

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, E. Fraga Guerra*

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Calle 127 s/n. CUJAE. Marianao 15. Ciudad de la Habana. Cuba.

Departamento Gráfica de Ingeniería. Teléfono: 261 3036

Departamento de Tecnología en la Construcción de Maquinarias. Teléfono: (537) 27 1644

*Departamento de Matemática de la Facultad de Ing. Mecánica

Email: cdiez@mecanica.cujae.edu.cu.

(Entregado el 10 de Febrero de 2004, aprobado el 23 de Abril de 2004)

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.

1. Introducción.

El hierro dúctil austemperado permite al ingeniero diseñador obtener una resistencia a la abrasión superior y le permite competir con otros materiales en un amplio rango de durezas. Generalmente, el hierro dúctil austemperado se desgasta menos que otros materiales competitivos en un nivel de dureza dado. Por ejemplo, en la figura 1 se puede apreciar como una pieza de ADI con una dureza entre 30 y 40 Rc tiene 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 figuras 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 esta 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 aumenta 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, debe usarse una temperatura en el rango de (350 – 370 °C). Cuando una combinación de alta resistencia y resistencia a la abrasión son requeridas, una temperatura de austemperado de 260 °C producirá los mejores resultados.

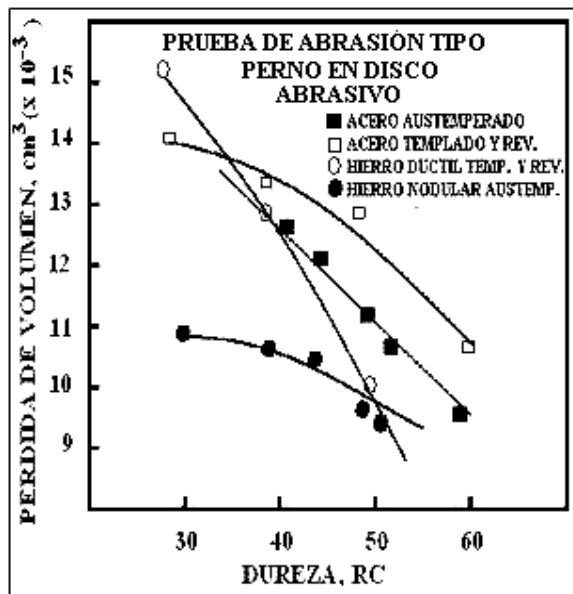


Fig. 1. Comparación de los resultados obtenidos en la prueba de desgaste por abrasión (tipo perno sobre disco abrasivo) del hierro dúctil austemperado con la de otros materiales resistentes a la abrasión.

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, 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.

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.

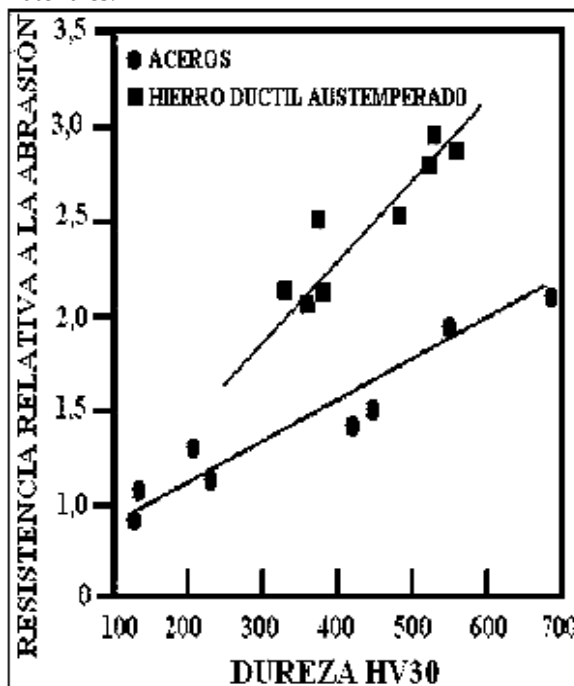


Fig. 2. Comparación de la resistencia relativa a la abrasión del hierro nodular austemperado con la de diferentes aceros resistentes a la abrasión.

2. Parte experimental.

Las probetas fueron construidas a partir de bloques en Y, como el indicado en la Fig.3. Las muestras para el análisis microestructural fueron tomadas de los extremos de las barras obtenidas después de ser seccionados los bloques en Y.

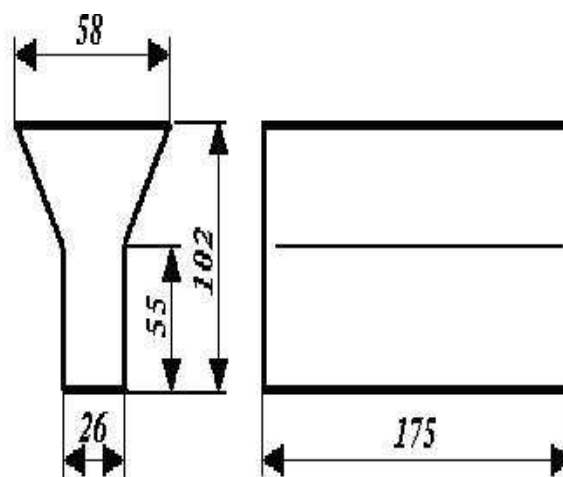


Fig. 3. Bloque en Y (dimensiones en mm).

Las probetas utilizadas poseen forma plana, semejantes a planchuelas, acorde con los requerimientos dados para la realización de los ensayos de abrasión con disco de goma en la máquina Fargo. Las dimensiones de las probetas son mostradas en la fig. 4

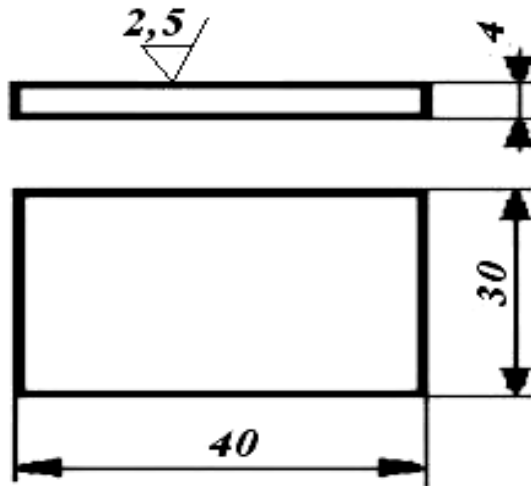


Fig. 4. Probeta para ensayo de desgaste abrasivo.

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 descarburación. 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 No 2.

Las probetas fueron examinadas con microscopia 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 5.

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

	A	B
A	3.66	3.72
3.66	2.49	2.52
2.49	0.03	0.03
0.03	0.021	0.020
0.021	0.014	0.016
0.014	0.06	0.05
0.06	0.044	0.044
0.044	0.24	0.24
0.24	0.03	.03
0.03	0.062	0.060
0.062	0.027	0.026
0.027	0.010	0.014
0.010	0.004	0.004
0.004	0.00	0.00
0.00	0.032	0.033

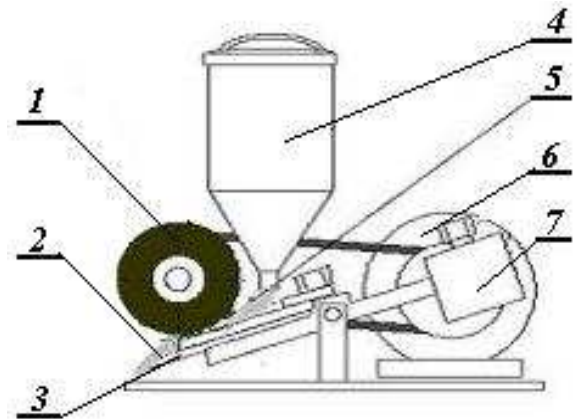


Fig. 5. Esquema de máquina Fargo para ensayos de abrasión. 1)Rueda de goma, 2)Probeta, 3)Porta muestra, 4)Recipiente para el material abrasivo, 5)Arena sílice, 6)Motor, 7)Peso.

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 $n = 60 \pm 2$ min⁻¹ y un período de 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 réplicas, 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.

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. Las características particulares de ambas estructuras son relacionadas a continuación:

Aleación A (figura 6).

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 (figura 6b).

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

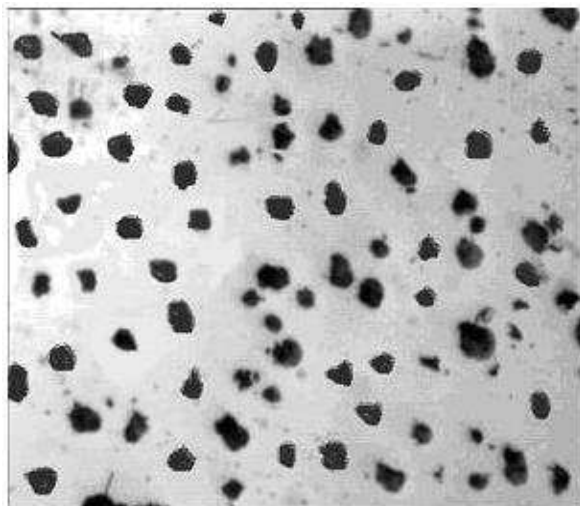


Fig. 6. a) Muestra A, con 140 nódulos/mm² 100X

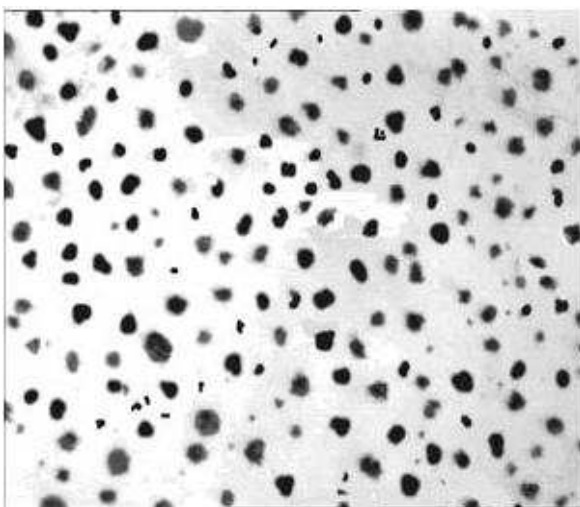


Fig. 6. b) Muestra B, con 240 nódulos/mm². 100X

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.

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.

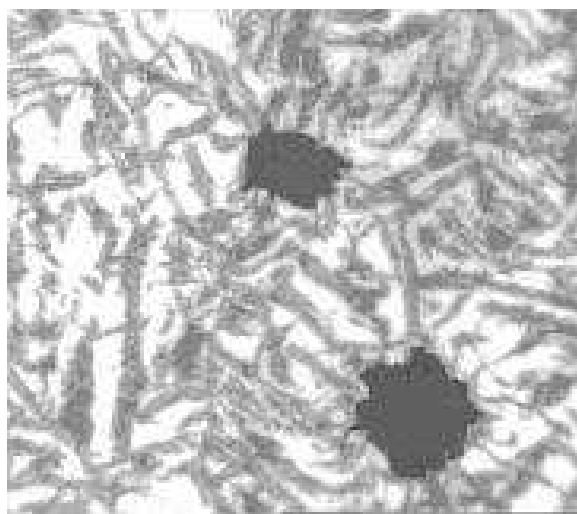


Fig. 7. Muestra B, austenizada a 925 °C con un temple isotérmico a 370 °C durante 30 minutos. Atacada con Nital 400X.

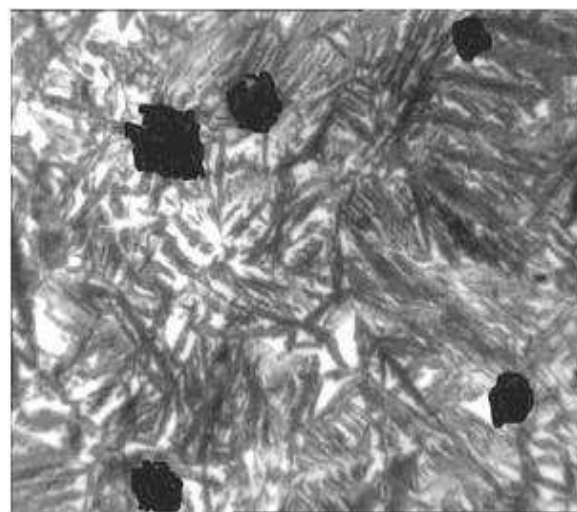


Fig. 8. Muestra austenizada a 850 °C y con un temple isotérmico a 370 °C. Atacada con Nital 400X

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.

La selección de materiales con suficiente resistencia al desgaste abrasivo para su utilización en piezas está 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, dando lugar como puede apreciarse, a un mejor comportamiento ante la acción del desgaste abrasivo.

En los gráficos de las figuras. 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.

Esto se debe a que un incremento del conteo de nódulos da lugar a estructuras más finas y más homogéneas.

Las estructuras más finas exhiben un mayor número de cristales y una mayor homogeneidad de las propiedades en todas las direcciones, con un incremento del límite de fluencia, de la ductilidad, la tenacidad y la resistencia en general.

El incremento del conteo de nódulos también favorece las deformaciones que dan lugar al endurecimiento de la matriz ausferrítica, por la transformación de la austenita retenida enriquecida en carbono en martensita, además va ser también el responsable de que el endurecimiento sea más homogéneo en toda el área de abrasión.

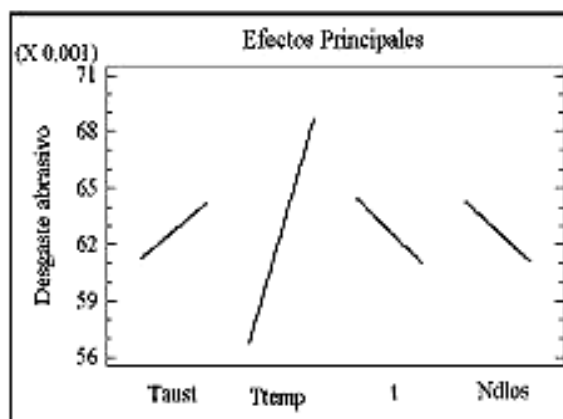


Fig. 9. Efectos de los factores principales en el Desgaste Abrasivo.

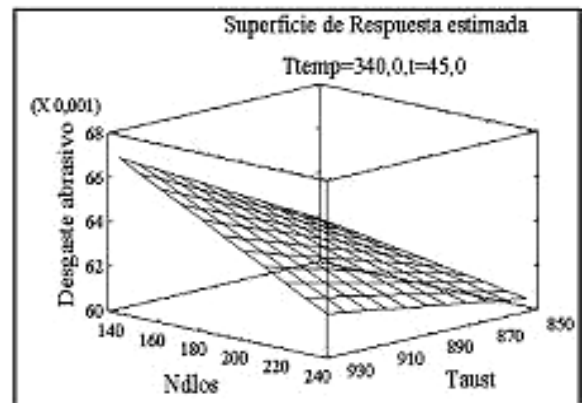


Fig. 10 Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y el conteo de nódulos.

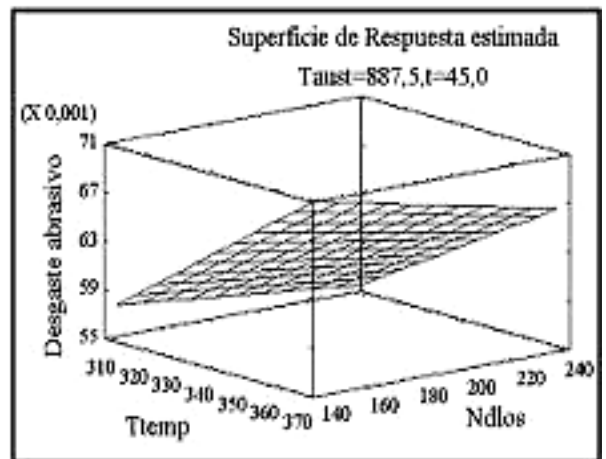


Fig. 11. Superficie de respuesta estimada en función de la Ttemp y del conteo de nódulos.

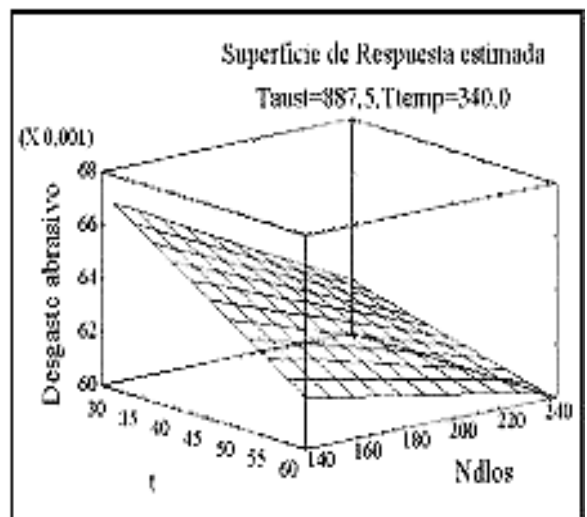


Fig. 12. Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de austemperado y del conteo de nódulos.

Tabla 2. Resultados experimentales.

Mues	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

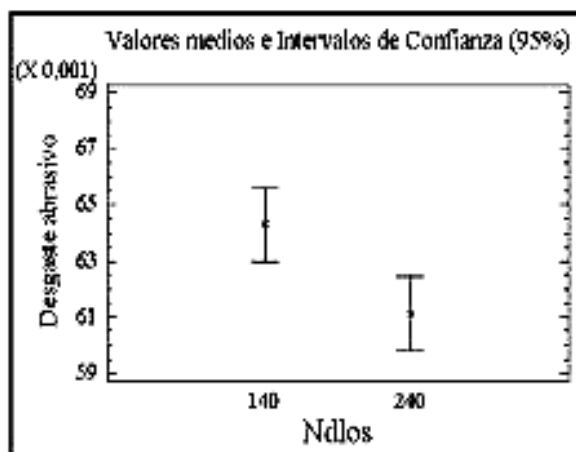


Fig. 13. Gráfico con los intervalos de confianza para Desgaste Abrasivo, en función del conteo de nódulos.

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. Bibliografía.

1. Ductile Iron Society: Ductile Iron Data for Design Engineers. Section IV. Austempered Ductile Iron. <http://www.ductile.org> (August 1998).
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. K. L. Johnson.: Contact Mechanics. Cambridge University Press. Edition 1989
4. Takita M. and Ueda Y.: Effect of Austenite Retained on Properties of Austempered Ductile Iron. *Cast Metal*, 1, March (1988), p. 147-55.
5. Chengjia Chen and Jouko J. vuorinen, Helsinki University Technology, Espoo Finland Matti Johanson, The Stability of

- Austenite in ADI. International ADI and Simulation Conference, May 28-30, 1997.
6. Díez C., Goyos L., Ordoñez U., El índice de endurecimiento en las fundiciones nodulares austemperadas. Memorias del II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. Septiembre de 1997.
 7. Goyos L., Castañeda R., Wettinck E., Valera R., Moors M.: Comportamiento del hierro nodular austemperizado en condiciones de corrosión y desgaste. Revista Ingeniería Mecánica. Cuba. Vol. 2 / Número 2, Abril / Junio 1999
 8. Vuorinen J.: Strain Hardening Mechanisms and Characteristics of Austempered Ductile Iron. *AFS Transaction*, 94 (1976), p. 577-88.
 9. Voigt R., Dhane H. and El Doky L.: Microstructural Aspects of Fracture in Austempered Ductile Iron. Proceeding. 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. *Presented at 59th Japan Ductile Cast Iron Associations License Conference (1978)*.
 11. Wu-Sheng Z. Et al. Abrasion resistance of ADI, *Cast Metals* Vol. 6 N° 2, 1993.
 12. S. Shepperson and C. Allen, "The Abrasive Wear Behaviour of Austempered Spheroidal Cast Irons," International Conference on Wear of Materials, Houston, Texas, 1987
 13. G. F. Ruff, "Comparison of Austempered Ductile Iron Versus Steel," American Foundrymen's Society Congress, Hartford, Connecticut, 1988.

Effect of nodules count in the waste by abrasion resistance for ductile austempering 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 austempering heat treatment, applied to these meltings, brings a new family of materials, characterized by its high mechanical resistance and elevated tenacity, that maintain the economy and facility of production of the nodular smeltings.

This work makes a valuation of the nodular irons behaviors, with different counts from nodules, to which the austempering treatment was applied, and later they were put under tests of abrasive wearing.

Of the obtained results, takes control of the influence the nodules count in these properties, as well as, of the interrelation of the nodules count, with the used variables of heat treatment in the tried samples.

Key words: nodular Iron, count of nodules, austempered.