

Determinación de la Granulometría del Nodulizante y el Parámetro de la Cámara mas adecuados para la obtención del Hierro con Grafito Esferoidal por el Método “In-mold”.

A. Batista Cabrera, U. Ordóñez Hernández.

*Universidad de Holguín. Ave. XX Aniversario. Rpto. Piedra Blanca. Holguín. Cuba

Tel. 428457 e-mail. acabrera@facing.uho.edu.cu

**Facultad de Ingeniería Mecánica. CUJAE, Habana, Cuba.

Telf. 267 1208, e-mail: urbano@mecanica.cujae.edu.cu

Recibido el 12 de Marzo de 2003, aceptado el 6 de Mayo de 2003.

Resumen.

Basados en investigaciones realizadas anteriormente, se determinó la pre-aleación y tipo de cámara más eficiente para la aplicación del procedimiento de obtención de hierro con grafito esferoidal con nodulización en el molde (“In-mold”). En el presente trabajo se realiza un análisis de la granulometría y el parámetro de la cámara (relación entre el volumen del nodulizante y el volumen de la cámara de reacción), con los cuales se obtienen mejores valores de resistencia a la tracción. Como resultado del trabajo se llegó a la conclusión de que con una dimensión del grano de 1 - 1.6mm combinado con el parámetro de la cámara de 0.7, es posible lograr un hierro con grafito esferoidal marca 520-5 por la norma ASTM.

Palabras claves: Grano, grafito esferoidal, método in mold.

1. Introducción.

Entre los parámetros que ejercen influencia en la calidad de la aleación obtenida por medio del “In-mold”, la granulometría y el volumen de la cámara de reacción son de los que presentan mayor influencia en el proceso.

Granulometría.

Aún adicionando la cantidad necesaria de pre-aleación, si la granulometría es inadecuada no se obtiene una nodulización completa en el tratamiento de esferoidización dentro del molde. De acuerdo a varios trabajos de investigación sobre este proceso, se ha observado que cuando se emplean nodulizantes con granulometría (o tamaño de malla) muy fina, no se obtienen buenos resultados debido a que ocurre una oxidación intensiva del magnesio y se pierde su efecto modificador. También cuando se utilizan mayores valores de granulometrías (>3.5 mm) se observa el mismo efecto de poco rendimiento en la modificación debido a la escasa solubilidad de la pre-aleación en el metal. Por lo tanto, la granulometría del modificador (pre-aleación) debe encontrarse en un rango

determinado, en dependencia de las características de la pre-aleación. [1].

Cuando los nodulizantes están formados por una mezcla mecánica de compuestos, se requiere que exista una distribución de tamaño compatible para cada uno de los dos componentes. Como resultado del análisis de los resultados de investigaciones realizadas por Hughes y Mannion [4], se puede tomar como recomendación para la presente investigación valores de partida para la granulometría que se encuentren en un intervalo entre 0.63 y 3mm

Parámetro de la cámara.

No es más que la relación existente entre el volumen del modificador y el volumen de la cámara:

$$(V_M / V_C = K)$$

Para que ocurra una reacción lo mas efectiva posible, el nodulizante dentro de la cámara debe llenar un volumen determinado. Si la cámara se encuentra completamente llena de pre-aleación, se dificulta la entrada del metal a la misma y existe una tendencia a la obstrucción del sistema, lo que provoca un efecto negativo en el proceso de nodulización. Por otra parte, un exceso de espacio vacío dentro de la cámara origina

la presencia de oxígeno en significativa cantidad dentro de la misma y por lo tanto la tendencia a la oxidación del magnesio restándole el efecto nodulizante al mismo. Tomando estos planteamientos como base, se llega a la conclusión de que el parámetro de la cámara como definidor del volumen de la misma es un aspecto tecnológico a controlar y que el mismo define la eficiencia en el proceso de nodulización.[3]

En el siguiente trabajo se plantea como objetivo definir la granulometría y parámetro de la cámara mas eficientes para la obtención de hierro con grafito esferoidal, por el procedimiento "In-mold" utilizando el NODULANT II como prealeación y con una cámara de reacción cilíndrica en la parte superior del molde, con la entrada del metal de forma tangente a la circunferencia del área de la sección de la misma.

2. Materiales y métodos.

En primer lugar, se realizó por medio de experimentos, un análisis de los valores extremos de la granulometría con el fin de definir el intervalo de variación de este parámetro con vistas a su selección. Se utilizó una muestra con la granulometría original del NODULANT II que es de (2,5 mm) y luego se realizó la trituration del mismo hasta que una porción pasara por el tamiz 1.6 y la otra por el tamiz 0.063. Los resultados de estas pruebas se observan en la tabla 1.

Tabla 1 Resultado de los experimentos para determinar los valores aproximados de granulometría a trabajar.

Granulometría	Solubilidad	Forma del grafito
2.5	Escasa, solo el 80% aproximadamente	Laminar con nódulos aislados
1.6	Disuelto el 90% aproximadamente	Nodular al 85%
0.063	Se disolvió todo el nodulizante	50% Laminar y 50% nodular

Las condiciones bajo las cuales se realizaron la pruebas fueron la siguientes. El metal fundido tenía la siguiente composición química:

- C-3,26%
- Si-2,4%
- Mn-0,51%
- P-0,12%
- S-0,03%.

El mismo se obtuvo en un horno de inducción de frecuencia industrial con revestimiento ácido. La carga poseía la siguiente composición: Chatarra de hierro 60%, chatarra de acero 20% y retorno 20%. La fusión se realizó introduciendo en primer lugar la chatarra de hierro y el retorno al caldo base del horno. Transcurrido el derretido se realizó la introducción de la chatarra de

acero. Una vez fundida toda la carga metálica se procede a la carburación del metal con residuos de electrodo de 99% de C. La estructura es rectificada con la adición del ferro-silicio. El vertido se realizó en moldes de arena con la siguiente composición: Bentonita 5%, melaza 2%, agua 4%, arena sílice 89%. Los 3 moldes contenían probetas "Y" de 25 x 75 x 175 de acuerdo a la norma ASTM-01.02 A536-84 (1993). El vertido se efectuó a 1440⁰ C. Después del desmoldeo se evaluó mediante una lupa el nivel de disolución del nodulizante y posteriormente se obtuvieron probetas para análisis metalográfico. Para la ejecución de esta prueba se utilizó una cámara cilíndrica en la parte superior del molde con un volumen de 144cm³

Del análisis de estos resultados podemos concluir que es necesario investigar los valores de granulometría que se encuentren entre 1.6 y 0.63. y cual es la relación más adecuada entre el volumen del nodulizante y de la cámara de reacción con el fin de obtener la mejor estructura y valores de resistencia a la tracción.

3. Diseño del experimento.

Para la determinación de la dependencia entre la resistencia a la tracción y la granulometría y el parámetro de la cámara K se aplicó un diseño de experimento factorial del tipo 3². Para el mismo se analizaron los parámetros que influyen de la siguiente forma:

-Parámetros prefijados: Temperatura de vertido, composición química de la aleación nodulizante, composición química del metal base.

-Parámetros calculados: Tiempo de vertido, velocidad de vertido, área de la cámara de reacción, cantidad de nodulizante requerida.

-Variables a investigar: Granulometría del nodulizante y volumen de la cámara de reacción

Existen otros parámetros que es necesario calcular, pero sus magnitudes dependen del peso específico del nodulizante y este a su vez varía en función de la granulometría. Es por eso que se mostrarán sus valores a medida que se haga el cálculo para la ejecución del experimento.

Variable Independiente:

Granulometría ((0.63);(1);(1.6))

Variable Independiente:

Parámetro de la cámara K ((0.6),(0.7),(0.8))

Variable dependiente:

Resistencia a la tracción (R_M)

Tabla. 2 Tratamientos aplicados en el experimento.

G ₁ K ₁ ; G ₁ K ₂ ; G ₁ K ₃	G ₂ K ₁ ; G ₂ K ₂ ; G ₂ K ₃	G ₃ K ₁ ; G ₃ K ₂ ; G ₃ K ₃
---	---	---

Donde :

G- granulometría

K- Parámetro de la cámara

Cada tratamiento fue replicado 3 veces. El cálculo de la cantidad de nodulizante a introducir se realizó por medio de las recomendaciones de [2], obteniéndose como resultado que para un valor medio de azufre calculado de 0,03% es necesario añadir 151,5 g de magnesio para que ocurra la nodulización.

El siguiente paso fue determinar el peso específico del nodulizante para cada granulometría, observable en la tabla 3.

Tabla.3 Resultado de la determinación del peso específico del nodulizante para cada granulometría.

Granulometría	0.63 mm	1.00 mm	1.6 mm
Peso Específico	0.96 g/ cm ³	1.52g/ cm ³	2.43 g/cm ³

Las dimensiones de cada elemento del sistema de alimentación se observan en la tabla 4.

Tabla.4 Magnitudes de los diferentes elementos del Sistema de Alimentación.

F alim	F ESC.	F ENT.CA	F SAL.CA.	F TRAG.	r _{trag}
4,54 cm ²	4,63cm ²	5.8cm ²	5.18cm ²	6.09 m ²	1,39 cm

Donde:

F ALIM. - Área de los alimentadores

F ESC. - Área del escoriador

F ENT.CA -Área de entrada a la cámara

F SAL.CA - Área de salida de la cámara

F TRAG - Área del tragadero,

r_{trag}.- Radio del tragadero

Para el diseño de las dimensiones de cada cámara de reacción fue necesario comenzar por determinar la masa en Kg de modificador para que ocurra la nodulización y luego el volumen que ocupa el mismo según la granulometría elegida. Este cálculo se realiza mediante la siguiente formula:

$$M_{T.MOD} = M_{gS} + M_{gRED.} \quad (1)$$

Donde:

M_{T.MOD}- Masa total de modificador

Mg.- Magnesio necesario para neutralizar el azufre

Mg_{RED.}- Magnesio necesario para obtener un magnesio residual preestablecido.

$$V_{mod.} = M_{mod.}/Pe \quad (2)$$

Donde:

V_{mod.}-Volumen del modificador (cm³)

M_{mod.}- Masa del modificador(g)

Pe- Peso específico del modificador(g/cm³)

Luego se determina el volumen de cada cámara de reacción para cada granulometría:

$$K = V_{mod.}/V_{cam} \quad (3)$$

Donde:

V_{mod.}- Volumen del modificador.(cm³)

V_{cam.}- Volumen de la cámara de reacción(cm³)

En este caso el parámetro K conocido como parámetro de la cámara se toma como una variable que determina el volumen de la cámara. Este parámetro puede estar entre los valores desde 0.6-0.8 según Iuffe, [3]. Teniendo en cuenta las recomendaciones del mencionado autor se tomó la decisión de variar el parámetro de la cámara en los intervalos de: K=0.6 ; K=0.7; K=0.8. Luego se determina el volumen de la cámara mediante la siguiente expresión.

$$V_{cam.} = V_{mod.}/K \quad (4)$$

Como es ya conocido, la forma geométrica de la cámara de reacción seleccionada es cilíndrica. El siguiente paso a realizar es el cálculo de las dimensiones de la misma con el fin de construir el modelo o plantilla para su construcción.

Conociendo el área de la sección de la cámara ASC se realiza el cálculo de su radio por medio de la formula:

$$r = \sqrt{Asc/3,1416} \quad (5)$$

Donde:

r- radio de la cámara

ASC= Área de la sección transversal de la cámara.

El siguiente paso consiste en el cálculo de la altura de la cámara para cada granulometría.

$$h = VC/\pi.r^2 \quad (6)$$

Donde:

VC-Volumen de la cámara, r-radio de la cámara.

Los parámetros determinados para la aplicación del experimento con el propósito de establecer la tecnología se relacionan a continuación:

- Factor Solución 0,069 Kg/ seg cm
- Velocidad de vertido 1,45 Kg/seg
- Nodulizante NODULANT II (Mg 5%, Si 45%, Ca 2%, Al 3%, Fe 40% y M.T R. el resto)
- Cantidad de aleación nodulizante 151,5g
- Magnesio residual deseado 0,04%
- Área de solución de la cámara 21,01 cm²
- Tiempo de vertido 4,7 seg.
- Composición química del metal base. C-3.26%, Si-2.4%, Mn-0.51%, P-0.12%, S-0.03.

Tabla 5 Resultado de los cálculos del volumen y alturas de las cámaras de reacción para las granulometrías estudiadas.

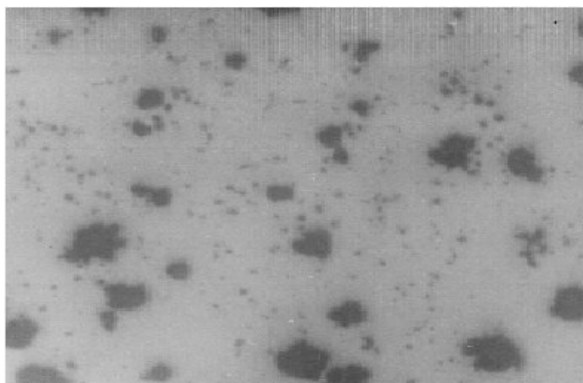
Granulometría.	$K_{0,6}$ [cm ³]	$K_{0,7}$ [cm ³]	$K_{0,8}$ [cm ³]	Alto. $K_{0,6}$ [mm]	Alto. $K_{0,7}$ [mm]	Alto. $K_{0,8}$ [m]
0,63	263	225.4	197.25	125	107	94.38
1	166.1	142.38	124.5	79.47	68.12	59.33
1,6	103.9	89.05	77.9	49.71	42.82	37.27

Tabla 6 Resultado de los Experimentos para determinar la granulometría adecuada y el parámetro de la cámara de reacción.

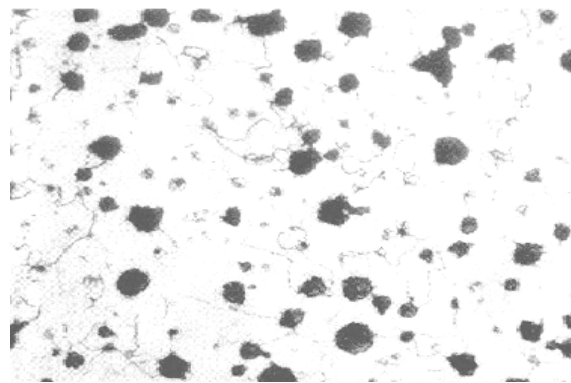
Granulometría.	K	τ_v	HB	% Alargamiento.	R_M (MPa)	% S Después de modificado	Mg Residual.
0.63	0.6	9	225	4	300	0.0176	0.025
	0.7	10	225	5	500		0.034
	0.8	12	229	3	292		0.019
1	0.6	14	225	4	318	0.0176	0.022
	0.7	16	260	6	522		0.036
	0.8	17	229	2	180		0.012
1.6	0.6	20	259	5	403	0.0176	0.024
	0.7	25	241	6	515		0.036
	0.8	28	217	4	320		0.021

Los resultados de los experimentos se pueden apreciar en la tabla 6. En la misma se reflejan los resultados de la resistencia a la tracción que fue tomada como parámetro de salida de mayor importancia, para poder definir cual valor de las variables utilizadas es el mas adecuado para su uso en la tecnología “In-mold”.

En las figuras 1, 2 y 3 se muestra el resultado del análisis metalográfico después del estudio de las microfotografías obtenidas.



(a)



(b)

Figura 1 Fotografías de las microestructuras. En (a) granulometría de 0.63 y K=0.7. Se observa una estructura de nódulos correctos con una densidad de 300 nódulos por campo. Factor de forma 0.83. Estructura ferrítico-perlítica (85-15). 100 aumentos. Estructura de grafito esferoidal aceptable. En (b) granulometría de 0.63 y K=0.8. Se observa una estructura de nódulos incorrectos. Presencia de grafito “chunky” y factor de forma de 0.79. Estructura ferrítico-perlítica (85-15).

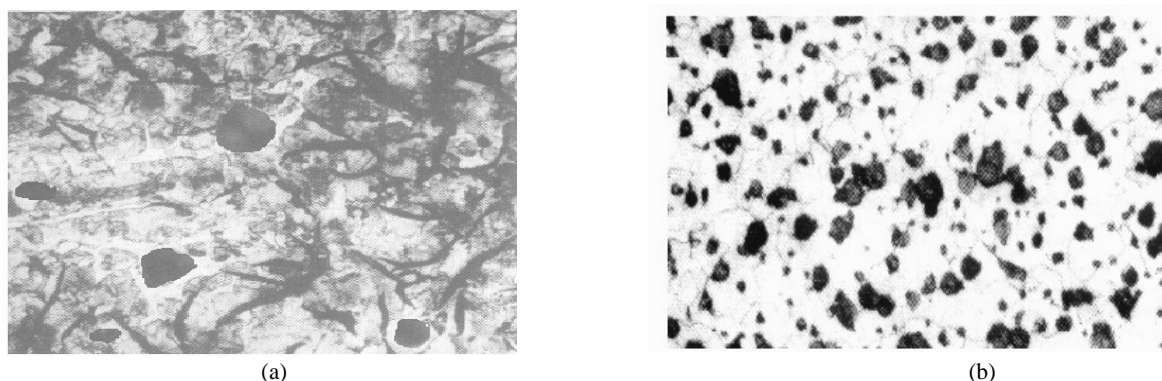


Figura.2 Fotografías de las microestructuras. En (a), granulometría de 1 y $K=0.8$ se observa una estructura de nódulos y grafito laminar rodeado de ferrita con láminas intercelulares. Estructura ferrítico-perlítica (85-15) En (b), granulometría 1 y $K=0.7$ se observa una estructura de nódulos correctos. Densidad de 350 nódulos por campo. Estructura ferrítico-perlítica (85-15).100 aumentos.

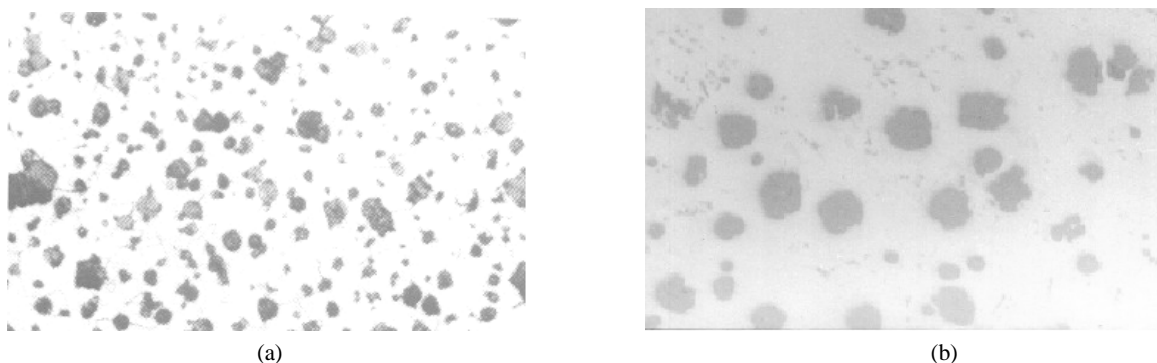


Figura.3 Fotografías de las microestructuras. En (a), granulometría 1.6 y $K=0.7$ se observa una estructura de nódulos correctos. Densidad de 350 nódulos por campo. Estructura ferrítico-perlítica (85-15).100 aumentos. En (b), granulometría de 1.6 y $K=0.8$ se observa una estructura de nódulos incorrectos con grafito estallado y algunos del tipo “chunky”. Estructura ferrítico-perlítica (85-15).100 aumentos.

4. Análisis estadístico de los resultados.

EFFECTOS	VALUE	DIFERENCIAS
Granulometría	0.008	Muy altamente significativa
Parámetro de la cámara	0.000	Muy altamente significativa

Test de rango múltiple de resistencia v.s. granulometría y resistencia v.s. parámetro de la cámara (K). Se utilizó el método de Duncan con 99.9% de confiabilidad. Tabla 7 y figura 4.

Tabla 7. Medias y homogeneidad de las variables independientes.

GRANULOMETRIA			
Parámetro	Cant.	Ls media	Grupos homogéneos
1	9	340.267	X
0.63	9	383.922	X
1.6	9	412.522	X
PARAMETRO DE LA CAMARA			
0.8	9	263.989	X

0.6	9	340.3	X
0.7	9	512.422	X

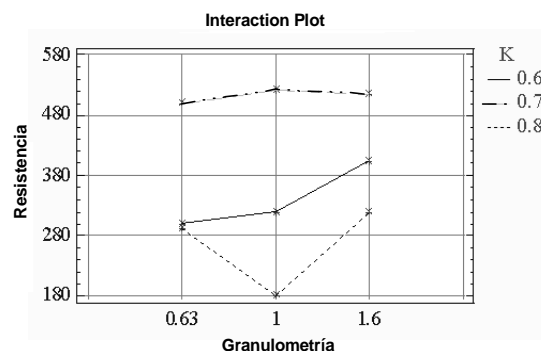


Figura 4.- Gráfico de interacción entre la granulometría y el parámetro de la cámara.

5. Discusión de los resultados.

- La granulometría propia del NODULANT II (2.5mm) no es recomendada, pues sus dimensiones no permiten una disolución

completa del mismo pues sólo se disuelve el 80% por lo que no se logra un gran nivel de esferoidización, observándose una estructura de grafito laminar con pocos nódulos. En el caso del nodulizante con granulometría de 0.063 se observa una estructura de 50% de grafito laminar y 50% de grafito esferoidal con una disolución completa del nodulizante. En este caso debido a las pequeñas dimensiones del grano ocurre una oxidación intensiva del Mg presente en el nodulizante, lo que le resta el efecto modificador al mismo. Por lo tanto como resultado de estas pruebas se puede definir que es necesario investigar entre los valores de granulometría menores de 1.6 y mayores de 0.063.

- La selección del intervalo de variación para el parámetro de la cámara fue realizada basándose en recomendaciones bibliográficas.
- El análisis estadístico de los resultados muestra que para ambos parámetros investigados se denota una diferencia muy altamente significativa, lo cual indica que existe influencia de ambos parámetros en el proceso. Esto es corroborado al notarse que ninguno de los valores se encuentra en grupos homogéneos de significación. El mayor valor de R_M se obtiene con una granulometría de 1.6 con 412.522 MPa y el parámetro de la cámara (K) que aporta mayores valores de R_M es el de 0.7 con 512.422 MPa. Sin embargo al realizar el análisis del gráfico de interacción de la granulometría con K, se observa que la combinación que aporta mejores valores de resistencia a la tracción es la de granulometría 1mm con parámetro de la cámara de 0.7.

- La diferencia entre los valores de R_M obtenidos entre 1 y 1.6 mm de granulometría no es significativa a los efectos de aplicaciones prácticas, por lo tanto se puede aplicar tanto una como la otra magnitud.

6. Conclusiones.

Como resultado de los experimentos realizados y del análisis de los resultados se llega a las siguientes conclusiones:

- La granulometría del NODULANT II para su empleo en la tecnología de obtención de hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold" se debe seleccionar entre los valores de 1 y 1.6 mm.
- El parámetro de la cámara cilíndrica en la parte superior del molde, para su implementación en el método "In-mold" debe encontrarse en 0.7 si se emplea como agente nodulizante el NODULANT II con granulometría entre 1 y 1.6 mm.

7. Bibliografía.

1. Davis.K.G. "Dissolution of mg-fe-si alloy during "in-mold" treatment" .British foundryman. no 8.1999.
2. Dunks C.M. "Mold nodulizing and continuous stream treatment techniques as operated in Europe". Foundry trade journal. 1976 no 234.
3. Iuffe. A. "Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde". Liteinoe proistbostba. no 12. 1994.
4. Material didáctico. Fes Cautiplan. Universidad autónoma de México.1995.

Determination of the nodulazer grain size and the appropriate chamber parameter for obtaining Iron with spherical graphite by means of "In-mold" method

Abstract

Based on investigations carried out previously, it was determined the pre-alloy and type of more efficient type of chamber for the application of the procedure of iron with spherical graphite with nodulization in the mold ("In-mold"). An analysis of the grain and chamber parameter (relationship between the volume of nodulization and the volume of the reaction chamber) was carried out in order to obtain better traction resistance values. As a result reached the conclusion that with a grain dimension of 1 - 1.6 mm combine with the chamber parameter of 0.7, it is possible to achieve an 520-5 iron with spherical graphite according to ASTM.

Key words: Grain, spherical graphite, in mold method.