

Efecto del conteo de nódulos en la resistencia al desgaste por abrasión de los hierros dúctiles austemperados.

C. J. Diez Cicero, G. R. Fernández López, U. Ordóñez Hernández, C. R. Figueroa Hernández, F. Mondelo

Recibido el 10 de enero de 2009; aceptado el 14 de abril de 2009

Resumen

Entre los materiales metálicos de mayor demanda, la producción de hierro con grafito nodular, ocupa en la actualidad, uno de los lugares más importantes entre los hierros fundidos de alta resistencia, y con la introducción del tratamiento térmico de austemperado, aplicado a estas fundiciones, se da lugar a una nueva familia de materiales, caracterizados por su alta resistencia mecánica y elevada tenacidad, que mantienen la economía y facilidad de producción de las fundiciones nodulares.

Este trabajo, hace una valoración del comportamiento de hierros nodulares, con diferentes conteos de nódulos, a los que les fue aplicado el tratamiento de austemperado, y posteriormente se les sometió a ensayos de desgaste abrasivo.

Con los resultados obtenidos, se hace un análisis de la influencia del conteo de nódulos en dichas propiedades, así como también, de la interrelación del conteo de nódulos, con las variables de tratamiento térmico utilizadas en las muestras ensayadas.

Palabras claves: hierro nodular, conteo de nódulos, austemperado.

Effect of nodules count in the abrasive wear of austempered ductile irons.

Abstract

Between the metallic materials of greater demand, the iron production with nodular graphite occupies at the present time, one of the most important places between fused irons of high resistance, and with the introduction of the austemperado heat treatment of, applied to these smeltings, gives rise to a new family of materials, characterized by its high resistance mechanical and elevated tenacity, that the economy and facility of production of the smeltings maintain nodulares. This work, makes a valuation of the iron behavior nodulares, with different counts from nodules, to which the austemperado was applied treatment to them of, and later it was put under to them tests of abrasive wearing down. Of the obtained results, an analysis takes control of the influence of the count of nodules in these properties, as well as, of the interrelation of the count of nodules, with the used variables of heat treatment in the tried samples.

Key words: iron to nodular, count of nodules

1. Introducción.

El hierro dúctil austemperado ofrece al ingeniero diseñador una resistencia a la abrasión que es superior y que le permite competir con otros materiales en un amplio rango de durezas. Generalmente, el hierro dúctil austemperado se desgastará menos que otros materiales competitivos en un nivel de dureza dado. Por ejemplo, en la fig. 1 se puede apreciar como una pieza de ADI con una dureza entre 30 y 40 Rc tendrá un desgaste comparable al de una pieza de acero templado y revenido con una dureza próxima a los 60 Rc en un mismo medio abrasivo. Esta propiedad mostrada en las figs. 1 y 2, permite al diseñador seleccionar la combinación de resistencia, ductilidad y resistencia a la abrasión que proporciona a la pieza el mejor desempeño para una aplicación en particular.

La superior resistencia a la abrasión, y la baja sensibilidad de la resistencia a la abrasión para la dureza medida, están relacionadas con la transformación inducida por las tensiones en la austenita estabilizada, la cual ocurre cuando la superficie de una pieza de hierro nodular austemperado está expuesta a una deformación. El resultado de esta transformación es un incremento significativo de la dureza superficial, y este incremento de la dureza superficial y su relación con la microestructura, son las responsables de la reducida sensibilidad en la resistencia a la abrasión en la dureza exhibida (1, 9, 10, 11, 12). Cuando la dureza es reducida en el hierro nodular austemperado por la temperatura de austemperado, la cantidad de austenita retenida se incrementa (1, 2, 4, 5), este incremento en el contenido de austenita incrementa el incremento de la dureza, que toma lugar por la acción de la deformación superficial. Como resultado, una pieza de hierro dúctil austemperado que exhibe una dureza más baja que la de otros materiales competitivos despliega una resistencia a la abrasión mayor que la prevista para la dureza medida. Esta probado que el mecanismo de abrasión entraña suficiente deformación para transformar las capas superficiales en martensita.

A través de las variaciones de las condiciones de austemperado, el diseñador puede optimizar la resistencia a la abrasión y las propiedades mecánicas referidas en una pieza de hierro nodular austemperado. Para obtener una alta tenacidad y buena resistencia a la abrasión, una temperatura en el rango de (350 – 370 °C) debe ser usada. Cuando una combinación de alta resistencia y resistencia a la abrasión son requeridas, una temperatura de austemperado de 260 °C producirá los mejores resultados.

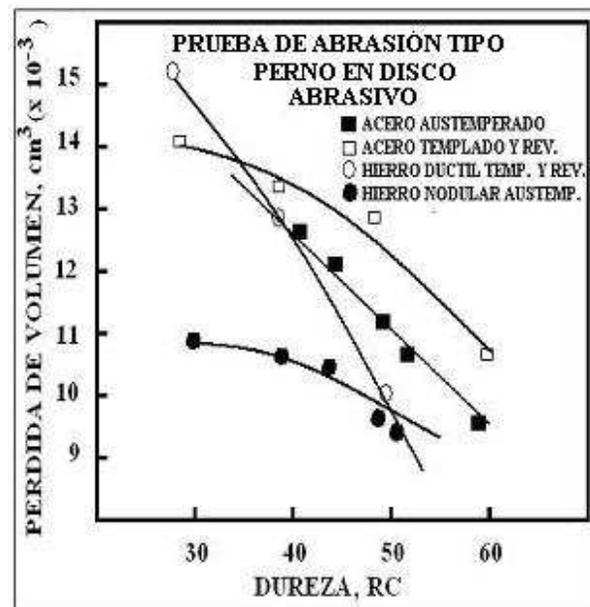


Figura 1. Comparación de los resultados obtenidos en la prueba de desgaste por abrasión (tipo perno sobre disco abrasivo) del hierro dúctil austemperado, con la de otros materiales resistentes a la abrasión.

Es conocido que el contenido de austenita retenida es el responsable del comportamiento mecánico de la aleación, de su alta resistencia a la fatiga y en cierta medida del endurecimiento por la acción del trabajo mecánico, lo que favorece su alta resistencia al desgaste.

Aunque es conocida la notable influencia de la austenita en la resistencia al desgaste de los hierros nodulares austemperados, es importante destacar la influencia que tiene el conteo de nódulos y, el tamaño y la forma de los nódulos de grafito, en las transformaciones estructurales que

favorecen la transformación de la austenita en martensita. Este es un aspecto que no ha sido reflejado en la literatura consultada.

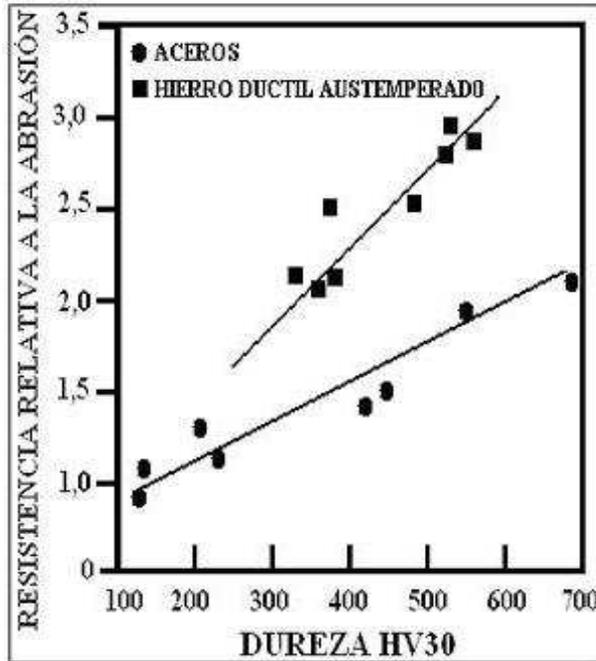


Figura 2. Comparación de la resistencia relativa a la abrasión del hierro nodular austemperado con la de diferentes aceros resistentes a la abrasión

El presente trabajo tiene como objetivo principal caracterizar el comportamiento ante condiciones de abrasión de una aleación de hierro nodular con diferentes conteos de nódulos, sometidos a diferentes regímenes de austemperado con el fin de determinar la influencia del conteo de nódulos en la resistencia al desgaste por abrasión de estos materiales.

2. Parte experimental.

Para el análisis microestructural, fueron tomadas las muestras de los extremos de las barras obtenidas de los bloques en Y seccionados. Figura 3.

Las probetas fueron construidas a partir de bloques en Y, como el indicado en la figura. 3.

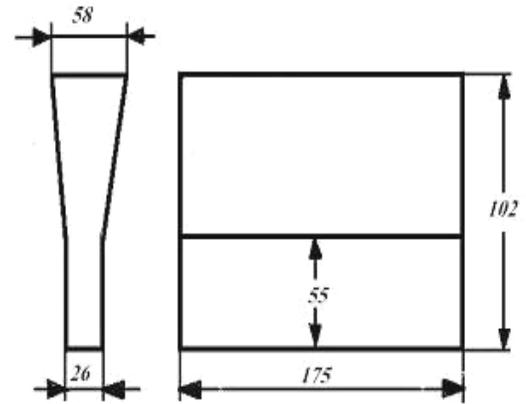


Figura 3. Bloque en Y (dimensiones en mm).

Se utilizaron probetas planas en forma de planchuelas con las dimensiones indicadas en la figura 4.

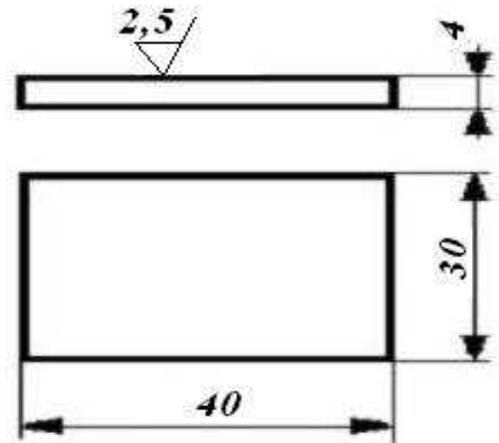


Figura 4. Probeta para ensayo de desgaste abrasivo.

Para el tratamiento térmico de austenización se empleó un horno de cámara, colocándose en su interior una cubeta con NaCl (sal común), donde fueron sumergidas las probetas para evitar su decarburación. En una primera etapa se reguló la temperatura del horno a 925 °C y en una segunda etapa a 850 °C, las probetas fueron mantenidas en el baño de sales por espacio de una hora, seguido de un enfriamiento rápido hasta la temperatura de mantenimiento isotérmico (T_{temp}) que se varió en dos niveles: 310 y 370 °C. El tiempo de mantenimiento isotérmico fue variado entre 30 y 60 minutos, siendo posteriormente enfriadas en agua las probetas. Los tratamientos aplicados aparecen en la tabla N° 2.

Las probetas fueron examinadas con microscopía óptica con el objeto de determinar su microestructura. Para determinar el contenido de austenita retenida fue empleado un programa creado en el Departamento de Ciencia de los Materiales y Metalurgia de la Universidad de Cambridge, consistente en un modelo de red neural dentro de una estructura Bayesian que fue creado usando datos publicados para modelar el contenido de austenita retenida. El modelo permite que la cantidad de austenita retenida sea estimada como una función de la composición química y de los parámetros de tratamiento térmico.

El ensayo fue realizado en una instalación tipo Fargo como la mostrada en el esquema de la figura 4.

La muestra fue comprimida contra el rodillo de goma, bajo la acción de una carga en la zona de fricción de $44,1 \pm 0,25$ N, con una frecuencia de rotación del rodillo de $n = 60 \pm 2 \text{ min}^{-1}$ y un período de tiempo 3600 vueltas en 60 minutos. Se realizaron paradas en intervalos de tiempo de 15 minutos para realizar pesajes de forma tal que se pudiese apreciar el comportamiento del desgaste en el tiempo. A cada muestra ensayada se le hicieron dos replicas, para un total de 48 ensayos. El desgaste se determinó mediante el pesaje antes y después de cada ensayo, con un error de 0,1 mg.

Tabla No. 1. Composiciones de los hierros usados (en %).

	A	B
C	3.66	3.72
Si	2.49	2.52
Mn	0.03	0.03
P	0.021	0.020
S	0.014	0.016
Cr	0.06	0.05
Ni	0.044	0.044
Mo	0.24	0.24
Cu	0.03	.03
Mg	0.062	0.060
Ti	0.027	0.026
Al	0.010	0.014
Pb	0.004	0.004
Sn	0.00	0.00
V	0.032	0.033

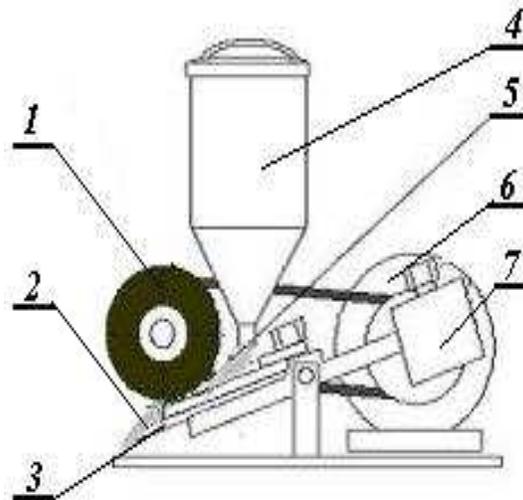


Figura 5. Esquema de máquina Fargo para ensayos de abrasión. 1) Rueda de goma, 2) Probeta, 3) Porta muestra, 4) Recipiente para el material abrasivo, 5) Arena sílice, 6) Motor, 7) Peso.

3. Análisis de los resultados

Los exámenes metalográficos practicados en las muestras del hierro nodular utilizadas en el tratamiento térmico de austemperado, exhiben una microestructura de colada con fundición gris ferrítica, con una morfología del grafito esferoidal (regular), en correspondencia con la norma ASTM. Forma F VI-V, con un grado de nodularidad del grafito de más del 90%. Tamaño de las inclusiones de grafito, T 5-7.

Tabla No. 2. Tratamientos térmicos y resultados experimentales.

Muestra	Taust °C	Ttemp °C	T min	Nlos mm ²	Xaust	HB	Desg. 1 g	Desg. 2 g	Desg. 3 g	Desg. P g
A1	925	370	60	140	0,36	329	0,06675	0,06567	0,06467	0,06570
B1	925	370	60	240	0,32	332	0,06145	0,06275	0,06201	0,06207
A2	925	370	30	140	0,34	317	0,08043	0,07940	0,08073	0,08019
B2	925	370	30	240	0,30	321	0,06821	0,06936	0,06909	0,06889
A3	925	310	60	140	0,27	395	0,05952	0,05899	0,06040	0,05964
B3	925	310	60	240	0,22	395	0,05788	0,05899	0,05643	0,05777
A4	925	310	30	140	0,24	391	0,06091	0,05988	0,06131	0,06070
B4	925	310	30	240	0,20	385	0,05775	0,05907	0,05871	0,05851
A5	850	370	60	140	0,22	377	0,06816	0,06791	0,06690	0,06766
B5	850	370	60	240	0,20	380	0,06725	0,06629	0,06757	0,06704
A6	850	370	30	140	0,25	340	0,06773	0,06910	0,07224	0,06969
B6	850	370	30	240	0,23	352	0,06834	0,06738	0,06863	0,06812
A7	850	310	60	140	0,12	410	0,05399	0,05389	0,05504	0,05431
B7	850	310	60	240	0,10	414	0,05059	0,05477	0,05190	0,05242
A8	850	310	30	140	0,13	405	0,06032	0,05421	0,05521	0,05658
B8	850	310	30	240	0,12	410	0,05307	0,05342	0,05214	0,05288

Las características particulares de ambas estructuras son relacionadas a continuación:

Aleación A.

Conteo de nódulos: 140 nódulos/mm²

Área ocupada por el grafito. ..más del 5% y hasta el 8%

D_{máx} de los nódulos: 100 MK

Aleación B

Conteo de nódulos: 240 nódulos/mm²

Área ocupada por el grafito del 3% al 5%

D_{máx} de los nódulos: de 40 a 60 MK

El análisis metalográfico realizado a las muestras evidencia una estructura predominante de tipo bainítica, con variación en la finura y geometría de los listones de ferrita en función de las temperaturas de temple isotérmico empleadas, 370°C y 315°C, variando las zonas de austenita en magnitud y dispersión según las muestras. Las figuras 7 y 8 muestran algunas de las estructuras obtenidas

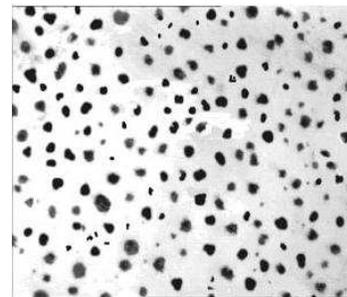


Figura 6. b) Muestra B, con 240 nódulos/mm². 100X.

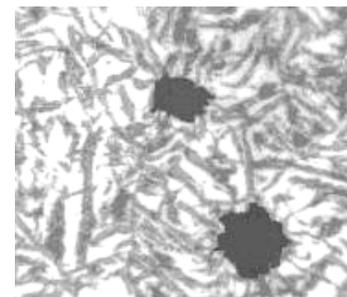


Figura 7. Muestra B, austenizada a 925 °C con un temple isotérmico a 370 °C durante 30 minutos. Atacada con Nital 400X.

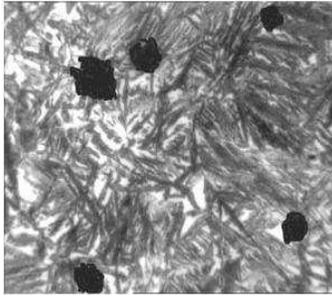


Figura 8. Muestra austenizada a 850 °C y con un temple isotérmico a 370 °C. Atacada con Nital 400X.

Como puede apreciarse en los resultados experimentales obtenidos, y en la evaluación estadística de los mismos, el conteo de nódulos ejerce un efecto significativo en el comportamiento del hierro nodular austemperado sometido a la acción del desgaste abrasivo.

En todos los casos analizados, un incremento del conteo de nódulos implicó un mejor comportamiento de cada material ante la acción del desgaste abrasivo, reduciéndose las pérdidas de material en condiciones semejantes de desgaste.

En los gráficos de las Figs. 9 - 14 es posible apreciar también, de forma esquemática, el efecto positivo que ejerce un incremento del conteo de nódulos en el comportamiento al desgaste abrasivo.

Los gráficos del 10 al 12 muestran el comportamiento al desgaste en función del conteo de nódulos y de las variables de tratamiento térmico

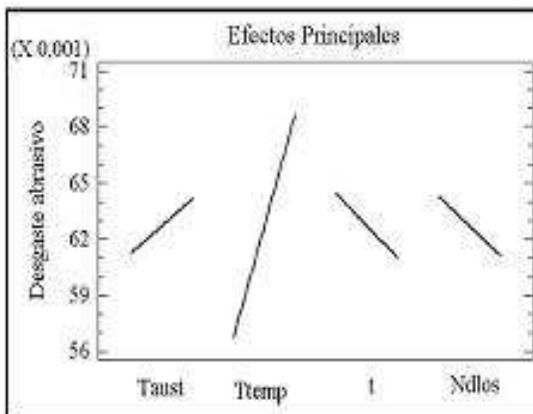


Figura 9. Efectos de los factores principales en el Desgaste Abrasivo.

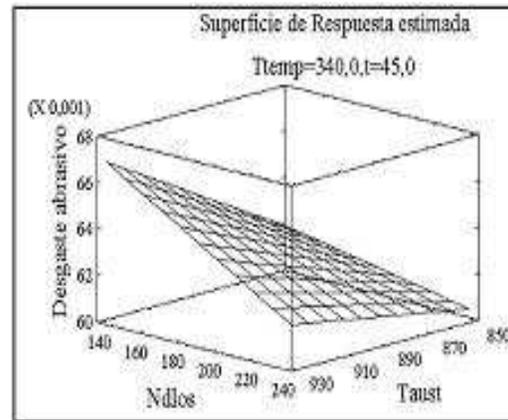


Figura 10. Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y el conteo de nódulos.

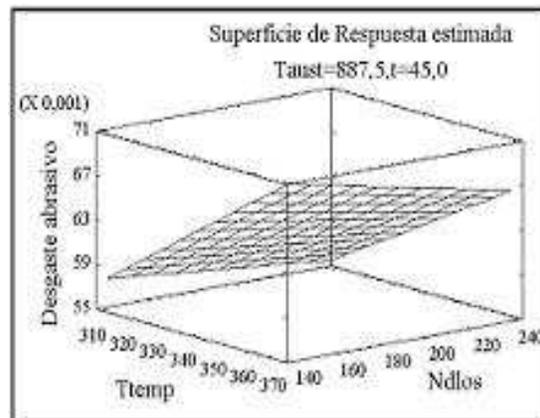


Figura 11. Superficie de respuesta estimada en función de la Ttemp y del conteo de nódulos

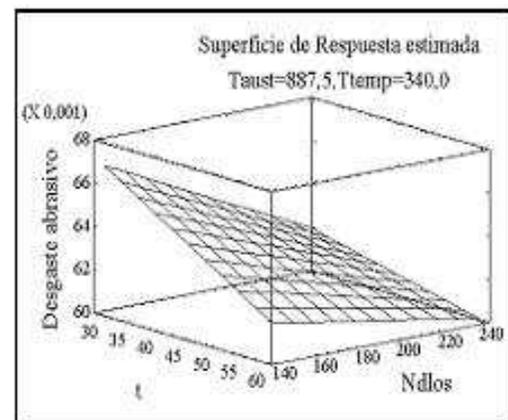


Figura 12. Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de austemperado y del conteo de nódulos.

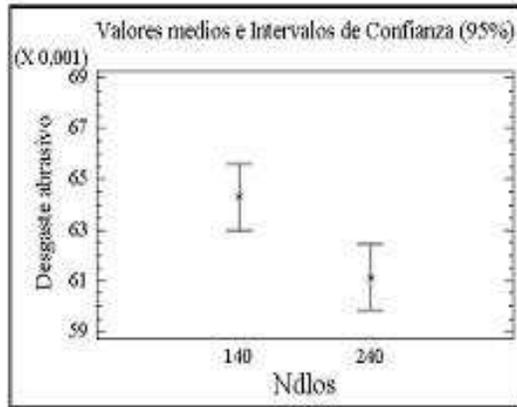


Figura 13. Gráfico con los intervalos de confianza para Desgaste Abrasivo, en función del conteo de nódulos.

La selección de materiales con suficiente resistencia al desgaste abrasivo, para su utilización en piezas esta basada en algunas propiedades físicas relevantes como son: la dureza, la tenacidad a la fractura, la capacidad de endurecerse por la acción del trabajo, la ductilidad, la distribución de las deformaciones, la inestabilidad mecánica y la anisotropía del cristal (3).

Con el incremento del conteo de nódulos, se favorecen casi todas las propiedades antes mencionadas en el material, redundando como puede apreciarse en un mejor comportamiento ante la acción del desgaste abrasivo.

4. Conclusiones.

- Un incremento del conteo de nódulos, da lugar a estructuras más finas y más homogéneas. Este refinamiento de la matriz mejora las propiedades a la tracción (ductilidad, tenacidad, y resistencia a la rotura), a la fatiga, y a la fractura, en la matriz del hierro nodular austemperado. Propiedades estas deseadas en los materiales que van estar expuestos a desgaste abrasivo.
- Favorece las deformaciones que dan lugar al endurecimiento de la matriz ausferrítica, por la transformación de la austenita retenida enriquecida en carbono, en martensita.
- Es el responsable de que el endurecimiento sea más homogéneo en toda el área de abrasión. Es conocido que un incremento de la dureza

equivale a una disminución del desgaste del material en el proceso de abrasión. La dureza es considerada como la más importante de las propiedades mecánicas en el material a desgastar.

5. Referencias.

1. "Ductile Iron Society: Ductile Iron Data for Design Engineers. Section IV. Austempered Ductile Iron". August 1998, Disponible en: <http://www.ductile.org>
2. **RUNDMAN, K.** *Department of Metallurgical and Materials Engineering Michigan Technological University: Austempered Ductile Iron: Microstructure and Mechanical Properties.* Helsinki University of Technology, May 28 1997.
3. **JOHNSON, K. L.** *Contact Mechanics.* Cambridge University Press, 1989.
4. **TAKITA, M. y UEDA, Y.** "Effect of Austenite Retained on Properties of Austempered Ductile Iron ". *Cast Metal.* March 1988. vol. 1, p. 147-155.
5. **CHENGJIA, C. y JOUKO, J.** The Stability of Austenite in ADI. En *Internacional ADI and Simulation Conferece.* May 28-30, 1997.
6. **DIEZ, C.; GOYOS, L., et al.** 6El índice de endurecimiento en las fundiciones nodulares austemperadas. En *II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. Septiembre de 1997.*
7. **GOYOS, L.; CASTAÑEDA, R., et al.** "Comportamiento del hierro nodular austemperizado en condiciones de corrosión y desgaste". *Revista Ingeniería Mecánica.* La Habana. Cuba. Abril - Junio 1999. vol. 2, nº 2, p.
8. **VUORINEN, J.** "Strain Hardening Mechanisms and Characteristics of Austempered Ductile Iron". *AFS Transaction.* 1976. vol. 94, p. 577-588.
9. **VOIGT, R.; DHANE, H., et al.** Microstructural Aspects of Fracture in Austempered Ductile Iron.Proceeding. En *2nd Conference on Austempered Ductile Iron. Ann Arbor, MI, USA. March 17-19 1986.* p. 327.

10. **SHIOKAWA, T.** On the Austempering of Ductile Irons, Their Mechanical Properties and Some Practical Applications. En *59th Japan Ductile Cast Iron Associations License Conference*. 1978.
11. **WU-SHENG, Z.** et al "Abrasion resistance of ADI ". *Cast Metals*. 1993, vol. 6, nº 2.
12. **SHEPPERSON, S. y ALLEN, C.** The Abrasive Wear Behaviour of Austempered Spheroidal Cast Irons. En *International Conference on Wear of Materials*. Houston, Texas. 1987.
13. **RUFF, G. F.** Comparison of Austempered Ductile Iron Versus Steel. En *American Foundrymen's Society Congress*. Hartford, Connecticut. 1988.

C. J. Díez-Cicero¹, G. R. Fernández-López¹, U. Ordóñez-Hernández², C. R. Figueroa-Hernández², F. Mondelo³

1. Departamento Gráfica de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Mecánica

E-mail: cdiez@mecanica.cujae.edu.cu, gfernandez@mecanica.cujae.edu.cu

2. Departamento de Tecnología en la Construcción de Maquinarias.

E-mail: urbano@mecanica.cujae.edu.cu, figueroa@mecanica.cujae.edu.cu

3. UDM "Antillana de Acero".

E-mail: mondelo@udm.cujae.edu.cu

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" – CUJAE
Calle 114 #11901 e/119 y 127. Marianao. La Habana. CP 19390. Cuba.