

EFFECTO DE LA INOCULACIÓN EN CUCHARA DE HIERROS GRISES FUNDIDOS EN HORNO DE CUBILOTE

PAULA ANDREA PÉREZ ESPITIA^{1,3}, ANA MARÍA PÉREZ CEBALLOS^{2,3}, CLAUDIA MARÍA SILVA VELÁSQUEZ³, FERLEY ALEJANDRO VÁSQUEZ ARROYAVE³, RICARDO EMILIO ARISTIZÁBAL SIERRA^{2,3}, JUAN MARCELO ROJAS ARANGO³, HAROLD DAVID MACHADO GONZÁLEZ³.

1. Estudiante de Maestría en Ingeniería. U de A.

2. Docente Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. U de A.

3. Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales -GIPIMME-. U de A.

*Laboratorio de Fundición Universidad de Antioquia, Bloque 19 primer piso, Teléfono: 2198546
e-mail: paulap@udea.edu.co*

RESUMEN

Las fundiciones grises tienen diversas aplicaciones como material estructural debido a su amplio rango de propiedades. Las propiedades mecánicas pueden modificarse en función de características microestructurales, las cuales a su vez dependen fundamentalmente de la composición química del metal base, de las condiciones de fusión, del tratamiento del metal fundido en cuchara y de la velocidad de enfriamiento durante la solidificación. El tratamiento del metal fundido en cuchara conocido como *inoculación en cuchara*, consiste en adicionar un agente inoculante, que permite crear muchos sitios de nucleación dentro del metal fundido, haciendo que la solidificación ocurra con sobreenfriamientos menores, disminuyendo la formación de carburos (*chill*) y favoreciendo la precipitación de grafito libre. El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de la inoculación en cuchara de hierros grises fundidos en horno de cubilote, mediante la comparación de agentes inoculantes comerciales a base de FeSi y SiC. El trabajo presentado aquí corresponde a estudios preliminares, en donde se evalúa el efecto inoculante de los agentes usados en las propiedades tensiles, la dureza, la microestructura y la sanidad (% libre de *chill*) en piezas de bajo espesor. Mediante este estudio se pudo determinar que debido a las características específicas del proceso de fusión llevado en horno de cubilote, hacen que se obtenga un metal en piqueta preinoculado, por lo cual no se observa ningún cambio significativo de las diferentes propiedades mecánicas y microestructurales en las diferentes experimentaciones.

PALABRAS CLAVE:

Fundición gris, inoculación, agente inoculante, carburo de silicio metalúrgico SiC, Ferrosilicio.

EFFECT OF LADLE INOCULATION ON GRAY IRONS CUPPOLA FURNACE MELTED

ABSTRACT

Gray irons have several applications as structural materials because of their wide range of properties. Mechanical properties can be modified with microstructural characteristics, that depend fundamentally on the chemical composition of the base metal, melting conditions, the ladle treatment of melted metal and the rate of cooling during solidification.

The ladle treatment of melted metal, known as ladle inoculation, consists in adding an inoculant agent, which permits the creation of many nucleation sites in the melted metal, so solidification occurs with less undercooling, diminishing carbide formation (chill) and favoring free graphite precipitation.

The main objective of this work was to determine the effect of ladle inoculation on gray cast irons melted in cupola furnace, by comparing commercial inoculants agents based on FeSi and SiC. Data in this paper correspond to preliminary studies, where the inoculant effect of those agents on tensile properties is evaluated as well as hardness, microstructure and soundness (% of chill free) in thin pieces. It was possible to determine that, due to the specific characteristics of the melting process carried out in the cupola furnace, metal in taphole is already preinoculated, so no significant change is observed in mechanical and microstructural properties for several experiments.

KEY WORDS

Gray iron, inoculation, inoculation agents, metallurgical silicon carbide SiC, ferrosilicon.

1. INTRODUCCIÓN

Los hierros fundidos son las aleaciones fundidas más utilizadas a nivel mundial, las estadísticas del año 2009 muestran que en el 2008, la cifra alcanzó el 73% del total de las 94 millones de toneladas producidas en el mundo, la producción estuvo repartida así: 46% de hierros grises y 27% entre hierros nodulares y maleables [1], esto se debe a varias razones: su alta colabilidad, sus bajos costos (20-40% menor que el acero) [2], y el amplio rango de propiedades mecánicas y térmicas alcanzadas para un uso específico. Los hierros grises, en particular, son aleaciones de hierro, carbono y silicio. Se caracterizan por poseer grafito libre en su microestructura con una morfología en láminas. Las propiedades mecánicas y el desempeño en servicio de estos materiales están fuertemente influenciados por sus características microestructurales, tales como la morfología, el tamaño y la distribución de las láminas de grafito, y del tipo de matriz, de las diferentes inclusiones y carburos presentes, las cuales, a su vez, dependen fundamentalmente de la composición química, del tratamiento del metal fundido y de la velocidad de enfriamiento durante la solidificación.

El procedimiento de metalurgia en cuchara, conocido como *inoculación en cuchara*, consiste en adicionar al metal a obtener un agente inoculante, éste permite crear muchos sitios de nucleación dentro del metal fundido (*inoculación*), para que durante la solidificación eutéctica el sobreenfriamiento sea menor, lo que disminuye la tendencia a formar carburos eutécticos (*chill*), favoreciendo la precipitación del grafito libre y la formación de una microestructura de grafito laminar tipo A de tamaño pequeño. Todas estas características en conjunto incrementan considerablemente las propiedades mecánicas y la maquinabilidad de las piezas fundidas [3].

Los agentes inoculantes más comúnmente utilizados son los a base de FeSi, los cuales presentan algunas variaciones en su composición química, especialmente en los elementos que actúan como formadores de los sitios de nucleación, tales como el Bario, Calcio, Aluminio, Estroncio, Manganeso, Azufre, Zirconio, Titanio, Bismuto, y elementos de tierras raras tales como el Lantano y el Cerio. [4-9]. Estos inoculantes son adicionados por varios procedimientos, el más comúnmente utilizado es el de inoculación en cuchara (*Ladle inoculation*), en donde el inoculante entra en contacto con el chorro del metal mientras que se va transfiriendo del horno de fusión a la cuchara. Las variaciones de este procedimiento se dan en función de la adición del inoculante al chorro, y pueden ser [10]:

1. Adición del inoculante a granel mediante un dispensador incorporado a una tolva de provisión. (*Gravity Feeding*).
2. Inyección del inoculante a granel con aire comprimido (*Air assisted-injection*).
3. Suministro del inoculante en hilo, mediante un tambor giratorio, (*Wire Injection*).

Otro procedimiento de cuchara, es el de adicionar el inoculante a granel en el fondo de la cuchara en un charco de metal que previamente se ha vaciado [3]. Existen otros procedimientos que son conocidos como Post-inoculación (*Mold inoculation*), en el cual el inoculante no se adiciona a la

cuchara, sino que entra en contacto con el metal después ser vaciado de la cuchara, ya sea en el chorro del metal antes de entrar al molde (*Inoculation in the pouring basin*) o al interior de éste, en donde el inoculante es posicionado dentro de cámaras a lo largo de los canales del sistema de colada, (*Inoculation in the sprue/runner*) [10,11], en estos métodos el inoculante se disuelve en el metal líquido que se encuentra dentro del molde.

A diferencia de los inoculantes a base de FeSi, el SiC inicialmente fue usado como material de carga en hornos de cubilote, para el ajuste de composición química, en cuanto a carbono y principalmente a silicio se refiere [12-17], ya que a diferencia de las ferroaleaciones de silicio, el SiC, no se funde a la misma temperatura que éste, si bien el SiC es muy estable químicamente, comienza a descomponerse entre los 1127°C y los 1727°C cuando está en contacto con metales de transición (Co, Ni, Fe) [17,18], además se disuelve endotérmicamente en el metal fundido a una velocidad más baja que los ferrosilicios los cuales se disuelven exotérmicamente [19], por esta razón la permanencia del SiC en el proceso es mayor, haciendo que la efectividad de inoculación sea más prolongada.

Recientemente se han realizado investigaciones de la utilización del SiC como agente inoculante tanto en las fundiciones grises como en las nodulares [19-23]. En estos estudios el SiC es adicionado junto con el metal de carga y ha sido usado solamente en hornos de inducción, es decir, el SiC se ha adicionado antes de que el metal fundido sea vaciado en la cuchara. Dentro de los estudios de comparación del SiC frente a los inoculantes a base de FeSi [19-23] se han encontrado ventajas tales como, el incremento de la temperatura de *liquidus* y de la temperatura eutéctica, la disminución de la velocidad de solidificación, y la reducción del sobreenfriamiento, el aumento de la cantidad de celdas eutécticas, el incremento del contenido del grafito tipo A, con un menor decaimiento de la efectividad del inoculante (*Fading*) [23]. Debido a este control en la solidificación se obtienen piezas con propiedades más homogéneas en secciones delgadas donde la velocidad de enfriamiento es más alta y en consecuencia se presentan zonas endurecidas debido al alto contenido de carburos eutécticos originados por enfriamientos acelerados en la solidificación del metal y que se presentan en hierros que normalmente solidifican libres de este tipo de carburos (*Chill*) [24,25]. El SiC además permite ajustar la composición química del metal en cuchara no sólo en lo que al silicio se refiere sino también en lo relacionado con el carbono.

2. OBJETIVO DEL TRABAJO

Este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la inoculación en cuchara de hierros grises obtenidos a partir de horno de cubilote, mediante la comparación de dos agentes inoculantes comerciales a base de FeSi con el SiC. Es importante anotar que, hasta el momento, no se ha realizado una investigación sistemática con el SiC usado como agente inoculante adicionado en cuchara. El trabajo presentado aquí corresponde al estudio de experimentaciones preliminares, en donde se evalúa el efecto inoculante de los inoculantes bajo las mismas condiciones: porcentaje de adición, tamaño de partícula y método de adición, sobre las propiedades mecánicas tales como la dureza y la resistencia última a la tracción, UTS (por sus siglas en inglés) y el porcentaje de sanidad (libre de *chill*). Las probetas fundidas fueron diseñadas para evaluar dichas propiedades,

en piezas con bajos espesores a controlar. Además, hasta ahora el SiC no ha sido usado como inoculante en nuestro país, su uso se ha enfocado al ajuste de la composición química de las aleaciones férreas [26].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El metal utilizado para este estudio fue obtenido en un horno de cubilote; el metal de carga corresponde a: 25% de retorno, 75% de chatarra (65% de hierro y 10% de acero). El metal fue inoculado en cuchara, adicionando el inoculante en el fondo de la misma; las condiciones de inoculación corresponden a: Metal Base sin inocular, FeSi IM75-B, FeSi Ca-Bearing y SiC Metalúrgico, las composiciones químicas de los inoculantes, se muestran en la tabla 1. Como parámetro de comparación, el porcentaje de adición, es el mismo para los tres inoculantes; el intervalo de tamaño de partícula del SiC se encuentra entre los tamaños de los FeSi comerciales, los valores son los sugeridos en las fichas técnicas de los inoculantes comerciales a base de FeSi. No obstante, para tener un mayor control en el tamaño de partícula de los inoculantes, este se determinó mediante análisis granulométrico, (ASTM E11-09) [27]. Estos valores se presentan en la tabla 2. Para la obtención de las probetas fundidas de los diferentes ensayos, el metal fue vaciado en moldes de arena. Los experimentos corresponden a dos series de fusiones (Col1 y Col2). La composición química del metal, la temperatura de vaciado y las temperaturas en cuchara tanto del metal sin inocular, como la temperatura de inoculación del metal inoculado se presentan en la tabla 3; la composición química fue determinada mediante Espectrometría de Emisión Óptica (OES), el carbono fue analizado adicionalmente utilizando el Ensayo Gasométrico LECO. Los contenidos de los elementos traza, corresponden a los niveles permitidos en un hierro gris. La información suministrada en la columna “Eq1” de la tabla 3, relaciona el contenido de manganeso requerido para neutralizar el efecto del azufre mediante la formación de sulfuros de manganeso, si bien el azufre es un fuerte promotor de perlita, éste y el manganeso son elementos que promueven la formación de carburos. La “Eq1” se indica en la siguiente expresión [3]:

$$\%Mn=1,7\%S+0,3\% \quad (1)$$

El tamaño de las probetas fundidas para determinar la resistencia a la tracción se seleccionó a partir de la Norma ASTM A48-08) [28], el tamaño seleccionado corresponde al espécimen A de dicha norma, éste relaciona la resistencia en piezas con un espesor de pared a controlar entre 5 a 14 mm. Para determinar el porcentaje de sanidad (medida del *chill*), se vaciaron probetas en forma de cuña, las cuales se escogieron a partir de la norma (ASTM A367-05) [29], se seleccionaron las probetas W1, W2 y W3, las cuales relacionan los menores espesores de pared de 5,1 mm, 10,2 mm y 19,1 mm, respectivamente, para hierros de altos carbonos equivalentes e hipoeutéticos. La probeta para determinar la dureza se diseñó en función del módulo de solidificación (M_s), seleccionando el valor de $M_s=7,5$ mm. De las probetas obtenidas, se determinó, la resistencia última a la tracción (UTS) en MPa, la dureza Brinell (2,5mm/187,5Kgf) y la sanidad de las cuñas (% sanidad), ver la figura 1. La norma establece que el valor permisible de sanidad está dado por $W \leq B/2$. Los resultados de la sanidad en las cuñas son presentados bajo la siguiente expresión:

$$\%Sanidad = \left(1 - \frac{W}{B}\right) \times 100\% \quad (2)$$

Adicionalmente, se evaluó la microestructura a partir de las probetas de tracción, la muestra fue extraída de una zona no deformada. Se examinó bajo microscopía óptica, la forma, distribución y tamaño de las hojuelas de grafito bajo la norma ASTM A247-10 [30,31] y el tipo de matriz, así como la presencia

Inoculante	Si	Ca	Al	Ba	Fe	Mn	Zr	Ti	Cu	S
FeSi IM75-B*	78,7 6	1,56	0,85	1,31	16,2 8	0,47	0,55	0,05	0,03 8	-
FeSi Ca-Bearing*	80,2 3	0,91	0,49	0,74	17,0 4	0,22	0,12	0,07	0,04	-
SiC **	69,3 7	0,61	0,25	0,15	-	0,03	-	0,02 0	0,02	0,03

* Suministrado por *Italmagnésio S.A.*, (Várzea da Palma, Minas Gerais, Brasil) a través de *Insumos Metalúrgicos Ltda.* (Medellín, Antioquia, Colombia) [32].
 ** Suministrado por *Washington Mills Hennepin Inc* (Hennepin, Illinois, USA), a través de la empresa *S. Katz Associates Inc*, (West Bloomfield, Michigan, USA) [33].

Tabla 1. Composición Química de los Inoculantes (% en peso) obtenidos mediante Fluorescencia de rayos X, FRX

Inoculante	Porcentaje de adición	Designación de tamiz (ASTM E11-09)	Apertura resultante de cada tamiz
FeSi IM75-B	0,3 %	4 -10	2,23 mm - 5,16 mm
FeSi Ca-Bearing		3 ^{1/2} - 8	2,61 mm - 6,07 mm
SiC		4 -10	2,23 mm - 5,16 mm

Tabla 2. Porcentaje de adición (% en peso) y tamaño de partícula de los inoculantes.

Condición de inoculación	T. C. (°C)	T. V. (°C)	%C	%Si	%M _n	%P	%S	%Cr	%Cu	CE	Eq1
Col1 - Sin inocular	1530	1250	3,40	2,17	0,80	0,11	0,13	0,09	0,26	4,1	0,52
Col1 - FeSi IM75-B	1529	1270	3,20	2,79	0,71	0,14	0,16	0,14	0,20	4,1	0,57
Col1 - FeSi CaBearing	1534	1250	3,10	2,57	0,80	0,12	0,17	0,16	0,27	4,0	0,59
Col1 - SiC	1580	1240	3,17	2,35	0,74	0,13	0,14	0,15	0,22	4,0	0,53
Col2 - Sin inocular	1470	1235	2,94	2,61	0,74	0,14	0,15	0,13	0,18	3,8	0,55
Col2 - FeSi IM75-B	1451	1250	3,22	2,68	0,82	0,14	0,14	0,10	0,20	4,1	0,53
Col2 - FeSi CaBearing	1502	1230	2,94	2,67	0,79	0,13	0,16	0,12	0,18	3,8	0,58
Col2 - SiC	1462	1250	3,25	2,94	1,06	0,15	0,15	0,10	0,18	4,2	0,56

Tabla 3. Composición química del metal (% en peso), temperatura de cuchara (T.C) y temperatura de vaciado (T.V.) de las diferentes condiciones de inoculación.

inclusiones no metálicas, tales como sulfuros de manganeso, además otras fases presentes como la esteadita (fosfuro eutéctico de carbono y hierro, duro y frágil) y cementita (carburo de hierro).



Figura 1. Cuña Tipo W2, la zona ubicada a la derecha de “W” es la zona con *chill* de esta cuña.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir del análisis microestructural en relación a la distribución, forma y tamaño del grafito libre se presentan en la tabla 4 (el índice R indica la colada de repetición), tal como lo indica la norma ASTM A247-10 [30], el número romano VII indica que la forma del grafito es laminar, la letra en mayúscula (A-E) indica el tipo de distribución de grafito y el número arábigo (2-6) indica el tamaño de la hojuela de grafito, cuyo número aumenta a medida que el tamaño decrece, en las figuras 2, 3, 4 y 5 se muestran las microfotografías correspondientes a hierros grises con láminas de grafito libre de tamaño 3, 4, 5 y 6 respectivamente, correspondientes a la colada 2. Como se observa, todas las condiciones presentan una distribución tipo A, el cual es un resultado satisfactorio, si bien existen regiones con otras distribuciones dentro de las muestras, son situaciones aisladas, y se observa que el tipo A prevalece.

No se observa una tendencia clara en cuanto al tamaño de las láminas de grafito libre se refiere en relación con las condiciones de inoculación. Los resultados muestran que el tamaño de las láminas de grafito en el hierro no inoculado es menor que el encontrado en los hierros inoculados con cualquiera de los agentes utilizados. Este resultado no está de acuerdo con lo esperado puesto que se espera que la adición de los inoculantes favorezca la obtención de una lámina de grafito de menor tamaño.

Evaluando los resultados obtenidos, se observa que las muestras obtenidas en la primera colada inoculando con SiC presentan un tamaño de lámina entre 4 y 5, lo que es un resultado importante puesto que este tamaño es el adecuado

Condición de inoculación	Microestructura del grafito	
	Col1	Col1R
Colada	Col1	Col1R
Sin inocular	VIIA6	VIIA6
FeSi IM75-B	VIIA5	VIIA4
FeSi CaBearing	VIIA3	VIIA3
SiC	VIIA4	VIIA5
Colada	Col2	Col2R
Sin inocular	VIIA6	VIIA6
FeSi IM75-B	VIIA3	VIIA4
FeSi CaBearing	VIIA5	VIIA4
SiC	VIIA3	VIIA3

Tabla 4. Reporte de la microestructura del grafito libre bajo la Norma ASTM A247-10 [30,31].

para esta clase de hierro. Sin embargo, los resultados muestran que para la segunda colada, el metal inoculado con SiC genera un tamaño de lámina mayor. Para las aleaciones inoculadas con los inoculantes a base de FeSi, el tamaño de las hojuelas permanece dentro de un rango de 3 a 5.

Con respecto a la composición química, los valores obtenidos para el carbono equivalente de todas las condiciones de inoculación corresponden a un hierro clase 30 (UTS mínima 30 ksi, \approx 200 MPa) para ambas coladas, a excepción de la condición de SiC de la colada 2, cuyo carbono equivalente de 4.2, corresponde a un hierro de clase 20 (UTS mínima 20 ksi, \approx 150 MPa) [3]. Dichos valores de UTS, están en concordancia con los resultados obtenidos, tal como se observa en la figura 6

En lo que al resto de la microestructura del metal se refiere, todas las condiciones de inoculación permiten obtener una matriz perlítica, sin embargo, se observa que el metal de la segunda colada posee una mayor cantidad de ferrita.

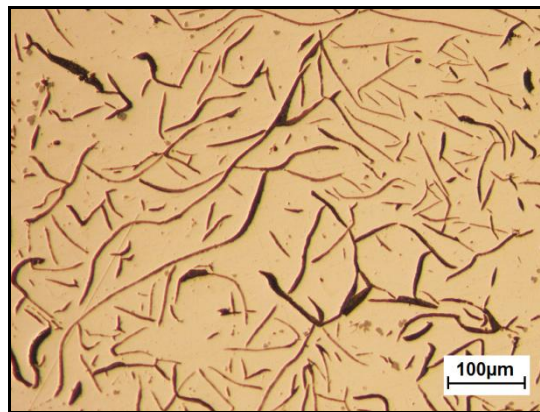


Figura 2. Microestructura del hierro gris inoculado con SiC. Tamaño de lámina de grafito libre N° 3. Probeta sin ataque metalográfico.

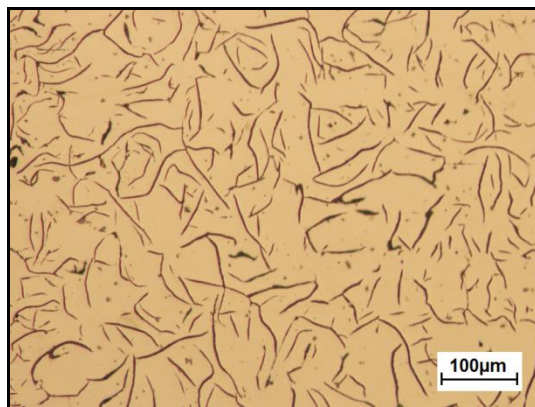


Figura 3. Microestructura del hierro gris inoculado con FeSi IM75-B. Tamaño de lámina de grafito libre N° 4. Probeta sin ataque metalográfico.

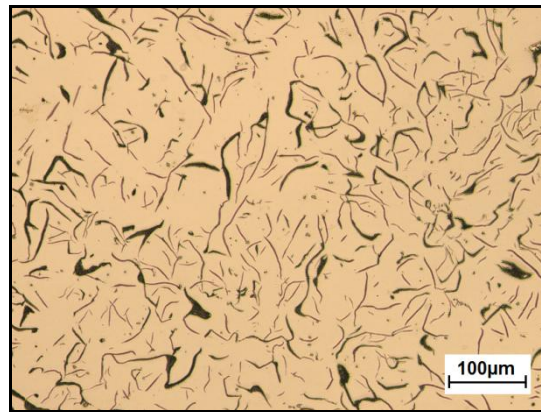


Figura 4. Microestructura del hierro gris inoculado con FeSi CaBearing. Tamaño de lámina de grafito libre N° 5. Probeta sin ataque metalográfico

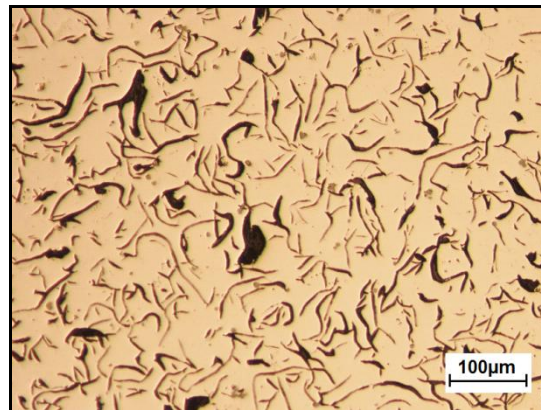


Figura 5. Microestructura del hierro gris sin inocular. Tamaño de lámina de grafito libre N° 6. Probeta sin ataque metalográfico.

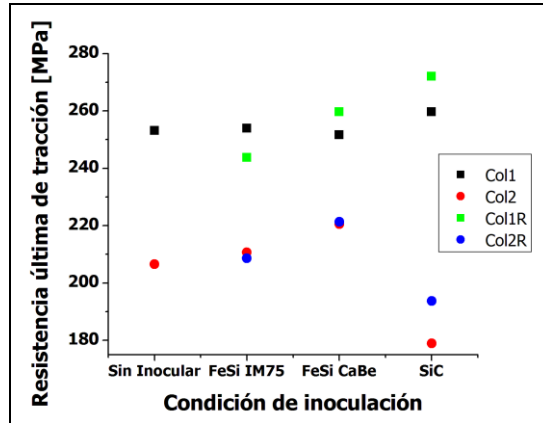
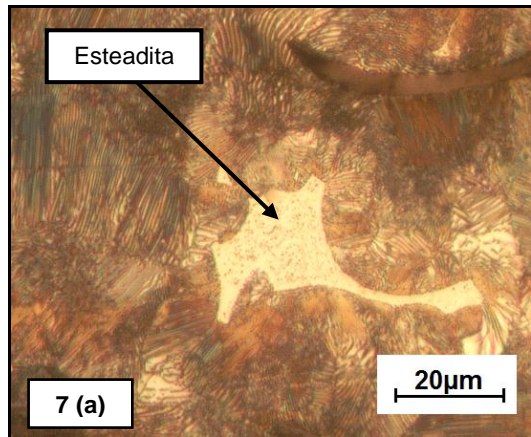


Figura 6. Resistencia última a la tracción del hierro gris para diferentes condiciones de inoculación

En las microestructuras de ambas coladas se observa la presencia de esteadita, y de sulfuros de manganeso como puede verse en las figuras 7a y 7b, esto se debe probablemente a que los contenidos de fósforo, azufre y manganeso son superiores a los valores permitidos por la norma para este tipo de hierros, promoviendo la formación de este tipo de estructuras [34]. El análisis metalográfico también permite observar la presencia de carburos en ambas coladas como se muestra en la figura 7c.



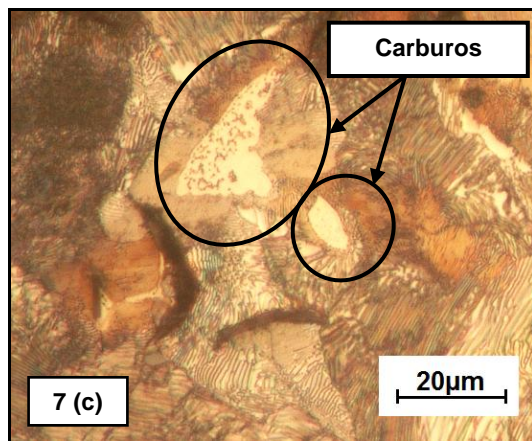
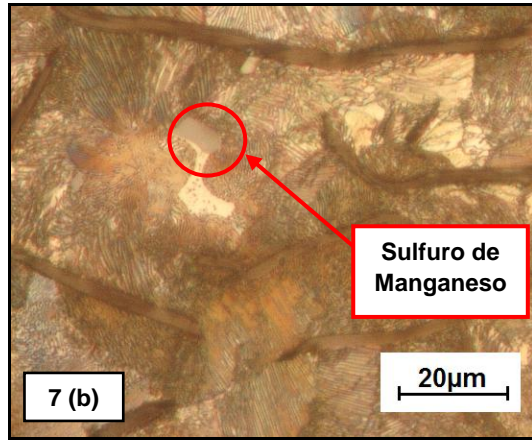


Figura 7. Microfotografías de hierro gris inoculado con FeSi IM75B Superficie pulida y sobreatacada con Nital al 5% para revelar las diferentes microestructuras

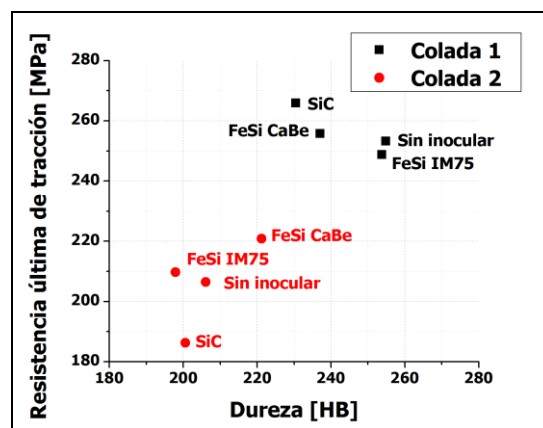


Figura 8. Relación de la UTS y la dureza Brinell para las diferentes condiciones de inoculación de ambas coladas.

La presencia y combinación de todas estas microestructuras influye tanto en la UTS como en la dureza, la comparación de ambas propiedades mecánicas se presenta en la figura 8. Comparando los valores obtenidos en la colada 1 y 2 se observó que tanto la UTS como la dureza disminuyen en la segunda colada, sin embargo, si analizamos los valores obtenidos para cada una de las condiciones de inoculación en cada colada individualmente se observa que tanto la dureza como la UTS conservan valores similares en todas las condiciones de inoculación y aproximados a los esperados para un hierro gris clase 30. Las diferencias encontradas entre ambas coladas podrían estar dadas por el aumento de la cantidad de ferrita en la colada 2. Esta situación podría estar dada por los altos valores de silicio encontrados en dicha colada, ya que el silicio actúa como elemento grafitizante, y favorece el crecimiento de las láminas de grafito a expensas de la disminución de la solubilidad del carbono en la matriz, por lo tanto se promueve la formación de una matriz más baja en carbono, viéndose favorecida la formación de ferrita y la precipitación de láminas más largas. Se observa que los valores tanto de la dureza como de la UTS para el metal inoculado con SiC en la segunda colada son menores que los obtenidos con las otras condiciones de inoculación. Adicionalmente, de acuerdo a la composición química, esta condición de inoculación tiene el valor más alto de silicio (2.93%) así como de carbono equivalente (4.2%), una posible explicación para esta disminución en las propiedades mecánicas es que se produzca una mayor ganancia de silicio debido a la particular cinética de disolución del SiC, de igual manera dicha disolución puede verse favorecida por una liberación de calor más lenta producto del menor gradiente térmico [35] (que se tuvo para esta condición) entre la temperatura de cuchara y la temperatura de vaciado.

El porcentaje de sanidad para las dos coladas se reporta en la figura 9. Se puede ver claramente que para todas las cuñas, tanto de metal inoculado como no inoculado se aseguran zonas libres de *chill*, respecto al mínimo valor de sanidad (superior al 50%), excepto para la cuña más pequeña del metal sin inocular de la colada 1.

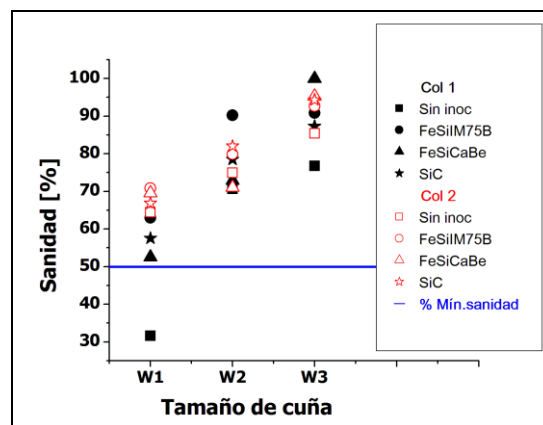


Figura 9. Porcentaje de sanidad para las diversas condiciones de inoculación de las Coladas 1 y 2.

Cabe anotar que los valores de *chill* son similares, para ambas coladas, a pesar de que la primera colada tiene una mayor temperatura de cuchara, y que de acuerdo a la literatura, las altas temperaturas favorecen el *chill* [35].

5. CONCLUSIONES

Las características del proceso de fusión en horno de cubilote, hacen que se obtenga un metal en piquera preinoculado, esto podría explicar que para las condiciones experimentales usadas en estas dos coladas, no se haya observado ningún cambio significativo ni en la microestructura ni en las propiedades mecánicas del hierro gris con la adición de los diferentes agentes inoculantes.

Esta preinoculación de los hierros grises producidos en cubilote, en combinación con el desarrollo de un procedimiento óptimo de inoculación, podrían permitir disminuciones significativas en el ferrosilicio usado como material de carga, además la posibilidad de hacer un ajuste muy riguroso de la composición química del metal, lo cual permite la fabricación de piezas de altas prestaciones mecánicas.

Teniendo en cuenta que los mecanismos de inoculación del SiC y de los inoculantes a base de FeSi son tan diferentes y que no se observó ningún cambio significativo en los resultados experimentales, se hace necesario hacer un ajuste en el tamaño y en el método de inoculación del SiC, de tal manera que se favorezca la formación de los núcleos y no la grafitización y consiguiente formación de ferrita.

Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para los inoculantes base FeSi, también se hace necesario un cambio en el método de inoculación, que permita establecer las mejores condiciones para lograr su mayor efectividad.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consorcio Metalúrgico Cometa Giralópez Ltda., por permitir la realización de las coladas experimentales en sus instalaciones y a la Universidad de Antioquia a través del proyecto CODI MC08-1-02 por la financiación del proyecto de investigación.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. A Modern Casting Staff Report. 42nd Census of World Casting Production 2008: Global Production, Modern Casting, Vol. 99, No.12, 17-21, 2009.
2. Collini, L., Nicoletto, G., Conečnák, R. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron, Materials Science and Engineering A, Vol. 488, 529-539, 2008.
3. Stefanescu, D.M. Classification of Ferrous Casting Alloys, Gray Iron. En: ASM Handbook, Volume 15, Casting. 1999.
4. Svensson, I.L., Millberg, A., Diószegi, A., A study of eutectic inoculation in grey iron by addition of Fe-Si-Ca-Al-, Sr, Ba, Zr, Ti, RE and C. Journal of Cast Metals Research, Vol.16, 29-34, 2003.
5. Riposan, I., Chisamera, M., Stan, S., Skaland, T., Onsoien, M.I. Analyses of possible nucleation sites in Ca/Sr over-inoculated gray irons, Journal: Transactions of the American Foundry Society, Vol. 109, No 01-094, 1-11, 2001.
6. Riposan, I., Chisamera, M., Stan S., Skaland, T. A new approach to graphite nucleation mechanism in gray iron, Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference, September 29-30, 31-41, 2005
7. Riposan, I et al. Al, Zr-FeSi preconditioning of grey cast irons, Materials Science and Technology Vol. 24, 579-584, No 5, 2008.
8. Riposan, I et al. Role of Al, Ti, and Zr in Gray Iron Preconditioning/Inoculation, Journal of Materials Engineering and Performance, 2008.
9. Riposan, I., et al. Complex (Mn, X)S compounds – Major sites for graphite nucleation in grey cast iron, China Foundry, Vol.6 No.4, 2009.
10. Harvey, J.N., Noble, G.A. Inoculation of Cast Irons: An Overview, 55th Indian Foundry Congress 2007, 343-360, 2007.
11. Brown, J.R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, 2000.
12. Benecke, T. Metallurgical silicon carbide in electric and cupola furnaces, Giesserei, Translation from German. Order BCIRA T 1620, Vol. 68, No. 12 344-349, 1981.
13. Slahora, P. The use of silicon carbide as a charge material for the melting of grey cast, Slevarenstvi, (2/3), 89-94, 1980.
14. Katz, S; Bauer, M E; Mutton, T J. Performance of briquetted and lump silicon carbide in cupola operations, Transactions of the American Foundry Society, Vol. 112, Paper No 04-153, 1021 - 1036, 2004.
15. Katz, S., Bahuer, M.E., Mutton, T.J. Improved Cupola Melting with Silicon Carbide and Ferrosilicon, Modern Casting, Vol. 94, No.6, 31-34, 2004.
16. Aristizábal, R.E., Silva, C.M., Pérez, P.A., Stanek, V., Katz, S. Studies of a Quenched Cupola Part II: The Behavior of C, Si, Mn and S in the Metallic Charge, AFS Transactions, Vol. 117, Paper 09-104, 693-708, 2009.
17. Aristizábal, R.E., Silva, C.M., Pérez, Katz, S. Studies of a Quenched Cupola Part III: Behavior of Silicon Carbide and Slags, AFS Transactions, Vol. 117, Paper 09-105, 709-725, 2009.
18. C. Silva. Estudio de la oxidación del carburo de silicio en el cubilote. Proyecto de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2010.

19. Schubert, W.D., Ta, A.T., Kahr, G., Benecke, Th., Lux, B. Influence of SiC additions on the microstructure of gray cast iron, Materials Research Society, Vol. 34, 119-128, 1985.
20. Onsoien, M.I, Skaland, T. Preconditioning of Gray Iron Melts using Ferrosilicon or Silicon Carbide, Transactions of the American Foundry Society, 1-12, 2001.
21. Edalati, K., Akhlaghi, F., Nili-Ahmadabadi, M. Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 160, 183-187, 2005.
22. Edalati, K., Akhlaghi, F., Nili-Ahmadabadi, M. Influence and/or SiC addition on characteristics of grey cast iron. International Journal of Cast Metals Research 2004, Vol. 17, No 3, 147-151, 2004.
23. Caspers, K.W. Use of silicon carbide in main-frequency induction furnace, Giesserei, Vol 59, No. 18, 656-659, 1972.
24. Kay, I. What is inoculation?, Modern Casting, Vol. 94, No 1, 46- , 2004.
25. ASTM A644-09. Standard Terminology Relating to Iron Castings, ASTM International 2010.
26. Pérez E., P.A, et al. Utilización de SiC como agente inoculante para la fabricación de hierros grises. Proyecto de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería, CODI-MC08-102 Universidad de Antioquia, 2009.
27. ASTM E11-09. Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves, ASTM International 2010.
28. ASTM A48-03 (Reapproved 2008) Standard Specification for Gray Iron Castings, ASTM International 2010.
29. ASTM A367-60 (Reapproved 2005) Standard Test Methods of *Chill* Testing of Cast Iron, ASTM International 2010.
30. ASTM A247-10 Standard Test Method for evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings ASTM International 2010.
31. ADJ A0247, Adjunct to A247, Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, Classification of graphite microstructure in gray iron (3 plates in Wall paper). ASTM International 2010.
32. Ferroaleaciones (Italmagnésio), <http://www.insumosmetalurgicos.com/metal/publico/empresa.php?id=3> [citado 11 de Octubre de 2008].
33. Silicon Carbide Metallurgical, Washington Mills Hennepin Inc, <http://www.washingtonmills.com/products/silicon-carbide/metallurgical/> [citado 29 de Agosto de 2010].
34. Heine, R.W. Rosenthal, P.C. The Family of Cast Iron. En: Principles of Metal Casting. McGraw-Hill Interamericana, 491- 506, 1967.
35. Molten metal Handling and treatments, En: Cupola Handbook, American Foundry Society. 6th edition, Des Plaines, USA, 1999.