

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR ALEADA CON COBRE, AUSTEMPERADA A 300°C

HORACIO SIERRA

Escuela de Ingeniería de Materiales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

JUAN VÉLEZ

Escuela de Ingeniería de Materiales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

CLARA HERRERA

Escuela de Ingeniería de Materiales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Recibido para revisar 24 de Mayo de 2002, aceptado 30 de Noviembre de 2002, versión final 12 de Diciembre de 2002.

RESUMEN: Fundición nodular aleada con cobre y no aleada fue austemperada a 300°C durante diferentes tiempos luego de austenizarse a 925°C por dos horas. Los cambios microestructurales fueron evaluados mediante la medición de dureza y metalografía cuantitativa. De los resultados se desprende que la dureza después de austemperar las diferentes fundiciones no presenta variaciones significativas. En cuanto a resistencia a la abrasión, las fundiciones aleadas con cobre presentan mejor comportamiento que las no aleadas pero a su vez, presentan una resistencia inferior al impacto, siendo ésta superior a la establecida por la norma ASTM A 897M.

PALABRAS CLAVES: Fundición Nodular, Austemperado, Resistencia a la Abrasión y Resistencia al impacto.

ABSTRACT: Unalloyed and alloyed Ductile irons containing 0,8%Cu and 1,25%Cu were austempered at 300°C during different times after being austenitized at 925°C for two hours. The changes on microstructure were evaluated through hardness measures and quantitative metallography. From the obtained results, it can be seen that no significant changes of hardness after austempering the studied irons were found. The copper - alloyed iron showed higher abrasion resistance and lower impact resistance when compared to the unalloyed one. Nevertheless, the impact resistance of the unalloyed material was above the minimum value specified by the ASTM A 897M standard.

KEYWORDS: Austempered Ductile Iron, Copper Alloyed, Abrasion Resistance, Impact Resistance.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la fundición nodular ha venido en continuo crecimiento desde su aparición en 1948, debido a su relativo bajo costo, excelentes propiedades mecánicas y a la posibilidad de obtener una amplia gama de propiedades mecánicas mediante la aplicación de tratamientos térmicos que transforman la microestructura del material. Adicionalmente, la

adicción moderada de elementos tales como: níquel, cobre, manganeso, cromo, estaño, entre otros, ha permitido el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la fundición nodular.

También se han generado fundiciones nodulares de alta aleación que tienen aplicación en componentes de maquinaria sometidos a condiciones severas de trabajo: alto impacto, abrasión y alta temperatura.

En lo referente a las transformaciones microestructurales, el tratamiento denominado

"austemperado" es el desarrollo más reciente y ha sido objeto de numerosas investigaciones. Los buenos resultados encontrados en la década del 80 llevaron a algunos autores a referirse a la fundición nodular autemperada (FNA) como un nuevo material (*Voigt and Loper, 1984*). Éste ha encontrado numerosas aplicaciones tales como: fabricación de engranajes, cigüeñales, piezas sometidas a desgaste abrasivo o piezas que requieren alta resistencia y buena tenacidad.

El tratamiento térmico de austemperado permite obtener una amplia gama de propiedades mecánicas en la fundición nodular. Durante la transformación, la austenita se descompone en una mezcla formada por austenita rica en carbono y ferrita bainítica (o ferrita + carburos) en proporciones que dependen de la temperatura y del tiempo de austemperado. El adecuado control de esta mezcla de fases permitirá obtener relaciones apropiadas entre la resistencia al desgaste, la dureza y la tenacidad, propiedades importantes en la evaluación del desempeño de elementos de máquinas.

Debido a las mejoras que produce el cobre en las propiedades mecánicas de la fundición nodular en estado de colada, al propiciar la obtención de matriz perlítica sin formación de carburos masivos, este elemento tiende a ser ampliamente utilizado por los fundidores siendo pertinente establecer el comportamiento a la abrasión de la fundición nodular aleada con cobre y sometida a diferentes tratamientos térmicos, específicamente, austemperada a diferentes temperaturas. Cuando ocurre la transformación de la austenita en ferrita, este elemento queda embebido en la ferrita como pequeñas partículas de cobre libre y en las intercaras de la ferrita-austenita tal como ha sido puesto en evidencia por (*Khalid and Edmonds, 1993*) en las transformaciones ferrito-perlíticas de aceros. De acuerdo a lo expuesto por Bain y Pastón (*Bain and Pastón, 1966*), la ferrita no disuelve cobre sustitucionalmente cuando está presente en cantidades superiores a 0,4% y, en consecuencia, se producirá la precipitación propuesta por Khalid. De otro lado, la austenita cuando no contiene carbono puede disolver hasta 9,5 %Cu (*ASM Metals Handbook*). Al incrementar el contenido de carbono en la austenita, se baja la solubilidad de cobre en ella. Así, la austenita con 1,7% de carbono, aún puede admitir cobre hasta un 6%. Estos rasgos

específicos permiten prever que la adición de cobre modificará el comportamiento a la resistencia a la abrasión de la fundición nodular austemperada, compuesta de ambas fases: ferrita bainítica más austenita rica en carbono.

El desgaste abrasivo consiste en la remoción o desplazamiento del material de una superficie debido al contacto con otra superficie en movimiento relativo, con asperezas duras de la misma, o con partículas duras desprendidas, tal como lo han expuesto (*Yust, 1985*), Joseph Tylczak (*ASM Handbook*), y (*Khruschov, 1974*). Durante el desgaste abrasivo ocurren fenómenos de corte y de deformación plástica acentuada de la superficie. Bajo un conjunto de condiciones, el desplazamiento plástico puede ocurrir sin remoción de material (arado de la superficie); en el otro extremo, la sección completa del surco podría ser removida. En la Figura 1 se ilustran los mecanismos que pueden estar presentes en el proceso de desgaste abrasivo.

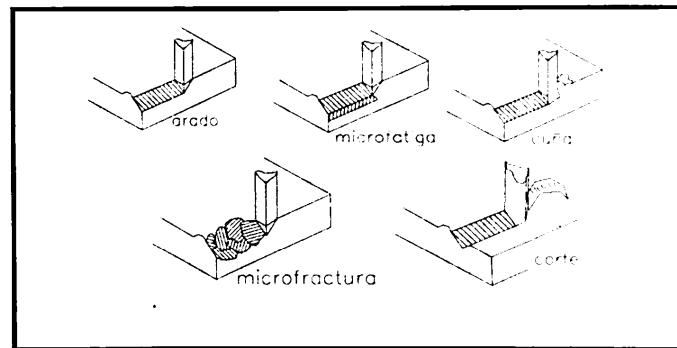


Figura 1. Cinco mecanismos de desgaste abrasivo (*ASM Handbook*).

En la Figura 2 se presenta una clasificación del desgaste abrasivo según los tipos de contacto involucrados, los cuales incluyen el de dos cuerpos (el abrasivo se desliza sobre la superficie), y tres cuerpos (cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies).

El desgaste abrasivo puede ser clasificado utilizando el nivel de esfuerzo presente entre las partículas de abrasivo y el material. Según este criterio, tres tipos de desgaste se pueden establecer, a saber: abrasión de bajo esfuerzo, abrasión de alto esfuerzo y abrasión por socavado.

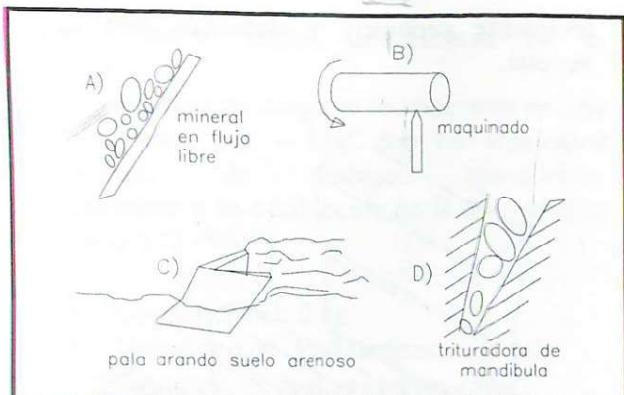


Figura 2. Tipos de contacto durante el desgaste abrasivo. A) dos cuerpos abiertos. B) dos cuerpos cerrados, C) tres cuerpos abiertos, y D) tres cuerpos cerrados. (ASM, Handbook)

La abrasión de bajo esfuerzo ocurre cuando los esfuerzos sobre las partículas de abrasivo no exceden su límite de rotura, esta condición se presenta típicamente durante el movimiento de tierra húmeda. La abrasión de alto esfuerzo ocurre cuando las dos superficies aprisionan las partículas de abrasivo con suficiente fuerza para romperla, y por último el desgaste por socavado representa una situación en la que piedras u otro abrasivo corta la superficie con suficiente fuerza para producir en ella estrías profundas.

La respuesta del material a las solicitudes generadas durante el desgaste abrasivo depende de sus propiedades mecánicas. La resistencia de una matriz metálica a la penetración y/o corte por partículas duras en contacto con la superficie aumenta con la dureza. Una matriz metálica de alta dureza presenta mayor oposición a la penetración y al corte al contacto con partículas duras comparativamente con matrices de media dureza, sin embargo, su desempeño en la práctica se ve comprometido debido a su fragilidad.

En (Khruschov, 1974) se encontró una relación lineal entre la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo de diferentes metales puros. Un comportamiento semejante fue encontrado para aceros tratados térmicamente.

Mecanismo de abrasión en fundición nodular austemperada.

El mecanismo y el comportamiento frente al desgaste de la fundición nodular austemperada

pueden ser afectados por numerosos factores (Owhadi et al, 1998):

- El endurecimiento por deformación de la austenita estabilizada sometida a esfuerzos y ubicada en la capa superficial.
- La transformación martensítica de la austenita estabilizada debido a la deformación superficial. Esta transformación depende del contenido de carbono de la austenita, a mayor cantidad, mayor estabilidad de la austenita. La austenita que no alcanza el contenido de carbono necesario para su estabilización, fácilmente transforma a martensita.
- La presencia de carburos formados durante la solidificación. Su forma, tamaño y distribución son rasgos importantes a considerar en el proceso de desgaste.
- La dureza de la fundición, la cual depende de las temperaturas de austenización y de austemperado, la composición química y la microestructura. Por ejemplo, la microestructura obtenida a baja temperatura, llamada fundición nodular bainítica austemperada, presenta mayor dureza y a su vez mayor resistencia al desgaste que la bainita de alta temperatura, llamada fundición nodular austemperada, debido al refinamiento microestructural y a la precipitación de carburos Epsilon que sirven de obstáculo al movimiento de dislocaciones.

Modelo de desgaste.

Establecer un modelo único de desgaste para la fundición nodular austemperada sería bastante atrevido pues como se indicó arriba son muchos los factores que influyen. No obstante algunos rasgos generales pueden presentarse:

- El grafito es expulsado fácilmente y en consecuencia, deja los bordes del orificio expuestos a la acción abrasiva, la cual los deforma o arranca.
- El tipo de microestructura alrededor del grafito es fundamental en prevenir agrietamientos tal como lo hace la bainita.
- La presencia de austenita no enriquecida en carbono en la región intercelular, puede

- conducir a fenómenos de fractura del material.
- La cantidad de austenita de alto carbono que mediante deformación logra transformar a martensita, la cual genera esfuerzos de tensión en las placas ferríticas adyacentes debido al crecimiento volumétrico.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

Para obtener las diferentes muestras utilizadas en este estudio, se vaciaron bloques en "Y" de fundición nodular con diferentes adiciones de cobre (norma ASTM A536 - 84). Los bloques fueron producidos utilizando un horno eléctrico de inducción. Su composición se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del material utilizado para la investigación, porcentaje en peso.

%C	%Si	%Cu
3.6	2.8	0
3.6	2.8	0.8
3.6	2.8	1.25

Para los ensayos de dureza y las observaciones metalográficas se utilizaron probetas de dimensiones $20 \times 10 \times 10 \text{ mm}$, las cuales se sacaron de la zona central de los bloques en "Y", como se ilustra en la Figura 3.

Las probetas para los ensayos de impacto fueron extraídas de las barras rectangulares iniciales, éstas se rectificaron y luego se cortaron para obtener las dimensiones finales $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$, tal como se especifica en la norma ASTM 327 - 91.

Los ensayos de desgaste se realizaron en barras cilíndricas de diámetro 6 mm y longitud de 15 mm , las cuales se confeccionaron antes del tratamiento térmico para evitar posibles cambios en la microestructura debido a los procesos de corte.

La austenización se realizó por dos horas, en un horno tipo mufla, a 920°C ($\pm 10^\circ\text{C}$). Para evitar la descarburación durante la austenización, las muestras fueron colocadas dentro de un

recipiente cerámico y cubiertas con carbón vegetal.

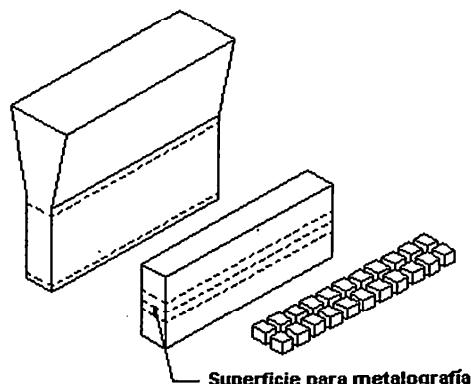


Figura 3. Esquema del bloque en "Y" y la obtención de las muestras para dureza y metalografía.

El tratamiento de austemperado se efectuó en un baño de sales tipo AS-140, en crisol adaptado a una mufla, a la temperatura de 300°C ($\pm 5^\circ\text{C}$). Los tiempos seleccionados, para las probetas de impacto y de desgaste, fueron: para la composición de 0% Cu se utilizaron tiempos de 45, 60, 90 y 120 minutos y para las demás composiciones los tiempos utilizados fueron de 30, 45, 60 y 90 minutos. Una vez cumplido el tiempo de residencia, las muestras se enfriaron en agua agitada manualmente.

Para monitorear las transformaciones de la austenita en los diferentes tratamientos térmicos realizados se hicieron mediciones de dureza y metalografía.

Las muestras austemperadas fueron cortadas a la mitad y preparadas para observación metalográfica y medida de dureza. Se utilizó la escala Vickers con una carga de 62.5 kg y se realizaron un mínimo de 6 y un máximo de 8 medidas por muestra. Para la identificación microestructural, se utilizó un microscopio marca Olympus PME con capacidad hasta 2000 aumentos. Para el ataque químico se usaron los siguientes reactivos: Nital en concentraciones de 2% y 4% y Picral al 4%.

Los ensayos de impacto Charpy se realizaron según la norma ASTM A897M en probetas tipo A ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$). Para cada tiempo de austemperado, se ensayaron tres probetas de impacto a temperatura ambiente utilizando un martillo de 15 kg y los resultados de energía al

impacto fueron leídos directamente en la máquina.

Los ensayos de desgaste se realizaron en una máquina tipo "pin - lija" con las siguientes condiciones de trabajo, ajustándose cercanamente a lo establecido en la designación ASTM G 132 - 96.

- Carga normal: 2 kg
- Velocidad de deslizamiento: 1,4 m/s
- Distancia de deslizamiento: 13 m
- Banda abrasiva de grano AFS 80

El ensayo se realizó después de los tratamientos térmicos utilizando tres probetas para cada tiempo de austemperado, mediante el siguiente procedimiento.

- Realización de un asentamiento, que consiste en pasar la probeta por un lijado ya usado en la máquina, con esto se puede dar paralelismo a las probetas y eliminar óxidos.
- Limpieza de las probetas en un limpiador ultrasónico que contiene tetracloruro de carbono, con este procedimiento las probetas se limpian de grasas, óxidos y residuos y finalmente se secan con aire caliente o frío.
- Medición del peso inicial de la probeta en una balanza electrónica con un poder de resolución de 0,0001 gr.
- Ensayo de desgaste, con una banda abrasiva nueva se procede a realizar este ensayo, con las condiciones ya dadas.
- Finalizado el ensayo de desgaste se repite el procedimiento de limpieza y luego se realiza la medición del peso final.
- Los resultados de los ensayos de desgaste se dan en términos de la pérdida de masa por unidad de distancia deslizada.

3. RESULTADOS.

3.1 Dureza

En la Figura 4 se presenta la variación de la dureza con respecto al tiempo de austemperado a 300°C para las diferentes fundiciones de la Tabla 1 y para diferentes tiempos de sostenimiento a dicha temperatura.

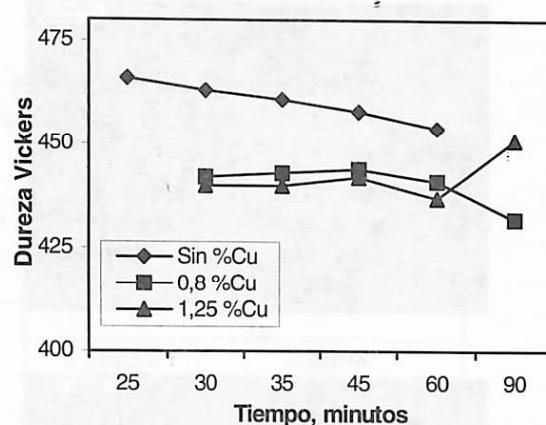
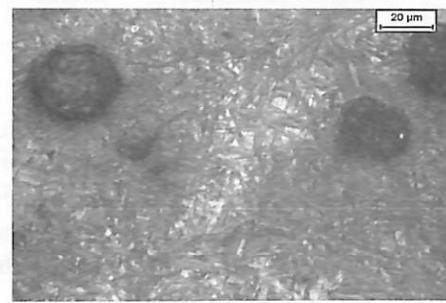


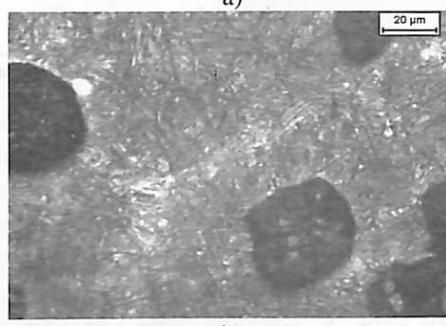
Figura 4. Variación de la dureza con el tiempo de austemperado para las diferentes fundiciones nodulares

3.2 Transformación microestructural

En las Figuras 5 y 6 se presentan algunas de las microestructuras obtenidas en las probetas de impacto y de desgaste para diferentes tiempos de sostenimiento para fundición nodular no aleada y fundición nodular con 0,8% Cu, respectivamente.



a)



b)

Figura 5. Microestructuras de fundición nodular no aleada y austemperada a 300°C durante 45(a) y 120 min (b). Ataque Nital 2%. a) Martensita, ferrita bainítica y austenita de alto carbono; b) ferrita bainítica y austenita de alto carbono más carburos.

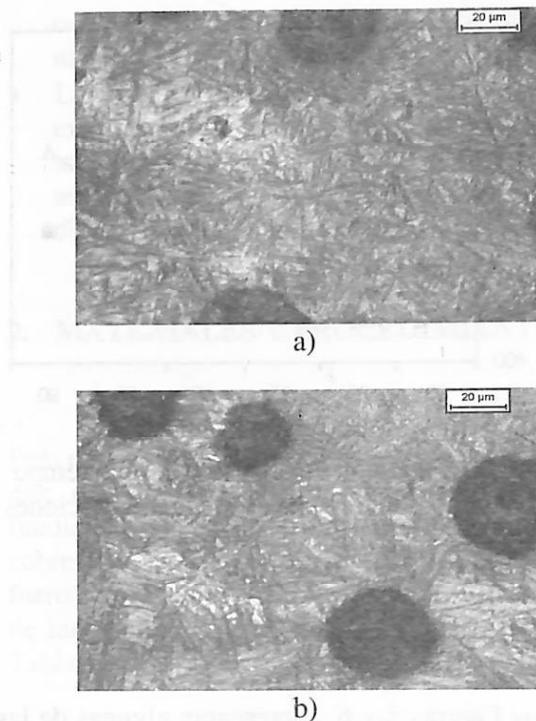


Figura 6. Microestructuras de fundición nodular aleada con 0,8 %Cu y austemperada a 300°C durante 30(a) y 90 min (b). a) Martensita, ferrita bainítica y austenita de alto carbono; b) bainita y austenita de alto carbono más carburos.

3.3 Impacto y desgaste

En las Figuras 7 y 8 se presentan los resultados de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy sin entalla y de resistencia al desgaste, respectivamente, para diferentes muestras austemperadas a 300°C durante diversos tiempos.

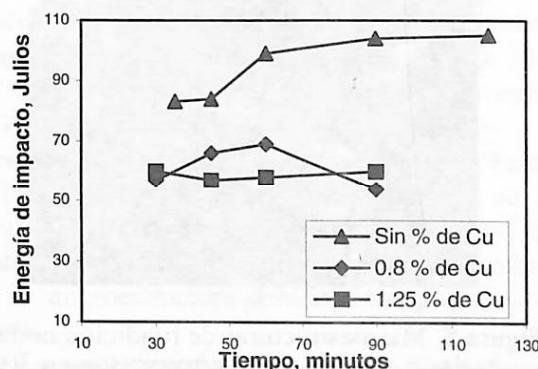


Figura 7. Variación de la energía absorbida en impacto Charpy sin entalla con el tiempo de austemperado para fundiciones nodulares con y sin cobre.

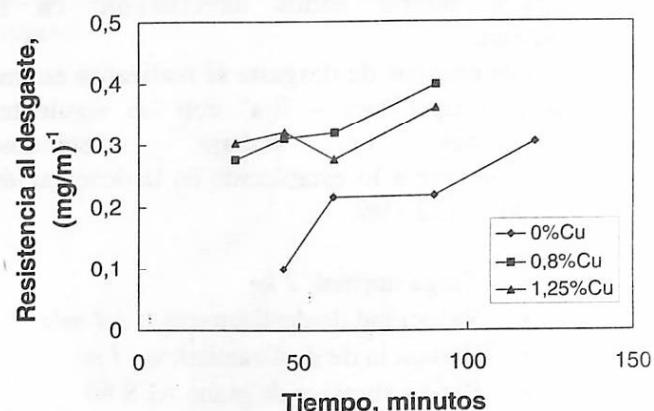


Figura 8. Variación de la resistencia al desgaste

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Dureza y evaluación de la transformación

En la Tabla 2 se presentan los resultados de dureza, resistencia al impacto y resistencia al desgaste abrasivo para diferentes muestras austemperadas a 300°C durante diversos tiempos, donde se aprecia el efecto del cobre sobre la dureza de la fundición nodular austemperada a 300°C y tiempos superiores a 50 min. (3000 seg.) no es muy significativo, siendo las diferencias del orden de 5%.

Para tiempos de 45 min. de austemperado a 300 °C, la microestructura de la fundición nodular sin alear está compuesta de ferrita bainítica más austenita de alto carbono y martensita, la cual se ubica en las regiones intercelulares, presentando un cierto grado de interconexión, tal como se ilustra en la Figura 5a. Para tiempos superiores a 50 min., la microestructura está compuesta de ferrita bainítica, austenita de alto carbono y carburos de hierro, Figura 5b.

Tabla 2. Variación de la dureza, resistencia al impacto y resistencia al desgaste abrasivo para las diferentes composiciones con el tiempo de austemperado

A) 0% Cu

T _A , min	Dureza, 62.5HV	Energía al impacto, J	Pérdida de masa promedio, mg	Desgaste, mg/m	Resistencia al desgaste, (mg/m) ⁻¹
25	466	57			
35	461	83			
45	458	84	130,3107	10,0239	0,0998
60	454	99	60	4,6154	0,2167
90		104	59,2539	4,558	0,2194
120		105	42,6916	3,284	0,3045

B) 0.80% Cu

T _A , min	Dureza, 62.5HV	Energía al impacto, J	Pérdida de masa promedio, mg	Desgaste, mg/m	Resistencia al desgaste, (mg/m) ⁻¹
30	442	57	46,9534	3,6118	0,2769
45	444	66	41,7982	3,2152	0,311
60	441	69	40,6297	3,1254	0,32
90	432	54	32,6089	2,5084	0,3987

C) 1.25% Cu

T _A , min	Dureza, 62.5HV	Energía al impacto, J	Pérdida de masa promedio, mg	Desgaste, mg/m	Resistencia al desgaste, (mg/m) ⁻¹
30	440	60	42,8311	3,2947	0,3035
45	442	57	40,519	3,1168	0,3208
60	437	58	46,9777	3,6137	0,2767
90	451	60	36,0416	2,7724	0,3607

La presencia de carburos de hierro y un incremento moderado de dureza en el tiempo de residencia a 300 °C son reportados en la literatura. Estos carburos son imposibles de poner en evidencia mediante microscopio óptico (Voigt, 1984).

Para las fundiciones nodulares con 0,8 y 1,25 %Cu austemperadas a 300 °C durante 30 min., la microestructura está compuesta de ferrita bainítica, austenita de alto carbono y martensita, esta última ubicada en zonas intercelulares pero aisladas, (Figura 6a). Tiempos superiores a una hora producen una microestructura de ferrita bainítica, austenita de alto carbono y carburos, Figura 6b.

4.2. Impacto y desgaste

Le energía absorbida al impacto para la fundición nodular no aleada aumenta con el tiempo de austemperado y se estabiliza cuando su microestructura no contiene martensita intercelular con alguna interconexión, lo cual se da para tiempos superiores a los 3600 segundos (1 hora). El máximo valor obtenido en probetas no entalladas fue cercano a los 100 julios excediendo en un 50% la exigencia de la especificación ASTM A 877-90

Las fundiciones aleadas con 0,8 y 1,25% Cu austemperadas a 300 °C entre 30 y 90 minutos,

satisfacen los requerimientos de las normas ASTM A 877-90 Para este intervalo de tiempo, la energía absorbida permanece en el rango de unos 60 a 65 julios.

La fundición nodular no aleada y austemperada a 300 °C en todo el intervalo de tiempo estudiado, a pesar de presentar una mayor dureza, presenta una menor resistencia al desgaste en comparación con las fundiciones nodulares aleadas con cobre. Este comportamiento parece ser debido a que durante el proceso de abrasión, las zonas intercelulares compuestas de martensita, debido a los esfuerzos inherentes al fenómeno de abrasión, se fracturan y permiten el arranque de material en pequeños bloques, acelerando el proceso abrasivo.

Cuando la microestructura está compuesta de ferrita bainítica, austenita enriquecida en carbono y carburos de hierro ($ab + \gamma_{A,C} + Fe_3C$), el proceso de pérdida de material ocurre homogéneamente y en consecuencia, en forma más pausada que en la microestructura anterior. También, se observó para ambas microestructuras como los nódulos de grafito al arrancarse permiten la erosión de los bordes de las cavidades que ocupaban, generando pérdida de matriz metálica.

Las fundiciones con 0,8 y 1,25% Cu presentan un comportamiento análogo debido a que su microestructura es bastante homogénea, aún para tiempos de 30 min. donde la microestructura contiene martensita en zonas intercelulares pero en forma aislada.

Las fundiciones con contenidos de cobre entre 0,8 y 1,25 % presentan una mayor resistencia al desgaste que las fundiciones nodulares no aleadas cuando se austemperan a 300 °C. Este comportamiento puede ser debido a varios factores: un refinamiento microestructural, un endurecimiento de la austenita de alto carbono por solución sólida sustitucional de cobre, un endurecimiento de la ferrita bainítica debido a los pequeños precipitados de cobre, reportados en (Khalid y Edmonds, 1993), los cuales se ubican tanto al interior del listón ferrítico como en sus intercaras. En los carburos ocurre una precipitación similar de estas partículas de cobre. Precipitados que también estarían presentes en las zonas martensíticas. Todos estos factores, actúan como barreras para el movimiento de las dislocaciones, inhibiendo, moderadamente, la deformación plástica y evitando el

desprendimiento de partículas al mejorar la resistencia.

CONCLUSIONES

- Microestructuras de ferrita bainítica, austenita estabilizada y martensita al límite de celda, obtenidas como producto de austemperado a 300°C durante tiempos inferiores al inicio de la ventana, presentan una baja resistencia al desgaste a pesar de tener alta dureza. Asimismo, presentan baja resistencia al impacto.
- Las fundiciones nodulares aleadas con cobre entre 0,8 y 1,25 % presentan menor resistencia al impacto para tiempos entre 30 y 90 min. que las no aleadas y austemperadas en condiciones similares. Sin embargo, estos valores satisfacen la norma ASTM A 877-90.
- Adiciones de cobre entre 0,8 y 1,25 % no incrementan significativamente la dureza de la fundición nodular austemperada a 300°C.
- Adiciones de cobre entre 0,8 y 1,25 % mejoran la resistencia a la abrasión de la fundición nodular austemperada a 300°C con respecto a la no aleada, duplicando su resistencia.
- El desprendimiento del grafito acelera el proceso abrasivo al dejar expuestos los bordes de la cavidad que ocupaba, generando pérdida de matriz metálica.

REFERENCIAS

- Voigt. R. and Loper. C. *Austempered Ductile Cast Irons. Influence of Microstructure Control.* 3rd. International Symposium on Austempered Ductile Iron. Estocolmo, Sweeden. August, 1984.
- Khalid. F. and Edmonds. D. *A Transmission Electron Microscopy Study of Copper Precipitation in Cementite Phase of Hypereutectoid Alloy Steels.* Metallurgical Transactions, 1993.

- Bain E. and Paxton H. *Alloying Elements in Steel.*
ASM Metals Park. Ohio, 1966.
- A.S.M. Metals Handbook. Vol 18. 9^a Edición.
- Yust, C. Tribology and Wear. *International Metals Reviews.* 3, (30), 141-154, 1985.
- ASM Handbook: Friction, *Lubrication and Wear Technology.* vol. 18. ASM International. 1992.
- Khrushev. M. Principles of Abrasive Wear.
Wear. Elsevier Sequoia. Netherlands. 28, 69-88
1974
- Owhadi A. et al. Wear Behavior of 1.5%Mn Austempered Ductile Iron. *Materials Science and Technology.* March, (14). 245 – 250, 1998.
- American Society For Testing of Metals (ASTM).
ASTM A536-84, Standard Specification for Ductile Iron Castings. Annual Book of ASTM Standards. Vol 2
- American Society for Testing of Metals (ASTM).
ASTM A327-91, Standard Test Methods for Impact Testing of Cast Irons. Annual Book of ASTM Standards, v. 01.02, 5133 – 135, 1993.
- ASTM G132 - 96 Standard Test Method for Pin Abrasion Testing.
- American Society for Testing of Metals (ASTM).
ASTM A897M-90, Standard Specification Austempered Ductile Iron Castings [Metric]. Annual Book of ASTM Standards, v. 01.02, 552 – 557, 1994.