

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PIEZA EN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE FUNDICIONES ESFEROIDALES CON DISTINTAS MICROESTRUCTURAS

A. Basso, S. Laino, J. Sikora y R. C. Dommarco

División Metalurgia, INTEMA - CONICET
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Mar del Plata
Juan B. Justo 4302, B7608FDQ Mar del Plata, Argentina.

E-mail: abasso@fi.mdp.edu.ar

RESUMEN

Como toda propiedad mecánica, la resistencia al desgaste está íntimamente relacionada con la microestructura del material. En particular, la resistencia a la abrasión de un material depende de su dureza, de la capacidad de deformación y del tribosistema o severidad de la sollicitación.

La resistencia a la abrasión de las fundiciones de hierro con grafito esferoidal (FE) está determinada principalmente por el tipo, cantidades, distribución y morfologías de las fases presentes en su microestructura, lo que depende de la composición química y velocidad de solidificación. Un aumento en el tamaño de pieza colada (disminución de la velocidad de solidificación) trae aparejado un aumento en el tamaño de las zonas últimas en solidificar (zonas LTF) y a la vez se presenta menor cantidad de nódulos de mayor tamaño (disminución del conteo nodular). Por otro lado, la performance de las FE bajo desgaste abrasivo ha sido mejorada marcadamente con la presencia de carburos en su microestructura.

En el presente trabajo se evaluó la influencia del tamaño de pieza sobre la resistencia a la abrasión y al impacto de FE. Se colaron bloques "Y" de 12.5, 25, 50 y 75 mm de espesor, y se realizaron ensayos mecánicos y de desgaste. Se obtuvieron estructuras con carburos mediante la aleación con Cr, y distintos tipos de matriz: perlíticas, martensíticas y ausferríticas. Las distintas velocidades de solidificación, producidas por la variación del tamaño de pieza, promovieron diferentes características microestructurales y, consecuentemente, distintas propiedades.

Tópico 2: Materiales metálicos

Palabras clave: Fundiciones esferoidales, propiedades tribológicas, tamaño de pieza, microestructura.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del grupo de materiales metálicos más utilizados en la industria, las fundiciones de hierro ocupan un lugar muy importante, debido al amplio abanico de propiedades que se pueden obtener dependiendo del tipo de fundición. Para aplicaciones que requieren elevada resistencia al desgaste, se utilizan las fundiciones blancas, las cuales se caracterizan por contener en su microestructura un elevado contenido de carburos de muy alta dureza (entre 800 y 3000 HV, dependiendo del tipo de carburo), los cuales le confieren una elevada resistencia a la abrasión. Sin embargo, las fundiciones blancas presentan muy baja resistencia al impacto y maquinabilidad. Por otro lado, las fundiciones esferoidales (FE) tienen un amplio campo de aplicación en la industria debido a que presentan una buena combinación de propiedades mecánicas, sumado a una buena resistencia al desgaste. En particular, las FE austemperizadas (ADI), han ganado importancia desde hace tiempo por su alta

resistencia a la tracción y tenacidad (más de 1600MPa y más de 100 J para los grados 5 y 1, respectivamente, de acuerdo con la ASTM A 897M-06), sustituyendo a los aceros forjados en muchas aplicaciones. Las ADI también poseen buenas propiedades al desgaste por fatiga de contacto por rodadura, adhesión y abrasión [1-3]. En los últimos años, se ha investigado una nueva variante de FE, denominadas CADI (del inglés Carbodic ADI), las cuales son ADI que contienen carburos dispersos en la matriz ausferrítica [4,5]. La presencia de carburos incrementa la dureza con respecto a las ADI convencionales, conduciendo a un incremento en la resistencia a la abrasión bajo condiciones de baja presión o severidad [6].

La resistencia a la abrasión de las FE está determinada principalmente por el tipo, cantidades, distribución y morfologías de las fases presentes en su microestructura, lo que a su vez depende de la velocidad de solidificación. Se ha observado que a medida que disminuye la velocidad de solidificación se presenta menor cantidad de nódulos de mayor tamaño (disminución del conteo nodular) y aumenta el tamaño de las inclusiones no metálicas ubicadas en las zonas LTF. Trabajos previos [7] mostraron que en FE con elevados conteos nodulares (superiores a 300 nod./mm²), la resistencia a la abrasión en laboratorio (ASTM G65) disminuye a medida que se incrementa el conteo nodular. Por otro lado, las CADI han mostrado que a medida que se incrementa la velocidad de enfriamiento, aumenta la cantidad de carburos libres produciendo un incremento en la resistencia a la abrasión [5].

Debido a la influencia mostrada por la estructura de solidificación de las FE sobre sus propiedades mecánicas y de desgaste, en el presente trabajo se evaluó la influencia del tamaño de pieza (velocidad de solidificación, características de la estructura de solidificación, distribución de zonas LTF, etc.) sobre las propiedades mecánicas y al desgaste de FE con distintas microestructuras. En particular, se evaluó la resistencia a la abrasión y al impacto de FE que poseen carburos en su microestructura, con distintos tipos de matrices: perlíticas, martensíticas y ausferríticas (CADI).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material utilizado se obtuvo a partir de una colada de fundición esferoidal de 100 Kg realizada en la firma Titania S.A. (Campana – Prov. Bs As), siguiendo prácticas convencionales de fusión y colada. El material se coló en forma de bloques “Y” de 12.5, 25, 50 y 75 mm de espesor (norma ASTM A897M), y su composición química se determinó empleando un espectrómetro de emisión óptica con excitación por chispa, marca Baird DV6.

Se evaluaron FE con carburos con 4 matrices metálicas diferentes: 100% perlítica, 100% martensítica y 2 ausferríticas (CADI), austemperadas a diferentes temperaturas. Los carburos fueron obtenidos mediante la aleación con cromo (elemento formador de carburos). La matriz completamente perlítica se obtuvo en la condición bruto de colada (probetas denominadas AS-CAST). La matriz martensítica se obtuvo a través de un tratamiento de temple y revenido (probetas denominadas TyR). El tratamiento de temple consistió en un austenizado a 910 °C durante 2 horas seguido de un enfriamiento en agua. El revenido fue realizado a 250 °C durante 1 hora. Las 2 estructuras ausferríticas (que produjeron las 2 variantes de CADI), se obtuvieron a partir de un tratamiento que consistió en un austenizado a 910°C durante 2 horas y luego un austemperizado en baño de sales a 280 y 360 °C durante 90 min. (probetas denominadas CADI-280 y CADI-360).

Para la cuantificación de carburos en función del espesor de bloque “Y”, las probetas fueron atacadas con persulfato de amonio, con el fin de poder visualizarlos claramente respecto del resto de la microestructura. La cuantificación se realizó en estado bruto de colada y posterior a los tratamientos térmicos, con la finalidad de evaluar la disolución de los carburos durante la etapa de austenizado. Por otro lado, se realizó una caracterización química de los carburos mediante EDS, para los distintos espesores de bloques “Y” estudiados. Los valores reportados corresponden al promedio de 3 mediciones realizadas sobre carburos ubicados en distintos sectores de las muestras.

Los ensayos de impacto (tipo Charpy) se llevaron a cabo de acuerdo con la norma ASTM E23 utilizando probetas sin entalla, de dimensiones 10 x 10 x 55 mm, en un péndulo marca “Amsler” con una energía disponible de 300 Joules. Los valores de energía absorbida reportados para cada microestructura evaluada, surgieron del promedio de 4 ensayos. Los ensayos de dureza se efectuaron bajo la norma ASTM E10 utilizando la escala Brinell para todos los casos (bolilla de carburo de tungsteno de 2.5 mm y 1875 N de carga).

La resistencia al desgaste fue evaluada siguiendo la norma ASTM G65, utilizando el procedimiento A. En la Figura 1 se muestra un esquema de la máquina de ensayo. La Resistencia Relativa al Desgaste – E, fue obtenida mediante la relación entre el volumen perdido por el material de referencia (ΔV_R), en este caso probetas de acero SAE 1010 en estado recocido, y el volumen perdido por las probetas de FE (ΔV_S), de acuerdo a la Ecuación 1.

$$E = \frac{\Delta V_R}{\Delta V_S} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Con la finalidad de cuantificar la pérdida de material, se determinó el peso de las probetas antes y después de cada ensayo. La pérdida de peso fue posteriormente convertida en pérdida de volumen, empleando los valores de densidad determinados mediante bloques de dimensiones calibradas fabricados en cada una de las variantes de material estudiadas. Los valores de pérdida de volumen reportados, surgieron del promedio de los valores obtenidos de cuatro ensayos.

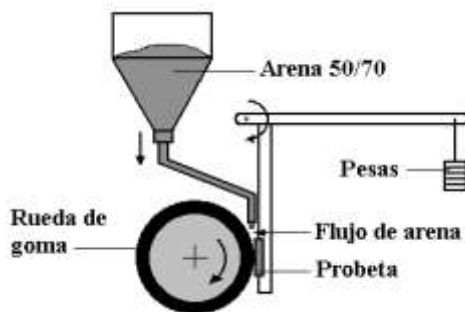


Figura 1. Representación esquemática de la máquina de ensayo de arena seca / rueda de goma (ASTM G 65).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Colada y microestructuras obtenidas para los distintos tamaños de pieza

Para los 4 espesores de bloques “Y” estudiados, la matriz presentó una microestructura completamente perlítica en estado bruto de colada, con una nodularidad superior al 90% en todos los casos, de acuerdo a la norma ASTM A247. Los conteos nodulares fueron de 320, 290, 140 y 80 nod/mm² para los bloques “Y” de 12.5, 25, 50 y 75 mm de espesor, respectivamente. La composición química de la colada se lista en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de la colada (% peso, balance Fe).

C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu	Cr	C.E.
3.3	2.4	0.4	0.016	0.015	0.026	1.2	2.0	4.1

En la Figura 2 se muestran imágenes obtenidas mediante SEM de las microestructuras en estado bruto de colada, correspondientes a los distintos espesores de bloques “Y”. Se pueden observar los

nódulos de grafito y los carburos libres (zonas grises oscuras) inmersos en una matriz perlítica. En la Tabla 2 se lista el contenido de carburos en estado bruto de colada y luego de los tratamientos térmicos para los 4 espesores de bloques “Y” estudiados.

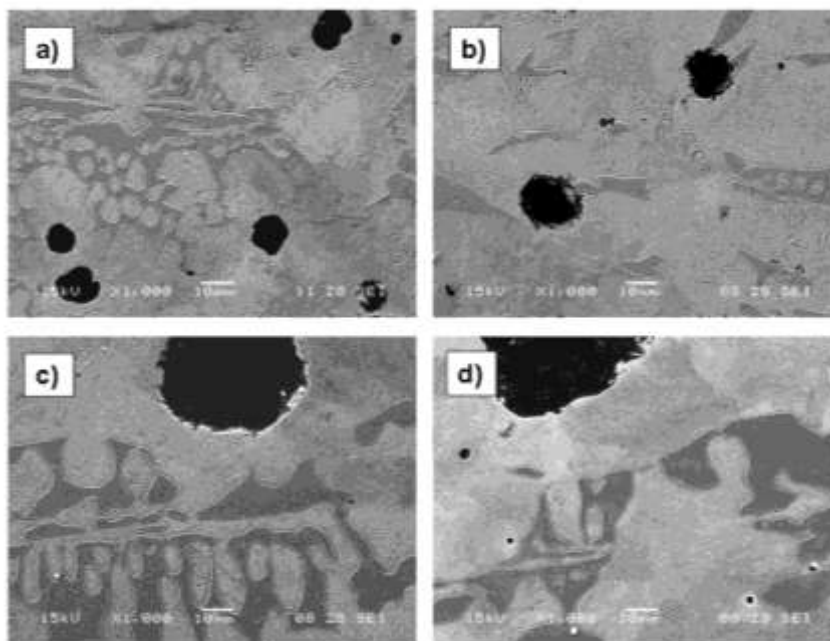


Figura 2. Imágenes SEM de las microestructuras para distintos espesores en estado bruto de colada, a) 12.5 mm, b) 25 mm, c) 50 mm y d) 75 mm.

Tabla 2. Porcentaje de carburos en estructuras as-cast y con tratamiento térmico.

Espesor de bloque-Y - mm	Estado	
	Bruto de colada	Con Tratamiento
12.5	26	22
25.0	22	19
50.0	19	17
75.0	14	14

Por un lado, se observa que a medida que aumenta el espesor, la cantidad de carburos disminuye, debido a la menor velocidad de solidificación. Por otro lado, la disolución de los carburos durante el tratamiento térmico también disminuye, debido a la mayor microsegregación, no registrándose este fenómeno en las muestras de de 75 mm de espesor. Como consecuencia de la microsegregación los carburos están más aleados a medida que la velocidad de solidificación disminuye (aumento del espesor de la pieza colada) [9]. Para verificar esto, se realizó el análisis químico semicuantitativo de los carburos, para los distintos espesores de bloque “Y”. El contenido de los elementos de aleación (en este caso cromo y manganeso) en los carburos se lista en la Tabla 3. En la Figura 3 se muestran las estructuras de los 4 espesores estudiados, después del ataque con persulfato de amonio. Se observa la morfología, distribución y cantidad, de los carburos (zonas blancas) en la microestructura. Para la aleación estudiada, a medida que aumenta el espesor del bloque “Y”, disminuye la cantidad de carburos y, a su vez, estos forman regiones cada vez más discontinuas y de mayor tamaño.

Tabla 3. Contenido de aleantes en los carburos, en función del espesor de bloque “Y”.

Espesor de bloque-Y - mm	Elemento (% peso)	
	Cromo	Manganeso
12.5	2.2	0.86
25.0	3.6	0.95
50.0	4.3	0.97
75.0	4.4	1.1

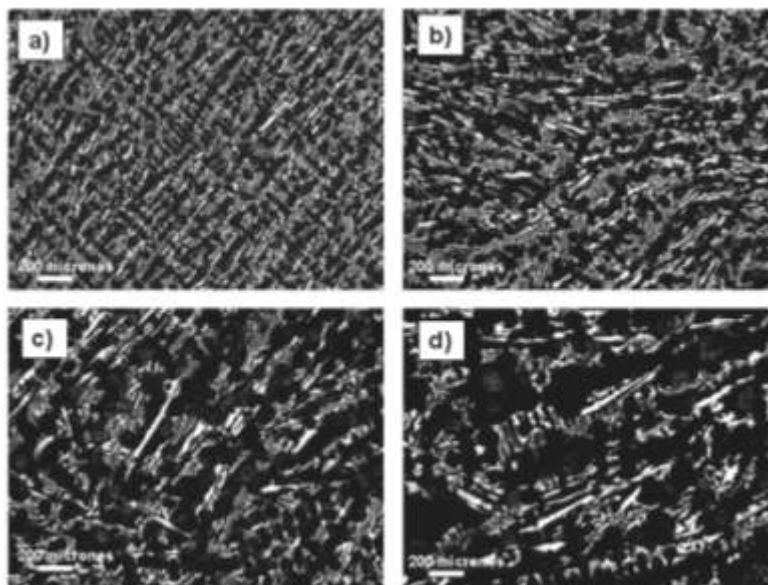


Figura 3. Morfología y distribución de carburos en función del espesor. Ataque persulfato de amonio.

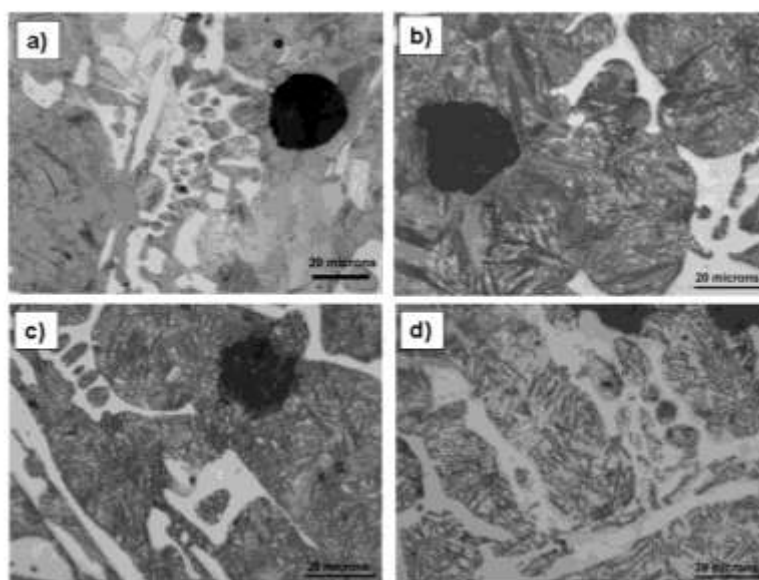


Figura 4. Microestructuras de la matriz en bloque “Y” de 25 mm , a) 100% perlítica, b) 100% martensítica, c) ausferrita a $T_a=280$ °C y d) ausferrita a $T_a=360$ °C.

En la figura 4 se muestran microfografías de las 4 microestructuras estudiadas, tomadas de bloques “Y” de 25 mm de espesor. En la figura 4-a se observa una microestructura completamente perlítica, correspondiente a la estructura en bruto de colada; la figura 4-b muestra una microestructura 100% martensítica correspondiente a las probetas templadas y revenidas; las figuras 4-c y 4-d, austemperadas a 280 y 360 °C respectivamente, muestran una matriz completamente ausferrítica.

3.2 Influencia del tamaño de pieza sobre las propiedades mecánicas y de desgaste

Ensayos de impacto y dureza

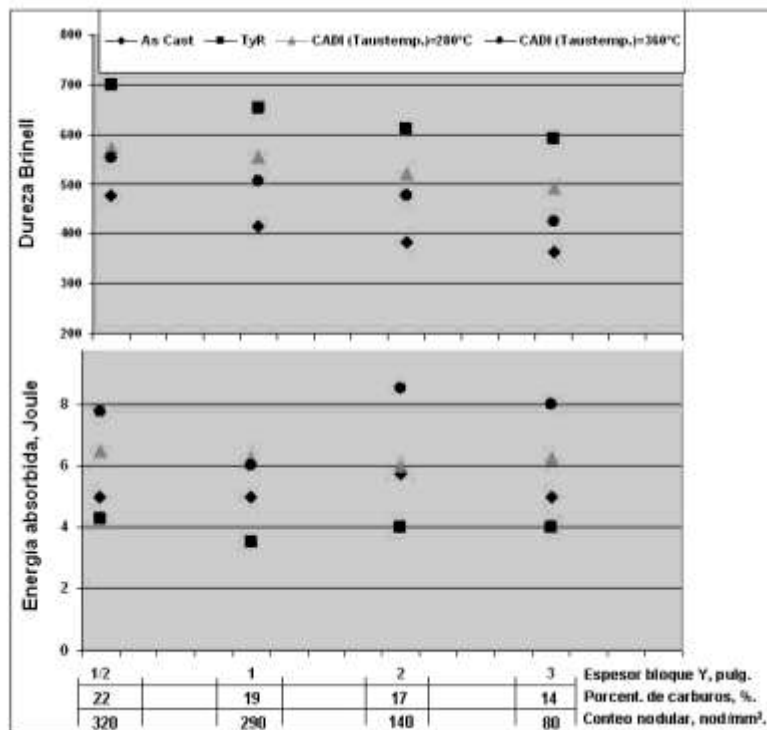


Figura 5. Energía absorbida en el ensayo Charpy y dureza en función del tamaño de pieza, para las distintas microestructuras estudiadas.

En la Figura 5 se muestran los resultados de los ensayos de impacto tipo Charpy con probeta sin entalla, en función del espesor de bloque “Y”, para las distintas microestructuras estudiadas. Se puede observar que, en general, la energía absorbida en el ensayo de impacto, se mantiene constante con el tamaño de pieza para cada microestructura, siendo las probetas CADI-360 las que mostraron los mayores valores de tenacidad al impacto para los distintos espesores. La ausferrita obtenida a $T_a=360$ °C, es la fase más tenaz de todas las estudiadas. Sin embargo, publicaciones anteriores realizadas por autores del presente trabajo [8], reportaron que ADIs austemperadas a temperaturas similares, mostraron mayores valores de energía absorbida para los mismos espesores de bloques “Y”, y que se produce un detrimento en las propiedades al impacto cuando se incrementa el tamaño de pieza colada. Esta diferencia en la tendencia de los resultados se atribuye a la presencia de los carburos libres en la estructura. En efecto, la presencia de esta fase frágil disminuye marcadamente la energía absorbida durante los ensayos de impacto, ya que provee un camino preferencial para la propagación de fisuras durante la fractura, enmascarando el efecto que puede tener el tamaño de pieza sobre dichas propiedades. En la misma figura se muestran los valores de dureza. Se puede observar que los mayores valores de dureza se corresponden con las FE que poseen una estructura martensítica. Por otro lado, a medida que aumenta el espesor de bloque “Y”, se produce una

disminución en la dureza para todas las microestructuras debido a que disminuye el contenido de carburos.

Ensayos de desgaste

En la Figura 6 se muestran los valores de Resistencia Relativa al Desgaste (E) para las cuatro microestructuras, en función del tamaño de pieza. Se observa que la mayor resistencia a la abrasión se obtiene para el mayor espesor de pieza estudiado (75 mm), y para estructuras martensíticas, las cuales poseen la matriz de mayor dureza. Por otro lado, las probetas obtenidas a partir de un espesor de 25 mm mostraron la menor resistencia a la abrasión.

Para interpretar estos resultados es importante conocer y entender cuales son los factores que influyen sobre la resistencia a la abrasión de las FE. Para este estudio en particular, se analizó la influencia del conteo nodular, el tamaño de nódulo, la dureza de la microestructura, y la cantidad y distribución de carburos sobre la resistencia a la abrasión.

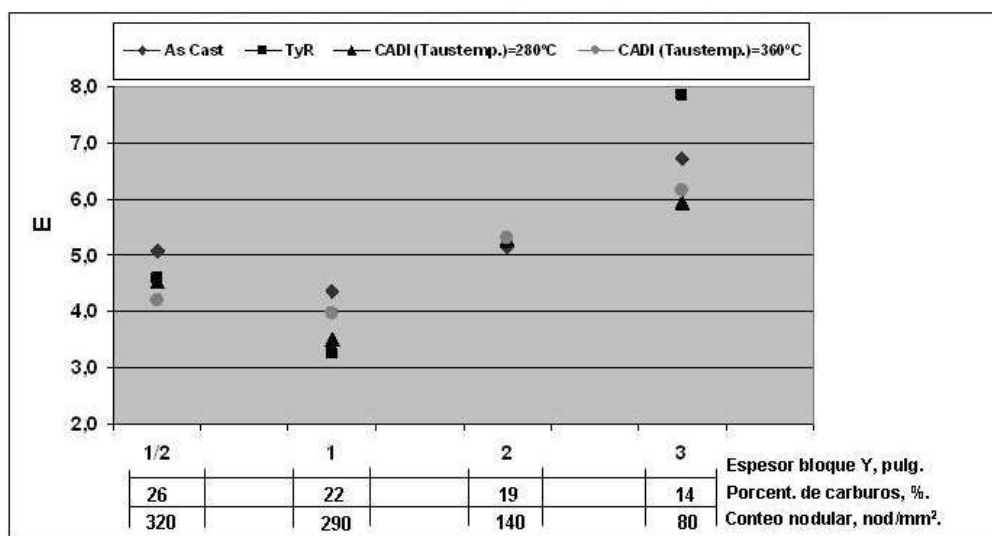


Figura 6. Resistencia Relativa al Desgaste para las cuatro microestructuras, en función del tamaño de pieza.

Entre las propiedades que afectan la resistencia al desgaste por abrasión de un material, la más importante es la dureza. Si se considera que la dureza de un material se define como la resistencia a la penetración, se puede pensar que esta propiedad afecta la penetración de las partículas abrasivas y, por lo tanto, el volumen removido por desgaste por una partícula abrasiva al generar un surco. Por lo tanto, es posible inferir que, a mayor dureza mayor resistencia a la abrasión, aunque este comportamiento no se observa en todos los tribosistemas [10].

La resistencia a la abrasión puede mejorarse mediante la incorporación de una segunda fase de refuerzo de alta dureza, como los carburos [10]. Las microestructuras templadas y revenidas obtenidas a partir de bloques “Y” de 25 mm de espesor poseen la matriz de mayor dureza y la mayor cantidad de carburos, por lo tanto deberían ser las que presenten la mayor resistencia relativa al desgaste (E). Sin embargo, Dommarco et. al. [7] reportaron que en la FE con distintas microestructuras (ferrítica, martensítica y perlítica), la resistencia a la abrasión disminuye cuando aumenta el conteo nodular. En la abrasión de la FE, el desgaste se concentra sobre el borde de salida de los nódulos, considerando la dirección de la abrasión. Por lo tanto, como el aumento del conteo nodular produce un aumento del perímetro total de los nódulos, esto promueve una disminución de la resistencia a la abrasión.

Por lo tanto, hay un doble efecto contrapuesto cuando aumenta el tamaño de pieza. Por un lado, E tiende a disminuir porque también lo hacen la cantidad de carburos y la dureza, y por otro lado, E tiende a aumentar porque el conteo nodular disminuye. El balance de estos 2 efectos hace que las probetas obtenidas de bloques “Y” de 25 mm muestren la menor resistencia a la abrasión. Para mayores espesores, la resistencia aumenta porque predomina la disminución del conteo nodular, y para espesores menores a 25 mm predomina el efecto del aumento del contenido de carburos.

4. CONCLUSIONES

1 - Se evaluó la influencia del tamaño de pieza sobre la resistencia a la abrasión y la tenacidad al impacto de FE con carburos libres y 4 microestructuras diferentes de matriz, perlítica, martensítica y dos ausferríticas austemperadas a 280 y 360 °C. Se observó que, en general, la tenacidad al impacto se mantiene constante con el tamaño de pieza para cada tipo de microestructura.

2- Las probetas CADI-360 fueron las que mostraron la mayor tenacidad al impacto, debido a que este tipo de ausferrita, austemperada a elevada temperatura, es la fase más tenaz de todas las microestructuras de matriz estudiadas.

3- La morfología y distribución de los carburos en la microestructura, muestra que a medida que aumenta el tamaño de pieza, se forman regiones cada vez más discontinuas y de mayor tamaño, y que la cantidad de los carburos disminuye.

4- La mayor resistencia a la abrasión se obtuvo para el mayor espesor de pieza estudiado (bloques “Y” de 75 mm) con estructuras martensíticas, las cuales poseen la máxima dureza. Las probetas obtenidas de bloques “Y” de 25 mm de espesor mostraron la menor resistencia a la abrasión, lo que se atribuye a una combinación de factores.

REFERENCIAS

1. A. Javaid, K.G. Davis, M. Sahoo, “Effect of chemistry and processing variables on mechanical properties of thin wall DI castings”; AFS Transaction, Vol. 108 (2000), p. 191–200.
2. F. Mampaey, Z.A. Xu, “Mold filling and solidification of a thin-walled ductile iron casting”; AFS Transaction, Vol. 105 (2002), p. 95–103.
3. D.M. Stefanescu, R. Ruxanda, L.P. Dix. “The metallurgy and tensile mechanical properties of thin walled spheroidal and compacted graphite iron”, Proceedings of the Science and Processing of Cast Iron (SPCI-7), Section 8.
4. S. Laino, J.A. Sikora, R.C. Dommarco, “Development of wear resistant carbidic austempered ductile iron (CADI)”, Wear 265 (2008), pp. 1-7.
5. S. Laino, J.A. Sikora, R.C. Dommarco, “Influence of chemical composition and solidification rate on the abrasion and impact properties of CADI”, ISIJ International 49 (2009), no. 8, pp. 1239-1245.
6. S. Laino, J.A. Sikora, R.C. Dommarco, “Wear behavior of CADI operating under different tribosystems”, ISIJ International 50 (2010), no. 3, pp. 418-424.
7. R.C. Dommarco, M.E. Sousa, J.A. Sikora. “Abrasion resistance of high nodule count ductile iron with different matrix microstructures”; Wear, Vol. 257 (2004), p. 1185–1192.
8. A. Basso, R. Martinez and J. Sikora, “Influence of section size on dual-phase ADI microstructure and properties: comparison with fully ferritic and fully ausferritic matrices”; Materials Science and Technology, Vol. 25-Nº10 (2009), p. 1271–1278.
9. M. Caldera, G. Rivera, R. Boeri and J. Sikora, “Precipitation and dissolution of carbides in low alloy ductile iron plates of varied thickness”, Materials Science and Technology, Vol. 21-Nº10 (2005), p. 1187–1191.
10. M. Khrushchov, M. Babiechev “An investigation of the wear of metals and alloys by rubbing on an adhesive surface”; Friction and Wear in Machinery, Vol. 12 (1958), p. 1-13.