

Características y propiedades de piezas de Fundición nodular de pequeño espesor

En un par de oportunidades ya hemos utilizado el espacio que en cada edición nos ofrece "El Fundidor" para publicar notas referidas al tema de las fundiciones de hierro con grafito esferoidal en piezas de pequeño espesor (FEPE). Más específicamente, en los artículos publicados en los Nros 110, 113 y 116 de esta revista [1-3] planteamos la importancia técnica y económica del tema para los potenciales usuarios de esta nueva tecnología y mostramos avances logrados en las líneas de trabajo de la División Metalurgia del INTEMA.

A fines de 2003 ofrecimos también una charla en la Cámara de Fundidores actualizando los resultados logrados sobre el tema. En dicha oportunidad varios

de los asistentes nos solicitaron que publicáramos en esta revista el material mostrado. Habiendo asumido el compromiso de hacerlo, presentamos a continuación, de manera sintética y actualizada, algunos resultados sobre aspectos que consideramos pueden resultar de interés.

Como fuera comentado ampliamente en nuestro anterior trabajo [2], las piezas de FEPE poseen una alta relación superficie/volumen, por lo que debe tenerse especial cuidado en el diseño de modelos y moldes, buscando asegurar una óptima alimentación y un llenado del molde sin turbulencias.

Hemos demostrado que el uso de software para simulaciones de flujo de metal líquido y solidificación, como el Novaflow&Solid® empleado por nosotros, es una importante herramien-

**M. Caldera, P. David,
R. Dommarco,
J. Massone, R. Boeri
y J. Sikora**

**DIVISIÓN METALURGIA
INTEMA. FAC. DE INGENIERÍA
UNIV. NACIONAL DE MAR DEL
PLATA**

**e-mail:
dommarco@fi.mdp.edu.ar
jsikora@fi.mdp.edu.ar**

ta para optimizar modelos y moldes [3].

Resueltos los problemas básicos, logramos contar con una metodología capaz de producir placas sanas y abocarnos al estudio de la influencia de la composición química (particularmente el carbono equivalente) sobre las características microestructurales y las propiedades de FEPE. Para los estudios realizados empleamos siempre placas rectangulares de 100 x 60 mm de lado y 1,5 a 4 mm de espesor y también se emplearon, con fines comparativos, Bloques "Y" de 13 y 25 mm. Todas las piezas fueron coladas en moldes de arena y ferritizadas, a fin de uniformizar el tipo de matriz y poder facilitar el estudio comparativo del efecto de las otras variables.

Características y disolución de carburos

Uno de los objetivos del desarrollo de FEPE es lograr que las piezas estén exentas de carburos libres. Un posible camino para avanzar en pro de dicho objetivo es ajustar minuciosamente las distintas variables del proceso, tales como composición química, sobrecalentamiento del líquido, inoculación, etc. Sin embargo, aún así es difícil lograr microestructuras totalmente libres de carburos en bruto de co-

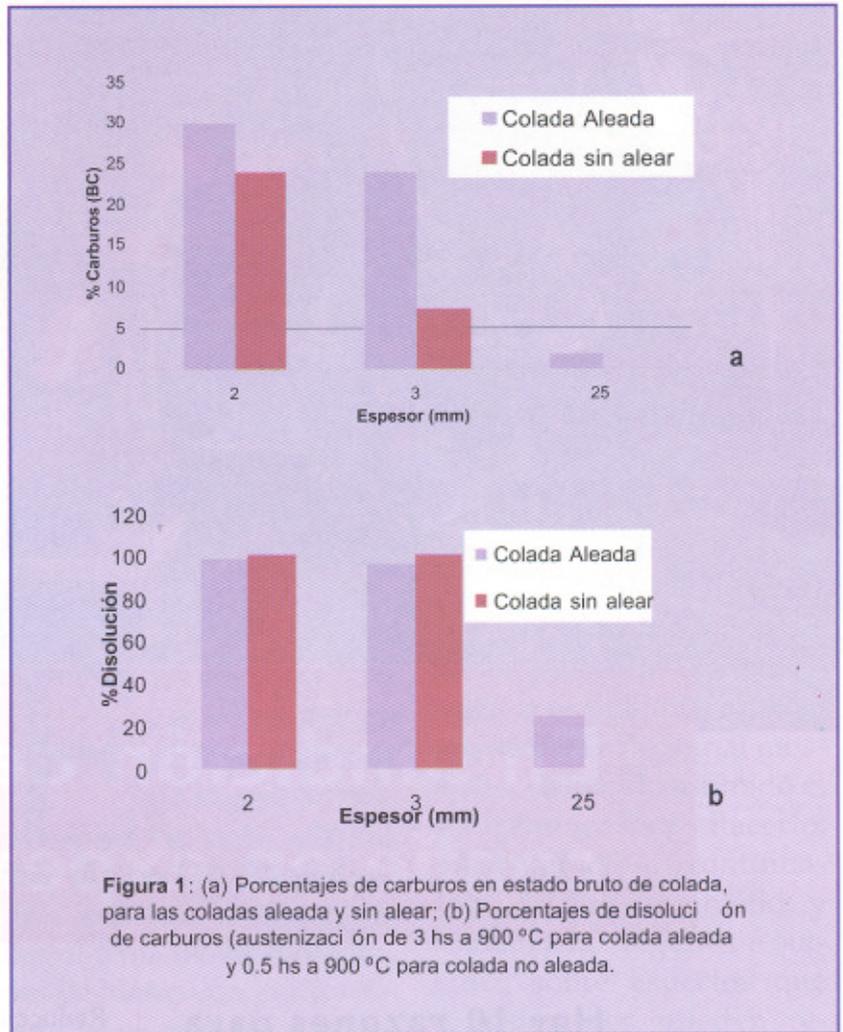


Figura 1: (a) Porcentajes de carburos en estado bruto de colada, para las coladas aleada y sin alea; (b) Porcentajes de disolución de carburos (austenización de 3 hs a 900 °C para colada aleada y 0.5 hs a 900 °C para colada no aleada).

lada para espesores inferiores a 3 mm. Una alternativa tecnológica es eliminar entonces los carburos mediante tratamiento térmico. Por ello se estudiaron las características de disolución de los carburos presentes en la condición bruto de colada en muestras no aleadas y con baja aleación.

Para el caso de las muestras no aleadas, se ha comprobado que la disolución completa de diferentes cantidades de los carburos ledeburíticos es muy rápida en comparación con lo habitualmente observado para

tratamientos de maleabilización y de disolución de carburos segregados. En efecto, se ha demostrado fehacientemente que permanencias de unos pocos minutos a temperatura de austenización, son suficientes para lograr la eliminación total de más del 30% de carburos presentes en placas de 1,5 mm de espesor [4].

A fin de entender mejor el alcance de este proceso, se trabajó también con coladas aleadas con Cr, Mo y Mn, elementos fuertemente formadores de carburos. Se determinó que en una FE hi-

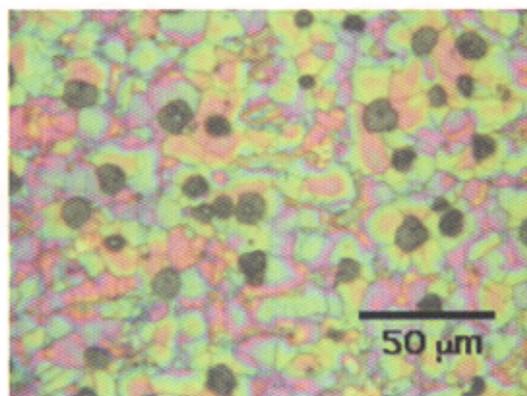


Figura 2: Distribución de la microsegregación en la placa de 2 mm.

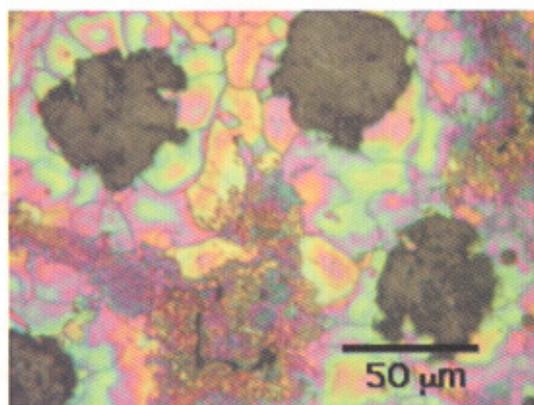


Figura 3: Distribución de la microsegregación en el bloque "Y" de 13 mm (Igual magnificación que en Fig. 2)

pereutética aleada con 0,37 % de Cr y 0,38 % de Mo los tratamientos térmicos de disolución realizados a 900°C causan la disolución de más del 90% de los carburos presentes en bruto de colada en las placas delgadas. En cambio, en los bloques Y de 13 y 25mm de la misma colada, la disolución mostró una eficiencia de tan solo un 30%. La Figura 1 ilustra sobre esta tendencia. Los estudios realizados mediante técnicas de metalo-

grafía color y microanálisis con EDX muestran que los carburos precipitados durante la solidificación presentan mayor contenido de elementos estabilizadores de carburos a medida que la velocidad de enfriamiento disminuye (aumento del tamaño de la pieza). Esto justifica la mayor estabilidad de los carburos formados en los espesores mayores, por tratarse de carburos microsegregados, con alto contenido de Cr y Mo. Las

Figuras 2 y 3 permiten observar cualitativamente las características de la distribución de la microsegregación entre una placa de 2 mm de espesor y un Bloque "Y" de 13 mm, observadas con igual aumento.

Se comprueba entonces que es posible trabajar con FEPE de baja aleación sin requerimientos de control estricto de los tenores de aleantes estabilizadores de carburos, ya que estos podrán ser disueltos fácilmente mediante tratamientos térmicos convencionales, que involucren una etapa de austenización. Esto representa una mayor versatilidad de uso, sin incremento de los costos de producción respecto de piezas de FE de espesores mayores.

Influencia del CE sobre la morfología y distribución del grafito y las propiedades mecánicas

Se estudió la influencia del C.E en el rango de 4,06 a 4,85 %, empleando coladas no aleadas. Los principales resultados mostraron que para C.E superiores a 4,6 %, la familia de nódulos primarios presenta un amplio desarrollo observándose, a medida que aumenta el CE, una mayor presencia de nódulos de grafito deteriorado (explotado) y aglomeraciones de grafito (clusters),

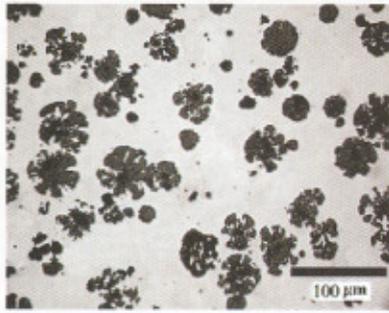


Figura 4: Grafito explotado en placa de 4 mm (CE= 4.77%)

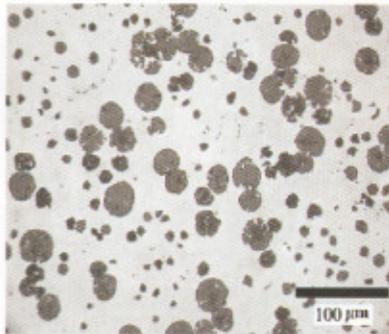


Figura 5: Clusters de grafito en placa de 4 mm 4.7(CE= 4.77%)

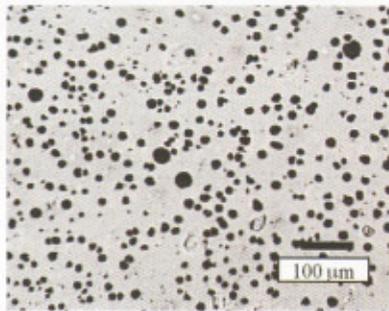


Figura 6: Morfología típica de la fase grafito en una placa de 2 mm de espesor (CE= 4.46%)

como se muestra en las Figuras 4 y 5, respectivamente.

Si bien la alta velocidad de solidificación de las placas de espesores delgados evita la flotación de grafito, las aglomeraciones observadas se atribuyen a un fenómeno

de flotación interdendrítica. Estas formas defectuosas afectan marcadamente las propiedades mecánicas, especialmente el alargamiento a la rotura. En cambio, las coladas que poseen CE comprendidos entre 4,3 y 4,6% presentaron mejores propiedades mecánicas, sa-

tisfaciendo los valores mínimos establecidos en la norma ASTM A536 para espesores convencionales.

La Figura 6 muestra la morfología típica de la fase grafito en una placa de 2 mm de espesor, para una colada ligeramente hipereutéctica (CE = 4,46%). En probetas de esta colada se obtuvieron valores de alargamiento a la rotura de hasta 32 %, con 450 MPa de tensión de rotura y 300 MPa de tensión de fluencia. Estos valores disminuyen marcadamente al aumentar el CE y observarse mayor cantidad de grafito defectuoso, como se muestra en la Figura 7, para distintas coladas.

Resistencia al impacto

La aplicación industrial de piezas de espesores delgados requiere la caracterización del material ante sollicitaciones, tales como fatiga, desgaste y choque. La bibliografía referida al comportamiento de FEPE ante estos tipos de sollicitaciones es prácticamente nula. Se reportan curvas de temperaturas de transición para fundiciones nodulares de espesores "convencionales" (aprox. 10 a 75 mm), caracterizados por conteos nodulares de entre 100 y 300 nod/mm². Los resultados muestran una disminución de la temperatura de transición dúctil/frágil y una dis-

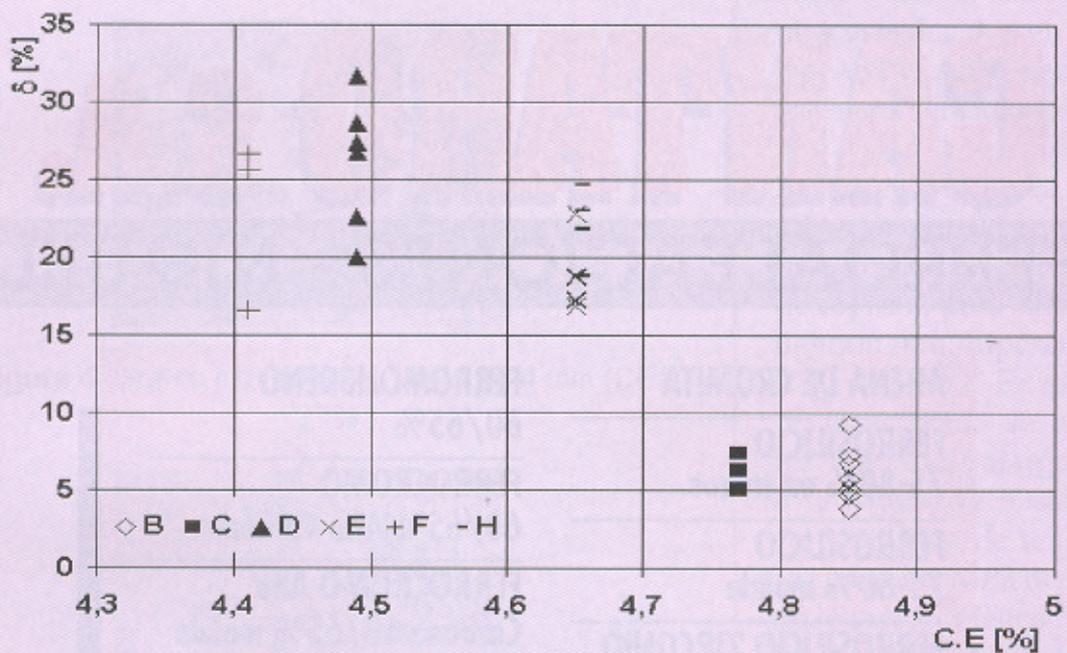


Figura 7: Alargamiento a la rotura Vs C.E en placas de 4 mm, para distintas coladas en molde vertical.

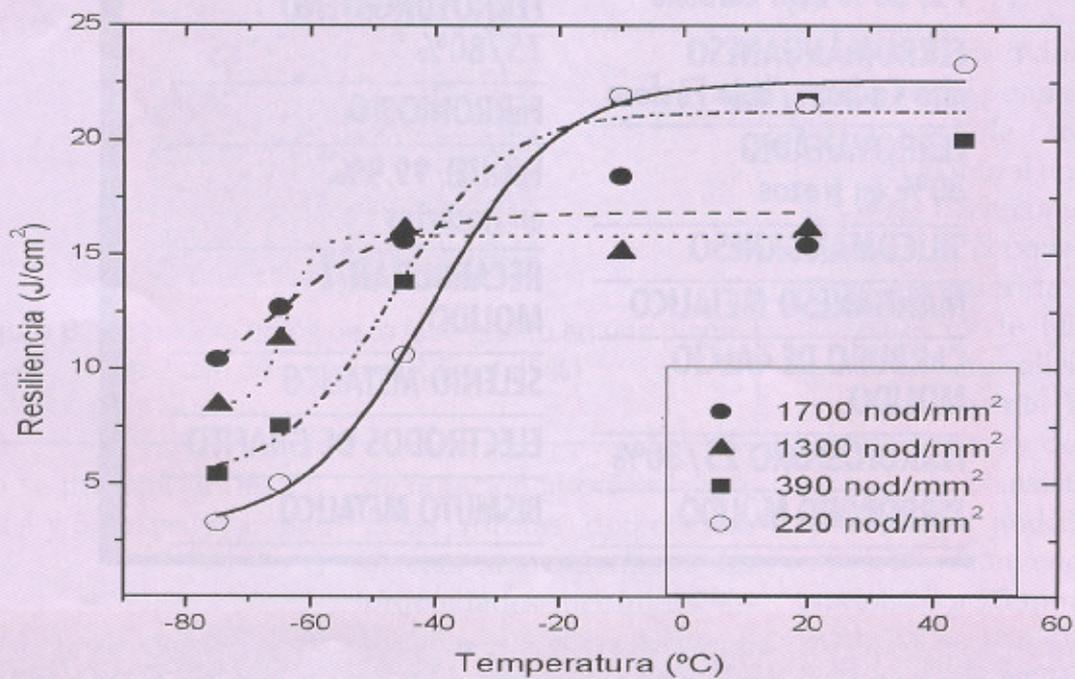


Figura 8: Curvas de transición para probetas con distintos conteos nodulares.

minución de la energía absorbida en el "upper shelf" con el aumento del conteo nodular. También se discute en la bibliografía el hecho que las probetas de impacto de geometrías o tamaños diferentes no arrojan resultados comparables.

Debido a que las probetas mecanizadas a partir de las placas delgadas tienen un espesor inferior a los 2mm, el cual se encuentra fuera de los valores de espesor establecidos por la norma ASTM E23-94b "Charpy Subsize Type A", nos propusimos establecer una correlación entre los valores de las probetas normalizadas y aquellos obtenidos sobre las probetas delgadas no normalizadas.

Se observó que probetas de igual material muestran mayor resiliencia a medida que disminuye su espesor. Además, se concluyó que los ensayos de choque en espesores delgados deben realizarse con probetas entalladas, las probetas no entalladas se deforman notablemente (curvado) por lo que muestran grandes dispersiones que invalidan la comparación de resultados [5].

Luego de realizar ensayos en rango de -75°C a $+45^{\circ}\text{C}$, se pudo observar, como se muestra en la Figura 8, una disminución de la tempera-

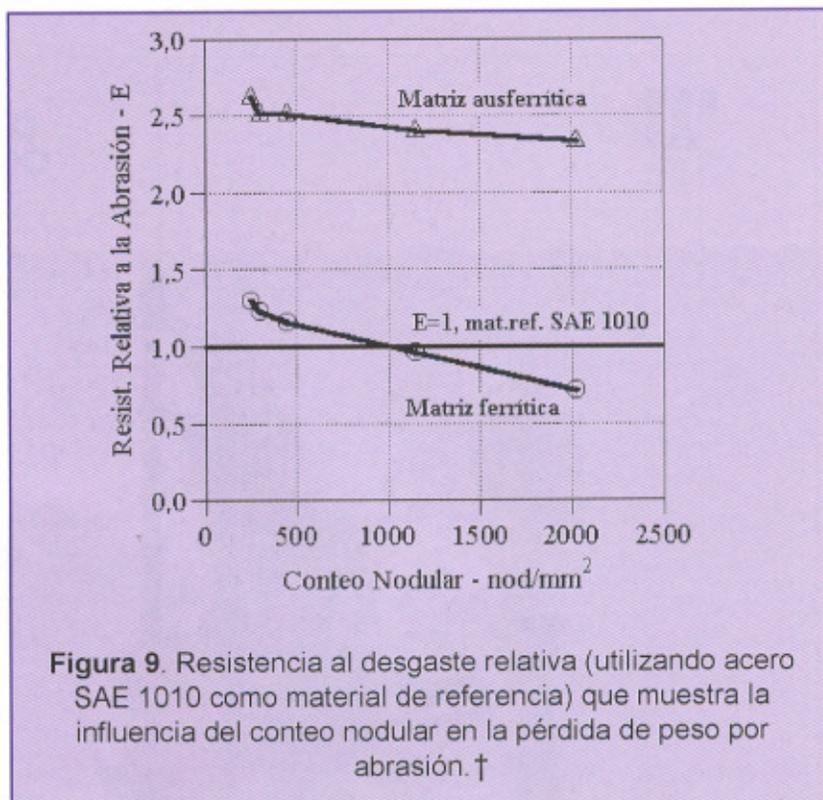


Figura 9. Resistencia al desgaste relativa (utilizando acero SAE 1010 como material de referencia) que muestra la influencia del conteo nodular en la pérdida de peso por abrasión. †

tura de transición con el aumento del conteo nodular. También la energía absorbida en el "upper shelf" disminuye a medida que aumenta el conteo nodular.

Las FEPE de alto conteo nodular (1300-1700 nod/mm²) ferritizadas, muestran una temperatura de transición de aproximadamente -80°C y una resiliencia en el "up-

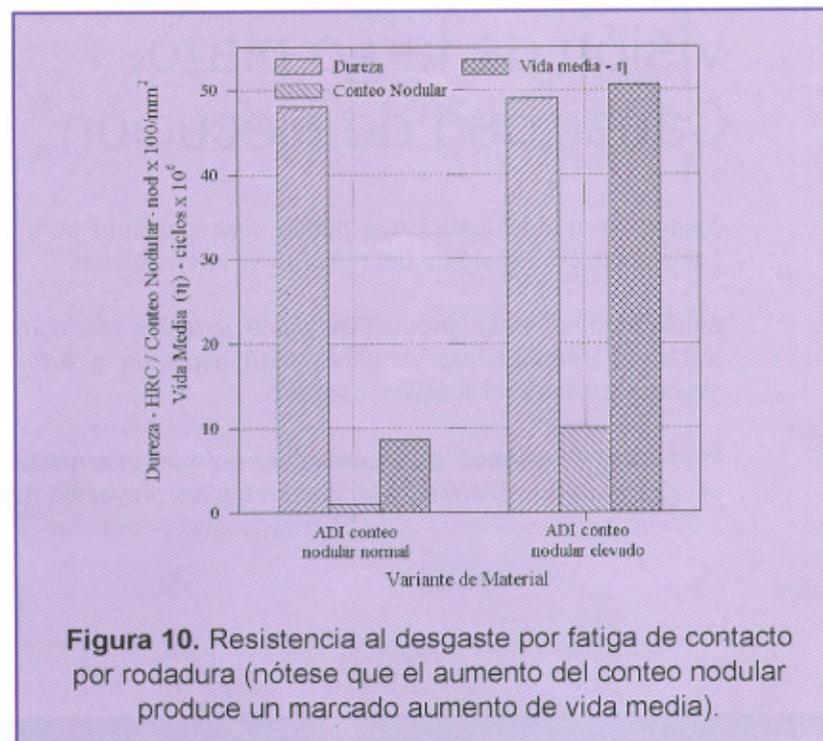


Figura 10. Resistencia al desgaste por fatiga de contacto por rodadura (nótese que el aumento del conteo nodular produce un marcado aumento de vida media).

per shelf" de aproximadamente 16 J/cm² cuando se la mide en probetas de aproximadamente 2 mm de espesor.

Resistencia al Desgaste

Como ya se indicara en el último número de "El Fundidor", los estudios tribológicos relativos a la resistencia al desgaste de las FEPE, han mostrado una muy fuerte influencia del conteo nodular, tanto en la resistencia al desgaste por abrasión como en la resistencia a la fatiga de contacto.

Con relación a la tasa de desgaste por abrasión, puede decirse que la misma aumenta con el conteo nodular, habiéndose observado un incremento del orden del 50% cuando el conteo nodular pasó de 250 a 1400 nod/mm², como se observa en la Figura 9. Esta tendencia fue verificada para diferentes microestructuras. Por el contrario, cuando el mecanismo de desgaste es la fatiga de contacto por rodadura, se observaron incrementos notables en la vi-

da media hasta la falla, aumentando hasta 5 veces al variar el conteo nodular de 200 a 1000 nod/mm², como puede observarse en la Figura 10.

Se observó que la relación "área de contacto vs. tamaño de nódulo" ejerce una marcada influencia en la vida a la fatiga de contacto y se establecieron los mecanismos tribológicos actuantes [6].

Comentario Final:

Luego de algunos años de investigación y desarrollo, podemos decir que una gran parte de los aspectos metalúrgicos necesarios para sustentar la potencial producción de piezas de fundición esferoidal de pequeño espesor son suficientemente comprendidos. Por supuesto, el desarrollo específico de una pieza dada podrá requerir algunos estudios complementarios. Asimismo, debe destacarse que la producción de partes de espesor delgado tiene requerimientos de moldeo es-

peciales, tanto en lo que respecta al diseño de los sistemas de alimentación como a la precisión dimensional requerida.

Referencias:

- [1] "Producción de piezas de fundiciones esferoidales de pequeño espesor; un nuevo desafío tecnológico", J. Massone, R. Boeri y J. Sikora. El Fundidor No. 110, pp 4-12, Junio 1999.
- [2] "Piezas de fundición de hierro de alta resistencia y pequeño espesor", J. Sikora, J. Massone. El Fundidor No. 113, pp 4-20, Noviembre 2000.
- [3] "Diseño de moldes para colar piezas de pequeño espesor empleando software de simulación de llenado y solidificación", P. David, J. Massone, R. Boeri y J. Sikora. El Fundidor No 116, pp 4-20, Noviembre 2003.
- [4] "Carbide dissolution in thin wall ductile iron", A. Giacomini, R. Boeri y J. Sikora, Material Science and Technology, Vol. 19, No. 12, pp 1755-1760 (2003).
- [5] "Impact properties of thin wall ductile iron", M. Caldera, J. Massone, R. Boeri y J. Sikora. ISIJ International, Vol. 44, No. 4, pp 731-736 (2004).
- [6] "Wear resistance of high nodule count ductile iron", N. Rebas, R. Dommarco and J. Sikora. WEAR, Vol 253, pp 855-861 (2002).

HORNOS ELECTRICOS INDUCCION - ARCO

Asesoramiento, Proyectos, Suministros, Servicios
Estudio de consumos y tarifas de energía eléctrica

Ing. Amadeo R. Crisi

Buenos Aires 2543
2000 Rosario
ARGENTINA

Tel./Fax 0341 481 2804 / +54 341 481 2804
Móvil 0341 15 540 2668 / +54 9 341 540 2668
amadeo@crisi.com