

Heterogeneidades químicas y microestructurales en las fundiciones de hierro características y consecuencias

R. E. Boeri,
G. L. Rivera,
y J. A. Sikora

Div - Metalurgia - INTEMA
- UNMDP
e-mail: jsikora@fi.mdp.edu.ar

Introducción

Los responsables técnicos de las fundiciones mantienen un interés permanente por mejorar la calidad de sus productos y la rentabilidad de sus empresas. Uno de los componentes significativos en la economía de costos consiste en la reducción de rechazos de piezas.

En muchos casos las piezas de fundición de hierro son requeridas por el solicitante según una especificación microestructural, que suele involucrar una definición de la morfología y tamaño del grafito deseado, y de la microestructura de la matriz. A diferencia de lo que ocurre con los aceros, no siempre se especifica la composición química deseada, por lo que es muy común que el fundidor "diseñe" una aleación, que en su experiencia será adecuada para lograr la microestructura

deseada en las piezas solicitadas. También es frecuente que este objetivo no sea alcanzado en el primer intento, generándose retornos, en lugar de piezas comercializables.

Este artículo tiene por objetivo abordar la descripción de algunos de los principales factores que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar una aleación, destinada a la obtención de una microestructura dada, en una pieza de dimensiones determinadas.

La discusión no se centrará en el control de la morfología del grafito, tema sobre el cual hay abundante información en la literatura, sino sobre la selección adecuada de los elementos de aleación y sus contenidos.

Clasificación habitual del efecto de los elementos de aleación

Karsay y otros autores (1,2,3) clasifican en detalle la

influencia de los elementos de aleación. Es ampliamente conocido que el Si es un fuerte grafitizante y además promotor de la formación de ferrita. La mayoría de los restantes elementos de aleación poseen un efecto estabilizador de la perlita. Algunos de ellos promueven también la formación de carburos, como el Cr, Mo y Mn, mientras que otros no lo hacen, como el Cu y Ni. Otros elementos, en tanto, son desaconsejados por su efecto deteriorante de la morfología del grafito. Es común también, encontrar límites establecidos en los elementos de aleación y en el contenido de impurezas, que obedecen a distintos motivos. Sin embargo, un efecto comúnmente ignorado es la forma en la cuál los elementos que constituyen la aleación, se distribuyen en la microestructura.

Por ejemplo, el fundidor leerá que el Mo es un elemento perlitzante. Sin embargo, si procurase obtener una fundición de grafito esferoidal empleando exclusivamente Mo como elemento de aleación, seguramente, al realizar incrementos progresivos de Mo, alcanzará un cierto tenor para el cuál obtendrá una microestructura como la que se muestra en la Figura 1. En este caso, no sólo no se ha obtenido la perlitzación total perseguida, ya que se observan halos de ferrita (bull's eye) alrededor de los nódulos de grafito, sino que se presentan además carburos libres, fuertemente perjudiciales para la maquinabilidad y otras propiedades. ¿Cómo puede explicarse este comportamiento? Como ya mencionamos, el Mo no sólo estabiliza la perlita,

sino que también es un fuerte formador de carburos. Ahora bien, ¿porqué no se ha presentado perlita en toda la matriz? La explicación de éste y otros efectos requiere comprender el fenómeno denominado microsegregación.

Microsegregación en fundiciones de hierro

Las fundiciones de hierro comerciales son aleaciones multicomponentes, es decir que su composición química incluye varios elementos químicos que afectan su comportamiento. Durante el enfriamiento de la aleación colada en un molde, se produce la solidificación de la fase metálica y de la fase no metálica, que es el grafito. Paralelamente, y en forma espontánea, se produce la microsegregación de los elementos de aleación. Este efecto ocurre como resultado de la tendencia de los elementos de aleación a repartirse en forma desigual entre el líquido y el sólido metálico. Algunos elementos se presentan en mayor concentración en el sólido que en el líquido que les da origen, mientras que otros muestran una tendencia con-

traria. Este efecto se representa esquemáticamente en la Figura 2-a para los elementos Si y Mn, donde se observa, a modo de ejemplo, que ambos elementos presentan comportamiento opuesto. El Si tiende a concentrarse en el sólido metálico, mientras que el Mn lo hace en el líquido residual. Como resultado de este proceso, a medida que la solidificación progresa, la composición del líquido puede alcanzar valores muy distintos a la composición inicial. Cuando la solidificación se ha completado, existirán regiones que presentarán una composición química diferente al promedio del sólido (composición nominal determinada por técnicas analíticas), localizadas en la posición de las últimas porciones de líquido en solidificar, como se indica en rojo en la Figura 2-b.

Paralelamente, las primeras porciones de sólido formadas, también presentarán una composición alejada de la media.

Así, por ejemplo, en una fundición de hierro aleada con Mn, Cr y Mo, todos elementos formadores de carburos que tienden a concentrarse en el líquido residual, el último líquido en solidificar presenta-

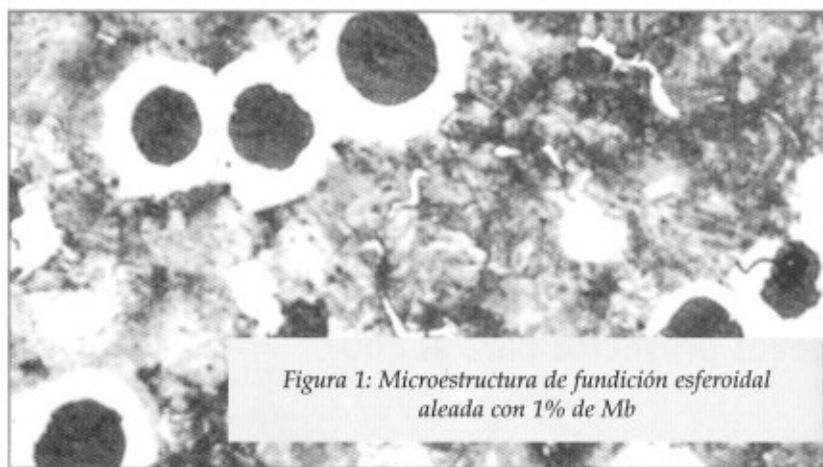


Figura 1: Microestructura de fundición esferoidal aleada con 1% de Mo

rá elevada concentración de estos elementos, y la consecuente presencia de carburos, como los que se observan en la Figura 3. La presencia de estos carburos en la microestructura afectará en definitiva

perlitización de las primeras porciones en solidificar, que poseerán baja concentración de este aleante perlitizante, y podrán presentar, en consecuencia, ferrita libre.

Casi todos los elementos de

mediante tratamientos térmicos posteriores, empleando tiempos compatibles con los procesos tecnológicos. Por esta razón, debe esperarse que todas las piezas obtenidas por colada presenten un grado de

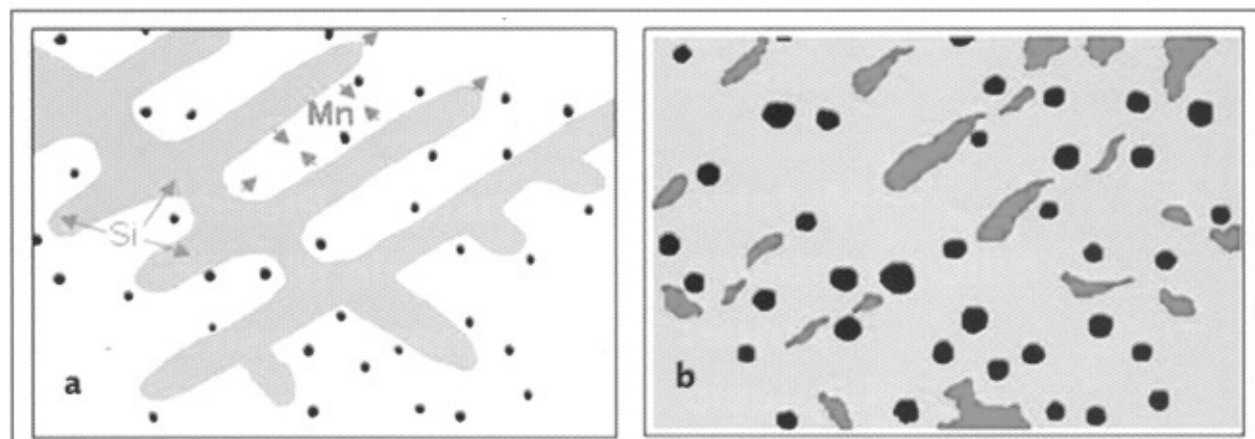


Figura 2:(a) Representación esquemática del proceso de microsegregación durante la solidificación de las fundiciones esferoidales. (b) regiones (en rojo) correspondientes a las zonas últimas en solidificar.

a las propiedades mecánicas, por ejemplo reduciendo la ductilidad del material. Un efecto semejante puede producirse cuando se procura obtener una estructura perlítica. La adición de un elemento perlitizante, con marcada tendencia de segregación hacia el líquido residual, como el Mo de nuestro ejemplo de la Figura 1, es poco eficiente para producir la

aleación de uso habitual, con excepciones como el C entre otros, se disuelven sustitucionalmente en la austenita que se forma durante la solidificación y tienen muy baja difusividad en estado sólido. En consecuencia, los patrones de microsegregación originados durante el proceso de solidificación son prácticamente imposibles de eliminar

heterogeneidad microestructural, que será más marcado cuanto más grandes sean las piezas, y cuanto mayor sea el contenido de elementos de aleación de la colada.

Ahora, ¿cómo puede evidenciarse la existencia de la microsegregación en una fundición de hierro?

Los autores del presente trabajo han desarrollado, probado y optimizado distintas técnicas metalográficas, que permiten evidenciar la heterogeneidad composicional y microestructural en piezas obtenidas por colada (4,5).

Algunos métodos se basan en la identificación de fases presentes en la microestructura final, cuya formación puede ser asociada con la presencia de microsegregación. Otros, algo más sofisticados, se basan en la detección de la distribución de ciertos elementos de

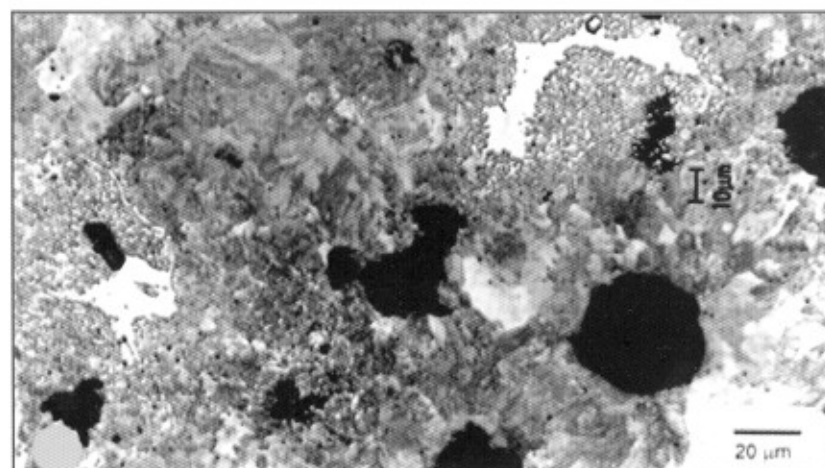


Figura 3: Carburos precipitados en las regiones últimas en solidificar.

aleación en la fase metálica, obteniéndose un mapeo de la microsegregación ocurrida durante la solidificación. Estos últimos métodos, aunque quizás de compleja aplicación práctica para el fundidor, permiten visualizar las heterogeneidades químicas y formar un concepto al respecto, por lo cual se describen sintéticamente.

Técnicas de metalografía color

Su nombre se debe a que, luego de un ataque específico, la microestructura presenta diferentes colores cuando se la observa mediante microscopía óptica. Estas técnicas consisten en la deposición de delgadas películas de óxidos, o productos de reacción, de distintos espesores (aproximadamente 0.04 a 0.5mm) sobre la superficie de la muestra pulida. El espesor de las películas depositadas es función de la concentración de los elementos de aleación presentes en cada zona de la muestra metalográfica. Las diferencias de coloración aparecen como resultado del fenómeno de interferencia de la luz. Este fenómeno óptico es del tipo aire-capa-metal, como se muestra en la Figura 4. Los rayos de luz que inciden sobre la superficie del metal, recubierta por una capa, pueden ser reflejados por la superficie de la capa, o por la superficie del metal, obteniéndose un efecto de interferencia de la luz que depende de la longitud de onda de la luz en el aire, del espesor de la capa y del índice de refracción en la capa (6).

Una técnica de ataque color particularmente útil para el

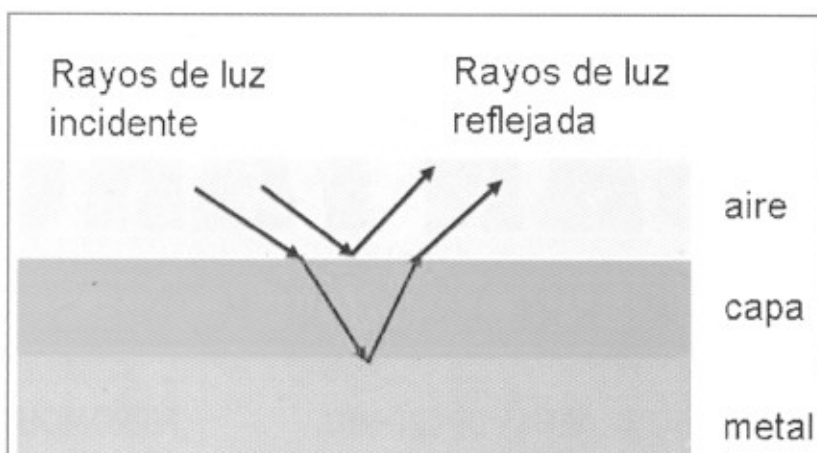


Figura 4: Esquema del efecto de interferencia óptica del tipo aire-capa-metal.

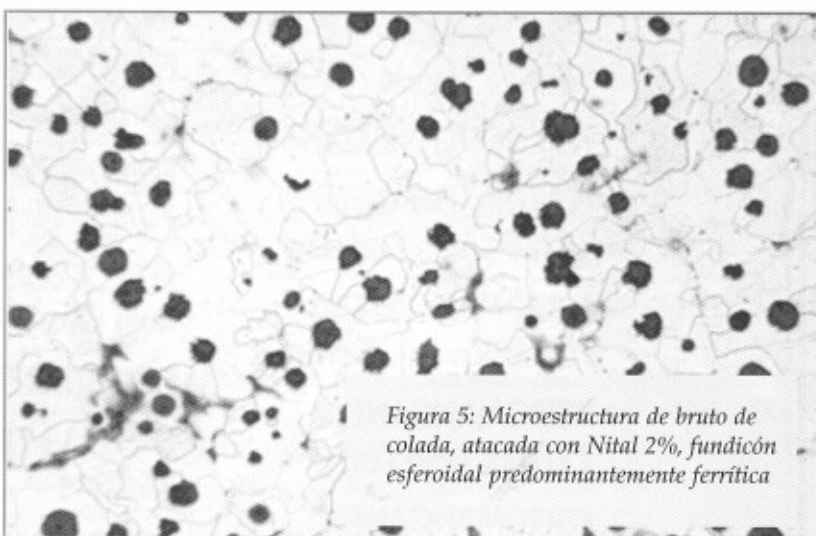


Figura 5: Microestructura de bruto de colada, atacada con Nital 2%, fundición esferoideal predominantemente ferrítica

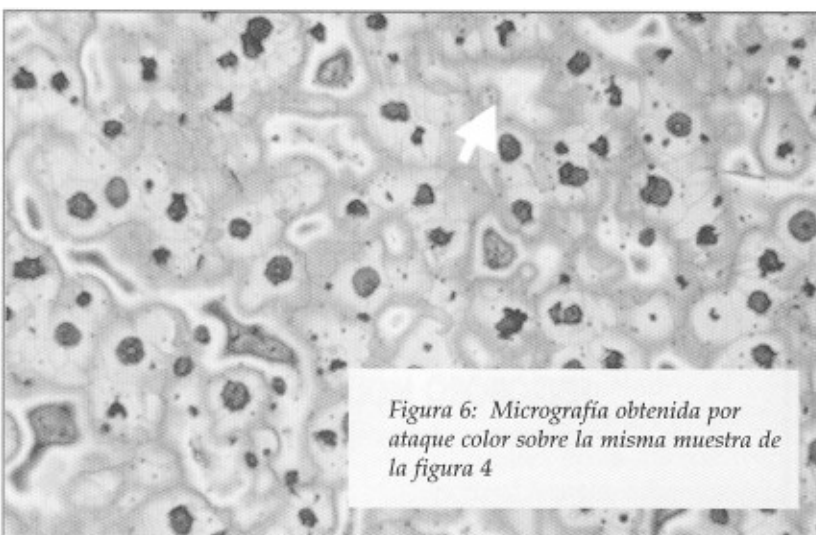


Figura 6: Micrografía obtenida por ataque color sobre la misma muestra de la figura 4

análisis de la microsegregación en fundiciones de hierro, logra la deposición de películas delgadas mediante procesos químicos. El reactivo más utilizado

por los autores presenta la siguiente composición: 10 g NaOH, 40 g KOH, 10 g ácido pícrico, 50 ml agua destilada. Este reactivo es aplicado a tem-

peratura de ebullición de 120°C. Se debe prestar mucho cuidado en el manipuleo, ya que es un reactivo tóxico y cáustico. Su utilización requiere una considerable experiencia, particularmente en la selección de los tiempos de ataque para muestras de diferente composición química.

Caracterización de las heterogeneidades composicionales y microestructurales mediante la aplicación de técnicas metalográficas

Las Figuras 5 y 6 muestran las microestructuras resultantes luego de la aplicación de una técnica convencional y una de ataque color sobre una misma muestra de fundición esferoidal de matriz predominantemente ferrítica.

La Figura 5 muestra la microestructura obtenida luego de un ataque con Nital 2%. Se observa la presencia de nódulos de grafito (esferoides negros), pocas áreas ocupadas por perlita (gris oscuro) y la matriz de ferrita (blanco). La Figura 6 muestra los resultados de la aplicación de la técnica de ataque color sobre la misma muestra. El procedimiento permite ubicar las regiones microsegregadas, una de ellas indicada con una flecha. Se puede observar que en esta muestra las áreas mayoritarias presentan coloración verde, mientras que las zonas últimas en solidificar, tienen coloración amarilla, envueltas en halos rojos y azules. Debe destacarse que la coloración de cada zona dependerá del tiempo de ataque empleado. Sin embargo, la secuencia de colores, desde las

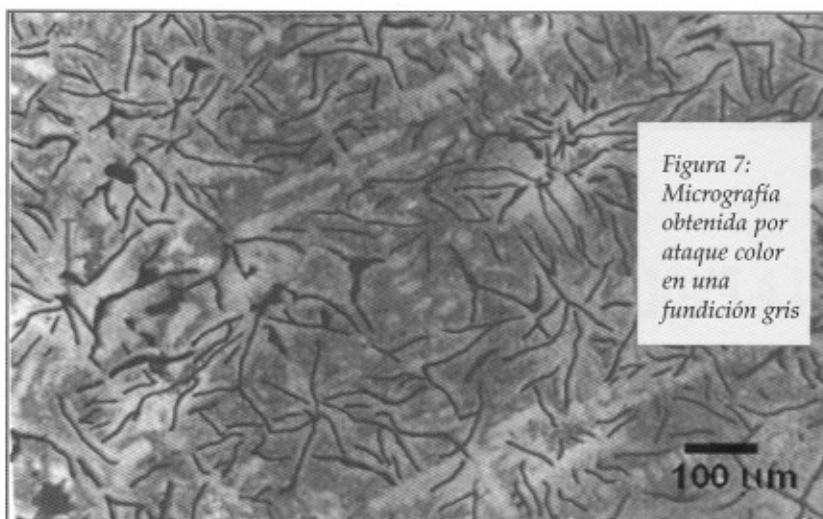


Figura 7: Micrografía obtenida por ataque color en una fundición gris

zonas primeras en solidificar hacia las últimas regiones microsegregadas, correspondientes a las últimas regiones en solidificar, se mantiene y es: amarillo, verde, azul, rojo y nuevamente amarillo.

La observación de las Figuras 5 y 6 permite apreciar claramente el notable incremento de información acerca de las características de la distribución de los elementos de aleación (microsegregación) brindado por la técnica de metalografía color, en comparación con la técnica metalográfica convencional.

La Figura 7 muestra el resultado de la aplicación de la técnica de ataque color sobre

una fundición con grafito laminar. Se observa en este caso que la secuencia de colores es diferente. Las regiones mayoritarias presentan color azul mientras que las zonas últimas en solidificar son de color rojo. También se evidencia claramente la subestructura dendrítica de la matriz metálica.

Cabe señalar que la correlación entre la microsegregación y la coloración generada por el ataque color ha sido fehacientemente verificada por los autores mediante microanálisis con EDX (4).

La Figura 8 muestra esquemáticamente el perfil de concentración de Mn y Si observa-

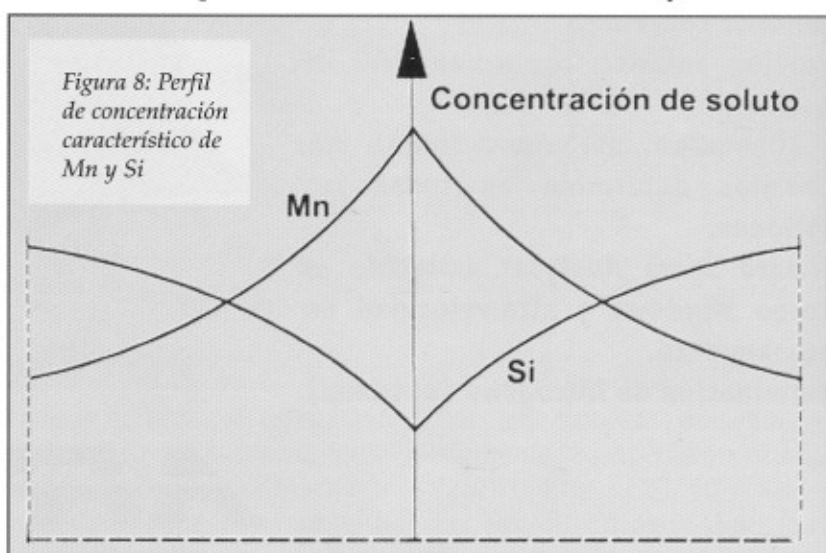


Figura 8: Perfil de concentración característico de Mn y Si

do típicamente entre el primer sólido formado (extremos izquierdo y derecho del gráfico), y la última porción en solidificar (centro). Puede observarse que el elemento Mn presentará su valor pico de concentración en el último líquido en solidificar, en coincidencia con el mínimo valor de concentración del elemento Si.

Tamaño de pieza y heterogeneidad

La intensidad de la microsegregación y la distribución de las zonas segregadas dependen principalmente de la composición química de la aleación, pero también de la velocidad de enfriamiento durante la solidificación. Como se mencionó anteriormente, el fenómeno de microsegregación, causante de la heterogeneidad química y microestructural, es más marcado en las piezas grandes que en las pequeñas, ya que las primeras experimentan menor velocidad de enfriamiento y por lo tanto poseen una estructura más basta, en la que las porciones fuertemente microsegregadas son de mayor tamaño.

Un ejemplo de la influencia del tamaño de pieza se observa en la Figura 9, que permite apreciar los resultados de la aplicación de la técnica de ataque color sobre muestras provenientes de bloques Y de 7 y 3 pulgadas. Se evidencia claramente el engrosamiento de la fase metálica con el mayor tamaño de pieza (menor velocidad de enfriamiento), ya que puede observarse el mayor tamaño de las áreas entre zonas microsegregadas (color verde). Las regiones microsegregadas (color amarillo) ocupan áreas más extensas.

También es evidente el engrosamiento de la fase grafito, ya que se observa que los nódulos se presentan en menor cantidad y mayor tamaño.

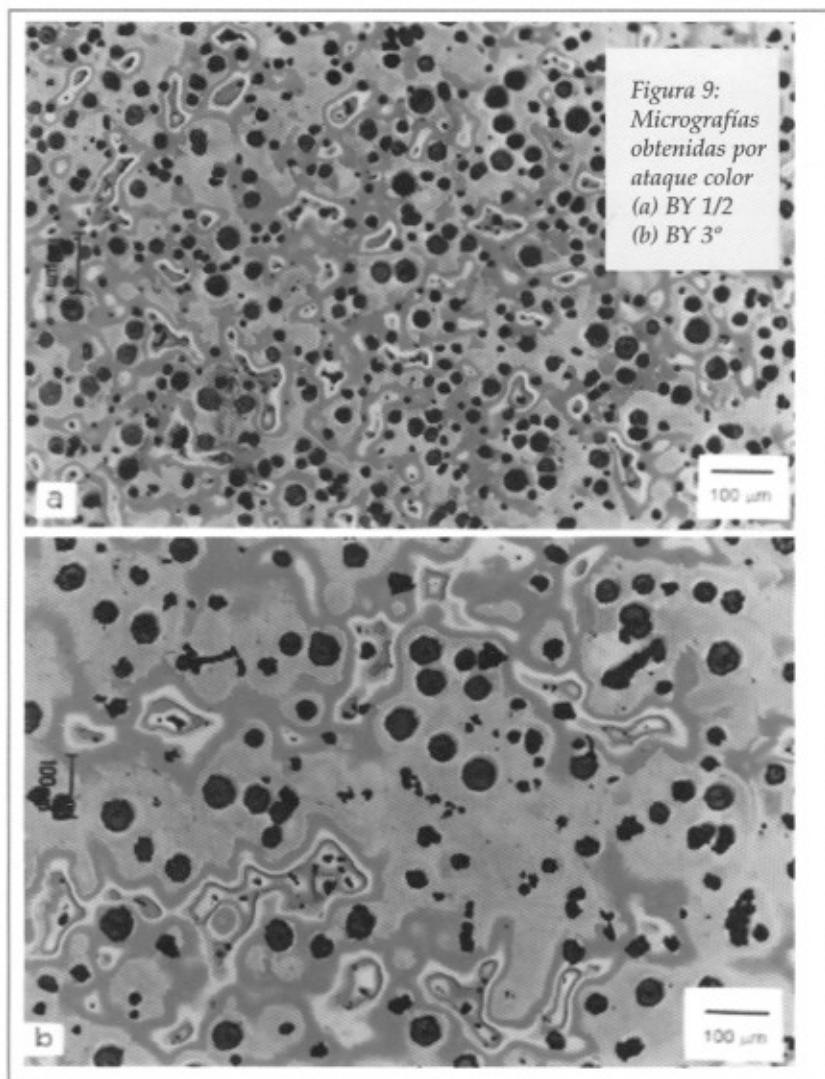
Los autores, en trabajos anteriores, incluyendo el publicado en *El Fundidor* Nro.119, pp 4-14, han demostrado que el refinamiento de la fase grafito puede ser incrementado, para un dado tamaño de pieza, mediante la utilización de técnicas de posinoculación, pero no así el refinamiento de la fase metálica y la distribución de las áreas microsegregadas (7,8). Como ya se señalara, los tratamientos térmicos permiten ajustar la microestructura de la

matriz, pero no modifican aspectos inherentes a la colada, como es la microsegregación.

Se ha observado que las heterogeneidades microestructurales presentes en las regiones últimas en solidificar inciden significativamente sobre la ductilidad del material, y se ha comprobado que el deterioro se incrementa a medida que aumenta el tamaño de pieza (9).

Efecto combinado de los elementos de aleación

Un factor importante en la formación de la microestructura final es la influencia combinada de los distintos ele-



mentos de aleación. Por ejemplo, podemos comparar la microestructura de dos fundiciones laminares, una que tiene 0.13% de P y 0.5% de Cr, y otra que contiene el mismo tenor de Cr, pero muy bajo P (0,03%). La fundición de alto P presenta una cantidad significativa de carbofosuros en las últimas regiones en solidificar, como se muestra en la Figura 10-a, debido a la interacción del fósforo con el cromo, ya que ambos elementos tienen tendencia a segregarse en el líquido y a su vez son formadores de carburos y fosuros estables. En cambio la microestructura de la aleación con muy bajo contenido de P se encuentra prácticamente libre de carbofosuros, como se muestra en la Figura 10-b.

La interacción entre los elementos de aleación es crucial a la hora de diseñar una aleación. Por ejemplo, cuando se diseña una composición química para obtener matrices perlíticas, se debe tratar de lograr una perlita homogénea sin caer en la formación de carburos libres. Para ello, además de optimizar los contenidos de C y Si, se deberá combinar adecuadamente el uso de elementos perlitizantes con tendencia a segregarse en el líquido durante la solidificación (Mn, Mo), con elementos perlitizantes que tengan tendencia a concentrarse en el sólido en formación (Cu, Ni). El uso de cantidades excesivas de elementos perlitizantes que tienen tendencia a concentrarse en el líquido, como por ejemplo el Mn o Mo, puede resultar perjudicial, ya que las últimas porciones en solidificar se encontrarán fuertemente enriquecidas en estos ele-

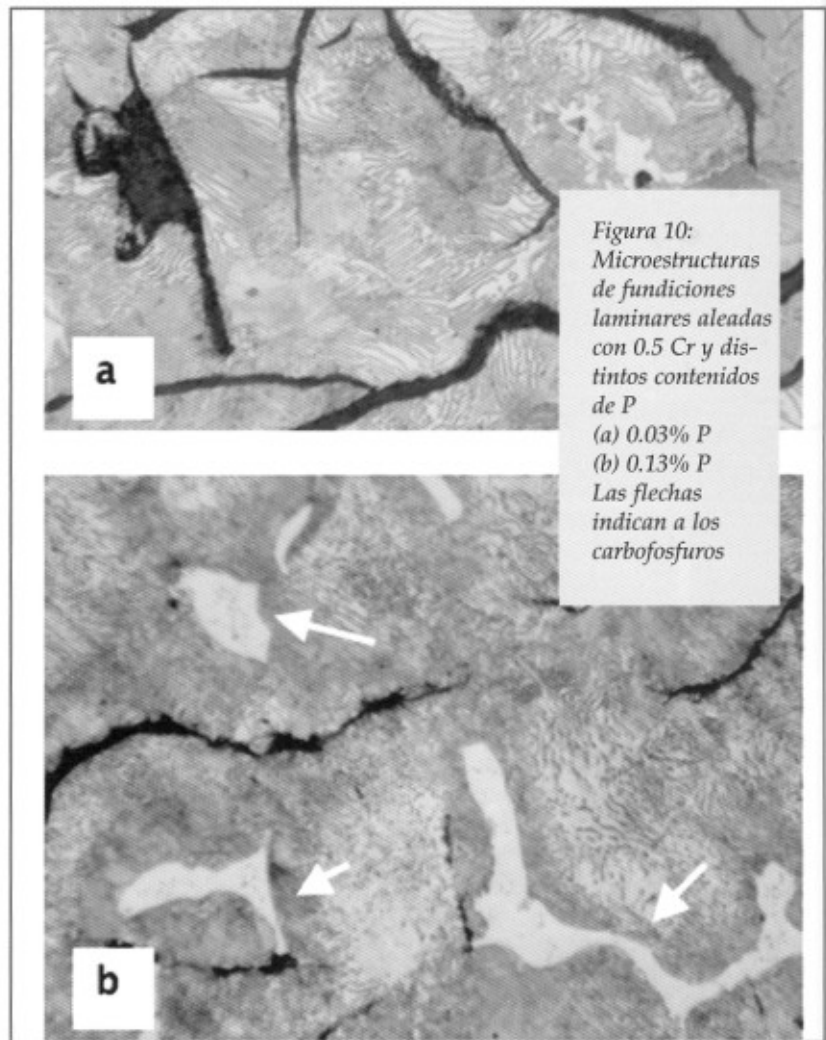


Figura 10:
Microestructuras
de fundiciones
laminares aleadas
con 0.5 Cr y distintos
contenidos
de P
(a) 0.03% P
(b) 0.13% P
Las flechas
indican a los
carbofosuros

mentos, y será muy probable que se formen carburos en ellas. Un ejemplo del uso inadecuado de estos elementos de aleación se observa comparando las metalografías de la Figura 11. La Figura 11-a muestra la microestructura en bruto de colada de una pieza de 50 mm de espesor de aleación 0.70%Cu y 0.75%Mn, que es predominantemente perlítica, y presenta aproximadamente un 10% de ferrita en ojo de buey. Es habitual esperar que un incremento en la concentración de los elementos perlitizantes sea suficiente para obtener una estructura perlítica. Sin embargo, al producir un incremento marcado de aleación, empleando ahora

1.20% de Mn, se forman carburos de segregación en las últimas regiones en solidificar, como se muestra en la Figura 11-b.

Por otra parte, cuando se busca obtener matrices ferríticas en bruto de colada, es evidente la necesidad de reducir al mínimo el contenido de elementos perlitizantes. Sin embargo, y particularmente si se trata de piezas de espesores importantes, aún tenores muy bajos de elementos tales como el Mn, podrán provocar la aparición de perlita en las regiones últimas en solidificar, donde dicho elemento estará segregado, y por ende podrá haber alcanzado localmente el tenor suficiente para favore-

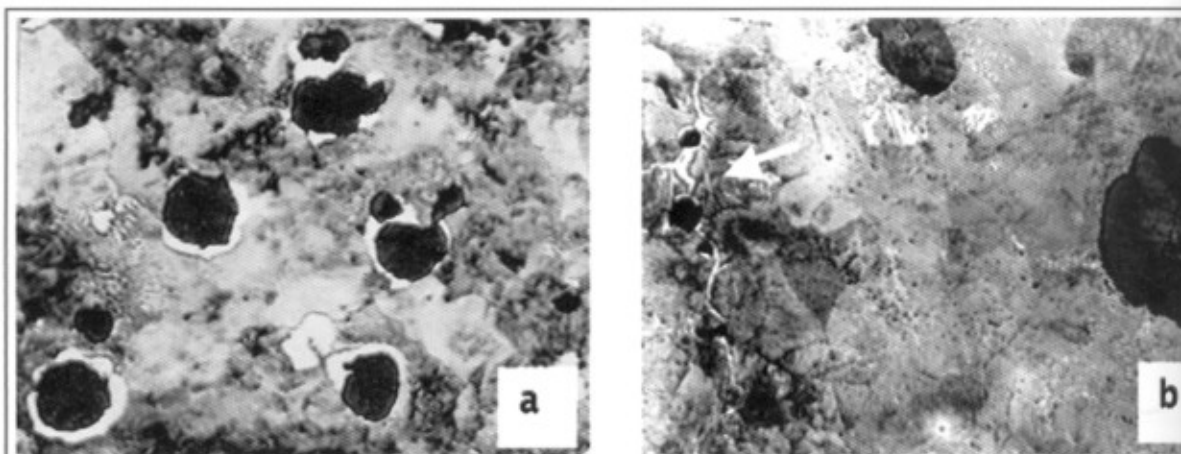


Figura 11: Microestructuras de fundición esferoidal aleadas con Cu y Mn
(a) 0.70% Cu y 0.75% Mn (100x) (b) 0.70% Cu y 1.20 Mn (200x)

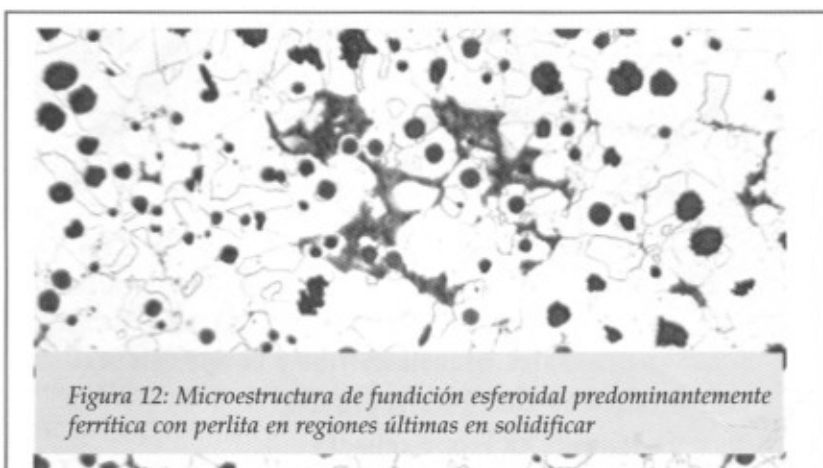


Figura 12: Microestructura de fundición esferoidal predominantemente ferrítica con perlita en regiones últimas en solidificar

cer la reacción eutectoide, como puede apreciarse en la Figura 12.

En síntesis, muchos de los problemas, como la presencia de ferrita libre indeseada en una fundición perlítica, o de restos de perlita en una fundición que debe ser totalmente ferrítica, que son originados por la selección de la aleación, quizá puedan ser subsanados mediante tratamientos térmicos. Sin embargo, éstos últimos ocasionan costos importantes que disminuyen la rentabilidad de la producción. Por lo tanto, es recomendable evitar inconvenientes mediante la selección adecuada de la composición del caldo líquido.

Comentario Final:

La industria de la fundición local está atravesando un buen momento, pero no debe olvidarse que los mercados son cada vez más competitivos y cambiantes. La mejor forma de prepararse para sobrevivir a estos cambios es mantener una política constante de mejora de productos, actualización tecnológica y formación de recursos humanos.

El correcto manejo de los conceptos discutidos en este artículo puede ser fundamental para el diseño de aleaciones que posean la cantidad óptima de aleantes para una aplicación dada. La utilización de los contenidos dentro de intervalos

convenientemente acotados sólo conduce a una reducción del costo de producción, sin que además disminuye los riesgos y facilita el manejo de los costos. ■

Referencias

- Karsay, S. *Ductile Iron. The art* (1980)
- Angus, H. *Cast Iron. Physical Engineering properties* (1976)
- Ductile Iron Handbook*. AFS
- Rivera, G., Boeri R and S. *Revealing the solidification structure of nodular iron; Cast Metals*, Vol. 5 (1995).
- Rivera, G., Boeri R. and S. *Revealing and characterising the solidification structure of ductile cast iron; Materials Science and Technology*, 18, pp 691-697 (2002).
- Beraha, E., Shpigler, B. *Metallography* (1977)
- Rivera, G., Boeri, R. *Si Influencia de la inoculación y la velocidad de enfriamiento sobre la estructura de solidificación de fundiciones de hierro nodular*. *El Fundidor*, Nro. 119, (2005)
- Rivera, G., Boeri, R. *Si Influence of the inoculation and the cooling rate, on the solidification and microstructure of ductile iron; Cast Metals Res.* Vol. 16, Nro. 1, pp 23-28 (2003)
- Rivera, G., Boeri, R. *Si Influence of the solidification structure on the mechanical properties of ductile iron. Int. J. Cast Metals* Vol. 11, pp 533-538 (1999)