

Producción de fundición nodular en el cubilote eco-eficiente de la Universidad de Antioquia

*Héctor Daniel Mejía**, *Álvaro Gómez**, *Claudia Silva** y *Ricardo Aristizábal**

(Recibido el 28 de marzo de 2001)

Resumen

Se describe la producción de hierro nodular en el horno de cubilote eco-eficiente de la Universidad de Antioquia y se destacan las ventajas de este tipo de horno con *recuperadores de calor*, tanto en la eficiencia energética como en la calidad del metal producido. Se hace una descripción de las características de este material, del proceso de obtención del metal base en el cubilote y del proceso de nodulización en cuchara. Finalmente se presentan los resultados de la investigación y el análisis de los mismos.

----- *Palabras clave:* horno de cubilote, hierro nodular, recuperadores de calor, eficiencia térmica.

Production of ductile iron in the eco-efficient cupola furnace of the University of Antioquia

Abstract

This paper describes the production of ductile iron in the eco-efficient cupola furnace of the University of Antioquia. Advantages of using a Cupola Furnace with *heat regenerator* are pointed out in both energetic efficiency and metal quality. It has a description of the material characteristics, production of base metal, and metallurgical ladle spheroidization process. Finally, results and analysis of the research are presented.

----- *Key words:* cupola furnace, ductile iron, heat regenerator, thermal efficiency.

* Grupo GIPIMME, Universidad de Antioquia. danme@udea.edu.co.

Introducción

Los equipos que usan combustibles fósiles, como hornos metalúrgicos, calderas, secadores, incineradores, etc. desperdician aproximadamente el 46% de la energía suministrada por el combustible en los humos que salen a la atmósfera a temperaturas elevadas y en los productos incompletos de combustión (calor sensible y calor latente), obteniendo eficiencias térmicas entre 20 y 30% [1], calculada como el calor útil con respecto al calor suministrado por el combustible.

El aprovechamiento de estas grandes cantidades de energía que se pierde en estos procesos es un tema que debe difundirse entre las PYMES (Pequeñas y medianas empresas) donde generalmente no se utilizan recuperadores de calor.

El presente artículo se fundamenta principalmente en el proyecto *producción de hierro nodular en horno de cubilote eco-eficiente*, financiado por el CODI (Comité Central de Investigaciones de la Universidad de Antioquia), con el que se pretende mostrar a las empresas fundidoras, que usan cubilote convencional (soplo frío, refractario ácido), las ventajas que tiene el cubilote de soplo caliente, en los procesos de fundición, en este caso aplicado al metal base para producir un hierro nodular de muy buena calidad y de esta manera acceder a mercados más exigentes. Aunque se han propuesto otras alternativas para los gases de salida como el sistema de aspersión de agua en la chimenea, denominado comúnmente sombrero chino, o el cambio de los cubilotes a los hornos de inducción, estas alternativas no cumplen, en el primer caso, las normas ambientales y en el segundo, los costos son demasiado altos para las PYMES.

Se presenta la alternativa del horno eco-eficiente, desarrollado en el grupo de investigaciones Pirometalúrgicas GIPIMME de la Universidad de Antioquia y la Corporación PROPEL (Promoción de la pequeña empresa eco-eficiente latinoamericana, actualmente se ha fusionado con FUNDES —Fundación para el desarrollo sostenible—, ambas son de origen suizo). Este equipo

tiene un sistema de recuperación de calor y limpieza de emisiones atmosféricas, de manera que trabaja con aire pre-calentado a temperaturas cercanas a los 400 °C, incrementando la productividad en el 50%, elevando la temperatura del metal en 7%, disminuyendo el contenido de azufre y cumpliendo con las normas ambientales vigentes. *En el aspecto energético, el sistema recupera el 60% del calor que se pierde a la atmósfera en un horno convencional.*

El costo estimado para una instalación en un cubilote de dos ton/hora oscila entre 70 y 90 millones de pesos, con la facilidad de financiación por créditos blandos en las líneas de Instituto de Fomento Industrial (IFI), con posibilidades de recuperar la inversión en dos años por el incremento en la productividad [2].

Antecedentes

Históricamente los hierros fundidos se han fabricado en hornos de cubilote y aunque hace algunas décadas se pronosticó su desaparición, hoy día, aproximadamente el 70% de los hierros fundidos en el mundo se producen en cubilotes [3]. Esta situación se ha logrado debido a que el cubilote se ha modernizado en concordancia con los avances tecnológicos y las normas ambientales. El control automático ha tenido un importante papel, y ha logrado mantener las variables operativas en rangos más estrechos. El desarrollo de software de simulación ha sido otro gran aporte y se destaca el modelo de la American Foundryman Society (AFS) [3]. En Brasil se ha inventado el cubilote FAR, que evita la gasificación de coque por CO₂ y está próximo a entrar en operación en los Estados Unidos [4].

En el ámbito nacional se han desarrollado trabajos en la Universidad Industrial de Santander (UIS) [5], [6], [7], en los temas de escoriado posterior, toberas antiescoriantes y desulfuración en cuchara.

En la Universidad de Antioquia se tiene desde 1985, un cubilote experimental de 12" de diámetro, construido y mejorado en proyectos de

pregrado de Ingeniería Metalúrgica [8-16], con el cual se han desarrollado diferentes proyectos de investigación co-financiados por la Universidad de Antioquia y por diferentes entidades de tipo industrial, con el objetivo de mejorar la calidad de las pequeñas y medianas fundiciones principalmente en el Valle de Aburrá. Se destaca el liderazgo de FEDEMETAL (Federación de Industrias Metalmeccánicas, actualmente fusionada con la Asociación Nacional de Industriales —ANDI—), en la celebración del Primer Congreso Nacional de Fundición, en la ciudad de Medellín (1995) y en la co-financiación de otros proyectos [2, 17-22].

En la figura 1 se puede ver un esquema de la planta eco-eficiente de la Universidad de Antioquia.

Hierro nodular

El hierro nodular está constituido microscópicamente por pequeños nódulos de grafito

alojados en una matriz metálica. La matriz metálica puede tener diferentes tipos de estructuras, desde el tipo totalmente ferrítico hasta el martensítico, dependiendo de aspectos como: los elementos aleantes presentes en el metal, de la velocidad de enfriamiento, del método de moldeo y de la geometría de la pieza [23, 24]. La figura 2 muestra una fotomicrografía de hierro nodular y otra de hierro gris. Se observa que la diferencia fundamental entre los dos materiales es la forma del grafito, que se presenta como esferoides en el primero y en forma de hojuelas en el segundo. Esta característica estructural hace que el hierro gris presente deficiencias en las propiedades mecánicas comparadas con las del hierro nodular ya que las de éste pueden llegar a ser similares a las del acero. El grafito laminar del hierro gris actúa como concentrador de esfuerzos, como si fuera una grieta que interrumpe la estructura de la matriz. En cambio, el grafito redondeado del hierro nodular disipa los esfuerzos mecánicos y actúa como una carga que disminuye la densidad global del material.

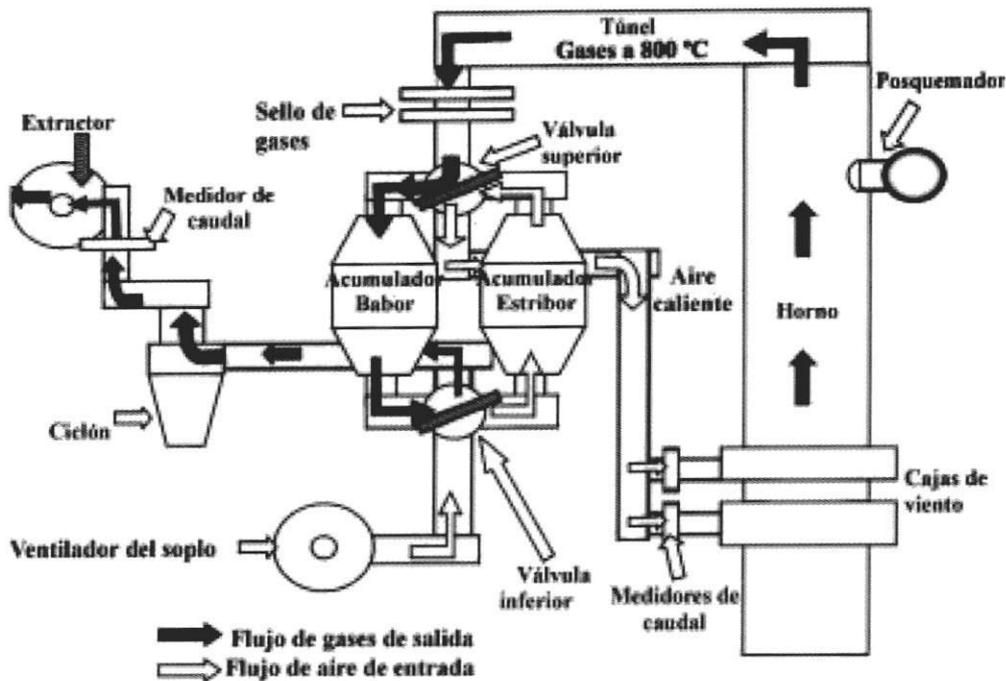


Figura 1 Esquema del sistema de recuperación de calor de la planta eco-eficiente de la Universidad de Antioquia

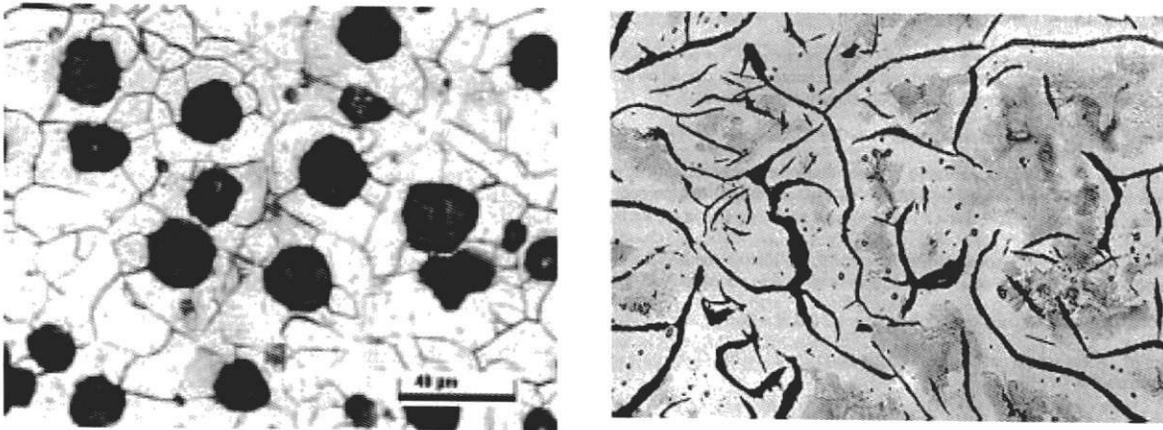


Figura 2 Fotomicrografías de hierro nodular (izquierda) y gris (derecha)

Bajo este punto de vista, puede considerarse al hierro nodular como un *material compuesto*, que reúne las propiedades de dos elementos diferentes: alta resistencia mecánica de la matriz (acero) y baja densidad de la carga (grafito), además de tener una *alta fluidez* en el estado líquido, propiedad que lo hace especialmente apto para los procesos de fabricación por fundición en molde de arena.

Adicionalmente, mediante el tratamiento térmico de *austemperado*, se logran resistencias a la rotura de 200 Ksi en el hierro nodular, similares a los aceros de alta aleación, razón por la cual el hierro nodular ha tomado un auge vertiginoso en las últimas décadas como material de ingeniería, especialmente en el campo automotor, donde se requieren materiales que combinen alta resistencia a la fatiga, buena tenacidad y excelente resistencia al desgaste al menor costo, reemplazando fundiciones, forjas y maquinados de acero [24].

La nodulización

Desde 1948 cuando se descubrió el procedimiento para producir hierro nodular, se han desarrollado varias hipótesis y especulaciones de este fenómeno. A continuación se hace un recorrido por las ideas más generales desarrolladas en los últimos treinta años, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada por Van de Velde [25].

En 1965 Benerjee, hizo una revisión bibliográfica de aproximadamente 150 experimentos. La discusión concluyó que la nucleación de un esferoide de grafito ocurría necesariamente en el estado líquido, cuando el hierro fundido era tratado con magnesio, y su crecimiento se daba por difusión de los átomos de carbono desde la superficie (que podía ser el metal fundido, austenita o la descomposición de la cementita) hacia los núcleos esferoides.

En 1970, el trabajo de Sheil y otros confirmaron la anterior teoría y fue claramente demostrada en experimentos por centrifugación, en los cuales los nódulos se separaron del metal líquido.

Hacia 1990, era ampliamente aceptado que la precipitación del eutéctico se iniciaba con la nucleación y el crecimiento del grafito en el líquido, seguido de un rápido encapsulamiento de estos esferoides de grafito en conchas de austenita. El posterior crecimiento ocurría por difusión de carbono desde el metal líquido a través de la concha austenítica. Posteriormente se demostró que las dendritas de austenita desempeñaban un papel importante en la solidificación del hierro nodular, y que era posible para las dendritas de austenita crecer parcialmente, independiente de los esferoides de grafito [25].

En 1993, T. Skaland y otros [26], hicieron una detallada investigación sobre los mecanismos de

inoculación en el hierro nodular fundido, con énfasis especial sobre los aspectos teóricos de la nucleación heterogénea del grafito sobre inclusiones. Se mostró que la mayoría de inclusiones en las fundiciones de hierro nodular son productos primarios o secundarios del tratamiento con magnesio por ejemplo, MgS , CaS , MgO , SiO_2 y $2MgO \cdot SiO_2$. Después, cuando se inocula con ferrosilicio que contiene pequeñas cantidades de otros elementos del tipo X-Al (donde X puede ser Ca, Sr o Ba) se forman fases de silicatos hexagonales de $XO \cdot SiO_2$ o del tipo $XO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, sobre la superficie de las inclusiones de óxidos, probablemente por una reacción de intercambio con MgO . La presencia de estas fases aumenta el poder de nucleación de las inclusiones con respecto al grafito. En particular, el plano basal (001) de los cristales son sitios favorables para la nucleación del grafito, porque estas caras proporcionan interfaces de baja energía coherentes o semicoherentes, entre el sustrato y el cristal de grafito que va creciendo en todas las direcciones, como se muestra en la figura 3. En contraste, el decaimiento en la inoculación puede ser explicado por un engrosamiento general de la población de inclusiones con el tiempo, el cual reduce el número de partículas catalizadoras para el grafito en el metal fundido.

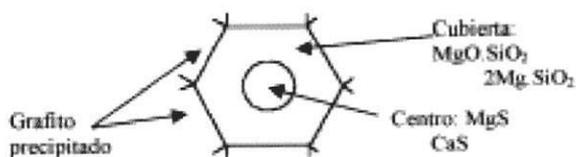


Figura 3 Esquema del mecanismo de nucleación del grafito según Skaland

En el simposio mundial de AFS, realizado en 1998 [27], se presentó el trabajo de Van de Velde, donde lanza la teoría de *crecimiento dendrítico*, en la cual el grafito se precipita directamente sobre los vacíos que dejan las dendritas de austenita primaria y los esferoides crecen de afuera hacia adentro, hasta que la contracción de la austenita logra compactarlos.

Esta teoría, como las demás tiene sus puntos débiles, y por ello queda el tema todavía en el campo de la investigación científica.

Producción industrial

Desde el punto de vista del proceso de obtención de hierro nodular, se deben realizar las siguientes operaciones [28]:

- Obtención del metal base por medio de equipos de fusión, en nuestro caso el cubilote.
- Tratamiento del metal líquido.
- Remoción del azufre (opcional).
- Modificación del metal base en cuchara (nodulización).
- Inoculación del metal base modificado.
- Vaciado del metal base modificado e inoculado en moldes de arena.

La cantidad de Mg incorporado en el metal debe estar en un rango desde 0,02 a 0,06 dependiendo del espesor de las piezas [29]. En atención a que la reacción del magnesio con el metal es muy violenta, se han desarrollado ferroaleaciones con bajos contenidos de este elemento, embebidos en una matriz que controle la velocidad de reacción. También se han desarrollado varios métodos para lograr el contacto metal base-magnesio, unos con equipo mecanizado, como el convertidor Fisher y la campana de inmersión, y otros con equipos sencillos, como la cuchara abierta y el método Sandwich [23, 24].

En el país, se ha generalizado el uso del *método sandwich*, que consiste en colocar la aleación de magnesio en una depresión practicada en el fondo de una cuchara de dimensiones adecuadas, cubrirla con trozos de acero y vaciar el metal base fundido sobrecalentado hasta una temperatura de 1.470 a 1.480 °C (ver la figura 4). La aleación comúnmente usada es la denominada LIGA #1, que contiene 8 a 10% de Mg; 44 a 46% de Silicio; 0,8 a 1,2 de tierras raras (cerio y otros); 0,9 a 1,1 de Ca; 0,8 a 1,0 de Al y balance de Fe.

Para calcular las cantidades de metal base y liga, debe tenerse en cuenta la gran afección del magnesio por el azufre y el oxígeno, puesto que la acción de estos últimos consume magnesio y disminuye la cantidad disponible de este para incorporarse en la composición química final. Además, debe evitarse la presencia de los llamados *elementos trampa* (Te, Pb, Ti, Al, Sb, Bi, Zr, Cr), que producen deformaciones en los nódulos de grafito, aun cuando se encuentren en pequeñas cantidades.

Producción de hierro nodular en horno de cubilote

En el horno de cubilote como en los demás hornos, es posible controlar las variables de operación de tal manera que se obtenga un metal base apropiado para un tratamiento de nodulizado exitoso, siempre y cuando se disponga de los equipos apropiados para la medición de variables (balanzas, pirómetro, medidor de caudal de aire, etc.).

La diferencia fundamental de la producción de hierro nodular en horno de cubilote, con respecto

a otros equipos de fusión, es la recuperación de azufre proveniente del coque utilizado como combustible, la cual puede controlarse de diferentes maneras. Principalmente debe controlarse el contenido de azufre en los materiales de carga utilizados, tanto en el coque como en la carga metálica, porque las altas cantidades de este elemento aumentan la cantidad de aleante necesario para la nodulización (Mg y Ca), y aumenta los defectos causados por inclusiones de escoria en las piezas fundidas [24]. Por estas razones, se debe utilizar el acero cold rolled como materia prima principal, pues además de su bajo contenido en azufre ($< 0,02\%$), tiene muy bajos niveles de elementos nocivos. Los mejores coques que se obtienen en Colombia presentan contenidos de azufre entre 0,4 y 0,6%.

Las empresas fundidoras nacionales, que usan el *cubilote convencional* para producir hierro nodular, obtienen valores de azufre entre 0,10 y 0,14%, lo cual implica la utilización de un exceso de liga, que se combina con el azufre, mientras el remanente se encarga de producir la nodulización.

Las alternativas para reducir el contenido de azufre antes de nodulizar son las siguientes:

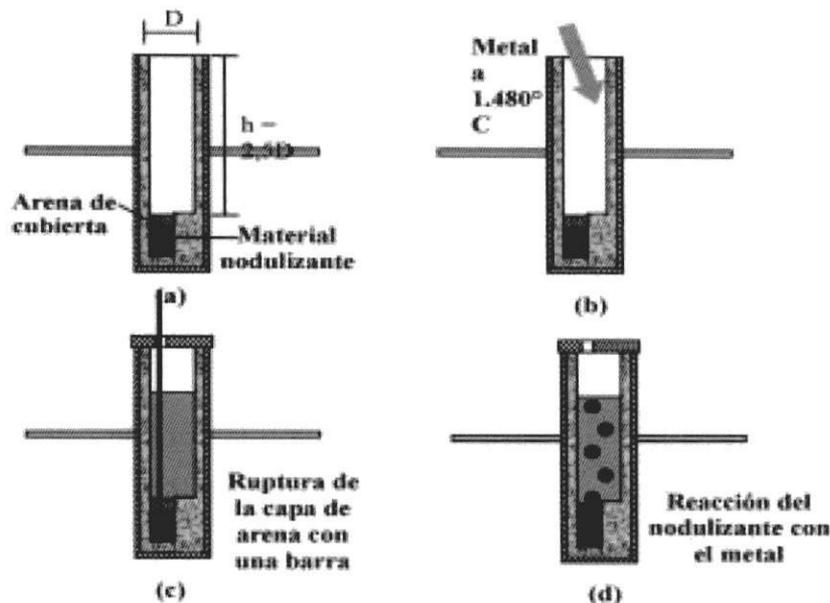


Figura 4 Esquema del proceso de nodulizado por el método Sandwich. a) Preparación del caldero. b) Adición del metal. c) Ruptura de la capa de arena con barra. d) Reacción del nodulizante con el metal

- *Desulfuración externa.* Antes del proceso de nodulizado, se trata el metal base con un agente desulfurante, en un caldero acondicionado con sistema de agitación mecánica o por corriente gaseosa. Este proceso implica pérdida apreciable de temperatura (100 a 150 °C), por lo cual es usado en sistema dúplex (cubilote-horno de inducción), lo cual conlleva una inversión de capital muy apreciable, que no está al alcance de las PYMES del sector.
- *Uso de refractario básico.* Permite contenidos de 0,03 a 0,04% de azufre, por la acción desulfurante de la escoria altamente básica. El punto desfavorable de esta opción es el alto costo de los refractarios básicos (de cinco a diez veces el de los ácidos), circunstancia que hace incosteable el proceso básico a nivel nacional.
- *Operación con refractario ácido y soplo caliente.* Esta alternativa puede producir contenidos de azufre entre 0,06 y 0,1%, en el metal base, de manera que el consumo de liga extra no es tan alto, como en el caso de cubilotes de viento frío. Esta opción implica inversión de capital más modesta y es la que se lleva a cabo en el presente trabajo, toda vez que el cubilote eco-eficiente opera con aire precalentado a partir de la energía recuperada de los humos.
- *Operación con refractario ácido y soplo caliente en condiciones de mínima absorción de azufre.* Esta opción implica en términos

generales, alta temperatura y condiciones de marcha reductoras, que se logran con adición de carburo de calcio y aluminio en la carga, grafito o carbón vegetal en el crisol, bajo soplo y alta proporción de calcio en la escoria. En un proyecto realizado anteriormente en el horno eco-eficiente de la Universidad de Antioquia, se obtuvieron resultados entre 0,035 y 0,045% de azufre, cargando 50% de acero [20]. Esta opción, aunque técnicamente es muy buena, no se ha considerado viable al nivel industrial por la carencia de insumos en el mercado nacional.

Trabajo experimental

En este proyecto se puso como meta la producción de hierro nodular para uso en líneas de transmisión eléctrica, que cumpla la norma *NEMA N° SC-E-015-3-04 Rev. 1 de 1° de septiembre de 1994*, que define los requerimientos químicos y mecánicos (tabla 1) para una pieza de herraje eléctrico denominada grapa prensora, pieza que se tomó como referencia gracias a la gentil colaboración de la empresa DACELCO S.A., que facilitó la placa modelo para su fabricación.

Equipo utilizado

Se construyó una nueva carcasa para el horno en este proyecto, cuyas dimensiones principales se muestran en la figura 5. Está provista de 8 toberas inclinadas 7°, organizadas en dos filas. Las superiores tienen 1,25" de diámetro y reciben el 40% del aire. Las inferiores tienen 1,5" de diámetro,

Tabla 1 Requisitos químicos y mecánicos

<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Propiedad mecánica</i>	<i>Valor</i>
Carbono	3,20-4,10	Resistencia mínima a la tracción (kgf/cm ²)	4.234
Fósforo	< 0,10	Límite mínimo de fluencia (kgf/cm ²)	2.820
Azufre	< 0,03	%	
Manganeso	0,15-0,90	de alargamiento en 50 mm	10
Silicio	1,80-2,80		

Los requisitos mecánicos se evalúan según la norma ICONTEC 1415.

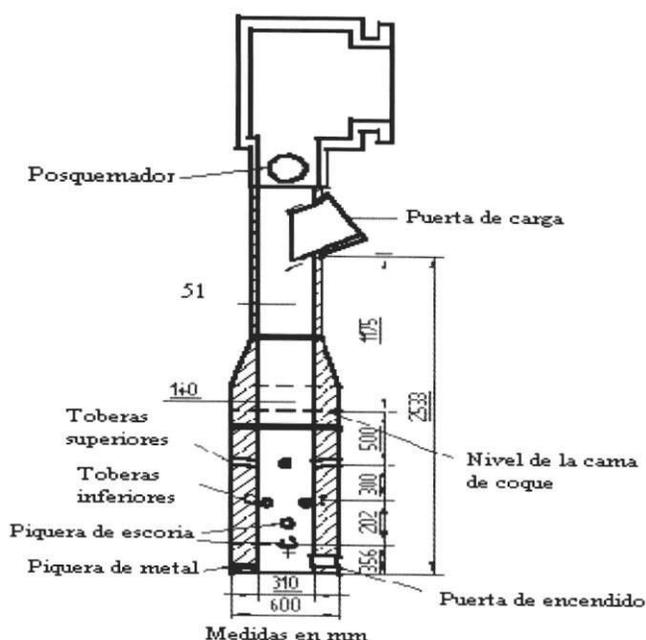


Figura 5 Principales dimensiones del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia

para el restante 60%. Por ambas filas se sopla aire caliente. El horno funciona con sangrado intermitente, con una producción de 50 kg de hierro fundido cada diez o doce minutos.

En el proceso de nodulizado, se utilizó el método sandwich diseñado para tratar 50 kg de metal base, con cubierta de arena silíceo y resina auto-fraguante en lugar de trozos de acero. Este tipo de cubierta tiene la ventaja de poder controlar el momento de inicio de la reacción, mediante la rotura de la capa de arena con una barra metálica como se ilustró en la figura 3.

Equipos de medición

- Balanzas comerciales de 10 kg para materiales de carga (Div. mínima 50 g).
- Balanza colgante de 200 kg para metal fundido (Div. mínima 1 kg).
- Balanza eléctrica de 6 kg para la liga (apreciación 0,1 g).
- Pirómetro óptico Leeds and Northrup (Div. mínima 5 °F).

- Pirómetro de inmersión ECIL digital, rango de 1.000 a 1.800 °C.
- Pirómetro infrarrojo RAYTEK, rango de 400 a 1.800 °C.
- Espectrómetro de emisión óptica SHIMADZU OES-5.500.
- Medidores de caudal tipo placa orificio.
- Lectores de temperatura de aire BARBER-COLMAN, con termopares tipo "K".

Metodología experimental

Inicialmente se realizó una serie de ocho coladas de dos horas cada una, con diez o doce sangrados, con el fin de ajustar los parámetros de proceso para el nuevo horno para lograr temperaturas en piquera adecuadas, entrenar el equipo de operarios y definir los procedimientos operativos que se recopilaron en formatos tipo ISO-9000 [22], por tales motivos no se hacen reportes de metal nodulizado en esta etapa. Es conveniente anotar que el reducido diámetro interno del horno lo hace muy ineficiente térmicamente por su alta super-

ficie específica, razón por la cual deben ajustarse muy estrechamente las variables operativas para alcanzar temperaturas de 1.480 a 1.500 °C en piquera.

En la segunda etapa experimental, se realizaron siete coladas, produciéndose el hierro nodular y ajustándose cada vez más el procedimiento, hasta que se alcanzaron las condiciones finales del proceso.

Datos de entrada y materiales de carga

La tabla 2 muestra los rangos de trabajo de las variables de operación para cada colada, los cuales fueron tomados en el tiempo de estabilidad térmica del horno, que se logra de la cuarta sangría en adelante. Se usó refractario tipo alta alúmina, referencia VULPLAX 80, en masa de apisonar, colocada con formaleta deslizante ver tabla 3. En la tabla 4, se muestran las composiciones de los materiales de carga.

El coque fue utilizado de la siguiente manera: la cama se controló por altura (50 cm por encima de las toberas superiores), con tamaños de 54 a 75 mm. Para las cargas se mezcló un kilo de tamaños entre 42 y 54 mm con dos kilos de tamaños entre 54 y 75 mm. La colada 16, no produjo datos para este proyecto por haberse presentado un daño en los sellos de las válvulas de cuatro vías, que no permitieron la operación de nodulizado.

Datos de salida y resultados

La tabla 5, muestra los rangos de las variaciones en la temperatura y en la producción. La tabla 6 muestra los resultados los ensayos de tracción y la tabla 7 los rangos de la composición química, tomados durante el período de estabilidad del horno.

En las figuras 6 a la 9, se muestra la secuencia de las microestructuras obtenidas en el estado de colada. Todas las muestras fueron tomadas del extremo de un canal de vaciado de una placa de moldeo, pero fueron cortadas a diferentes distancias del borde, en todos los casos se desmoldeó

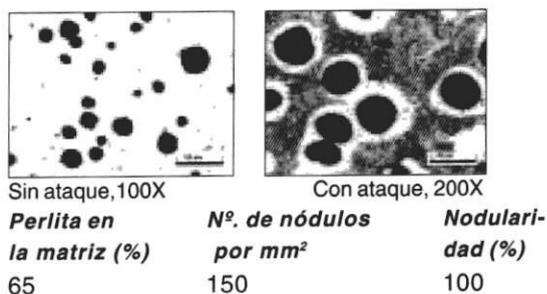


Figura 6. Fotomicrografías de la colada 10

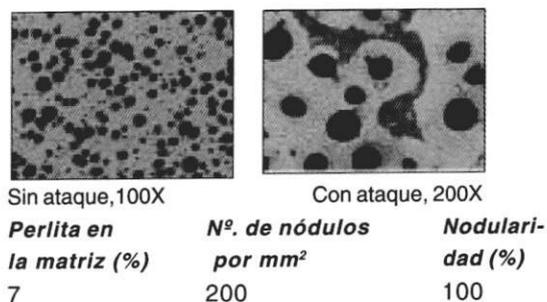


Figura 7. Fotomicrografías de la colada 12

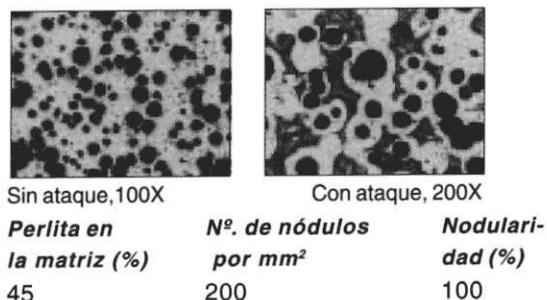


Figura 8. Fotomicrografías de la colada 13

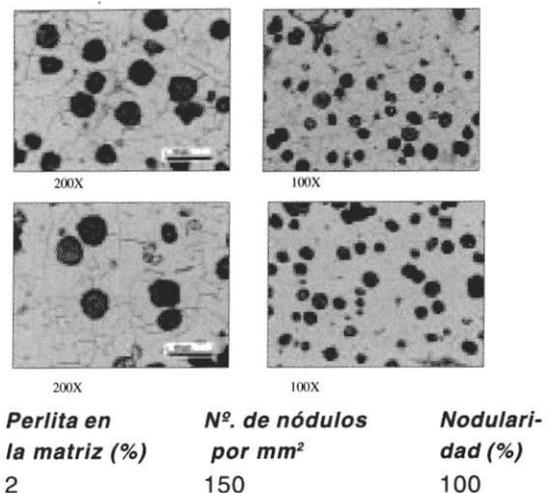


Figura 9. Fotomicrografías de la colada 12, 13, 14, 15

Tabla 2 Resumen de condiciones de operación

Colada	Carga (kg)		% C/M	Soplo		% Liga	Inoculante	Post-inoculante		
	Metal Acero	Retorno		Aire (m³N/min)	T °C				%	
									C	% O ₂
9	7 T.S.	7 F.G.	3	21,4	4,0-5,0	286-377	0	2,6	0	0
10	6,4	7,6	3	21,4	3,77-5,59	290-441	0	2,6	0,6	0,3
11	7,0	7,0	3	21,4	4,56-5,41	323-404	0	2,6	0,3	0,3
12	7,0	7,0	3	21,4	3,5-4,9	230-400	2,78-4,37	2,6	0,3	0,3
13	7,0	7,0	3	21,4	3,47-5,6	270-403	2,34-4,36	2,8	0,3	0,3
14	6,5	6,5	3	23,0	3,54-6,01	186-390	2,1-5,7	2,8	0,3	0,3
15	6,5	6,5	3	23,0	2,62-5,5	147-380	1,03-4,02	2,8	0,6	0,3

T.S.: Tubería de silla. F.G.: Fundición gris. C: Coque. C/M: Relación coque carga metálica. T: Temperatura del soplo.

Tabla 3 Condiciones del revestimiento por colada

Colada	Refractario	Referencia	Observaciones
Tipo			
9	Alta alúmina	Vulplax 80	Refractario nuevo
10	Alta alúmina	Vulplax 80	Refractario sin reparar
11	Alta alúmina	Vulplax 80	Refractario sin reparar
12	Alta alúmina	Vulplax 80	Refractario nuevo
13	Alta alúmina	Vulplax 80	Refractario nuevo
14	Alta alúmina magnesita	Vulplax 80 – promag	Refractario nuevo con anillo de cromo-magnesita en la zona de fusión
15	Magnesita	Magnamix	Refractario nuevo

Tabla 4 Resumen composición química de los materiales de carga

Colada	Tipo de metal	Elemento									
		C	Si	CE	Mn	S	P	Ni	Cu	Pb	Mg
9	Fundición gris*										
	Tubería de silla	0,035	0,018		0,007	0,007	0,008				
10	Retorno nodular	3,717	1,626	4,27	0,07	0,1	0,046	0,017	0,124	0,179	0,149
	Tubería de silla	0,035	0,018		0,229	0,007	0,008				
11	Retorno nodular	3,612	2,168	4,372	0,087	0,056	0,061	0,023	0,115	0,023	0,081
	Tubería de silla	0,035	0,018		0,229	0,007	0,008				
12	Retorno nodular	3,534	2,047	4,23	0,098	0,069	0,054	0,011	0,08	0,022	0,081
	Cold roll	0,007	0,03		0,232	0,008	0,015	0,02	0,011	0,03	
13	Retorno nodular	3,467	2,193	4,211	0,146	0,03	0,053	0,017	0,049	0,027	0,063
	Cold roll	0,007	0,03		0,232	0,008	0,015	0,02	0,011	0,03	
14	Lingotes	3,496	2,419	4,317	0,164	0,008	0,059	0,009	0,042	0,03	0,07
	Cold Roll	0,007	0,03		0,232	0,008	0,015	0,02	0,011	0,03	
15	Lingotes	3,761	2,577	4,632	0,134	0,023	0,05	0,002	0,017	0,026	0,118
	Cold roll	0,007	0,029		0,232	0,008	0,015	0,02	0,011	0,003	

Composición química de la caliza 0,9 kg/carga

	CaCO ₃	CaO	CO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	Fe ₂ O ₃
%	95-98	50-55	40-45	0,20	2	1-2	0.1	1

Composición química del coque 3 kg/carga

	Carbono fijo	Volátiles, gas y alquitranes	Humedad residual	Cenizas	Azufre máximo
%	88,6	1,7	0,5	9,2	0,46

* La composición química de este material se desconoce, por tal motivo uno de los objetivos de esta colada fue preparar material para las próximas fusiones.

Tabla 5 Temperatura en piquera y producción por colada

Colada	Temperatura °C				Producción (kg/hora)
	Piquera		Vaciado		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
9	1.392	1.454	1.286	1.380	258
10	1.392	1.497	1.226	1.394	267
11	1.315	1.485	1.272	1.331	344
12	1.454	1.508	1.284	1.374	315
13	1.362	1.497	1.275	1.355	343
14	1.424	1.528	1.331	1.363	364
15	1.348	1.552	1.126	1.503	252

Tabla 6 Ensayos de propiedades mecánicas

<i>Probeta</i>	<i>Resistencia última (kgf/cm²)</i>	<i>Límite mínimo de fluencia (kgf/cm²)</i>	<i>% de alargamiento en 50 mm</i>	<i>Fractura</i>
Norma	4.234	2.820	10,0	
12A	5.943	3.842	11,0	Fuera de marcas
13A	5.504	4.173	4,28	Fuera de marcas
13B	5.117	4.239	3,00	Fuera de marcas
13C	4.034	3.444	3,42	Fuera de marcas
14A	4.403	3.709	2,42	Fuera de marcas
14B	4.503	3.444	6,39	Fuera de marcas
14C	4.583	3.974	2,42	Dentro de marcas

Tabla 7 Composición química promedio del hierro nodular por colada

<i>Norma</i>	<i>Mínimo</i>	3,20	1,80	3,80	0,15						
	<i>Máximo</i>	4,10	2,80	5,03	0,90	0,03	0,10				
<i>Colada</i>	<i>% elemento</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>CE</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Mg</i>
10	Promedio	3,632	2,280	4,439	0,086	0,051	0,0550	0,0180	0,095	0,022	0,092
	Desviación estándar	0,398	0,214	0,364	0,014	0,030	0,0070	0,0030	0,014	0,001	0,023
11	Promedio	3,554	2,011	4,238	0,103	0,076	0,0520	0,0130	0,082	0,023	0,072
	Desviación estándar	0,267	0,071	0,263	0,005	0,031	0,0023	0,0012	0,005	0,001	0,019
12	Promedio	3,437	2,259	4,203	0,148	0,029	0,0510	0,0080	0,049	0,027	0,068
	Desviación estándar	0,156	0,159	0,141	0,018	0,009	0,0020	0,0030	0,011	0,002	0,024
13	Promedio	3,426	2,831	4,493	0,205	0,041	0,0500	0,0180	0,038	0,026	0,063
	Desviación estándar	0,334	0,230	0,096	0,021	0,051	0,0050	0,0010	0,001	0,001	0,012
14	Promedio	3,780	2,653	4,677	0,139	0,021	0,0510	0,0030	0,016	0,027	0,123
	Desviación estándar	0,249	0,172	0,208	0,016	0,008	0,0035	0,0016	0,007	0,005	0,023
15	Promedio	4,070	2,622	4,898	0,125	0,017	0,0530	0,0050	0,011	0,040	0,189
	Desviación estándar	0,379	0,198	0,410	0,014	0,010	0,0082	0,0024	0,006	0,029	0,043

al día siguiente, proporcionando una baja velocidad de enfriamiento lo cual es favorable para el proceso. Se trató, en la medida de lo posible, de no variar las características de la arena de molde, para no afectar las condiciones de solidificación del metal. Las muestras fueron atacadas solamente con nital 2. El análisis de número de nódulos y nodularidad de la misma, se hizo según las indicaciones de Frás, "Producciones de hierro" [29] y la norma ASTM A 247.

El análisis de la cantidad de perlita se hizo teniendo en cuenta sólo los componentes de la matriz.

Análisis

En la tabla 5 se observa el aumento de las temperaturas en piqueta promedio por colada, indicativo de que las variaciones realizadas fueron medidas eficientes, en el objetivo de trabajar en la banda de temperaturas de 1.450 a 1.500 °C.

Las temperaturas máximas de trabajo por colada registran claramente la influencia de los cambios realizados, primero con la inyección de oxígeno en la colada 12, que aumentó las temperaturas en un promedio de 20 °C y en las coladas 14 y 15, con el aumento de la relación coque-carga metálica que aumentó las temperaturas en otros 20 °C en promedio.

Las coladas 10 y 11 presentan producciones por hora mayores que la colada 9, debido a que no se reparó el refractario (tablas 4 y 6), lo que condujo al aumento del diámetro del horno, relacionado con el nivel de producción. La colada 12 con condiciones de revestimiento iguales a la de la colada 9, registra un aumento notorio en la producción debido a la inyección de oxígeno. Las coladas siguientes presentan también aumentos en la producción como consecuencia directa de la inyección de oxígeno por suplemento y del aumento de la relación coque-carga metálica.

Se registra en la tabla 4, el cambio de refractario realizado, de alta alúmina a magnesita, lo cual influye en las recuperaciones de los elementos presentes en la carga metálica, en especial con la recuperación del silicio, lo que se refleja en el alto porcentaje de inoculante utilizado en la colada número 15.

Las composiciones químicas se encuentran dentro del rango permitido por la norma, con excepción del manganeso, que está un poco por debajo. Se prefirió no adicionar este elemento en vista de que las primeras coladas presentaban altos contenidos de perlita, los cuales se atribuyeron inicialmente a los porcentajes de Mn y Cu presentes.

El fósforo presenta estabilidad en todas las coladas y está en una cantidad que aunque permitida para esta aplicación puede estabilizar algún porcentaje de perlita ayudado con la contribución de otros elementos perlitizantes. En las microestructuras no se advierte la presencia de esteadita.

Aunque el cobre se vuelve un fuerte perlitizante después de 0,25% [30], en la literatura se reporta que cantidades mayores de 0,03% pueden pro-

ducir algo de perlita [24] y en nuestro caso podemos observar cómo el cobre fue disminuyendo a través de la experimentación desde 0,095 hasta 0,011, debido a la dilución sucesiva causada por el uso de Cold Rolled y de retornos en el material de carga, lo que contribuyó para aumentar la ferrita de la matriz.

El manganeso se encuentra por fuera de la norma aunque en una cantidad mínima, esto debido a que porcentajes por encima del 0,15% de manganeso promueven fuertemente la formación de una matriz perlítica en piezas de espesores inferiores a 50 mm [29] como es este caso.

El aumento en la cantidad de liga nodulizante en las coladas 14 y 15, muestra marcadamente su influencia en la cantidad de azufre final en el metal. Los porcentajes de azufre rebajaron desde 0,041% hasta 0,017% de la colada 13 a la 15, lo que implica una disminución de casi el 50%, en el azufre final.

Las metalografías muestran claramente que el grafito presenta forma esférica. Se puede observar que la matriz varió desde una estructura con mucha perlita hasta una completamente ferrítica. Aunque la microestructura de las coladas 10 y 13 tienen mayores porcentajes de elementos perlitizantes, estos no son lo suficientemente altos como para producir matrices con porcentajes de perlita tan altos. En la colada 12 se presenta una estructura más coherente con la composición química. Por lo anterior podemos confirmar que tener una composición química adecuada no es suficiente para obtener una estructura ferrítica, en nuestro caso pudo haber influido que al cortar el canal de vaciado para sacar la muestra metalográfica, se hizo muy cerca del borde, el cual era angular, generando diferentes velocidades de enfriamiento y por tanto diferentes tipos de estructuras.

Los porcentajes de nodularidad en todos los casos, luego de que el proceso se ajustó fueron del 100%, mientras el número de nódulos por milímetro cuadrado fue en promedio de 150, indicando junto con la estructura ferrítica de la matriz

que las propiedades mecánicas logradas son las adecuadas para este tipo de aplicación. Desafortunadamente, las probetas de ensayo de tracción reventaron por fuera de las marcas debido a defectos de fundición y mecanizado, lo que no permite aceptarlas como un dato confiable.

A pesar de esto los límites de fluencia y los esfuerzos máximos están muy por encima de lo exigido por la norma (ver tabla 7), aunque no se puede establecer el porcentaje de alargamiento. La probeta No. 12, fue la única que sobrepasó el porcentaje de alargamiento requerido, a pesar de presentar defectos de mecanizado.

Conclusiones

1. Se obtuvo fundición nodular ferrítica en estado de colada, quedando sustentados los beneficios del cubilote de sople caliente sobre la producción de un metal base apropiado para tal producto.
2. Las temperaturas del sople indicaron claramente la recuperación del calor a través de los acumuladores, mejorando la combustión y reflejándose en las altas temperaturas alcanzadas en el metal de salida.
3. La planta piloto quedó dotada de un horno nuevo y los equipos auxiliares necesarios para la producción de hierro nodular.
4. Es necesario instalar un sistema de control automático en el horno, que garantice un margen más estrecho de las variables operativas, ya que por su tamaño es muy sensible a pequeños cambios en sus parámetros de funcionamiento.
5. Deben estrecharse las relaciones con las empresas del sector, hasta lograr la instalación de sistemas eco-eficientes en ellas, que las hagan más productivas y eleven su calidad.

Referencias

1. AFS. *El horno de Cubilote y su Operación*. México. C.E.C.S.A. 1967.
2. Saez, Alejandro, et al. *Mejoramiento de la Eco-eficiencia en el Subsector de la Fundición. Proyecto de Desarrollo Empresarial*. FEDEMÉTAL, PROPEL, Universidad de Antioquia. Medellín. 1996.
3. Katz, Seymour, et al. "The AFS Cupola Proces Model: A Computer Tool For Foundries". *Metal Casting*. Vol. 89 No. 6. Chicago. 1999. pp. 41-43.
4. AFS. *Cupola Handbook*. Chicago. 6th Edition. 1999.
5. Alonso Baquero, Arnaldo. "Extracción metal-escoria por sifones separados". *Carta Metalúrgica*. FEDEMÉTAL. 1996, pp. 30-32.
6. Alonso Baquero, Arnaldo. "Estudio de Materiales Para Desulfuración en Cuchara". *Carta Metalúrgica*. FEDEMÉTAL. Bogotá.
7. Alonso Baquero, Arnaldo. *Diseño, Control y Operación del Cubilote*. Bucaramanga. Editorial Universidad de Santander. 2000.
8. Gómez, Alvaro, et al. *Construcción de Horno de Cubilote Experimental*. Proyecto de Grado en Ingeniería Metalúrgica. Medellín. Universidad de Antioquia. 1985.
9. Velásquez, Carlos Mario, et al. *Puesta en Marcha de Cubilote Experimental de 10" de Diámetro en la Universidad de Antioquia*. Proyecto de Grado en Ingeniería Metalúrgica. Medellín. Universidad de Antioquia. 1986.
10. Ramírez, José Miguel. *Materias Primas y Metodología para la producción de Hierro Nodular en Cubilote de Sople Caliente*. Proyecto de Grado en Ingeniería Metalúrgica. Medellín. Universidad de Antioquia. 2001.
11. Aristizábal, Ricardo. *Modelo matemático para la temperatura del metal en horno de cubilote de sople caliente*. Proyecto de Grado en Ingeniería Metalúrgica. Grupo GIPIMME. Medellín. Universidad de Antioquia. Agosto de 2001.
12. Serna, Carlos Augusto. *Optimización del Porcentaje de Azufre en el Cubilote de Sople Caliente del Taller de Fundición de La Universidad de Antioquia por el Método Taguchi, 1^a etapa*. Medellín. Universidad de Antioquia. 1997.
13. Orozco, Guillermo de Jesús. *Optimización del Porcentaje de Azufre en el Cubilote de Sople Caliente del Taller de Fundición de La Universidad de Antioquia por el Método Taguchi 2^a etapa*. Medellín. Universidad de Antioquia. 1998.
14. Mejía, Ricardo. *Propuesta de Modelo Matemático Para Regenerador de Lecho Poroso Empacado*. Medellín. Facultad de Minas. Universidad Nacional. 2000.

15. Fernández S., Gerardo y Roman, José Miguel. *Solución al Problema de Sellado de Gases a Altas Temperaturas, Esfuerzos Térmicos y Mezclado de Gases en la Planta Piloto Eco-eficiente*. Proyecto de grado en Ingeniería Mecánica. Medellín. Facultad de Minas. Universidad Nacional. 2000.
16. Lezcano, José Fernando; Parodi, David. *Rediseño, Construcción y Evaluación de una Válvula de Paso Rápido para Evacuación de Gases en la Planta Piloto eco-eficiente*. Proyecto de Grado en Ingeniería Mecánica. Medellín. Facultad de Minas. Universidad Nacional. 2000.
17. Echavarría, Alejandro. Gómez, Jorge Iván. *Problemática del Sector Manufacturero en el Valle de Aburrá, Subsector Fundición*. CIDI (UPB), CESET (Universidad De Antioquia), Medellín, 1991.
18. Mazarella, Vicente. Diagnóstico y Asesoría al Subsector Fundición, FEDEMETAL, ONUDI, Bogotá, 1995.
19. Mejía, Héctor Daniel; Gómez, Álvaro. *Planta piloto Eco-eficiente para Horno de Cubilote*. Convenio PROPEL. Medellín. Universidad de Antioquia. 1996.
20. Mejía, Héctor Daniel; Sánchez, Héctor Darío. *Optimización del Porcentaje de Azufre en Horno de Cubilote Eco-eficiente por el Método Taguchi*. Grupo GIPIMME. Medellín. Universidad de Antioquia. 1998.
21. Rivero, Pedro; Mejía, Héctor Daniel. *Optimización de la Planta Piloto Eco-eficiente en la Universidad de Antioquia*. Grupo DRAGON. Grupo GIPIMME. Medellín. Universidad Nacional y Universidad de Antioquia. Febrero de 2001.
22. Mejía, Héctor Daniel et al. *Producción de Hierro Nodular en Cubilote Eco-eficiente*. Informe Final. Grupo GIPIMME. Medellín. Universidad de Antioquia. Diciembre de 2001.
23. Karsay, Stephen Ignace. *Fundición con Grafito Esferoidal, Quit Fer et Titanie*. Canada. 1976.
24. AFS. *Ductile Iron Handbook*. U.S.A. American Foundrymen Society. 1993.
25. Van De Velde, C.A. et al. *The solidification of ductil cast iron – A new approach*. An AFS especial report. AFS. Inc. 1997.
26. Skaland, T. Grong, O.; Grong, T.; *A model for graphite formation in ductil cast iron: part 1. Inoculation mechanisms*. Metallurgical transaction A. Vol. 24 A. Octubre, 1993. pp. 2.321-2.344.
27. Mills, Keith. *Word Symposium on Ductil Iron*. The Ductil Iron Society's. Soth Carolina. 20-22 de octubre, 1998.
28. Osorio, Hedilberto. *Diseño del sistema de nodulizado y definición de parámetros operativos para el horno eco-eficiente de la Universidad de Antioquia*. Trabajo para especialización en Ingeniería de materiales y procesos. Universidad Nacional. Medellín, 1999.
29. Fras, Edward. et al. *Fundiciones de hierro*. Estructuras, propiedades, Fabricación. primera edición. ILAFA. 1990.
30. Sierra R, Horacio. *Efecto del cobre en las propiedades mecánicas de la fundición nodular al estado de colada y normalizado*. Revista Dyna, No. 103, mayo, 1984, pp. 31-35.