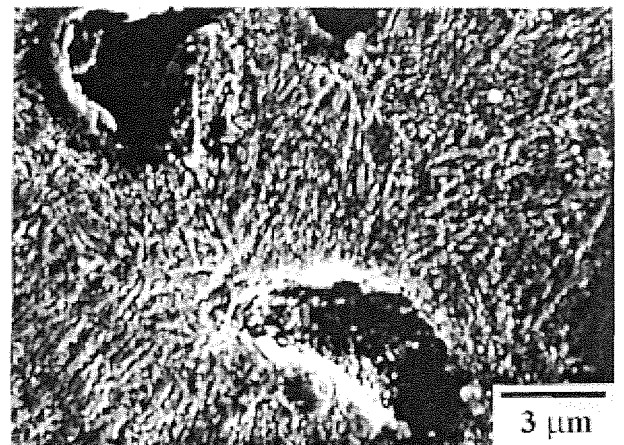


Fig. 2. Aspecto metalográfico del material C.

La caracterización mecánica de los materiales se llevó a cabo en términos de dureza (Rockwell C), parámetros de tracción y resistencia a fatiga. Los ensayos de tracción se efectuaron en una máquina electromecánica, con un extensómetro de 25 mm de apertura inicial, y a una velocidad de desplazamiento de pistón de 1 mm/min. Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina servohidráulica, en flexión por tres puntos, a una frecuencia de 20 Hz y con una razón de carga aplicada, R, de 0.1. Las probetas utilizadas fueron de sección rectangular (55 x 10 x 5 mm). El límite de fatiga se definió como la amplitud de esfuerzo aplicada para la cual no se produjo la rotura después de 2×10^6 ciclos. En la determinación de las curvas de amplitud de esfuerzo impuesta - número de ciclos a rotura (curvas S-N), se utilizaron un mínimo de cuatro probetas por nivel evaluado. Con la finalidad de comprender mejor la interrelación entre aspectos microestructurales y el

comportamiento mecánico de los materiales, las superficies de fractura correspondientes a los ensayos bajo cargas tanto monótonas como cíclicas fueron examinadas finalmente por MEB.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la **Tabla II** se detallan los resultados obtenidos en los ensayos de dureza y tracción (límite elástico, σ_y ; resistencia máxima, σ_u ; y alargamiento a rotura, δ_r) para los tres materiales estudiados. Los valores indicados corresponden a la media de al menos diez ensayos por condición.

Tabla II. Características mecánicas de los materiales estudiados en esta investigación.

Material	Dureza (HRC)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	δ_r (%)
A	41	---	790	0.82
B	46	---	650	0.57
C	36	880	950	1.42

Los altos valores de dureza determinados son consistentes con la idea de utilizar estos aceros autotemplables en aplicaciones que conllevan niveles significativos de contacto o fricción. Las diferencias en dureza apreciadas para los tres materiales son una consecuencia directa de los tratamientos térmicos realizados con posterioridad a su sinterización. Mientras mayor es la temperatura de revenido, menor es la dureza medida. El máximo valor de dureza obtenido para el material B es un fiel reflejo de los cambios mecánicos inducidos por la transformación de austenita retenida en martensita durante el enfriamiento subcero previo al revenido final.

Curvas de tracción genéricas para los materiales estudiados se muestran en la **Figura 3**. La respuesta esfuerzo-deformación para las condiciones A y B no permite definir un límite elástico (al 0.2% de deformación plástica) y se puede describir como frágil. Por su parte, el material C exhibe cierta ductilidad a nivel macroscópico. Los resultados obtenidos sugieren el tratamiento de 250 °C durante 1 hora como óptimo, para el acero sinterizado autotemplable en cuestión, en términos de resistencia mecánica y ductilidad.

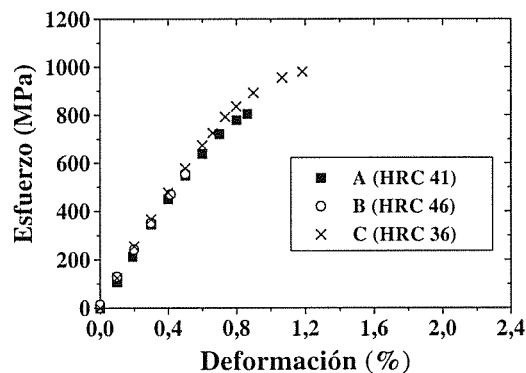


Fig. 3. Ejemplos de curvas esfuerzo-deformación para las distintas condiciones evaluadas.

Las curvas S-N determinadas experimentalmente se muestran en la **Figura 4**. Los valores de límite de fatiga (σ_f) y cociente de fatiga (σ_f/σ_u) obtenidos para los tres materiales se indican en la **Tabla III**.

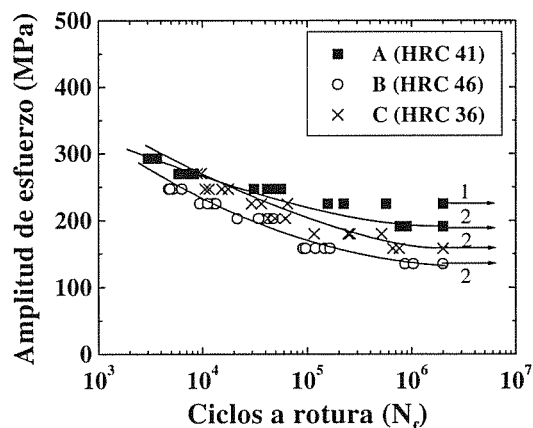


Fig. 4. Curvas S-N para los materiales investigados en este trabajo.

Se observa claramente que el material A exhibe no sólo el mayor límite de fatiga sino también la menor sensibilidad a fatiga. La condición B muestra el más bajo límite de fatiga, mientras la C es la que presenta el menor cociente de fatiga. La pronunciada sensibilidad a fatiga (cocientes de fatiga bajos) del material estudiado en este trabajo concuerda con la determinada previamente en otro acero autotemplable de diferente composición química por otros autores [3], y es similar a la que exhiben, bajo sollicitaciones mecánicas similares, otros aceros sinterizados endurecidos convencionalmente mediante temple y revenido [4,5].

Tabla III. Parámetros de fatiga de los distintos materiales estudiados.

Material	σ_f (MPa)	σ_f / σ_u
A	190	0.24
B	135	0.21
C	160	0.17

El análisis por MEB de las superficies de fractura de las probetas ensayadas permite discernir la rotura de los cuellos como el aspecto fractográfico dominante en todos los casos. Bajo condiciones de aplicación monótona de carga (ensayo de tracción) los tres materiales exhiben microcavidades en estas regiones de conexión entre partículas (**Figura 5a**); independientemente del carácter frágil de la respuesta mecánica a nivel macroscópico. Por otra parte, bajo sollicitaciones cíclicas se observa la existencia de estrías (**Figura 5b**), clara evidencia de la propagación subcrítica de grietas por fatiga ocurrida localmente a lo largo de la sección transversal de los cuellos.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El compactado y posterior sinterización de materiales pulvimetalúrgicos resulta en la formación de poros en lugares intersticiales entre partículas. Así, las propiedades mecánicas de materiales sinterizados están determinadas básicamente por los enlaces entre partículas; es decir, los cuellos [6-8]. Tomando esto en consideración, la respuesta mecánica a nivel macroscópico del material debe venir dada por las características mecánicas a nivel local de estos cuellos.

Por otra parte, en el análisis del comportamiento mecánico de materiales sinterizados se debe tener muy en cuenta que las zonas agudas de los poros desempeñan el papel de microentallas en las regiones de conexión entre partículas. Desde este punto de vista, parece lógico pensar que un factor significativo en la respuesta mecánica de estos materiales sea la sensibilidad a la entalla de los cuellos. Esto es particularmente cierto en los aceros sinterizados autotemplables donde, debido a consideraciones económicas (temperatura baja y tiempo corto de sinterización) y técnicas (prensado difícil por los altos contenidos de carbono implícitos), las densidades finales no son elevadas y la estructura y forma de los poros existentes son bastante irregulares. En el marco de estas ideas, los resultados experimentales descritos en la sección anterior serán discutidos a continuación.

La dureza de un material representa la resistencia de

éste a ser deformado bajo la acción de un indentador, y se puede considerar como una característica mecánica que no es afectada por la presencia de entallas. Más aún, es un parámetro utilizado convencionalmente como una medida indirecta de la resistencia mecánica de aceros macizos templados y revenidos. Así, los valores de dureza indicados en la **Tabla II** se podrían asociar a la resistencia a tracción intrínseca del material en las zonas de conexión, aunque con la salvedad que la correlación resultante no es idéntica, en términos absolutos, a la bien conocida para materiales macizos (por ej. ref. [9]), debido a la influencia de la porosidad en la dureza evaluada a nivel macroscópico.

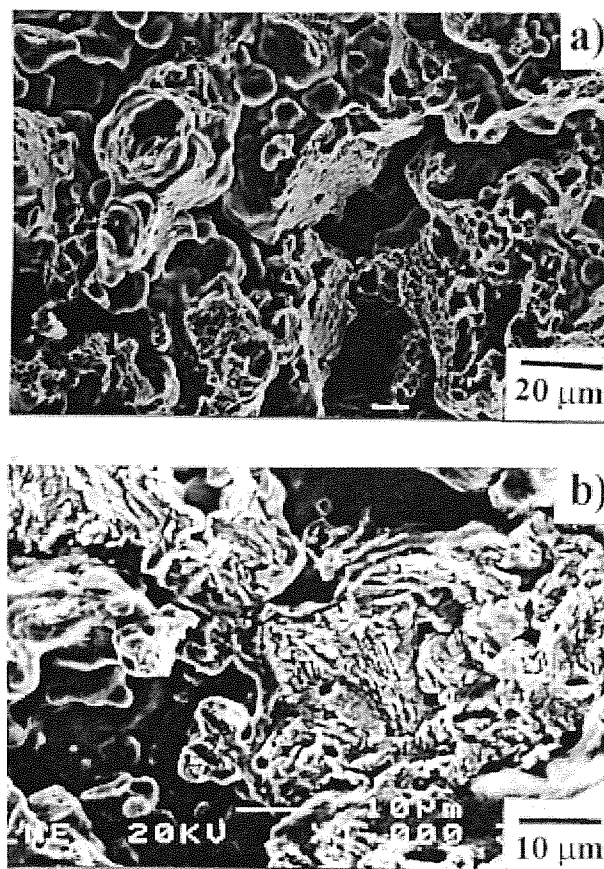


Fig. 5. Características fractográficas de los materiales ensayados **a)** a tracción, y **b)** en fatiga.

De igual manera, se puede suponer que los cuellos entallados (**Figura 6** [10]) exhiben un comportamiento mecánico similar al mostrado por aceros convencionales con entallas. Así, en los aceros de alta resistencia mecánica aquí estudiados, se deben esperar mayores efectos de disminución de resistencia y ductilidad debido a la presencia de entallas a medida que la dureza del material es mayor.

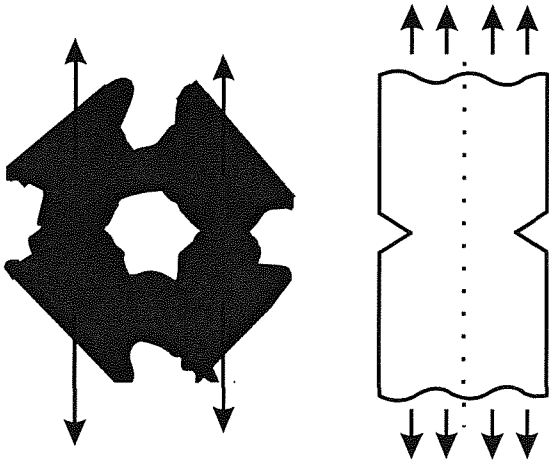


Fig. 6. Modelo de la zona de conexión de partículas (cuello) en un material sinterizado como una muestra entallada sometida a solicitaciones axiales de tracción.

Considerando que las propiedades mecánicas a nivel local en los cuellos son responsables del comportamiento mecánico de materiales sinterizados, estos enfoques "clásicos" sobre efectos de entalla permiten racionalizar de una manera simple la tendencia observada en la respuesta tensil evaluada a nivel macroscópico para los tres materiales: menor resistencia máxima y ductilidad para mayores valores de dureza (**Figura 7**). La observación generalizada de microcavidades en la superficie de rotura de los cuellos para las tres condiciones investigadas sustentan la función de estas zonas como unidades estructurales del material estudiado, independientemente del tratamiento llevado a cabo.

Con respecto a los resultados obtenidos bajo solicitaciones cíclicas, los valores tabulados en las Tablas **II** y **III** indican que no existe una relación directa entre dureza, parámetros de tracción y la resistencia a fatiga para los materiales estudiados. Sin embargo, nuevamente un análisis que considera posibles efectos de entallas será utilizado para explicar este hecho.

Bajo cargas fluctuantes la rotura de un material viene dada por la nucleación y posterior propagación de fisuras. En el régimen de alto número de ciclos la nucleación de fisuras toma tiempos mucho mayores que la propagación de las mismas hasta rotura, mientras que para vidas de bajo número de ciclos generalmente sucede lo contrario. El hecho que los componentes de deformación dominantes en estos regímenes sean el elástico y el plástico respectivamente, se suele utilizar para racionalizar las dos observaciones siguientes: 1) materiales con mayor resistencia mecánica exhiben mayor resistencia a fatiga para amplitudes de esfuerzo aplicado pequeñas; y 2) materiales con mayor ductilidad presentan mejor comportamiento de fatiga para

amplitudes de esfuerzo aplicado grandes. Sin embargo, en presencia de entallas, éstas actúan como concentradores de tensión facilitando la nucleación de fisuras, lo cual resulta en una disminución en la resistencia a fatiga mientras más elevada sea la resistencia mecánica intrínseca del material. Así, para el caso particular de la resistencia a fatiga en el régimen de alto número de ciclos de aceros sinterizados, un incremento de la dureza en las zonas de conexión entre partículas debería inducir, por una parte, una mayor resistencia intrínseca a fatiga del cuello (no entallado); pero por la otra, un incremento de la sensibilidad a la entalla en fatiga de éste (entallado localmente).

Los resultados presentados en la **Tabla III** y la **Figura 4** simplemente reflejan el compromiso arriba descrito e indican el material A como la mejor alternativa desde el punto de vista de resistencia a fatiga, independientemente del régimen en cuestión. Aunque las consideraciones para el análisis propuesto son difíciles

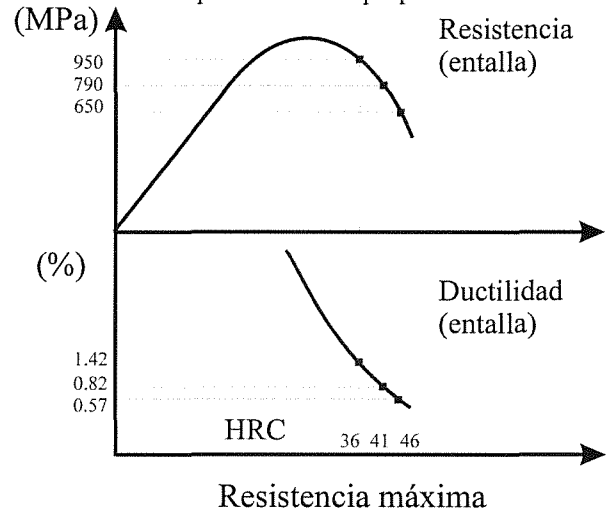


Fig. 7. Efectos debido a la presencia de entallas (irregularidades de los poros) en las propiedades mecánicas de los cuellos de los materiales sinterizados que se estudian en este trabajo.

de validar experimentalmente, una observación detallada del comportamiento de fatiga relativo de los materiales estudiados a medida que se va del régimen de alto al de bajo número de ciclos a rotura aporta bases adicionales. Así, considerando que al someter el material a amplitudes de esfuerzo mayores, los niveles de ductilidad a nivel local comienzan también a ser cada vez más importantes, el comportamiento de fatiga relativo de los materiales debería pasar a ser regido única y exclusivamente por el fenómeno de propagación de fisuras. Desde este punto de vista, el material entallado con mayor ductilidad, referencia de lo cual sería el comportamiento mostrado durante los ensayos de tracción, debería presentar la mejor resistencia a fatiga. Esto es claramente apreciado en la tendencia a

cruzarse que exhiben las curvas S-N para las condiciones A y C, sustentando experimentalmente, aunque de una manera indirecta, el enfoque aplicado.

5. CONCLUSIONES

El estudio de las características mecánicas de un acero sinterizado autotemplable sometido a diferentes tratamientos térmicos con posterioridad a la sinterización permite extraer las siguientes conclusiones:

1) La dureza, los parámetros de tracción y la resistencia a fatiga del material se ven fuertemente afectados por los diferentes tratamientos de revenido investigados. Para el material y condiciones aquí evaluadas, los tratamientos óptimos son de 1 hora durante 250 °C bajo sollicitaciones de estáticas de tracción y de 1 hora durante 180 °C bajo la aplicación de cargas cíclicas.

2) La influencia de distintos tratamientos de revenido sobre las propiedades mecánicas del material estudiado, tanto bajo cargas monótonas como cíclicas, puede ser racionalizada en términos de conceptos clásicos de efectos debidos a la presencia de entallas en materiales de alta resistencia mecánica y poca ductilidad, pero aplicados al nivel local de los cuellos, las verdaderas unidades estructurales en materiales sinterizados.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido financiado por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) en el marco del proyecto PETRI 95-0030-OP. Uno de los autores (H.D.) agradece a la Universidad Simón Bolívar (Venezuela) por su apoyo institucional. Igualmente, los autores desean expresar su agradecimiento a M. Marsal, del Servicio de Microscopía Electrónica del Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica (UPC) por su asistencia técnica en la caracterización microestructural y fractográfica.

7. REFERENCIAS

[1] Lindskog, P. y Thronblad, O., "Ways to improve the strength of sintered components made from partially pre-alloyed steel powders" En: P/M SEMP, 98-103 (1978).

[2] Stedman, S., Debortilli, S., Hudson, C. y Nash, M., "Relationship between microstructure and properties of sinter hardened PM materials", En: Proc. 1998 Powder

Metallurgy World Congress & Exhibition, EPMA, 613-618 (1998).

[3] Lang, K.-H., Neubauer, A., Vöhringer, O. y Löhe, D., "Cyclic properties of differently heat treated PM-steels". En *Proc. 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, EPMA*, 231-236 (1998).

[4] Sonsino, C.M. y Schlieper, G., "Improvement of mechanical properties of diffusion- and prealloyed sintered steels by heat treatments", *Powder Metall.Int.* 24, 339-345 (1992).

[5] D'Armas, H., Llanes, L., Altaba, B., Bas, J. y Anglada, M., "Fatigue life behavior of a sintered steel: heat treatment effects". En: *Proc. 7th. Int. Fatigue Conf., EMAS*, en prensa (1999).

[6] Fleck, N.A. y Smith, R.A., "The use of simple models to estimate effect of density on fracture behaviour of sintered steels", *Powder Metall.* 3, 126-130 (1981).

[7] Ledoux, L., Prioul, C. y François, D., "A stereological approach of the quasi-static mechanical behaviour of sintered iron". En: *Powders and Grains, Balkema*, 143-148 (1988).

[8] Hadrboletz, A. y Weiss, B., "Fatigue behaviour of iron based sintered material: a review", *Int. Mater. Rev.* 42, 1-44 (1997).

[9] Dieter, G., "Mechanical metallurgy", SI Metric Edition, McGraw Hill, Reino Unido, (1988).

[10] Navara, E. y Bengston, B., "Fracture toughness of P/M steels", *Int. J. Powder Metall. Powder Technol.* 20, 33-43 (1984).