

Influencia de los factores microestructurales en la resistencia al desgaste por deslizamiento de las fundiciones nodulares austemperadas.

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

Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría* (ISPJAE)
Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba.
Facultad de Ingeniería Mecánica.

*Departamento de Gráfica de Ingeniería

**Departamento de Tecnología en Construcción de Maquinarias

***Unidad Docente de Metalurgia

E-mail cdiez@mecanica.cujae.edu.cu

E-mail figueroa@mecanica.cujae.edu.cu

E-mail urbano@mecanica.cujae.edu.cu

E-mail gfernandez@mecanica.cujae.edu.cu

E-mail fmondelo@udm.mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 10 de marzo de 2008; aceptado el 19 de junio de 2008)

Resumen

Entre los materiales metálicos de mayor demanda, el hierro dúctil con grafito esferoidal o nodular ocupa en la actualidad uno de los lugares más importantes entre los hierros fundidos de alta resistencia. Desde hace unos veinticinco años la introducción del hierro nodular austemperado significó de hecho una revolución en el campo de las aleaciones ferrosas. En el presente trabajo se realiza un estudio de la influencia del conteo de nódulos de grafito del hierro nodular en el proceso de austemperado, a partir de las características de las estructuras obtenidas, por la variación de la cantidad de nódulos de grafito y de las variables de tratamiento térmico. Dichas estructuras son sometidas a la acción del desgaste, en este caso a un desgaste por deslizamiento mediante un ensayo típico disco-zapata. Con los resultados obtenidos, se realiza un análisis estadístico de la influencia del conteo de nódulos en dichas propiedades y de las causas de este comportamiento, tomando en consideración la interrelación del conteo de nódulos con las variables de tratamiento térmico utilizadas en las muestras ensayadas y su incidencia en el mecanismo de desgaste.

Palabras claves: Hierro nodular, conteo de nódulos, austemperado, desgaste por deslizamiento.

1 - Introducción.

Un amplio rango de propiedades pueden ser obtenidas en las fundiciones nodulares austemperadas debido a los cambios en las proporciones de la mayoría de las fases presentes en la microestructura; ferrita bainítica, austenita enriquecida en carbono y los conteos de nódulos de grafito. Martesita, ferrita, carburos de hierro y otros carburos aleados pueden también estar presentes. La microestructura está en dependencia de la composición del hierro fundido y de la exactitud de los parámetros en las etapas de los procesos de su obtención.

Esta matriz de microestructura única, que poseen los hierros nodulares austemperados (la ausferrita), le confiere al material alta resistencia mecánica, alta tenacidad y alta resistencia al desgaste. Estas cualidades del material, lo clasifican entre los materiales que pueden ser empleados en la fabricación de piezas para automóviles, equipos pesados, y equipos utilizados en la explotación de minas. El nombre de ausferrita se toma de su microestructura y define en primer lugar, a la matriz de austenita y en segundo lugar, a las finas escamas de ferrita que están dispersas dentro de la matriz de austenita.

La matriz de ausferrita, es la responsable de las excepcionales propiedades mecánicas que caracterizan a este material y que son mucho mayores, tanto en resistencia como en ductilidad, que las del hierro dúctil elaborado convencionalmente, rivalizando además con

las de algunos aceros convencionales fundidos, aceros forjados y aceros aleados de alta resistencia [1, 2, 7].

En la Fig. 1 se muestra un resumen de las especificaciones de la ASTM sobre la resistencia y la ductilidad de los hierros nodulares comunes, de lo austemperados y de los aceros fundidos.

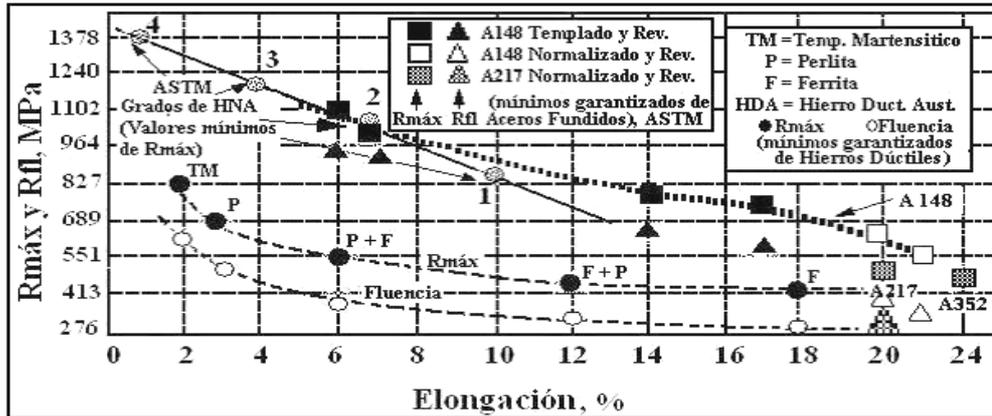


Figura 1 – Valores de esfuerzos (en MPa) vs elongación (%), con identificación de los esfuerzos límites mínimos por rotura Rmáx y por fluencia Rfl según compendio de los grados de hierros fundidos dúctiles y aceros fundidos declarado por la ASTM.

2 – Procedimiento.

Para lograr muestras con conteos de nódulos diferentes se realizó una primera inoculación en la cazuela, obteniéndose la denominada aleación A, posteriormente se realizó una segunda inoculación o post-inoculación en la cuchara y se obtuvo la denominada aleación B (en ambos casos el método de inoculación empleado fue el *sándwich*). La Tabla 1 presenta la composición química alcanzada en cada una de las muestras ensayadas.

Las probetas para los ensayos fueron obtenidas de bloques en Y fundidos según la Norma ASTM E8M-93 para hierros nodulares. Para el análisis microestructural fueron tomadas las muestras de los extremos de las barras obtenidas de los bloques en “Y” según se observa en la Fig. 2. Las aleaciones A y B mostraron un conteo de nódulos de 140 y 240 respectivamente.

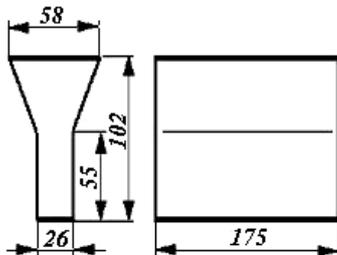


Figura 2 - Bloque en Y

Tabla 1 - Composición química (en %) de las muestras ensayadas.

	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
V	0.032	0.033

En el tratamiento térmico de austenización se empleó un horno de cámara, en el cual fue colocada una cubeta con sal común para sumergir las probetas, con el objeto de minimizar la descarburación de ellas a las temperaturas de 850°C y 925°C durante una hora.

El austemperado se realizó en un horno eléctrico vertical de pozo profundo y las probetas fueran sumergidas en un baño de sales, con una mezcla a partes iguales de nitrato de sodio (NaNO_2) y nitrato de potasio (KNO_3), tratadas a las temperaturas de 310 °C y 370 °C indistintamente en tiempos de 30 minutos y 1 hora.

Las probetas fueron enfriadas en agua después de austemperadas. En la Tabla 2 se realiza un análisis comparativo de las aleaciones A y B.

Las muestras utilizadas en la metalografía fueron preparadas de la forma convencional, el ataque fue hecho con nital al 2%.

El contenido de austenita retenida fue determinado según un procedimiento computacional basado en un modelo de red neural y datos corroborados para modelar el contenido de austenita retenida.

Las probetas empleadas en los ensayos de desgaste fueron hechas por triplicado, respondiendo a un plan experimentos del tipo factorial 2^4 con 2 replicas.

Las probetas fueron elaboradas según indicaciones de la norma ASTM G83-90 para ensayos de desgaste por deslizamiento (Ver Fig. 9). La sección calibrada de las probetas fue rectificada.

3 - Análisis microestructural

Los exámenes metalográficos practicados en las muestras del hierro nodular utilizadas en el tratamiento térmico de austemperado exhibieron una microestructura de colada de fundición gris ferrítica con morfología del grafito esferoidal (regular). Las características particulares de ambas estructuras pueden ser apreciadas en las Figs. 3 y 4.

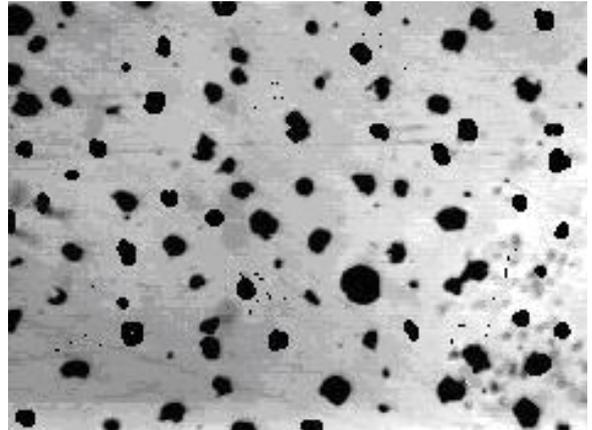


Figura 3 - Muestra A con 140 nódulos/mm². (100 X)

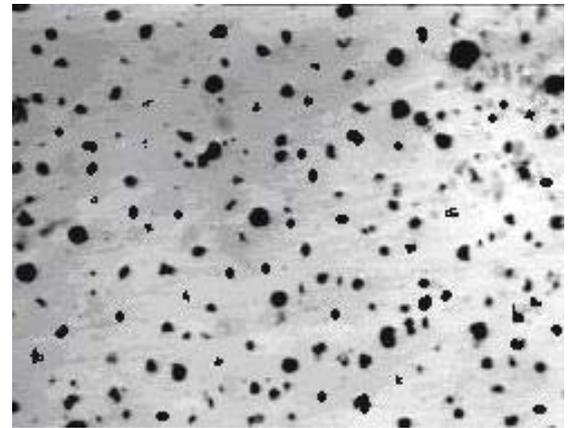


Figura 4 - Muestra B con 240 nódulos/mm². (100 X).

Tabla 2 - Análisis comparativo de las aleaciones A y B.

	Aleación A	Aleación B
Conteo de nódulos	140 nódulos / mm ²	240 nódulos / mm ²
Forma del grafito	grafito tipo VI	grafito tipo VI
Tamaño del grafito	5	6
Diámetro máximo de los nódulos de grafito	100 Mk	de 40 a 60 Mk
Características	Más del 90 % del grafito de forma esferoidal	Más del 90 % del grafito de forma esferoidal
Área ocupada por el grafito	Más del 8 % y hasta el 12 %	del 3 % al 5 %

4 - Análisis microestructural del hierro nodular austemperado.

Los análisis metalográficos obtenidos de las muestras tratadas térmicamente, evidencian una estructura predominante de tipo bainítica, con variación en la finura y geometría de los listones de ferrita en función de las temperaturas de austenización, de la temperatura de austemperado y del conteo de nódulos. Ver figuras desde la 5 hasta la 8.

Las muestras austenizadas a 850 °C exhiben una estructura más fina que las austenizadas a 925 °C, observándose este efecto más pronunciado en las muestras de la aleación B con 240 nódulos/mm². Esto se debe a que el crecimiento del grano a la temperatura de 925 °C es mucho mayor que en 850 °C. Al ser aplicado el temple a 925°C las muestras manifiestan una estructura más grosera que las austenizadas a 850 °C. Además, las muestras de la aleación B inicialmente exhibían un refinamiento de su estructura producido por el incremento del conteo de nódulos, que da lugar a una

reducción del tamaño del grano durante el proceso de cristalización del hierro nodular.

Se observa también, una mayor homogeneidad de las estructuras ausferríticas obtenidas en la aleación B, en las diferentes variantes de temple empleadas, donde las zonas de austenita no transformada son más pequeñas y dispersas.

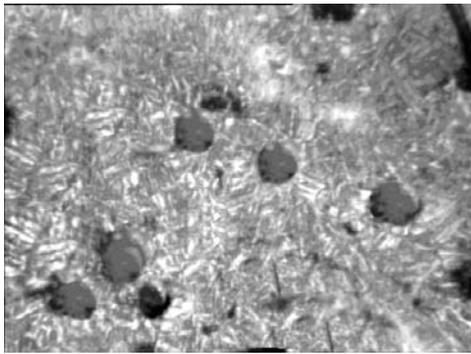


Figura 5 - Muestra A3 con 140 N/mm², austenizada a 925 °C y austemperada a 310 °C durante 60 minutos. (100 X)

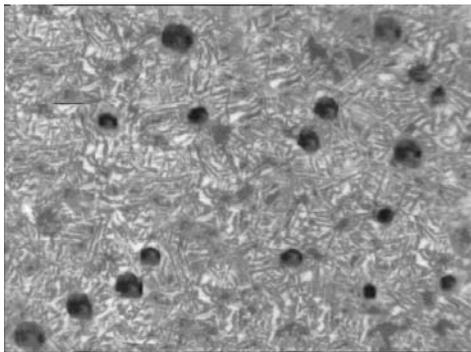


Figura 6 - Muestra B3 con 240 N/mm², austenizada a 925 °C y austemperada a 310 °C durante 60 minutos. (100 X).

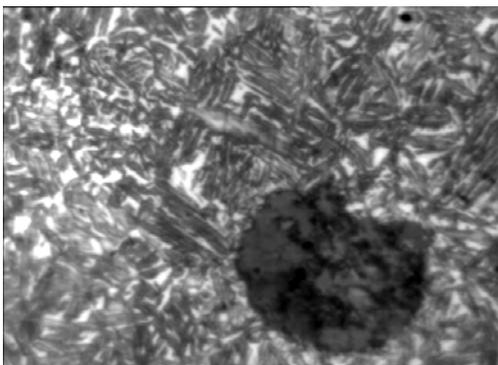


Figura 7 - Muestra A6 con 140 N/mm², austenizada a 850 °C y austemperada a 370 °C durante 30 minutos. 400 X

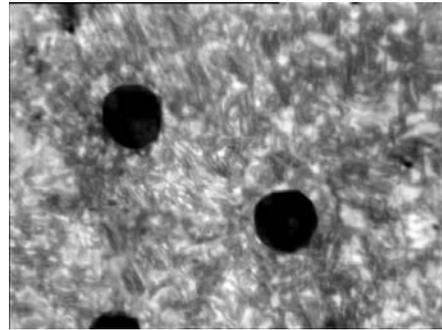


Figura 8 - Muestra B6 con 140 N/mm², austenizada a 850 °C y austemperada a 370 °C durante 30 minutos. 400 X.

5 - Desgaste por deslizamiento en ensayo del tipo Disco-Zapata.

Los ensayos se ejecutaron en una máquina universal de ensayos de fricción y desgaste con un rango de medición de 0-20 N/m, 0-0,5 g/mm². La muestra de ensayo se colocó en un dispositivo especial y fue fijada con tornillos de sujeción. Las dimensiones de la probeta y el esquema de trabajo se muestran en las figuras 9 y 10.

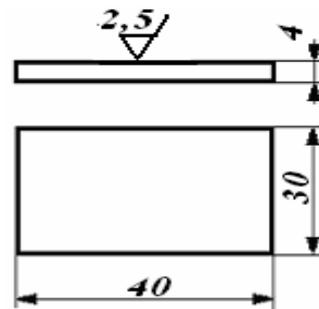


Figura 9 - Probeta de ensayo, según norma ASTM G 83-90.

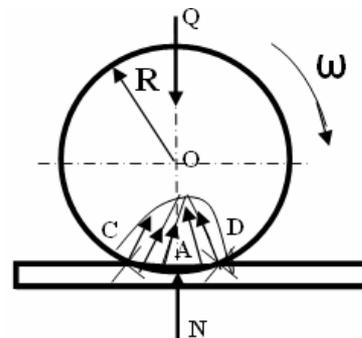


Figura 10 - Esquema de trabajo.

El procedimiento experimental fue ejecutado garantizando una velocidad del disco de 300 min⁻¹, una carga de 200 N y un tiempo de ensayo acorde con una

planificación para que el experimento tuviera una duración de una hora. Se hicieron paradas cada 15 minutos para realizar mediciones del desgaste y controlar su comportamiento en el tiempo.

Las mediciones de desgaste en las muestras se realizaron por pérdida de peso mediante una balanza analítica con rango de medición de 0-200 g y precisión de 0,01g.

6 - Mecanismo de desgaste por deslizamiento.

Cuando ocurre el deslizamiento, las dos superficies son desplazadas como se muestra en la figura 11, donde la carga originalmente sostenida por la aspereza es transferida progresivamente a otras uniones de asperezas, las cuales están en proceso de formación en otras partes de la superficie.

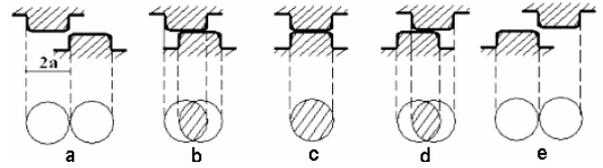


Figura 11 - Esquema que muestra la evolución de una sección correctora de contacto único, cuando ambas asperezas se deslizan una sobre otra.

Los deslizamientos continuos dan lugar a la formación progresiva y a la destrucción por el contacto de las asperezas individuales. El desgaste está asociado al desprendimiento de los fragmentos de material y el volumen de cada fragmento en el desgaste dependerá del tamaño de la aspereza en la unión a partir de la cual se originó. La Tabla 3 resume los valores promedio de cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 3 - Ensayo de desgaste por deslizamiento del tipo Disco-Zapata. Valores promedios.

Muestra	Taust °C	Ttemp °C	T min	C.N nod / mm ²	Aust. Ret.	HB	Desg. P Kg.
1-Aleación A	925	370	60	140	0,36	329	0,39171
1-Aleación B	925	370	60	240	0,32	332	0,38257
2-Aleación A	925	370	30	140	0,34	317	0,39732
2-Aleación B	925	370	30	240	0,30	321	0,39268
3-Aleación A	925	310	60	140	0,27	395	0,35414
3-Aleación B	925	310	60	240	0,22	395	0,34292
4-Aleación A	925	310	30	140	0,24	391	0,35999
4-Aleación B	925	310	30	240	0,20	385	0,34788
5-Aleación A	850	370	60	140	0,22	377	0,38685
5-Aleación B	850	370	60	240	0,20	380	0,38347
6-Aleación A	850	370	30	140	0,25	340	0,38466
6-Aleación B	850	370	30	240	0,23	352	0,38193
7-Aleación A	850	310	60	140	0,12	410	0,33142
7-Aleación B	850	310	60	240	0,10	414	0,31259
8-Aleación A	850	310	30	140	0,13	405	0,34181
8-Aleación B	850	310	30	240	0,12	410	0,33310

Leyenda:

Taust: temperatura de austenización

Ttemp: temperatura de temple isotérmico

T: tiempo de mantenimiento a la temperatura de temple isotérmico

C.N: Conteo de nódulos por mm².

Aust.Ret. :Austenita retenida

HB: Dureza superficial en grados Brinell

Desg. P: Desgaste promedio

7 - Análisis de los resultados

En la Fig. 12 se muestra la influencia de los diferentes factores en la resistencia máxima del material. Puede observarse el efecto positivo del conteo de nódulos en el incremento de la resistencia máxima.

Con vistas a determinar las mejores variantes tomando como referencia el conteo de nódulos de conjunto con las diferentes variables de tratamiento térmico, en las Figs. 13, 14 y 15 se muestran las superficies de respuesta obtenidas para la resistencia máxima en función del conteo de nódulos y de las variables de tratamiento térmico (temperatura de austenización, temperatura de temple isotérmico y tiempo de mantenimiento a la temperatura de temple isotérmico).

En la Fig. 16 se muestra el valor medio y el intervalo de confianza para la resistencia máxima en ambas aleaciones

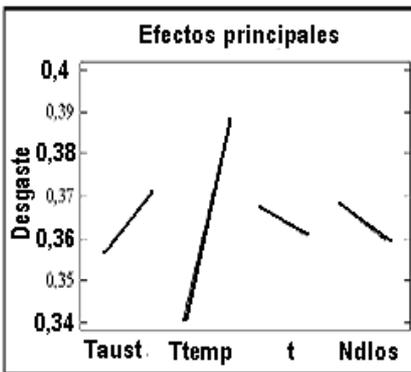


Figura 12 - Efectos de los factores principales en el desgaste por deslizamiento.

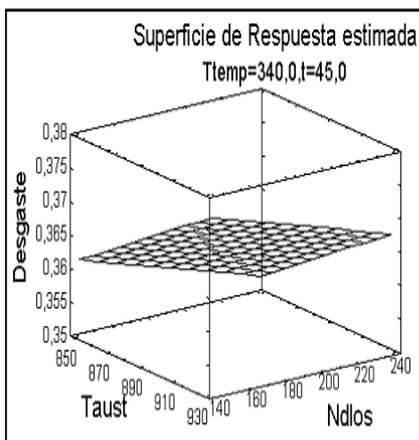


Figura 13 - Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y el conteo de nódulos

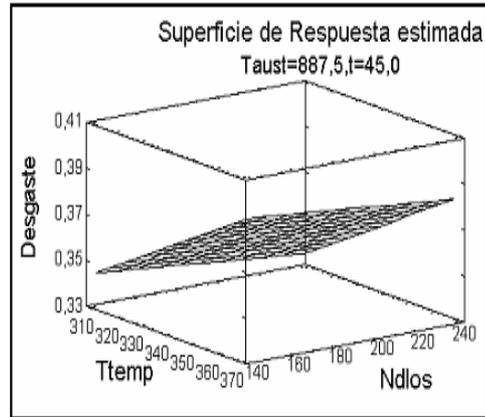


Figura 14 - Superficie de respuesta estimada en función de la Ttemp y del conteo de nódulos.

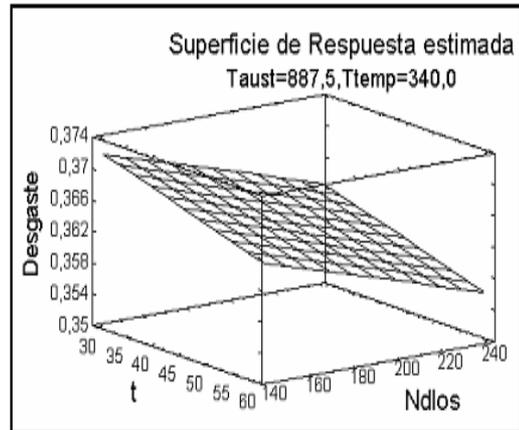


Figura 15 - Superficie de respuesta estimada en función de tiempo de austemperado y del conteo de nódulos.

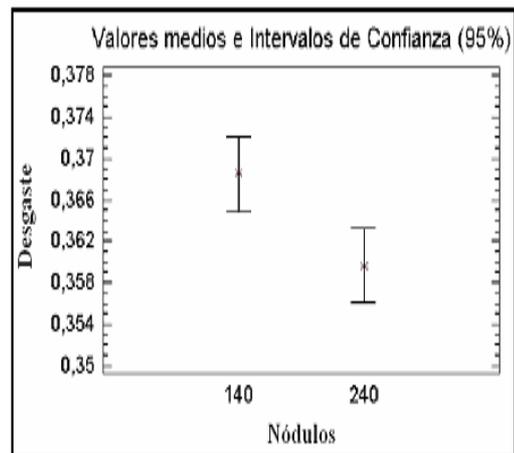


Figura 16 - Gráfico con los intervalos de confianza para el desgaste por deslizamiento, en función del conteo de nódulos

Una explicación del comportamiento de los resultados obtenidos puede ser basada en la denominada *ecuación de desgaste de Archard* [6], la cual relaciona el volumen perdido por unidad de deslizamiento. La ecuación de desgaste de *Archard* establece que:

$$Q = \frac{K \cdot W}{H}$$

Donde:

Q: Volumen perdido por unidad de deslizamiento en la distancia.

K: Coeficiente de desgaste.

W: Carga normal.

H: dureza de la superficie más suave.

La constante *K*, usualmente denominada coeficiente de desgaste o algunas veces coeficiente para el desgaste, es adimensional y siempre menor que la unidad.

El coeficiente de desgaste adimensional *K* es de gran importancia y proporciona un medio valioso para comparar la severidad del proceso de desgaste en diferentes sistemas. Sin embargo, para aplicaciones ingenieriles la relación *K/H* es con frecuencia más útil.

Aunque se define a *K* como la probabilidad de que la interacción de cada aspereza de lugar a una partícula desgastada, es importante dejar claro que no es la única interpretación posible, ya que puede también reflejar el número de ciclos requerido por cada aspereza antes que un fragmento de material sea desprendido por un proceso de fatiga de contacto.

De forma general, el comportamiento de los hierros nodulares austemperados ante el desgaste por deslizamiento fue tratado recientemente por investigadores que observaron que la presencia del grafito libre, presente en la microestructura de estos, desempeña un papel muy importante en la gran resistencia al desgaste que exhiben, pues evita las microsoldaduras de las asperezas superficiales [8,9] y lubrica las superficies en contacto.

Del análisis realizado sobre el mecanismo de desgaste por deslizamiento en los metales, se puede deducir que los dos factores que más inciden en la resistencia al desgaste del material son la dureza y el coeficiente de desgaste *K*.

En los casos ya analizados, se vio que el conteo de nódulos tiene un rol importante en la capacidad de endurecimiento del material y en la mayor uniformidad de la superficie endurecida. En el caso del coeficiente de desgaste, puede verse que tiene una relación directa con el número de ciclos necesarios para que se produzcan desprendimientos de partículas de material por la acción de las tensiones de contacto.

Como se aprecia, ambos factores son influenciados por el conteo de nódulos, por lo que podemos concluir

que un incremento del conteo de nódulos favorece la resistencia al desgaste del material, por mejorar su capacidad de endurecimiento ante la acción de las tensiones de contacto y al lograrse una mejor distribución en la matriz de ausferrita de la austenita retenida enriquecida en carbono. Así también, se conoce que un incremento del conteo de nódulos implica un cierto refinamiento de la estructura y una reducción del tamaño de los nódulos de grafito, lo que da lugar a un incremento de la resistencia a la falla por fatiga de contacto [2,3,5]. Este último efecto ya fue analizado y se observó que mientras más pequeño es el diámetro del nódulo de grafito mayor será el número de ciclos necesarios para que se produzcan los desprendimientos de partículas en la superficie del material por la acción de las tensiones de contacto, todo lo cual explica el mejor comportamiento ante el desgaste por deslizamiento de la aleación B que posee un mayor número de nódulos.

8 - Conclusiones

1. Los resultados de la metalografía muestran, que las estructuras ausferríticas obtenidas en la aleación B con 240 nódulos/mm² producto del austemperado son más homogéneas que las de la aleación A con 140 nódulos /mm².
2. Los valores más bajos de desgaste por deslizamiento se alcanzaron con austemperados a 310 °C durante 60 minutos, siendo más bajos aún en las muestras austenizadas a 850 °C. Las muestras de la aleación B con 240 nódulos/mm² mostraron los desgastes más bajos.
3. El grafito libre presente en la microestructura, desempeña un papel muy importante en la gran resistencia al desgaste que exhiben, pues evita las microsoldaduras de las asperezas superficiales.

9 - Referencias.

1. Barbezat, G. and Mayer H.; *Bainitic-austenitic cast iron with spheroidal graphite-Engineers materials for the needs today and tomorrow*. Sulzer Technical Review, pp. 32-38, February, 1986.
2. Diez Cicero, C. J.; L. Goyos Pérez y Ordoñez Hernández U. *El índice de endurecimiento en las fundiciones nodulares austemperadas*. Memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana, Septiembre, de 1997.
3. Diez Cicero, C. J.; Figueroa Hernández, C. R.; Ordoñez Hernández, U.; Fernández

- López, G. R.; Mondelo García, F. *Influencia de los factores microestructurales en el desgaste por rodadura de contacto*. Ingeniería Mecánica, ISPJAE, Ciudad de la Habana. Aceptado para publicar Julio 2008.
4. Farrar Don, Reimer (Corporation Norwich, Kansas): *Applications for austempered ductile iron castings. 2002 World Conference on ADI Paper Template*.
 5. Figueroa, C.; U. Ordóñez; R. Rivero, D. Moreno; Y. Rodríguez; M. Jacas, M. Rodríguez y J. T. Nóbrega de Medeiros: *Influencia del nódulo de grafito en la rotura por fatiga de contacto de una fundición nodular*. Ingeniería Mecánica, ISPJAE. Ciudad de La Habana, septiembre, pp 73-78. 2005.
 6. Ishihara, Y. & E. Nakano: *Magnetic properties of austempered ductile iron*. Imono. 59, pp. 396-401, July 1987.
 7. Rundman, K.; T. Rouns; W. Dubensky & D. J. Moore: *Structure and properties of austempered ductile cast iron*. Proceeding, 2nd International Conference on Austemper Ductile Iron, Ann Arbor, MI, pp. 157-69, USA, March 17-19,1986.
 8. Rundman, K. B.; D. J. Moore, K. I. Mayrynen; W. I. Dubensky & T. N Rouns: *The microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron*. *Heat-Treating* 5, pp.79-95, February, 1988.
 9. Salvande, J. y R. Domarco: *Estudio de la fatiga de contacto de la fundición nodular*. Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, pp. 471- 427, agosto del 2000.
 10. Shibutani, S. *et. al: Embrittlement of austempered spheroidal graphite cast iron*. International Journal of Cast Metals Research, pp. 579-585, 1999.

Influence of the microstructure factors in the sliding wear resistance of austempered cast ductile iron.

Abstract:

A study about the influence of the graphite nodules quantity and some heat treatment parameters in the characteristic of cast ductile iron is presented. Experimental investigation of wear resistance by sliding is applied to specimens tested of austempered ductile irons using a test machine based in the disc- plate system. Statistical analysis about the influence of the graphite nodule quantity in the wear resistance properties, so as well as, the causes of this behaviour taking into account the graphite nodule count and some heat treatment variables is done.

Key words: austempered ductile iron, graphite nodules, wear resistance, sliding