

Aplicabilidad de Modelos Matemáticos Para Simular la Nucleación de Partículas de grafito en Fundición Esferoidal de Pequeños Espesores

J.M.Borrajo^a, R.A.Martínez^b, R.E.Boeri^b

^a Estudiante de Doctorado - Politecnico di Torino - Torino, Italia

^b Div. Metalurgia - INTEMA - Fac. Ing. - Univ. Nac. de Mar del Plata

Av. J.B. Justo 4302 - B7608 FDQ Mar del Plata, Argentina, email: rimarti@fi.mdp.edu.ar

RESUMEN

El estudio detallado de la potencial aplicación de la fundición esferoidal en la fabricación de piezas de espesores inferiores a 6 mm es muy reciente. La información con que se cuenta en la actualidad es escasa, contrariamente al estado de conocimiento de su aplicación en espesores convencionales. Uno de los campos de estudio es el referido al cálculo de la evolución del número de partículas de grafito en la etapa de solidificación. Este aspecto ha sido examinado en detalle para espesores convencionales a través de numerosos modelos propuestos por diferentes autores.

Es bien conocido el notable aumento del conteo nodular que se logra con el incremento de la velocidad de enfriamiento, como consecuencia de colar espesores delgados. Este aumento del conteo nodular puede tener un efecto importante en las transformaciones de fase en estado sólido, en la microestructura y en las propiedades mecánicas, y es aquí donde radica la importancia de este estudio.

Los objetivos de este trabajo son: realizar una revisión de modelos reportados en la bibliografía para espesores convencionales y analizar su posible aplicación en piezas de espesores delgados; identificar aquel modelo matemático que se aproxime con mayor exactitud a los datos recolectados de la experimentación en piezas prototipo de espesores delgados; y por último proponer un modelo matemático aplicable a la evolución de partículas de grafito con el fin de disminuir las discrepancias posibles entre datos de conteo nodular modelados y medidos. A tal fin se escribió un programa de cálculo con todos los modelos de nucleación reportados. Algunas de las variables a ingresar son la composición química, temperatura de colada, velocidad de extracción de calor y diferentes coeficientes no claramente especificados en las publicaciones. Se realizaron también comparaciones con datos experimentales obtenidos sobre coladas instrumentadas con termocuplas, para prototipos de espesores en un rango de 38,1 a 1,5 mm.

Palabras claves: Fundición nodular, conteo nodular, modelos de nucleación, espesores finos.

ABSTRACT

Recently, the scientific community has begun to study in detail the potential application of ductile iron in the production of thin wall components. Efforts are focused on the identification of the operative conditions necessary to obtain parts free of defects, with the desired microstructure. These aspects have been widely examined in the past for parts of conventional thicknesses (more than 5 mm), either experimentally or by using computational programs to model the solidification process. Nevertheless, modeling of thin walled parts is still unreliable, since specific databases are not available.

It is well known that noticeable increments of nodule count take place when the cooling rate increases, for example as a consequence of the presence of thin walls. The increase in the nodule count can have an important effect on the solid-state phase transformations of ductile iron, and on its microstructure and mechanical properties; these are the goals of the present work.

The objectives of this work are: to review the current models for conventional thicknesses and to analyze their application for being used in thin wall parts; to identify those mathematic models that match with the experimental data on thin wall prototype castings; and finally the creation of a new model capable to calculate the evolution of the graphite particles with sufficient precision according to measured and modeled nodule count. In order to do that a computer program was written capable to analyze the current nucleation model. Some of the input parameters were chemical composition, pouring temperature, heat transfer rate and a number of coefficients not clearly defined in all models. Comparison with experimental data from instrumented thin wall prototypes, ranging from 1.5mm to 38.1mm, was also carried out .

Keywords: Ductile iron, nodule count, nucleation models, thin-wall castings.

1. INTRODUCCION

Si bien el concepto de solidificación es generalmente bien comprendido, en la práctica suele no tenerse en cuenta que en la mayor parte de las piezas metálicas, la etapa de solidificación juega un rol preponderante en la obtención de las propiedades mecánicas deseadas. El efecto de la solidificación es más evidente cuando se trata de piezas obtenidas por el proceso de fundición. En este caso las propiedades finales del componente dependerán notablemente de las condiciones de enfriamiento en cada posición de la pieza. La influencia de la solidificación se vincula con la presencia de defectos, que muchas veces son difíciles o aún imposibles de eliminar. En etapas posteriores. Por lo tanto un buen control del proceso de solidificación es sumamente crítico en la obtención de las propiedades óptimas deseadas.

Las aplicaciones de fundiciones esferoidales, FE, continúan aumentando notablemente en los últimos años debido a su bajo costo de producción y a la variedad de microestructuras obtenibles, las que permiten disponer de un amplio espectro de propiedades mecánicas.

Recientemente, el interés en la producción de piezas de fundición esferoidal (también llamada fundición nodular) se ha visto impulsado por la posibilidad de producir piezas de paredes delgadas, como alternativa para reemplazar a aleaciones ligeras en componentes con alta relación resistencia-peso.

Es bien conocido el notable aumento del conteo nodular que se logra con el incremento de la velocidad de enfriamiento, como consecuencia de colar espesores delgados. El aumento del conteo nodular puede tener un efecto importante en las transformaciones de fase en estado sólido, en la microestructura y en las propiedades mecánicas. Sin embargo la información disponible con respecto al cambio que sufre el conteo nodular debido a la disminución del espesor es todavía escasa, especialmente para las secciones de paredes delgadas que actualmente se encuentran en pleno desarrollo.

En este trabajo se revisan los modelos de nucleación de partículas de grafito aplicables a piezas de fundición esferoidal de espesores convencionales (mayores a 10 mm). Se analiza también la posibilidad de aplicar dichos modelos a la predicción de la evolución de la cantidad de nódulos de grafito en piezas de espesores finos. Se propone asimismo un modelo mejorado basado en la comparación de datos experimentales de conteo nodular y en el análisis de los modelos reportados en las publicaciones.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La experimentación comprendió el relevamiento de diferentes parámetros característicos en muestras de FE sometidas a diferentes condiciones de enfriamiento. Las piezas de donde se extrajeron las muestras metalográficas fueron coladas en planta piloto de fundición de la División Metalurgia INTEMA. La fusión se realizó en un horno de inducción de media frecuencia, empleando una carga compuesta por chatarra de acero, arrabio y retornos de fundición. El metal se trató con 2% en peso de FeSi9%MgCe y se inoculó con un 0,6% en peso de Fe75%Si, usando el método sandwich y proceso de inoculación tardía. El líquido se sobrecalentó a 1440°C y se coló a 1390°C, aproximadamente.

En la Figura 1 se muestran las geometrías y dimensiones de las piezas coladas, que presentan secciones que varían entre 38,1 mm y 1,5 mm. Los moldes fueron construidos con arena seleccionada ligada con resina. Los mismos fueron instrumentados con termocuplas tipo K para registrar las curvas de enfriamiento de cada una de las secciones.

Se trabajó con fundiciones esferoidales sin alear, eutécticas e hipereutécticas (4,3 - 4,6% carbono equivalente, CE).

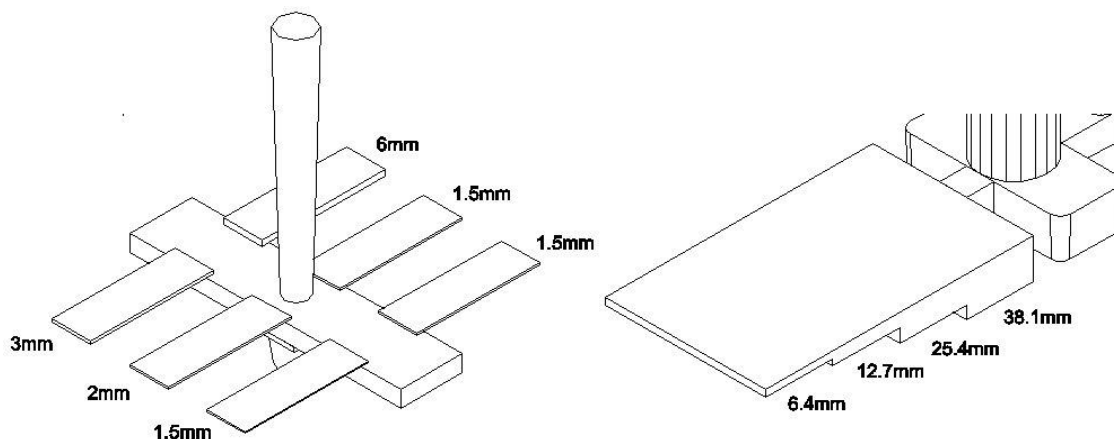


Figura 1. Forma y dimensiones nominales de las piezas prototipo.

Con los espesores seleccionados se garantizó un considerable variación de la velocidad de solidificación. Debido a la dificultad de obtención de las probetas sanas de espesores de 1,5 mm, se decidió de colar tres de estas secciones por colada.

La solidificación y enfriamiento de las piezas se modeló utilizando el programa SIMTEC (Licencia Académica de la División Metalurgia INTEMA). En la simulación de la solidificación de piezas de espesores delgados debe modelarse cuidadosamente el intercambio de calor entre el metal y el molde durante el llenado, ya que el flujo de metal, además de enfriarse notablemente, calienta ciertas porciones del molde, lo que afecta las condiciones locales de solidificación.

Se tomaron muestras metalográficas del centro de cada una de las secciones, y con la ayuda del analizador de imágenes Image-Pro Plus 1.3, se cuantificó el conteo nodular. En la determinación del conteo nodular fueron tenidos en cuenta aquellos nódulos con un área mayor a $15 \mu\text{m}^2$, para las secciones mayores, y de $8 \mu\text{m}^2$ para las secciones más finas, siempre trabajando con una magnificación de 100X. También se fijó un límite para la redondez (relación entre el diámetro menor y el diámetro mayor), ambos a fin evitar de considerar a pequeños defectos, microrrechupes y defectos del pulido como nódulos, y de este modo relevar con la mayor exactitud posible el número nódulos de grafito presente en las muestras.

En lo que hace a la parte numérica, se escribió un programa para calcular la velocidad de nucleación de las partículas de grafito con diferentes subrutinas de cálculo conteniendo cada uno de los modelos de nucleación en análisis. Como datos de entrada se ingresaron las curvas de enfriamiento, ya sea medidas experimentalmente o modeladas en el programa SIMTEC, y los porcentaje de C y Si. El programa determina además las temperaturas características del diagrama Fe-C calculadas según las formulaciones reportadas por Heine [1] y una forma de la evolución de la fracción sólida similar a la reportada en la literatura [2]. Los diferentes coeficientes de los modelos de nucleación deben ser ingresados como datos de entrada. Para estos últimos, en varios casos no se encuentran especificados los valores de los coeficientes intervinientes, por lo que se realizaron diferentes corridas preliminares.

Usualmente el conteo nodular es reportado como número de nódulos por unidad de volumen (N_V). Se debió adoptar un modelo para convertir el valor de conteo nodular en volumen a conteo nodular en superficie (N_A). Con este objeto se adoptó la expresión de Richoz [3].

$$N_V = 2,69 \cdot (N_A)^{3/2} \Rightarrow N_A = \left(\frac{N_V}{2,69} \right)^{2/3} \quad (1)$$

En la bibliografía se reportan varias ecuaciones que relacionan estas dos formas de expresar el conteo nodular, sin embargo todas ellas consideran el conteo nodular volumétrico como una constante multiplicada por el conteo nodular expresado por unidad de área elevado a la potencia 3/2. La diferencia entre las diferentes expresiones recae justamente en el valor que toma la constante premultiplicativa. El uso de la ecuación (0) permite obtener valores de conteo nodular dentro de la media del conjunto de formulaciones reportadas en la bibliografía.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Modelos de solidificación

La primer gran división que se puede hacer en los modelos de solidificación estudiados es entre aquellos que tratan a la solidificación como homogénea o como heterogénea. Los modelos de solidificación heterogénea disponibles son simples extensiones de las teorías de nucleación homogénea, la cual considera como tal a toda nucleación que procede sin ayuda de elementos externos. En base a observaciones microestructurales, es ahora ampliamente aceptado que los esferoides de grafito nuclean heterogéneamente sobre sitios de nucleación proporcionados por el tratamiento de inoculación e inclusiones no metálicas [4, 5].

El cálculo de la tasa de nucleación de los nódulos de grafito al igual que de la austenita, dN/dt , es la etapa más complicada en el modelado de la cinética de solidificación, debido a que la teoría formal de la nucleación heterogénea no se puede aplicar para estos cálculos. Debido principalmente a que requiere del seguimiento de la cinética y de la variación de la energía libre punto por punto a lo largo de toda la pieza durante el proceso de solidificación, además de la identificación de numerosos factores difíciles de definir e cuantificar con exactitud, como la barrera energética de inicio de la nucleación, el tamaño de cluster crítico, la temperatura crítica, la influencia de elementos externos que afectan el carácter heterogéneo del proceso de nucleación, la energía interfacial, etc. Hasta el momento, existen dos métodos alternativos para resolver este problema, por medio de la nucleación continua y por medio de la nucleación instantánea [6], a través de leyes de nucleación basadas en datos empíricos.

Los investigadores que usan la nucleación continua asumen que la nucleación tiene lugar continuamente una vez que se alcanza la temperatura de comienzo de solidificación, durante todo el intervalo de solidificación. Otro modo de abordar

el problema es suponiendo nucleación instantánea, caso en el que se considera que todos los núcleos se generan en el mismo momento a un dado subenfriamiento crítico, ΔT_n .

El primer modelo publicado en la bibliografía fue el modelo de Oldfield [7], en el que se asume la existencia de un amplio espectro de sitios potenciales de nucleación disponibles para la formación de los esferoides de grafito, y que se activan sitios adicionales a medida que la temperatura disminuye. La mayoría de trabajos publicados que estudian la formación de estructuras de solidificación de FE y su modelado utilizan éste modelo para calcular el número de núcleos de grafito. Otros modelos de formación de grafito tienen como base el modelo de Oldfield, yendo desde simples modificaciones de coeficientes hasta modificaciones troncales. En este estudio pionero, Oldfield observó que al aumentar el subenfriamiento también lo hacía el número de nódulos. Basándose en evidencia experimental propuso un modelo de nucleación de la forma:

$$N = A \cdot \Delta T^2 \quad (2)$$

Donde el coeficiente A variaba entre 0,91 y 7,12. Aunque especifica que para fundiciones comerciales puede alcanzar valores próximos a 300.

Diferenciando:

$$dN = 2A \cdot \Delta T \cdot dT \quad (3)$$

y para pequeños incrementos de ΔT

$$\partial N = A(2\Delta T \cdot \partial T + \partial T^2) \quad (4)$$

Donde ΔT , subenfriamiento, es la diferencia entre la temperatura del metal líquido y la temperatura de equilibrio, dT es la disminución de la temperatura en el intervalo de cálculo previo. (Representando físicamente que la población de embriones contiene un número de partículas de tamaño posible de crecer para cada ΔT , y que es directamente proporcional a ΔT).

En algunos trabajos se utiliza directamente la ecuación de Oldfield sin especificar coeficientes [8,9]. Su et al [9] concluyeron que la nucleación se extiende incluso luego del comienzo de la recalcancia y además que no es conveniente aplicar la ecuación de Oldfield para el caso de fundición nodular.

Zhang y coautores [11] utilizaron un modelo mejorado del que inicialmente propusiera Oldfield. Asumieron una nucleación continua en la que la tasa de nucleación a una temperatura específica depende del subenfriamiento eutéctico (ΔT_{eut}), y de la fracción volumétrica de líquido residual (f_L).

$$dN_v = A \cdot f_L \cdot (\Delta T_{eut})^n \quad (5)$$

Ensayos experimentales condujeron a valores de las constantes A y n de 90 y 2,5, respectivamente.

Almansour y coautores [10] afirman que la teoría clásica de nucleación heterogénea no ha sido aplicada con éxito en la solidificación de fundiciones. En su trabajo determinan la velocidad de nucleación de grafito en función del subenfriamiento, utilizando un modelo similar al de Oldfield. El conteo nodular total (N) se compone de la suma del número de núcleos creados hasta el máximo subenfriamiento, N_1 , y el número de partículas nucleadas durante el lapso entre el máximo subenfriamiento y el 50% de la solidificación, N_2 . También reconoce la posibilidad de un número de partículas preexistentes al momento del subenfriamiento, N_0 .

$$N = N_0 + N_1 + N_2 \quad (6)$$

Finalmente el conteo nodular total se expresa en términos del tiempo de solidificación (t_s), del subenfriamiento y de la velocidad de enfriamiento CR, como:

$$N = \frac{a}{b+1} \cdot \frac{\Delta T^{b+1}}{CR} + a \cdot t_s \cdot \Delta T^b + N_0 \quad (7)$$

Ohnaka [11] utiliza este mismo modelo, asumiendo una constante "b" y calculando "a" por regresión lineal. Lacaze, Castro y Lesoult [12,13] observaron en muestras templadas sometidas a solidificación direccional que el número de sitios de nucleación disponibles disminuye durante la solidificación, y que esta variación puede estar relacionada con el cambio en la fracción volumétrica de líquido residual. Finalmente en este trabajo el número de partículas de grafito que aparecen en un volumen V durante el cambio de temperatura del metal fue propuesto como dependiente de la variación del subenfriamiento con respecto a la línea de liquidus del grafito, como:

$$dN = A \cdot (\Delta T_L^g)^{n-1} \cdot (g^l \cdot V^{off}) \cdot \frac{d(\Delta T_L^g)}{dt} \cdot dt \quad (8)$$

$$\text{cuando } \frac{d(\Delta T_L^g)}{dt} > 0$$

$$\text{Y } dN = 0 \quad \text{cuando } \frac{d(\Delta T_L^g)}{dt} < 0 \quad (9)$$

dN: número de nuevas partículas de grafito.

A: coeficiente de inoculación.

n: constante que caracteriza la eficiencia de la inoculación.

ΔT_L^g : subenfriamiento con respecto a la línea de liquidus del grafito.

$(g^l \cdot V^{off})$: volumen de líquido remanente.

Experimentalmente obtuvieron valores de $n=1$, y $A=4 \cdot 10^{11}$ o $1 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}\text{K}^{-1}$ dependiendo si el metal líquido fue postinoculado o no, respectivamente. Según este modelo, la nucleación se detiene cuando el subenfriamiento con respecto a la línea de liquidus del grafito decrece durante el proceso de solidificación. Esto puede ocurrir tanto durante la reacción eutéctica, cuando ocurre la recalcancia, como durante la deposición primaria de grafito, si la velocidad de crecimiento de los nódulos es suficientemente grande.

Svensson y Wessén [14] determinaron el número de núcleos de grafito mediante una versión modificada de la ecuación original de Oldfield; donde se tuvo en cuenta el suministro de inoculante en una expresión exponencial. Las constantes fueron evaluadas en ensayos sobre placas inoculadas in stream.

$$N_v = 1 \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(\frac{-t}{40}\right) \cdot \Delta T^{1,25} \quad (10)$$

Donde:

t: tiempo transcurrido desde el momento que se pasa por la línea de liquidus del grafito.

ΔT : subenfriamiento eutéctico.

Llegaron a la conclusión de que la ley de nucleación no es lo suficientemente precisa, y suponen que se debe a que la misma no se ajusta a el método de inoculación aplicado.

Banerjee y Stefanescu [15] observaron que el número de nódulos varía a lo largo de todo el intervalo de solidificación. Determinaron la siguiente ley empírica para evolución del número de nódulos:

$$N = 8171 + 20,82 \cdot \Delta T + 13,96 \cdot \Delta T^2 - 0,21 \cdot \Delta T^3 \quad (11)$$

Donde N es el número de nódulos por cm^2 . Para $\Delta T=0$ el número de nódulos es 8171 debido a la nucleación primaria del grafito, ya que trabajaron con composiciones hipereutécticas.

Stefanescu, Upadhyay y Bandyopadhyay [6] proponen un modelo de nucleación instantánea, suponiendo inicialmente que todos los núcleos se forman cuando $\Delta T= 1^\circ\text{C}$, y en un segundo caso que la mitad de los núcleos se forma a $\Delta T= 1^\circ\text{C}$ y la otra mitad a $\Delta T= 5^\circ\text{C}$. Para ambos casos, el número total de nódulos fue el mismo. La dependencia entre la velocidad de enfriamiento y la densidad de granos eutécticos (asumen un modelo uninodular de solidificación) puede ser descrita por una ecuación parabólica de tipo:

$$N_s = K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{dT}{dt}\right)^2 \quad (12)$$

Las constantes K_1 y K_2 han de ser determinadas experimentalmente para cada aleación. Ellos determinaron para su trabajo $K_1=65,82 \cdot 10^4$ y $K_2=3,814$. También observaron que la temperatura de colada juega un rol importante en la densidad de granos, mientras que no encontraron una diferencia apreciable en los dos casos estudiados de nucleación instantánea.

Liu y coautores [16] proponen una ecuación similar al modelo de nucleación instantánea propuesto por Stefanescu, pero suponiendo que la nucleación termina a aproximadamente un 2% de la fracción sólida. Comentan que las constantes K_1 y K_2 se han de determinar experimentalmente (sin reportar valores), y especifican un valor de 1,5 para el exponente de la ecuación.

3.2. Análisis y comparación con datos experimentales

En el gráfico de la Figura 2 se representan los valores de conteo nodular y tiempos de solidificación en función de los espesores reales de las secciones coladas. Se ve claramente que la cantidad de nódulos de grafito aumenta bruscamente cuando se producen piezas de espesores menores a 8 mm.

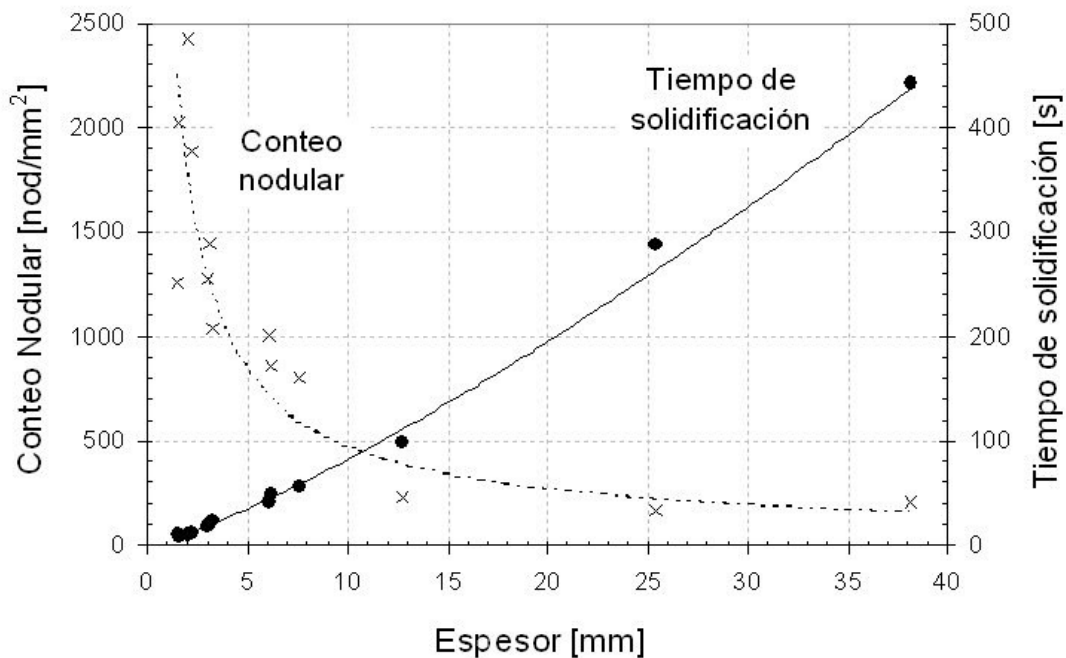


Figura 2. Resultados experimentales de conteo nodular y tiempo de solidificación para cada espesor.

A efectos de analizar el comportamiento de los modelos, se estudió inicialmente el efecto de la fracción sólida en el modelo de nucleación. Para esto se confrontaron los modelos de Oldfield y, Zhang y coautores, asumiendo $n=2$ y $A=300$ en ambos modelos, y se calculó la evolución del número de partículas de grafito en función de la temperatura. Los resultados obtenidos son graficados en la Figura 3, para una sección de 6,3 mm.

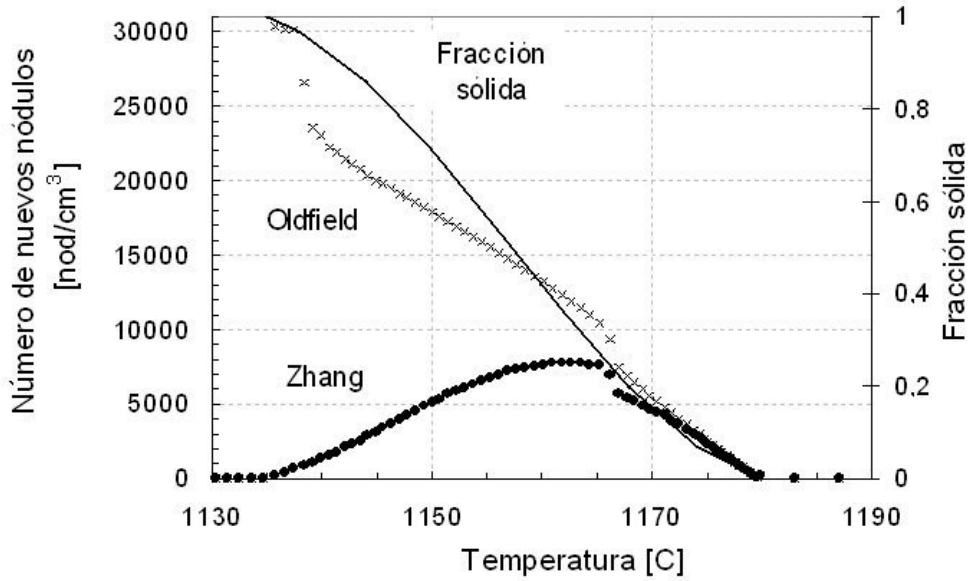


Figura 3. Efecto de la fracción sólida en el modelo de nucleación

Otras de las variables a analizar del modelo es aquella que cuantifica el proceso de inoculación y la eficacia del mismo. Todos los modelos estudiados incluyen una constante que tiene en cuenta este efecto. Su influencia se aprecia claramente en el gráfico de la Figura 4, donde se representó la evolución del conteo nodular en función del tiempo, de acuerdo al modelo de Lacaze y coautores. El conteo nodular se calculó ingresando los dos valores del coeficiente A publicados en sus trabajos. Se adjuntó también la curva de enfriamiento de la sección correspondiente, 6,3 mm. En la Tabla I se listan los resultados más relevantes de los modelos de nucleación que se ajustaron en mayor medida a los datos experimentales recolectados. Cabe mencionar que en varios casos las constantes incluidas en los modelos son válidas sólo para casos muy particulares, por lo que no siempre los resultados obtenidos se asimilaban a los obtenidos de nuestra experimentación.

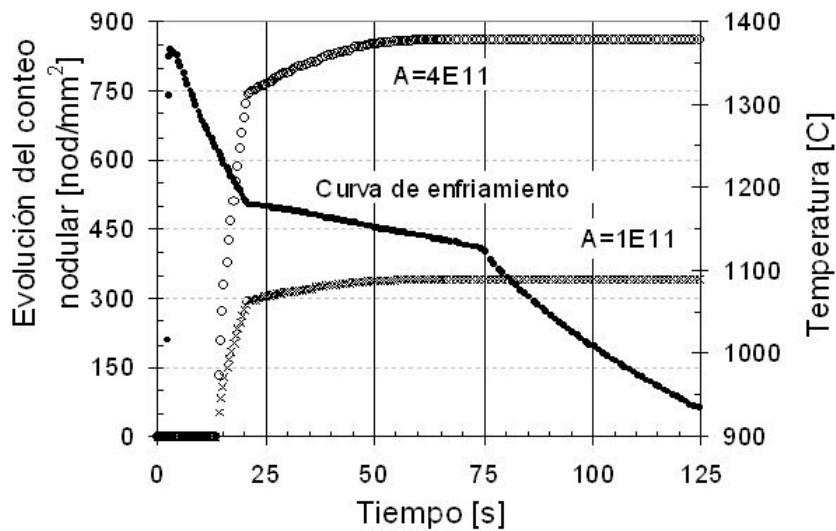


Figura 4. Efecto del coeficiente que tiene en cuenta la eficacia del proceso de inoculación

3.3. Modelo propuesto

Tabla I. Valores de conteo nodular experimental y modelado, para los modelos más relevantes.

Espesor [mm]	Conteo nodular [nod/mm ²]				
	Experim.	Lacaze ^A	Lacaze ^B	Liu ^C	Svensson
38.1	202	462	184	114	31
25.4	162	525	208	143	104
12.7	228	688	273	157	869
7.6	798	-	-	-	-
6.3	-	861	342	170	2782
6.2	854	-	-	-	-
6.1	1007	-	-	-	-
6	-	1326	526	129	4686
3.3	1037	-	-	-	-
3.1	1443	-	-	-	-
3	1275	1386	550	139	6555
2.2	1890	-	-	-	-
2	2423	1417	562	156	7213
1.6	2027	-	-	-	-
1.5	1257	1432	568	161	21471

^A coeficientes: A=4E11, n=1.

^B coeficientes: A=1E11, n=1.

^C coeficientes: K₁=65,82.10⁴, K₂=3,814, n=1,5.

De la confrontación de datos experimentales y los resultados del modelado, surge que el modelo que mejor representa la formación de partículas de grafito es el reportado por Lacaze y coautores. Sin embargo se debería hacer una corrección debido a que el conteo nodular modelado tiende a ser menor (cuando se usa A=1.10¹¹, o mayor para A=4.10¹¹) que el real cuando los espesores se hacen muy chicos. Considerando el efecto del factor exponencial que utiliza la formulación de Svensson y Wessén sobre el conteo nodular, se sugiere emplear un factor exponencial, que aumenta con la disminución del espesor, con el fin de simular la influencia del espesor.

En trabajos previos [17] se ha resaltado que el espesor no es un parámetro independiente, ya que a igual espesor pueden obtenerse diversas velocidades de enfriamiento dependiendo del molde, y por ende diversos conteos nodulares. Un parámetro independiente que puede ser empleado para caracterizar la velocidad de enfriamiento es el tiempo de solidificación. El inconveniente que para cuantificar este parámetro es necesario realizar mediciones experimentales o simular el proceso de colada. A tal fin se podría realizar un modelado preliminar para calcularlo y contar con él como dato de entrada en una nueva formulación del modelo de nucleación.

Finalmente se propone un modelo modificado de la forma:

$$dN = A \cdot (\Delta T_L^s)^{n-1} \cdot f_L \cdot B_e \cdot \frac{d(\Delta T_L^s)}{dt} \cdot dt \tag{13}$$

cuando $\frac{d(\Delta T_L^s)}{dt} > 0$

Y $dN = 0$ cuando $\frac{d(\Delta T_L^s)}{dt} < 0$ (14)

con: A: 1,5.10¹¹ [m⁻³K⁻¹], n=1 y N [nod/m³], T [°C], t [s].

Los valores reportados para ambas constantes, A y n, fueron hallados basándose en los datos de conteo nodular obtenidos en la parte experimental del trabajo. De acuerdo a las características de la colada (cantidad y tipo de

inoculante, tiempo transcurrido entre la inoculación del caldo metálico y el colado del mismo, proceso de inoculación, composición química del caldo, etc) estas constantes, que caracterizan el proceso de inoculación, típicamente pueden variar en un rango de 1 a 2 para n y de $5 \cdot 10^{10}$ a $1 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}\text{K}^{-1}$ para A.

B_e es denominado coeficiente de espesor. Según se tenga en cuenta el espesor o el tiempo de solidificación, toma el valor corespondiente a:

$$Be = 1 + e^{\frac{esp-5}{3}} \quad Be = 1 + e^{\frac{0,3 \cdot ts^{0,8}-5}{3}} \quad (15 \text{ a y b})$$

Donde en la ecuación 13-a la variable esp indica el espesor de la pieza colada expresado en milímetros; mientras que en 13-b ts indica el tiempo que dura la solidificación calculado en segundos. Fijada la forma de la expresión del factor B_e , ambas expresiones empíricas se obtuvieron por prueba y error comparando los resultados de conteo nodular experimental y los obtenidos por modelado.

Este coeficiente tiene el significado físico de que al colar secciones delgadas, ya sea por el inoculante como por las grandes velocidades de enfriamiento u otros factores, el conteo nodular crece con una tasa mayor que la tasa de nucleación para secciones convencionales. Este factor siempre es creciente con la disminución del espesor colado. Al igual que la mayoría de las expresiones existentes, ésta no tiene en cuenta la precipitación de carburos cuando la velocidad de solidificación es excesivamente elevada. Con esta salvedad, los resultados con el nuevo modelo arrojaron valores muy próximos a los experimentales, como se puede ver en la Figura 5.

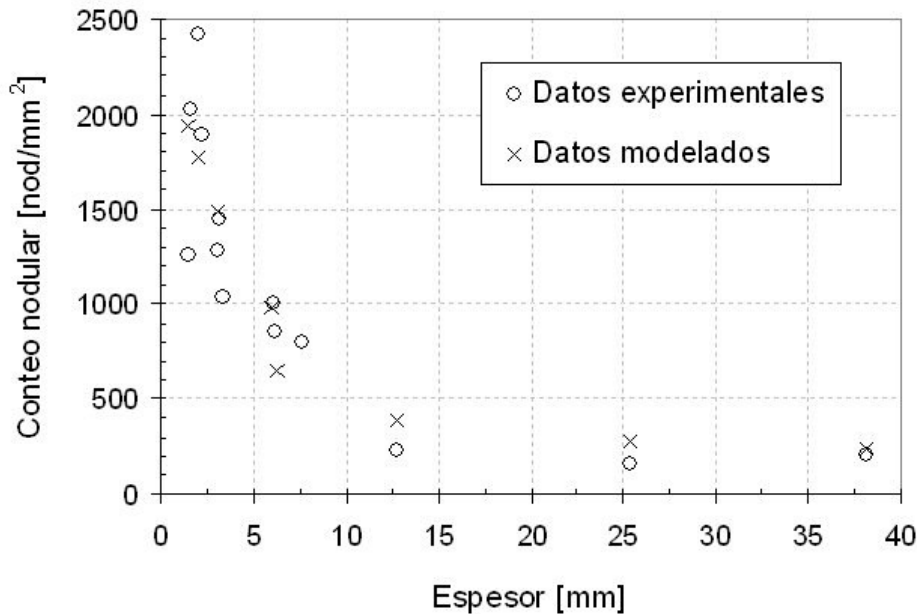


Figura 5. Comparación de datos de conteo nodular experimentales con resultados del modelo propuesto

En la Figura 6 se graficó la evolución del conteo nodular durante la solidificación de las secciones de 1,5 y 3 mm de espesor. Se ve claramente que la tasa de nucleación es alta al comienzo, y disminuye a medida que avanza la solidificación. También se puede observar que la aparición de nuevos núcleos disminuye marcadamente para tiempos mayores a 50% del tiempo de solidificación.

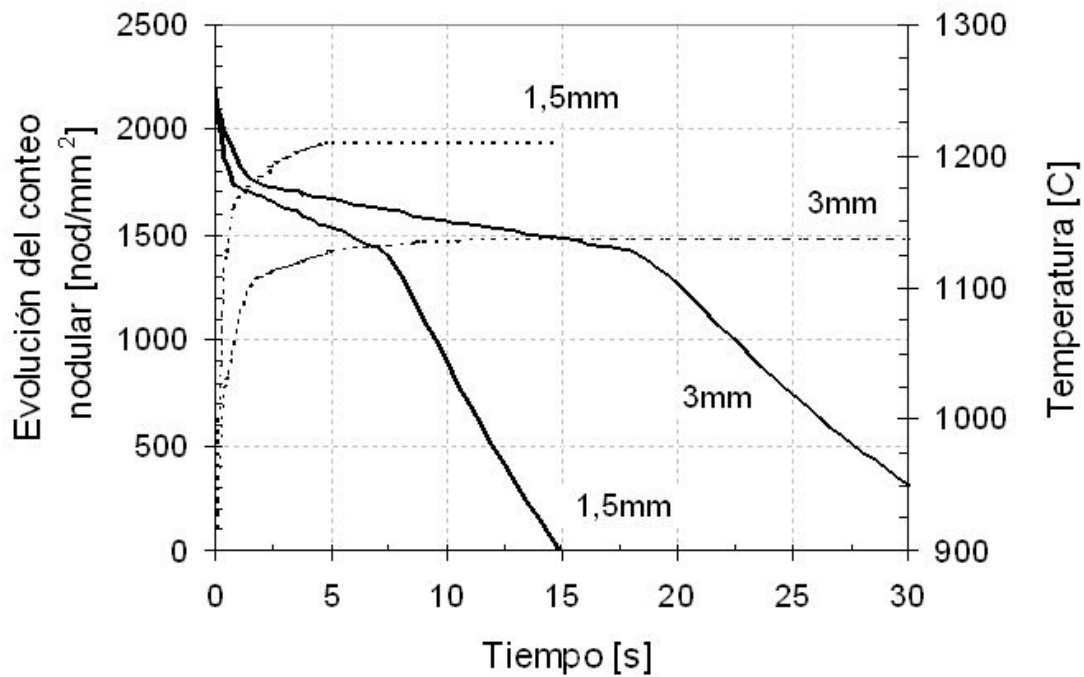


Figura 6. Evolución del conteo nodular para las secciones de 1,5 y 3 mm, junto con curvas de enfriamiento.

4. CONCLUSIONES

- Se compararon los resultados de conteo nodular obtenidos por modelización y experimentalmente. Esto permitió identificar aquellos modelos que mejor se adaptan a la simulación de piezas de secciones delgadas.
- Se observó que los modelos actuales de nucleación no pueden ser directamente aplicables a piezas de espesores delgados.
- Se analizaron las diferentes variables intervinientes, llegando a la conclusión que en el enunciado de un nuevo modelo no se puede obviar el efecto del avance de la solidificación ni del proceso de inoculación.
- Se propuso un modelo de nucleación modificado que tiene en cuenta el aumento del número de partículas de grafito con el aumento de la velocidad de enfriamiento. A tal efecto, se propuso un factor de corrección, dependiente ya sea del espesor o del tiempo de solidificación, de acuerdo a la formulación. Los cálculos basados en el modelo muestran un buen ajuste con los resultados experimentales.

5. REFERENCIAS

- [1]. HEINE, R., The Fe-C-Si solidification diagram for cast irons, **AFS Transactions**, v. 94, p. 391-402, 1986.
- [2]. WETTERFALL, S.; FREDRIKSSON, H.; HILLERT, M. Section IV: Solidification. **Source Book on Ductile Iron**. American Society for Metals. Ohio, p. 162- 184, 1977.
- [3]. CHARBON, CH., RAPPAZ, M. 3D stochastic modelling of nodular cast iron solidification. . *Advanced Materials Research*. Vol 4-5, 1997. p. 499- 504. En: *Proceedings of the Third international symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron V*. LESOULT, G.; LACAZE, J. Lugar: editora, p. 453-460, 1997.
- [4]. PURDY, G.; AUDIER, M. Electron microscopical observations of graphite in cast irons. *Proceedings of the Third international symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron*. Stockholm, Swesen, August 29-31, p. 13-23, 1984.

- [5]. ELTIOTT, R. **Cast Iron Technology**. Editorial Butterworths, 1988.
- [6]. STEFANESCU, D.; UPADHYA, G.; BANDYOPADHYAY, D., Heat Transfer-Solidification Kinetics Modeling of Solidification of Castings, **Metallurgical Transactions**, v. 21A, p. 997-1005, 1990.
- [7]. OLDFIELD, W., A quantitative approach to casting solidification: freezing of cast iron, **ASM Transactions**, v. 59, p. 945-961, 1966.
- [8]. FRÁS, E.; KAPTURKIEWICZ, W.; BURBIELKO, Computer modeling of primary structure formation in ductile iron. *Advanced Materials Research*. Vol 4-5, p. 499- 504, 1997.
- [9]. SU, K.; OHNAKA, I.; YAMAUCHI, I.; FUKUSAKO, T., Computer simulation of solidification of nodular cast iron. *Proceedings of the Third international symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron*. Stockholm, Sweden, August 29-31, 1984. p. 181-.189
- [10]. ALMANSOUR, A.; MATSUGI, K.; HATAYAMA, T.; YANAGISAWA, O., Simulating solidification of spheroidal graphite cast iron of Fe-C-Si system. **Materials Transactions**, v. 36, p 1487-1495, 1995.
- [11]. ZHANG, Y.; SUBRAMANIAN, S.; PURDY, G., Graphite growth in S.G. cast irons: simulation vs. Experiment. En: **Physical Metallurgy of Cast Iron V**. LESOULT, G.; LACAZE, J. Lugar: editora, p. 461, 1997.
- [12]. LESOULT, G., CASTRO, M., LACAZE, J., Solidification of spheroidal graphite cast irons – I. Physical modeling. **Acta Mater.**, v. 46, p. 983-995, 1998.
- [13]. LESOULT, G., CASTRO, M., LACAZE, J., Solidification of spheroidal graphite cast irons – II. Numerical simulation. **Acta Mater.**, v. 46, p. 997-1009, 1998.
- [14]. SVENSSON, I., WESSÉN, M., Integration of casting process and microstructure medelling in an industrial nodular iron casting by computer simulation. En: **Physical Metallurgy of Cast Iron V**. LESOULT, G.; LACAZE, J. Lugar: editora, p. 535-542, 1997.
- [15]. BANERJEE, D.; STEFANESCU, D., Structural transitions and solidification kinetics of SG cast iron during directional solidification experiments. **AFS Transactions**, v. 99, p. 747-759, 1991.
- [16]. LIU, B.; ZHAO, H.; LIU, W.; WANG, D.; SHANGGUAN, D.; CHENG, J., Study of microstructure simulation of spheroidal graphite cast iron. **Int. J. Cast Metals Res.**, v. 11, p. 471-476, 1999.
- [17]. BORRAJO, J.; MARTÍNEZ, R.; BOERI, R.; SIKORA, Shape and count of free graphite particles in thin wall ductile iron castings. **J. ISIJ International**, v. 42, N. 3, p. 257-263, 2002.