

# Sinterabilidad y propiedades del acero pulvimetalúrgico HCx diluido con aceros inoxidable

E. Gordo\*, N. Khattab\* y J.M. Torralba\*

## Resumen

El acero pulvimetalúrgico HCx ha sido desarrollado para combinar la resistencia a corrosión de los aceros inoxidable con la resistencia al desgaste de los aceros de herramientas. Aparece así como un material adecuado para componentes sometidos a desgaste en un ambiente agresivo, como los asientos de válvulas en motores de automóviles. En este trabajo se estudia la dilución del HCx con dos aceros inoxidable, uno ferrítico (430) y otro austenítico (316L), en porcentajes hasta 15 % en masa, para mejorar las condiciones de procesado, especialmente la compresibilidad. La sinterabilidad de los materiales diluidos se ha estudiado mediante sinterización en vacío, a temperaturas entre 1.200 °C y 1.260 °C, y se han determinado las propiedades de los materiales sinterizados. Los resultados se discuten en relación a la evolución microestructural.

## Palabras clave

Pulvimetalurgia. Dilución. Aceros inoxidable. Desgaste. Carburos.

## Sinterability and properties of HCx PM steel diluted with stainless steels

## Abstract

HCx is a powder metallurgy steel developed to combine the corrosion resistance of stainless steel with the wear resistance of tool steels. Therefore, HCx appears to be a suitable material for wear applications in aggressive environments, as valve seat inserts in automotive engines. In this work dilution of HCx with two stainless steels, one ferritic (430) and another austenitic (316L), in percentages up to 15 % in mass, has been studied to improve process conditions, especially compressibility. The sinterability of diluted materials was studied through vacuum sintering at temperatures from 1.200 °C to 1.260 °C. Finally, properties of sintered materials were determined. The results are discussed in relation to the microstructure evolution.

## Keywords

Powder metallurgy. Dilution. Stainless steels. Wear. Carbides.

## 1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, se ha desarrollado un nuevo tipo de acero pulvimetalúrgico de alta aleación, denominado por el fabricante HCx, en cuya composición se encuentran elevados porcentajes de cromo y carbono, junto con elementos de aleación carburos. Su microestructura después de la sinterización consiste en una matriz inoxidable ferrítica con carburos dispersos de cromo y otros elementos. Este acero combina de manera satisfactoria propiedades de resistencia al desgaste, por la presencia de carburos, con resistencia a corrosión, por el porcentaje de cromo que permanece en la matriz<sup>[1]</sup>. Por lo tanto, parece un material adecuado para aplicaciones que requieran ambos grupos de pro-

piedades<sup>[2]</sup>. Sin embargo, su baja compresibilidad y su elevado precio pueden limitar su utilización.

Algunos autores<sup>[3-5]</sup> han realizado investigaciones en las que polvos de acero de baja compresibilidad son mezclados o "diluidos" con otros de mayor compresibilidad, buscando mejorar esta propiedad junto con propiedades mecánicas y de desgaste adecuadas. La dilución tiene la ventaja, además, de abaratar el coste del material final.

El presente trabajo muestra algunos resultados de un estudio realizado mediante dilución del acero HCx con cantidades variables de dos tipos de acero inoxidable, uno ferrítico (430), por su compatibilidad con la matriz del HCx, y otro austenítico (316L). El interés de la dilución con 316L radica en el estudio posterior de la influencia de la

(\*) Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, E-28911 Leganés - elena.gordo@uc3m.es.

austenita sobre las propiedades de desgaste, ya que su efecto no está claramente definido<sup>[6]</sup>.

## 2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados en el presente estudio han sido: como material base, polvo de HCx, proporcionado por Powdrex; (Höganäs Great Britain Ltd.); como materiales de dilución, polvo de aceros inoxidable 316L y 430 LHC, proporcionados por Coldstream (Höganäs Belgium S.A.). La composición de estos polvos, según datos de los fabricantes, se recogen en la tabla I.

Las mezclas estudiadas fueron HCx + 5 %, 10 %, 15 % 430 y HCx + 5 %, 10 %, 15 % 316 L (porcentajes en masa). Las mezclas se prepararon en una Tórbula a una velocidad de 100 rpm, durante 60 min, y la compresibilidad de las mismas fue evaluada a partir de los valores de densidad en verde de cada mezcla. Para estudiar las condiciones de sinterización de los distintos materiales se fabricaron, mediante compactación uniaxial a 700 MPa de presión, probetas rectangulares con las dimensiones normalizadas para ensayos de flexión. Los compactos fueron sinterizados en vacío a cuatro temperaturas diferentes: 1.200 °C, 1.220 °C, 1.240 °C, y 1.260 °C, fijando en todos los casos el tiempo de sinterización en 30 min. Las propiedades estudiadas después de la sinterización fueron: densidad, variación dimensional, dureza, resistencia a flexión y comportamiento a desgaste. La densidad se determinó mediante un método basado en el principio de Arquímedes, la dureza se midió en la escala Rockwell A; la resistencia a flexión (TRS) se evaluó mediante ensayos de flexión en tres puntos; los ensayos de desgaste se realizaron en un equipo *pin-on-disc*, utilizando como *pin* el material a ensayar, y los discos extraídos de las cabezas de válvulas comerciales (acero de 73HRA). Las condiciones de los ensayos de desgaste fueron 10N de carga, velocidad de giro 480 rpm, velocidad de deslizamiento 0,5 m/s, y distancia de deslizamiento

5.000 m. Se utilizaron además dos temperaturas de ensayo: temperatura ambiente y 400 °C, y se repitieron tres veces para cada material. El estudio se completó mediante análisis microestructural por microscopía óptica y electrónica de barrido.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al igual que en estudios previos realizados con otros porcentajes de dilución<sup>[7]</sup>, en este caso, la compresibilidad de los materiales diluidos, como se puede ver en la figura 1, mejora con respecto al material base, lo que supone la base de partida para el estudio de sinterabilidad que se expone a continuación.

En la figura 2 se muestran los valores de densidad relativa alcanzados por los materiales en función de la temperatura de sinterización. El material base alcanza una densidad elevada (97 % de la teórica) cuando se sinteriza a 1.260 °C, pero ya a 1.240 °C se obtiene el 85 % de la teórica. Todos los materiales alcanzan los mismos valores de densidad que el material base a 1.260 °C. Se observa además que los valores de densidad de los materiales con 10 % y 15 % de dilución son constantes

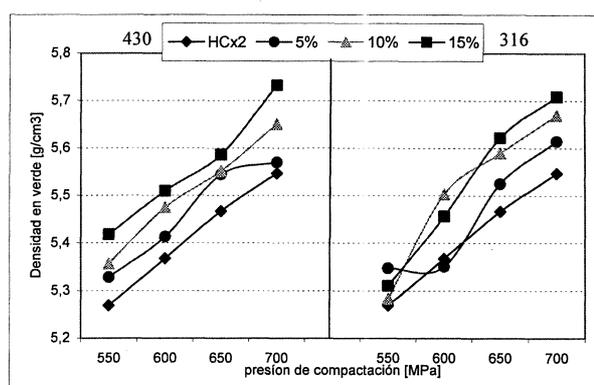


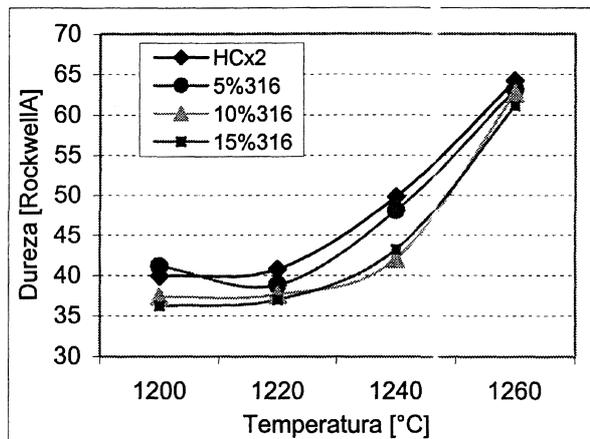
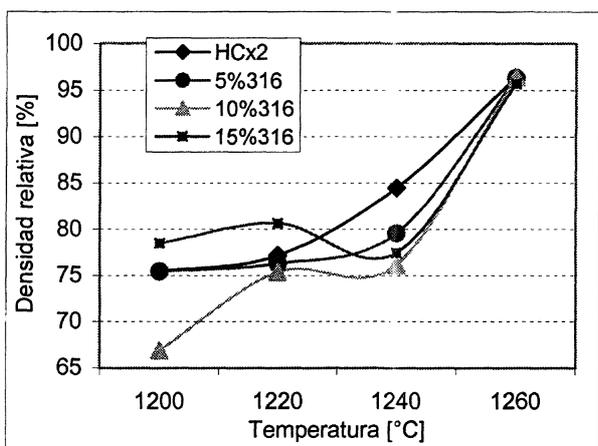
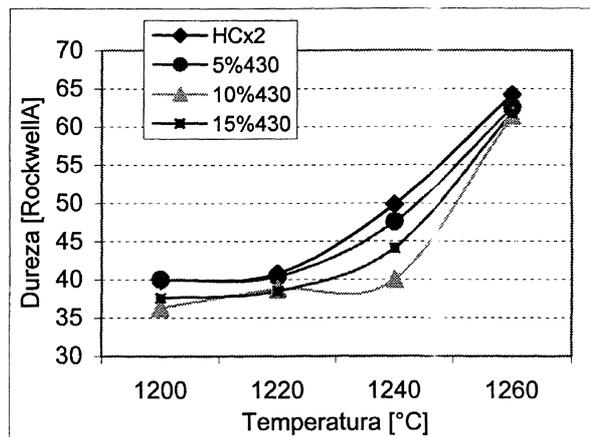
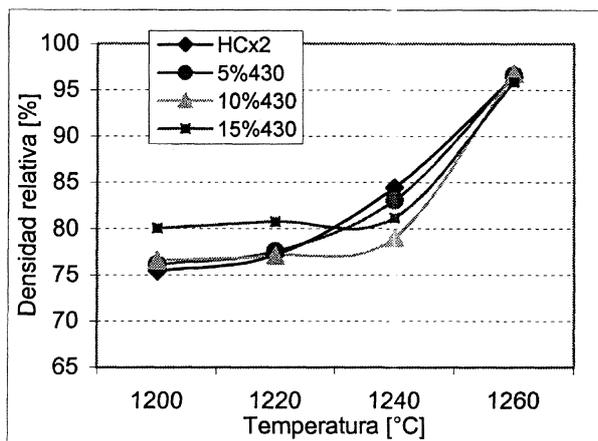
Figura 1. Compresibilidad del HCx y los materiales diluidos.

Figure 1. Compressibility curves of the HCx and diluted materials.

Tabla I. Composición de los materiales empleados

Table I. Composition of the used materials

	Fe	C	Cr	W	Mo	V	Si	Ni	Cu	Mn
HCx	Resto	1,6	22,6	2,7	2,8	1,9	1,4	-	-	-
316L	Resto	0,021	16,1	-	2,24	-	0,87	13,55	0,02	-
430LHC	Resto	0,018	16,85	-	-	-	1,15	-	-	0,18



**Figura 2.** Densidad relativa de los materiales diluidos con 430 (arriba) y 316 (abajo) en función de la temperatura de la sinterización.

**Figura 3.** Dureza (HRA) de los materiales diluidos con 430 (arriba) y 316 (abajo) en función de la temperatura de la sinterización.

Figure 2. Relative density of materials diluted with 430 (up) and 316 (down) vs. sintering temperatures.

Figure 3. Hardness (HRA) of materials diluted with 430 (up) and 316 (down) vs. sintering temperatures.

entre 1.200 °C y 1.240 °C, lo que indica que estas mezclas empiezan a sinterizar a temperaturas mayores que 1.240 °C. Sin embargo, en el material base y en el diluido con 5 % se observa aumento de densidad desde 1.220 °C.

En los materiales pulvimetalúrgicos, los valores de densidad están íntimamente relacionados con sus propiedades. Así, se puede observar en la figura 3 que los valores de dureza máximos (65 HRA) se obtienen para el material base sinterizado a 1.260 °C, que coincide con los valores máximos de densidad. Conviene hacer notar que, aunque los valores de densidad son prácticamente independientes de la temperatura de sinterización entre 1.200 °C y 1.240 °C para las mezclas de 10 % y 15 %, los valores de dureza presentan una cierta tendencia a aumentar con la temperatura de sinterización, probablemente debida a la activación de procesos de difusión, más que a una disminución en la porosidad. Todos los materiales alcanzan, a

1.260 °C, casi la misma dureza que el material base.

Los resultados de TRS se presentan en la figura 4, donde se observa que todos los materiales alcanzan valores similares cuando se sinterizan a 1.260 °C, excepto en el caso del acero diluido con un 15 % de 430, que presenta elevada porosidad superficial (Fig. 5c). Hay que tener en cuenta que los aceros inoxidable 430 y 316 L presentan menor valor de TRS que el acero base (excepto cuando se utilizan técnicas de consolidación especiales)<sup>[8]</sup>, por lo que sería de esperar que esta propiedad disminuyera en los materiales diluidos. Sin embargo, en el caso de las mezclas con 316 L todos los materiales alcanzan valores de TRS mayores que el material base, mientras que en el caso de dilución con 430 sólo el de 15 % de adición presenta valores más bajos que el material base. Una posible explicación al comportamiento de los primeros es considerar que presentan una matriz de acero inoxidable dúplex, cuyas propiedades mecánicas son

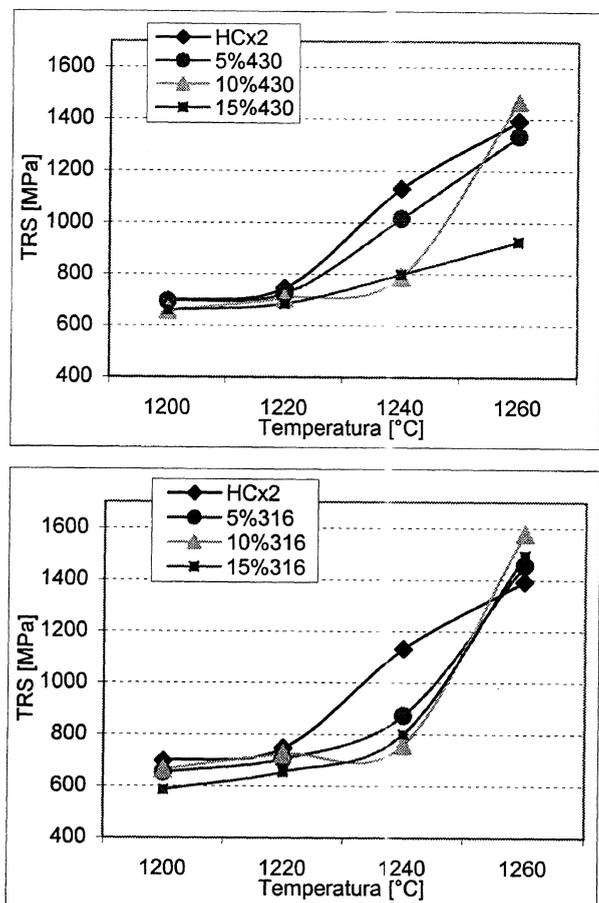


Figura 4. Resistencia a flexión (TRS) de los materiales diluidos con 430 (arriba) y 316L (abajo) en función de la temperatura de la sinterización.

Figure 4. TRS of materials diluted with 430 (up) and 316L (down) vs. sintering temperatures.

superiores a las de los aceros inoxidables ferríticos y austeníticos por separado<sup>[9]</sup>.

En la figura 5 se muestran microestructuras tomadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), con electrones retrodispersados (BSE), de varios materiales sinterizados a 1.260 °C. La figura 5a corresponde al material base HCx sin adiciones. La fase de contraste brillante corresponde a carburos complejos de cromo, molibdeno, wolframio y vanadio, en los que también se encuentra disuelto hierro. La fase de contraste más oscuro muestra también, carburos complejos pero con mayor contenido en vanadio. Esta fase oscura se encuentra siempre en el núcleo de carburos situados en borde de grano, en los materiales sinterizados a mayor temperatura, debido probablemente a un fenómeno de microsegregación en la solidificación de una fase líquida. La composición de la matriz, evaluada mediante dispersión de energía (EDX) mantiene un porcentaje en cromo del 14 %, que asegura su carácter inoxidable. Se puede apreciar,

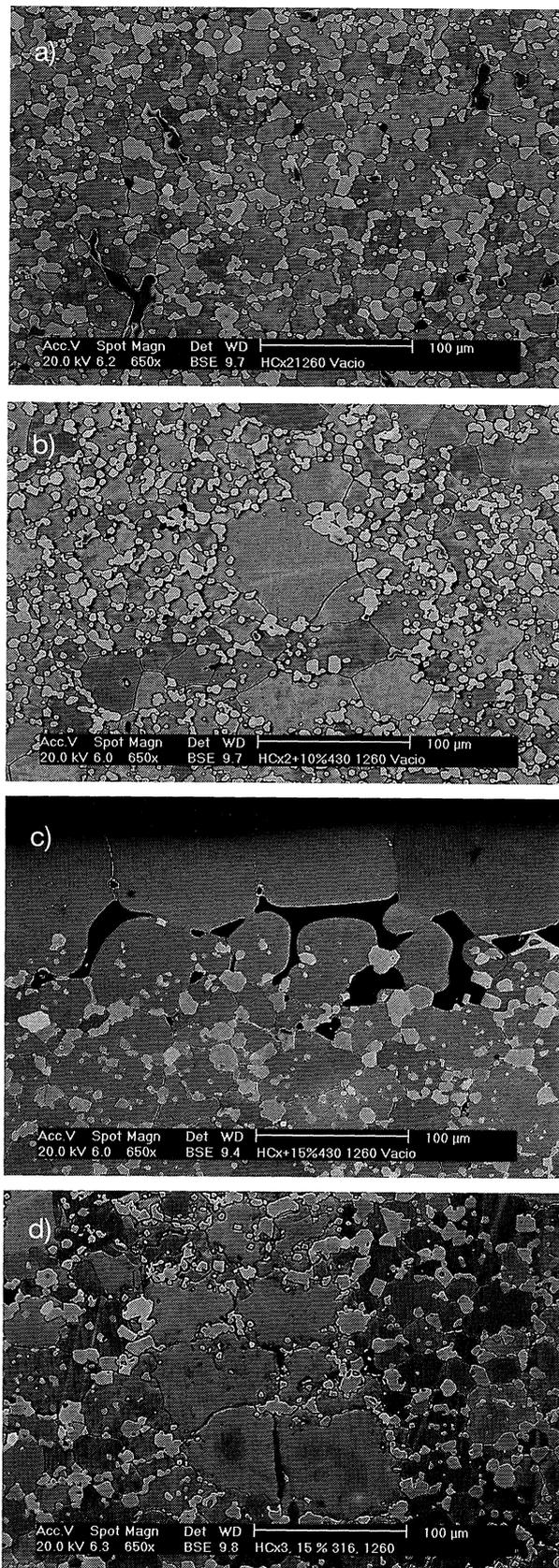


Figura 5. Microestructuras (BSE) de varios materiales sinterizados a 1.260 °C: a) HCx, b) HCx + 10 % 430, c) superficie del HCx + 15 % 430, d) HCx + 15 % 316 L.

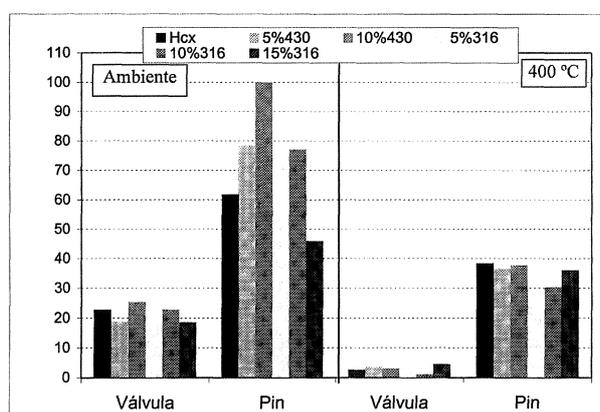
Figure 5. Microstructures (BSE) of several materials sintered at 1,260 °C: a) HCx, b) HCx + 10 % 430, c) HCx + 15 % 430 surface, d) HCx + 15 % 316 L.

además, en la misma figura 5a, que los carburos se encuentran homogéneamente distribuidos, si bien su tamaño es mayor que a menores temperaturas de sinterización. En la figura 5b, correspondiente a la adición de 10 % 430, se pueden distinguir claramente áreas libres de carburos, donde inicialmente se encontrarían las partículas de 430 al igual que ocurre en los materiales con adición de 316 L (Fig. 4d).

Todos los materiales sinterizados a 1.260 °C fueron ensayados a desgaste, excepto el diluido con 15 % 430, cuya superficie presentaba una elevada porosidad que podía afectar a los resultados de desgaste. En la figura 6 se presenta la pérdida en masa de todos los materiales ensayados a las dos temperaturas, en porcentaje con respecto al *pin* que mayor pérdida en masa ha sufrido, teniendo en cuenta todos los ensayos.

De la figura 6 se deduce que:

- A temperatura ambiente el material que mayor pérdida en masa ha sufrido es el HCx + 10 % 430. Se observa, además, una tendencia creciente en la pérdida en masa al aumentar el porcentaje de dilución con 430. Sin embargo, para los materiales diluidos con 316 L se observa para bajos porcentajes de dilución mayor pérdida en masa que el material base, disminuyendo ésta en el material con el mayor contenido (15 %) de 316 L. Este material es el que menor pérdida en masa presenta de todos los ensayados a temperatura ambiente, lo que representa un resultado muy prometedor teniendo en cuenta el objetivo de dilución. Se observa, también, que los materiales con 5 % 430, 5 % y 10 % 316 L presentan valores de pérdida en masa muy similares entre sí.



**Figura 6.** Pérdida en masa (en gramos) de los materiales ensayados a temperatura ambiente y a 400 °C.

Figure 6. Mass (in grams) loss of materials tested at room temperature and 400 °C.

- Todos los materiales (tanto el *pin* como el de la válvula) ensayados a 400 °C presentan menor pérdida en masa que los ensayados a temperatura ambiente, y los resultados son más uniformes a esta temperatura.

Para tratar de explicar estos resultados se observaron las superficies de desgaste mediante MEB, deduciéndose que, a temperatura ambiente se observa mayor cantidad de residuo oxidado adherido en la superficie de desgaste del *pin*, lo que lleva a pensar que el mecanismo de desgaste ha sido inicialmente de abrasión, seguido de adhesión de residuos, mientras que a 400 °C el mecanismo de abrasión es menos importante. En la superficie desgastada de las válvulas se observa mayor adhesión de residuos oxidados después de los ensayos a 400 °C, lo que puede explicar la menor pérdida en masa que presentan las válvulas a esta temperatura.

#### 4. CONCLUSIONES

- La compresibilidad del polvo de acero HCx se puede mejorar mediante dilución, o mezcla, con aceros inoxidables pulvimetalúrgicos convencionales como el 316 L y el 430.
- La dilución de HCx con 316 L, 5 % y 10 % de 430 permite obtener materiales sinterizados en vacío con valores de densidad, dureza y resistencia a flexión iguales o superiores a los del acero base.
- Los resultados de desgaste son muy similares en todos los materiales estudiados en las mismas condiciones. En todos los casos se produce mayor pérdida en masa a temperatura ambiente que a 400 °C.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a Powdrex Ltd. el suministro del material empleado, y al Ministerio de Ciencia y Tecnología español por la financiación a través del proyecto COO1998AX149.

#### REFERENCIAS

- [1] HCx: a corrosion and wear resistant stainless steel, POWDREX LTD. TECHNICAL DATASHEET, Powdrex Ltd., England, 1996.
- [2] I. WHITAKER, P. MAULIK y C. G. PURNELL, *Proc. PM World Congress*, Granada, Spain, 1998, Vol. 4, pp. 259-264.

- [3] G.L. ZHOU y J. V. WOOD, *Powder Metall.* 38 3 (1995) 230-236.
- [4] P. MARSH, J.V.WOOD y J.R. MOON, *Powder Metall.* 44 3 (2001) 205-210
- [5] P. KJELDSTEEN, *Proc. PM World Congress*, Granada, Spain, 1998, Vol. 4, pp. 265-270.
- [6] K.H. ZUM GAHR, *Wear* 64 (1980)175-194.
- [7] E. GORDO, N. H. KHATTAB y E. M. RUIZ-NAVAS, *Mater. Res.* 6 4 (2003)
- [8] J.M. MONTES, J.A. RODRÍGUEZ y E.J. HERRERA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 99-106.
- [9] R.N. GUNN, *Duplex Stainless Steel. Microstructure, properties and applications*, Abington publishing, 1997.