

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE FUNDICIONES ESFEROIDALES FERRÍTICAS EN BRUTO DE COLADA

A. Suárez Sanabria y J. Fernández Carrasquilla

Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. Universidad Pública de Navarra.
Campus de Arrosadía. 31011 Pamplona. España

Resumen. Con objeto de estudiar el efecto de la diferente velocidad de enfriamiento, los cambios de composición y los de microestructura sobre las propiedades mecánicas de dos fundiciones de grafito nodular y matriz ferrítica, se fabricaron dos cubos mediante colada en moldes de arena cuya arista presenta una longitud de 300 milímetros. A uno de ellos se le añadió una mezcla acondicionadora, que introduce en el metal fundido los elementos: Si, Ca, Al, Zr, Mn, Bi, Ce y otros elementos de las tierras raras. El cubo sin acondicionador contiene, como es habitual, silicio y magnesio procedentes del inoculante (ferrosilicio) y del nodulizante (Fe-Si-Mg). Se investigan los efectos del tamaño, forma y distribución de los nódulos de grafito y de la microestructura de la matriz sobre la resistencia mecánica y resistencia a impacto de ambas fundiciones. Se describe su composición química y las técnicas utilizadas para realizar los ensayos mecánicos. También se incluye una descripción de las técnicas de análisis metalográfico utilizadas en esta investigación.

Abstract. In order to carry out a study of the effect of the different cooling speed, and changes in composition and microstructure upon the mechanical properties of two cast irons of nodular graphite and ferritic matrix, two cubes were manufactured through casting in sand moulds showing an edge of 300 millimeters in length. A conditioner mixture which introduces the elements: Si, Ca, Al, Zr, Mn, Bi, Ce, and other elements of the rare earths into the founded metal, was added to one of the cubes. The cube without conditioner contains, as it is habitual, silicon and magnesium which proceed from the inoculant (ferrosilicon) and from the nodulizant (Fe-Si-Mg). The effects of the size, shape, and distribution of the graphite nodules and of the microstructure of the matrix upon the mechanical resistance and impact resistance of both cast irons are investigated. Their chemical composition and the techniques used to perform the mechanical tests are described. A description of the techniques of metallographic analysis used in this research is also include

1. INTRODUCCIÓN

En el caso de las fundiciones es bien sabido que la microestructura del material viene condicionada por el espesor de la pieza, de manera que en función de éste, las propiedades mecánicas nunca pueden tener en el interior, cuya velocidad de enfriamiento es menor, los mismos valores que en el exterior de la misma.

En estos casos, los trabajos deben ir encaminados a considerar todos aquellos aspectos que favorezcan el que la microestructura, y en consecuencia las propiedades mecánicas en el centro térmico de las piezas (aproximadamente a 150 mm. hacia el interior de la misma) cumplan las exigencias de la norma para las probetas testigo.

El tratamiento térmico de ferritización provocaría un incremento de aproximadamente 0,15 / Kg. lo que repercute de un modo importante en el precio de piezas que pueden pesar 10 Toneladas, por tanto interesa trabajar sobre el supuesto de mejorar la calidad de los productos fabricados sin considerar la aplicación posterior de tratamientos térmicos.

En cuanto a los defectos observados en algunas piezas y que se deben evitar, hay que resaltar la presencia en determinados casos de grafito Chunky y de perlita. Según Brechmann [1], Bi y Sb son elementos perlitizantes. La experiencia indica que el grafito Chunky no se presenta en las piezas fabricadas cuando se trabaja con espesores inferiores a 70 mm. e incluso algo superiores a este valor.

En lo concerniente al proceso, existe una gran variedad de inoculantes comerciales y la inoculación por adición de ferrosilicio se efectúa en horno o cuchara. La cantidad de magnesio que se añade depende del procedimiento de fabricación, ya que es función del tiempo de difusión del elemento; habitualmente se procede de manera que quede finalmente entre 0,030% a 0,050% de magnesio residual. El tiempo de difusión (12-14 minutos) es independiente de la masa de la pieza colada. Las mazarotas tienen un módulo de aproximadamente 1,2 veces el módulo de la pieza.

Con anterioridad a la realización del trabajo, se estudiaron diversos informes sobre trépanos extraídos de piezas. En ellos, no aparece grafito Chunky, pero se presentan otros problemas en el núcleo, tales como

presencia de microinclusiones, grafito de forma irregular y valores de 5-10% de perlita. Los trépanos muestran valores bajos de resiliencia y el número de nódulos en el núcleo es de 30 a 40 nódulos/mm². Se puede suponer por tanto según diversos autores [2] y [3] que la causa de su baja resistencia a impacto reside en el reducido número de nódulos/mm², ya que el contenido en perlita no es excesivamente elevado. Como resultado de lo anterior, el equipo investigador sugiere ensayar un acondicionador que, según informaciones previas, eleva el número de nódulos/mm² de grafito, mejorando así la microestructura de las fundiciones nodulares. La adición se debe realizar antes de que ocurra la esferoidización. La composición química de los dos productos que, una vez mezclados, constituyen el acondicionador son las siguientes:

Tabla 1 Composición química del acondicionador

%	Producto 1	Producto 2
Silicio	60-64	58 – 62
Aluminio	0,8 (máx)	0,6 – 1,5
Calcio	1,8 – 2,4	0,6 – 1,5
T. R.	1,0 (aprox.)	
Circonio		2,5 – 3,5
Bismuto	1,0	
Cerio		2,0
Manganeso		2,5 – 3,5
Hierro	Resto	Resto

Con estas premisas, se plantea el estudio de dos cubos de 300 mm. de arista: uno de ellos obtenido mediante acondicionado por adición de la mezcla citada y el otro cubo sin acondicionar. La mezcla acondicionadora introduce en el fundido los siguientes elementos: Si, Ca, Al, Zr, Mn, Bi, Ce y otros elementos de las tierras raras. El cubo sin acondicionador contiene, como es habitual, silicio y magnesio procedentes del inoculante (ferrosilicio) y del nodulizante (Fe-Si-Mg). La inoculación se realizó no en cuchara sino en bañera. Una vez fabricados los dos cubos con y sin acondicionador de 300 mm. de longitud de arista se extrajeron dos secciones de 30 mm. de espesor, cada una del centro de los cubos y se dividieron a su vez en 8 prismas de 30 mm. de espesor. Las referencias desde un extremo hasta el opuesto son las siguientes: 1,2,3,4,5,6,7,8 para las muestras procedentes del cubo sin acondicionar y 1c, 2c, 3c, 4c, 5c, 6c, 7c, 8c para las procedentes del cubo acondicionado. Así, las muestras de referencia 4, 5, 4c y 5c representan los centros térmicos de ambos cubos.

Sobre dichas muestras se realizaron: análisis químicos, ensayos de impacto a -20+/-2°C, ensayos de tracción y dureza y análisis de imagen sobre probetas metalográficas. En resumen, con objeto de estudiar el efecto de la diferente forma, tamaño y distribución de los nódulos de grafito en una matriz ferrítica sobre las propiedades mecánicas, se emplearon dos cubos cuya arista mide 300 mm. de longitud fundición dúctil y

matriz ferrítica de diferente composición química coladas en moldes de arena.

2.MATERIALES Y PROCESO DE FABRICACIÓN

No se dio tratamiento térmico alguno, pues precisamente uno de los objetivos del trabajo es mejorar las propiedades del material en bruto de colada, para evitar así añadir el coste que supone el conveniente tratamiento térmico posterior, dadas las dimensiones y peso de las piezas. Las normas a seguir en el presente estudio son fundamentalmente las UNE y DIN 1693 para fundición GGG 40 y de probeta de 70 mm. de espesor. Estas normas han sido sustituidas por la norma UNE-EN 1563 para fundición de grafito esferoidal, siendo la designación de la fundición de matriz ferrítica EN-GJS 400 18 LT.

3. RESULTADOS

Análisis químicos

Tabla 2. Composición química de las fundiciones

%	Normal	Adicionada
Carbono	3,80	3,78
Carbono eq.	4,50	4,53
Silicio	2,08	2,12
Manganeso	0,12	0,14
Fósforo%	0,021	0,119
Azufre	0,011	0,012
Calcio		0,042
Aluminio	0,011	0,025
Magnesio	0,036	0,028
Circonio		0,0085
Bismuto		< 0,034

Se realizan análisis químicos mediante un equipo de ICP sobre tres muestras diferentes, con objeto de estudiar la posible influencia de la segregación de los elementos incorporados con el acondicionador en la distribución, forma y tamaño del grafito.

Muestra nº 1: corresponde a la probeta 5c (cubo acondicionado región central con buena y mala nodulización)

Muestra nº 2: corresponde a la probeta 5 (centro del cubo sin acondicionador, parte exterior extrema)

Muestra nº 3: corresponde a la probeta 5c (cubo acondicionado región entre centro y extremo con mala nodulización)

Tabla 3 Análisis químico de elementos incorporados con el acondicionador. MCD: concentración mínima detectable mediante técnicas con ICP

%	Muestra N1	Muestra N2	Muestra N3
---	------------	------------	------------

Silicio	2,1601	1,9645	2,2510
Aluminio	0,0259	< MCD	0,0243
Manganeso	0,1285	0,1471	0,1428
Fósforo	0,1076	0,1298	0,1217
Magnesio	0,0217	0,0354	0,0282
Calcio	0,0419	0,0391	0,0472
Cerio	< MCD	< MCD	<MCD
Circonio	0,0081	< MCD	0,0090
Bismuto	<MCD	< MCD	< MCD

Ensayos de tracción

Mediante estos ensayos realizados en la máquina universal de Mohr-Federhaff de 400 KN, según norma EN 10002 /1 se obtuvieron los valores correspondientes de resistencia, límite elástico (0,2%) y alargamiento, expresado en tanto por ciento. Se realizan dos ensayos de tracción sobre la probeta de referencia 2 (cubo sin acondicionar) y sobre probeta de referencia 2c (cubo acondicionado), obteniéndose los resultados que se indican en la Tabla 4

Tabla 4 Resultados de los ensayos de tracción

	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A (%)
Ref. 2	369	235	12,9
Ref.2c	366	267	6,4

Ensayos de impacto

El ensayo se realizó según norma UNE-EN 10045 -1 con un péndulo para ensayos de impacto instrumentado Instron-Wolpert. Las probetas, se ensayaron a cuatro temperaturas diferentes (24°C, -20°C, -30°C y -40°C) para lo cual los tres grupos últimos se enfriaron en una mezcla frigorífica de etanol y CO₂. Se ensayan cuatro probetas de Ref.5 y cuatro de Ref. 5C obtenidas de los centros totales de las barretas 5 y 5C, a una temperatura de -20 °C que es la indicada por la norma para este tipo de material. Con objeto de observar la variación de resiliencia, se realizan tres medidas a -30, -40, -20 °C sobre dos probetas cada una (6 en total) de material similar (barreta nº 7) para comprobar el efecto de la temperatura. En la Fig. 1 se ofrece un ejemplo gráfico de determinación de la resistencia a impacto de una de las muestras con el péndulo instrumentado.

Tabla 5 Resultados de los ensayos de impacto

Muestra sin acondicionar	Muestra acondicionada	T= -20C	T=-30C	T=-40C
11,8 J	9,6 J	8,9 J	8,1 J	6,5 J
11,4 J	10,7 J	8,9 J	9,4 J	7,0 J
11,7 J	9,5 J			

12,6 J	10,1 J			
11,3 J				
Valor medio = 11,8 J	Valor medio = 10,0 J	Valor Medio = 8,9 J	Valor medio = 8,7 J	Valor medio = 6,7 J

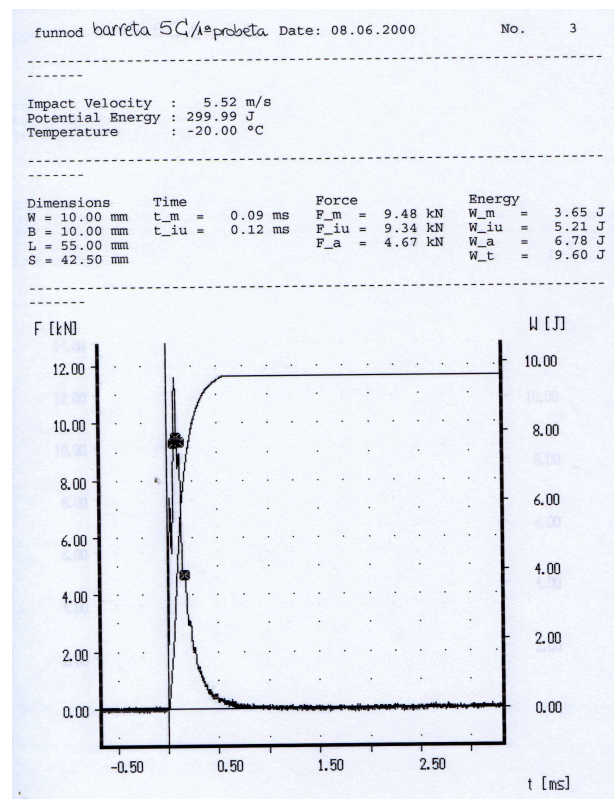


Fig. 1. Gráfico obtenido en la determinación de la resistencia a impacto de una de las muestras.

Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza se realizaron en un durómetro Wolpert-Instron Testor 930/250; el ensayo Brinell s/n UNE-EN 10003-1 utilizando como penetrador bola de acero de 2,5 mm. de diámetro y carga de 187,5 Kg. No obstante, en la norma UNE-EN 1563 "Fundición de grafito esferoidal" se indica que debe realizarse este ensayo con bola de acero de 10 mm de diámetro y carga de 3000 Kg. para abarcar una área mayor de la probeta y obtener un resultado más homogéneo, debido a que los nódulos de grafito influyen en la dureza obtenida.

Tabla 6 Resultados de los ensayos de dureza

Probeta	HB	HB
Ref. 1A	146	144
Ref. 5A	140	142
Ref. 1C	136	139

Evaluación microestructural

Se extrajeron probetas para su estudio metalográfico y se prepararon por los procedimientos convencionales usando como reactivo Nital-2. Fueron observadas mediante un microscopio metalográfico invertido Olympus Mod. PME 3-313 UN asociado a un analizador de imágenes Buehler Mod.Omnimet-3. Se evaluaron características microestructurales tales como tamaño, forma y distribución de grafito. El análisis de imagen se llevó a cabo sobre 20 campos de observación de 0, 51mm² cada uno. En primer lugar se determinó sobre probeta pulida sin atacar: porcentaje de grafito, número de nódulos por milímetro cuadrado, porcentaje de nodularidad y tamaño de nódulo. Respecto a la caracterización del índice de nodularidad se siguió el criterio de considerar esferoidales aquellos nódulos cuyo factor de forma fuese superior a 0,65. La matriz de ambas fundiciones es ferrita y se presentan algunas pequeñas colonias de perlita.

Tabla 7 Resultados del análisis de imagen

	Ref. 5	Ref. 5c
Número de nódulos / mm ² (Valor medio)	163	284
Nodularidad (factor de forma > 0,65)	40%	44,6%
Tamaño de los nódulos	72% #6 25% #5	77% # 6 16% #7 6% #5

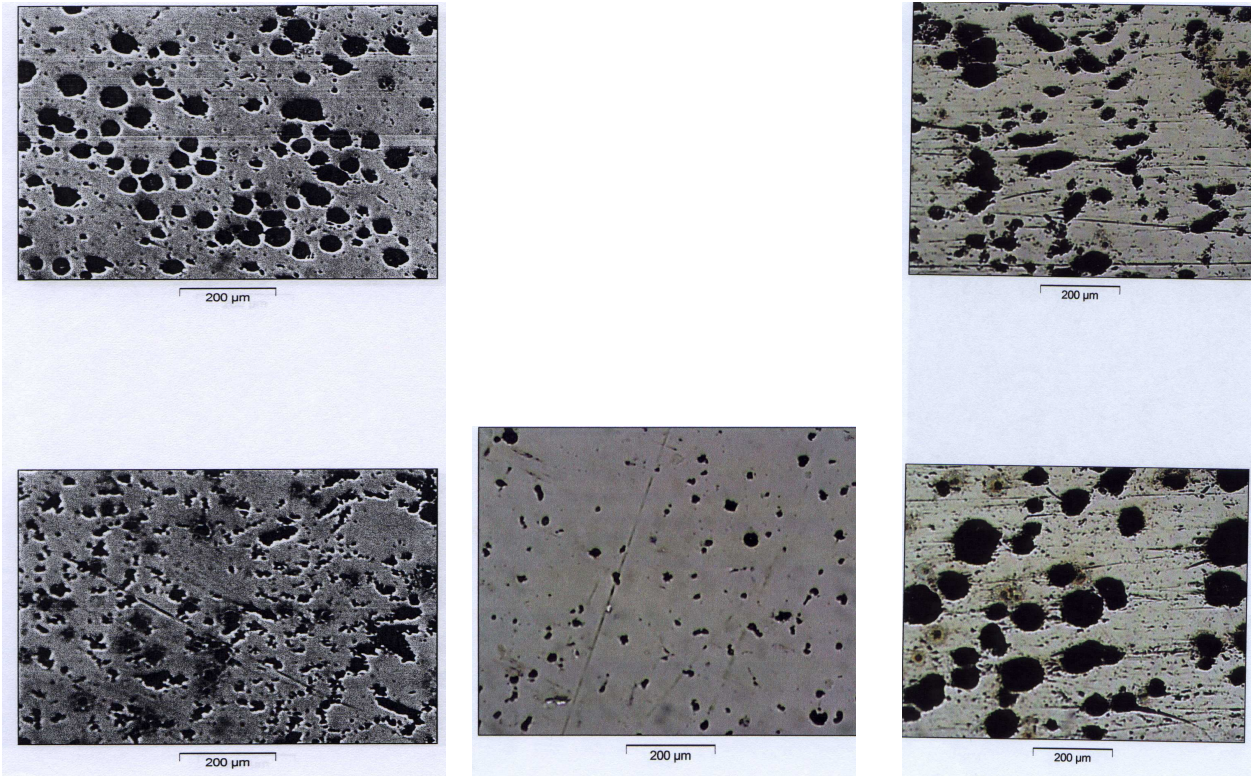


Fig. 2. Microfotografías de referencia “Centro” (izquierda), “Zona intermedia” y “Superficie” (derecha)

Al estudiar las tres microfotografías de la muestra 5 C (acondicionada) de la Fig. 2, en la zona intermedia aparece exclusivamente un tipo de grafito muy pequeño y en muy poca cantidad.

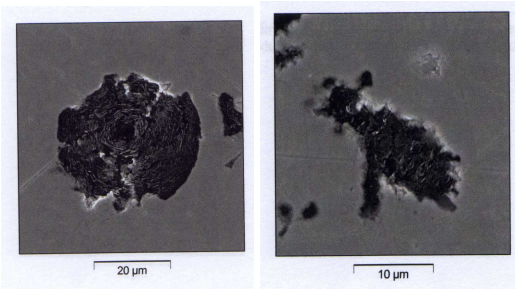


Fig. 3. Aspecto de nódulos de grafito normal (izquierda) y degenerado (derecha)

La Fig. 3 muestra el aspecto de los nódulos de grafito deseables y de los degenerados observados al microscopio electrónico de barrido.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del análisis de imagen obtenidos al estudiar las probetas preparadas metalográficamente inciden en la caída de resistencia a impacto del material acondicionado a pesar de que el número de nódulos / mm² es mayor. Considerando que en las probetas procedentes del cubo sin acondicionador se aprecian muy bien los nódulos esferoidales de grafito, se puede pensar que la caída de resiliencia se debe a la presencia de grafito de forma irregular presente en el cubo acondicionado. Si se observan las imágenes de la probeta acondicionada, el grafito no es esferoidal sino Chunky.

Se consideran algunas opiniones en el sentido de que la causa del mal resultado puede guardar relación con el hecho de que la inoculación (Si-Al) en el caso del cubo C (con acondicionador) no se realizó en cuchara sino en bañera. Esto fue debido a que los proveedores del acondicionador aconsejaron no añadir inoculante. En cambio, el cubo "normal" que no lleva acondicionador, se inoculó como es habitual, en cuchara. El hierro al colar "lame" la "bañera" que contiene el inoculante y es posible que el reparto no sea homogéneo; sin embargo durante la nodulización o el acondicionado, el grado de agitación es mayor y el reparto puede ser más homogéneo.

En consecuencia se planteó la realización de análisis químicos sobre tres muestras diferentes, con objeto de estudiar la posible influencia de la segregación de los elementos incorporados con el acondicionador durante la nodulización o durante la inoculación, en la distribución, forma y tamaño del grafito. En relación con estos resultados se puede comentar que la muestra nº 3 presenta en relación con la nº 1 contenidos más elevados de todos los elementos, excepto aluminio, por otra parte dichos resultados que se pueden observar en la Tabla 3 no ofrecen diferencias significativas en el contenido de los elementos. A pesar de que la mezcla acondicionadora introduce en el fundido los elementos Si, Ca, Al, Zr, Mn, Ce y Bi, la probeta que no lleva acondicionador (nº 2) resultó con la mejor microestructura y contiene mayor proporción de magnesio que las de referencia 1 y 3.

En cuanto a los resultados de los ensayos de tracción (Tabla 4), dan idea de que el material ensayado normal (no acondicionado) es adecuado, pues cumple con los valores exigidos por la norma en resistencia a tracción, límite elástico y alargamiento. Sin embargo, el material acondicionado, a pesar de su elevado límite elástico,

sufre una brusca caída del alargamiento, que le impide cumplir las condiciones impuestas por la norma. Se piensa que la razón de este descenso del alargamiento es de nuevo el grafito Chunky que aparece de forma generalizada en el cubo acondicionado.

Respecto a los ensayos de dureza (Tabla 6), también se observa una ligera disminución en la muestra acondicionada, probablemente debida otra vez a la presencia de grafito Chunky.

5. CONCLUSIONES

No se considera adecuado el uso del acondicionador empleado, cuya composición incluye cerio y otros elementos de las tierras raras. Como se deduce de la discusión de resultados, después de comparar las propiedades mecánicas y las microestructuras correspondientes de la fundición acondicionada y de la no acondicionada, el resultado de la adición del producto, no ofrece resultados positivos. En este aspecto, los resultados observados concuerdan con lo expuesto en la patente japonesa "Método de evitar la precipitación de grafito Chunky" de Haruki Itoi y Ayumu Masutani.

Para atender las exigencias técnicas de cumplimiento en el centro térmico de las piezas de los valores mínimos exigidos por la norma para probeta adjunta, se confirma como positiva la experiencia de estudiar de manera sistemática cubos de arista 300 mm. ya que se ha comprobado con los distintos resultados obtenidos, que reproducen las condiciones del interior de las piezas fabricadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brechmann, Frank. "A study of the effects of bismuth and rare earths when used in inoculants for the treatment of ductile cast irons"
- [2] ASM (1985). "Metallography and microstructures" Metals Handbook, 9th Edition Volume 9 ASM. Metals Park. Ohio
- [3] Izaga, J. & Intxausti, P. (1993). "Metalurgia de las fundiciones de hierro" . Azterlan. Edelvives, Zaragoza.