

Estudio del enfriamiento de un cubilote

Parte I: El comportamiento del carbono y el silicio en la carga metálica

Por Ricardo Aristizábal Sierra¹, Claudia María Silva Velásquez², Paula Andrea Pérez Espitia³, Vladimir Stanek⁴, Seymour Katz⁵ y Mark E. Bauer⁶

RESUMEN

Este es el primero de una serie de artículos que describen los procesos físicos y químicos que ocurren en el interior del horno de cubilote. La información experimental fue obtenida mediante el apagamiento rápido de un cubilote operando en condiciones estables y la posterior caracterización química de muestras metálicas obtenidas a diferentes niveles en el horno. El enfriamiento fue realizado mediante la adición de agua por la puerta de carga y el reemplazo del soplo por una corriente de nitrógeno en un horno de cubilote de 0,31m de diámetro. El horno fue cargado con hierro blanco, acero y carburo de silicio.

La composición química de las muestras extraídas fue determinada mediante Espectrometría de Emisión Óptica (OES) y los resultados fueron usados para construir los perfiles de carbono y silicio en la

carga metálica por encima del nivel de las toberas. En artículos posteriores se presentarán los resultados obtenidos para otros materiales de carga (SiC, coque) en esta región y en la zona por debajo de las toberas.

Los perfiles de carbono y silicio obtenidos se ajustan bien a los perfiles generados por el programa de simulación CupolaMelt-I, así como también la producción, la temperatura y el porcentaje de carbono y silicio en el metal en piquera. El ajuste entre los resultados experimentales y los simulados indican que el proceso de enfriamiento no afecta significativamente las condiciones del cubilote. Además indica que los procesos en el interior del horno son independientes del tamaño del mismo.

Los resultados experimentales demuestran que mientras los materiales metálicos se encuentran en estado sólido, no ocurren reacciones importantes que afecten sus contenidos de carbono y silicio. Se detectó una pequeña carburación del acero sólido a una pequeña distancia de la zona de fusión. Mientras las gotas de hierro fundido descienden por la zona de fusión ocurre una disminución en el contenido de carbono y silicio, lo cual es acorde con los perfiles de las simulaciones. No se encontraron gotas de acero en la región entre las toberas y 0,15 m por encima de ellas, sin que haya por el momento una explicación para esto.

Palabras clave: Horno de cubilote, carburo de silicio, carbono y silicio en el cubilote, simulación.

¹ Profesor Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales GIPIMME.

² Estudiante de Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales GIPIMME.

³ Estudiante de Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales GIPIMME.

⁴ V. Stanek, Czech Academy of Science, Prague, Czech Republic.

⁵ S. Katz Associates Inc., W. Bloomfield Michigan, USA.

⁶ Senior Staff Engineer, Materials Engineering Department, General Motors Powertrain, USA.

INTRODUCCIÓN

Se han realizado muy pocos estudios para determinar las condiciones que existen en el interior del horno de cubilote [1-4]. La mayoría de la información disponible corresponde a los datos en la puerta de carga y en la piquera. Con la cantidad de materiales de carga disponibles en la actualidad, es necesario entender cómo se comportan cada uno de ellos y cómo interactúan entre sí, con el fin de entender el comportamiento del cubilote. Esto es particularmente cierto para los materiales en briquetas. Este estudio comenzó con el fin de examinar las diferencias en el comportamiento del carburo de silicio en dos presentaciones a granel y en briquetas. Este artículo es una entrada a este estudio y cubre los cambios observados en las concentraciones del carbono y el silicio en la carga metálica, desde la puerta de carga hasta el nivel de las toberas. El papel del carburo de silicio en sus diferentes presentaciones se reportará en artículos posteriores.

Existen dos publicaciones conocidas de materiales analizados de un cubilote enfriado [1,2]. Estos estudios fueron limitados en su naturaleza, en ambos casos un cubilote operando en condiciones estables fue enfriado mediante la adición de agua por la puerta de carga. Rambush y Taylor [1] enfriaron un cubilote de 1,0 m y luego extrajeron los materiales de su interior. Reportaron los cambios físicos en la carga y los cambios en la composición química del acero en cuanto al carbono y al azufre se refiere. También demostraron que aunque la carga es introducida al horno en capas, a medida que desciende se mezcla debido a que la carga del centro desciende más rápido que la de los costados. Lownie et al [2] realizaron sus estudios en un cubilote de 0,25 m, con la información extraída construyeron un perfil de temperatura probable en el horno, además describieron los cambios en el tamaño del coque mientras se acerca a la zona de fusión.

General Motors realizó estudios de las condiciones internas del cubilote en un horno de 1,5 m de diámetro, teniendo en cuenta el comportamiento del carburo de silicio [3]. La investigación se llevó a cabo mediante la extracción de muestras a través de cinco ventanas de muestreo espaciadas entre ellas por intervalos de 0,30 m y ubicadas por encima de la fila inferior de toberas [4].

Los principales materiales metálicos que entran en la carga del cubilote son hierro y acero; se acepta que en estado sólido las reacciones relacionadas

con el carbono y el silicio son despreciables y que sólo la oxidación del hierro es importante. Los cambios más significativos en la composición química de la carga metálica comienzan luego de que los materiales se funden [5]. El hierro y el acero funden a temperaturas diferentes (~1.150 °C y ~1.500 °C respectivamente), por lo tanto sus cambios en la composición química comienzan a diferentes alturas en el cubilote, empezando los cambios en el hierro más arriba que en el acero.

Cuando la carga metálica se funde, desciende en forma de gotas a través de la cama de coque. Estudios anteriores han demostrado que el 97% del tiempo de descenso las gotas se mantienen en contacto con el coque [6]. Landefeld demostró que debido a la poca probabilidad de que las gotas se mezclen unas con otras, es apropiado asumir que cada material de carga desciende como una corriente individual y que la mezcla de estas corrientes ocurre en el fondo del horno [7]. Es por esta razón que la composición de las gotas puede ser usada para describir los cambios químicos que ocurren en cada corriente. Las reacciones más importantes relacionadas con el carbono y el silicio que ocurren en el estado líquido se pueden observar en la tabla 1.

Reacción	
(1)	$C_{\text{coque}} \rightleftharpoons C_{\text{metal}}$
(2)	$C_{\text{metal}} + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$
(3)	$Si_{\text{metal}} + CO_2 \rightleftharpoons SiO_2 + C_{\text{metal}}$

Tabla 1. Reacciones del carbono y el silicio en la carga metálica del horno de cubilote.

La figura 1 muestra la configuración bajo la cual se presume que estas reacciones se llevan a cabo [8]. La carburación (reacción 1) ocurre en la intercara coque-metal. Olsson, Angeles y Mihailovic y Marinček [9-11] demostraron que la reacción es controlada por el transporte de átomos de carbono a través de la intercara coque-metal. La fuerza impulsora para la reacción es la diferencia de carbono equivalente en el metal y el carbono equivalente de saturación. El grado de la reacción depende también de la temperatura. Otras investigaciones han aplicado este mecanismo al horno de cubilote [12-19].

Simultáneamente con la carburación ocurre la oxidación del carbono en la intercara metal-gas (reacciones 2 y 3). Los estudios relacionados con esta reac-

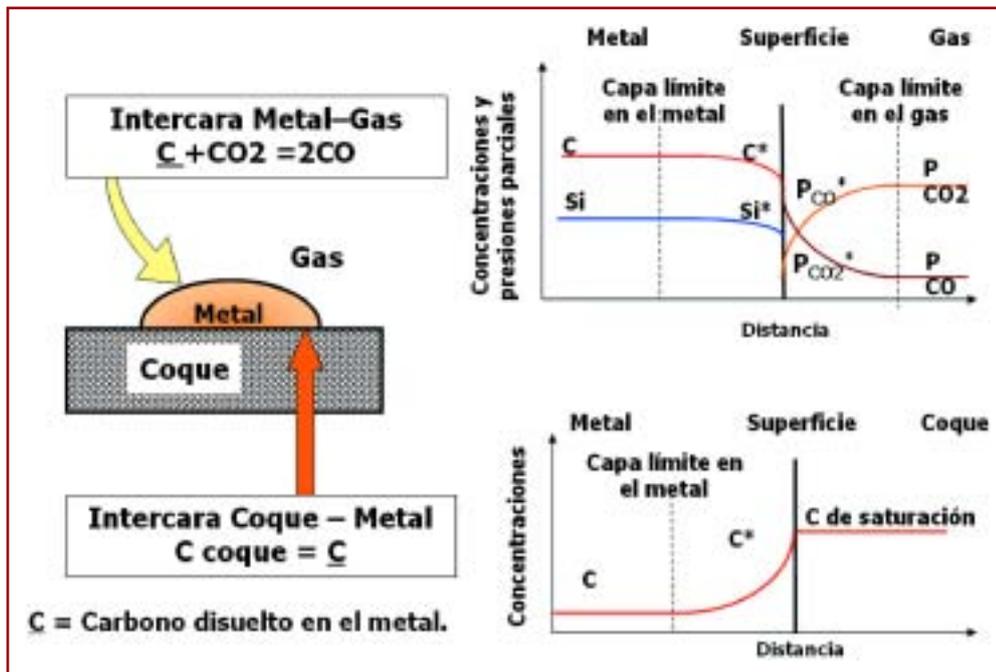


Figura 1. Modelo del comportamiento de las gotas de metal en contacto con el coque en el horno de cubilote (basado en la referencia [17]).

ción han demostrado que es controlada por el transporte de masa en las fases líquida y gaseosa [20,21]. Los gradientes de concentración relacionados con las reacciones 1, 2 y 3 se pueden observar en la figura 1.

Cuando todos estos elementos son introducidos en un modelo matemático completo del horno de cubilote [22,23] los perfiles esperados para el carbono y el silicio en el hierro y el acero son los mostrados en la figura 2. Los perfiles en esta figura asumen carburo de silicio presente en la carga del horno.

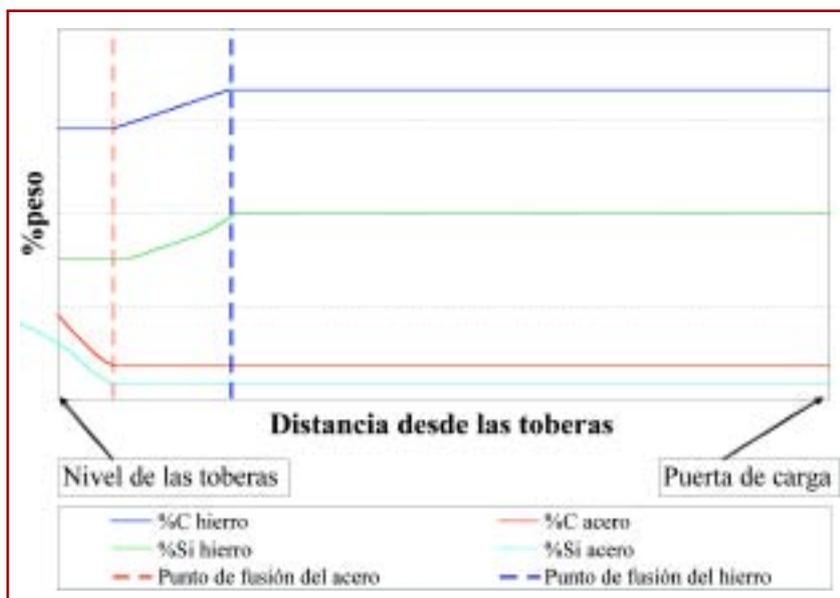


Figura 2. Perfiles cualitativos para el carbono y el silicio en la carga metálica en el horno de cubilote.

Comportamiento del carbono y el silicio en el hierro. El hierro funde más arriba que el acero en el horno de cubilote. Cuando se funde, la carburación y la oxidación comienzan simultáneamente. Debido a que los porcentajes de carbono y silicio en el hierro son altos, la fuerza impulsora para la carburación es baja y para la oxidación es alta. El resultado neto es una disminución en los porcentajes de carbono y de silicio en el material (ver figura 2).

Comportamiento del carbono y el silicio en el acero. Como en el hierro, cuando el acero se funde comienzan la carburación y la oxidación simultáneamente. Ya que la cantidad de los elementos de aleación en el acero es muy baja, la fuerza impulsora para la carburación y para la disolución de los elementos es alta y la fuerza impulsora para la oxidación es baja, por lo tanto es de esperar que la concentración de carbono en el acero aumente a medida que la gota desciende. Otros estudios han demostrado que

la composición del acero depende de los aleantes que estén presentes, cuando se carga carburo de silicio tanto el carbono como el silicio aumentan en el acero [3].

EXPERIMENTACIÓN

La información presentada en este estudio fue obtenida mediante el enfriamiento rápido del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia mientras operaba en condiciones estables. Luego del enfriamiento los materiales del interior del horno fueron removidos de forma cuidadosa en capas de ~0,1 m. Se determinó la composición de los materiales metálicos con el fin de construir los perfiles de carbono y silicio. Los resultados experimentales fueron comparados con la simulación de las condiciones internas (CupolaMelt-I [24]).

El horno de cubilote: Las dimensiones y principales características del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia se pueden ver en la tabla 2. El horno posee un sistema de enriquecimiento del sople con oxígeno y un sistema de recuperación de calor. El sistema de recuperación de calor precalienta el sople a temperaturas entre 250 °C y 450 °C. Consiste en dos regeneradores de lecho empacado que trabajan de manera alternada, mientras uno de ellos recibe los gases calientes producto de la combustión en el proceso, el otro precalentado en un ciclo previo recibe el aire del sople. La dirección de los gases de combustión y el aire por uno u otro regenerador se controla mediante dos válvulas de cuatro vías. En la figura 3 se puede ver una foto del sistema y en la figura 4 se puede observar un esquema del sistema de regeneración de calor.

La reducción de las emisiones de CO se realiza con un post-quemador ubicado encima de la puerta de



Figura 3. Vista general del sistema de regeneración de calor. La flecha indica la puerta de carga.

carga. Una fracción del material particulado queda atrapado en los regeneradores de calor, la otra fracción queda atrapada en un ciclón tipo Stairmad.

Condiciones Experimentales: Las condiciones de operación durante la colada pueden verse en la tabla 2. La carga fue de 50% acero, 50% hierro y carburo de silicio en dos presentaciones a granel y en briqueta. Además se adicionó cobre (~0,80%) al hierro de la carga, con el fin de determinar las proporciones de hierro y de acero en las muestras.

Durante la operación se tomó la siguiente información:

1. La temperatura del metal en el canal de colada continua con un pirómetro de inmersión.
2. Se tomaron muestras del metal en piqueta para analizar su composición química. Las muestras se vaciaron en una coquilla de cobre para evitar

Tabla 2. Dimensiones y características principales del horno de cubilote.

Parámetro	Dimensión
Diámetro interno	0,31 m
Diámetro exterior en la zona de fusión	0,60 m
Número de toberas	4 en una fila
Diámetro interno de las toberas	0,054 m
Protuberancia interna de las toberas a partir del refractario	0
Distancia desde el centro de las toberas hasta la puerta de carga	2,10 m
Distancia desde el centro de las toberas hasta el fondo del horno	0,32 m

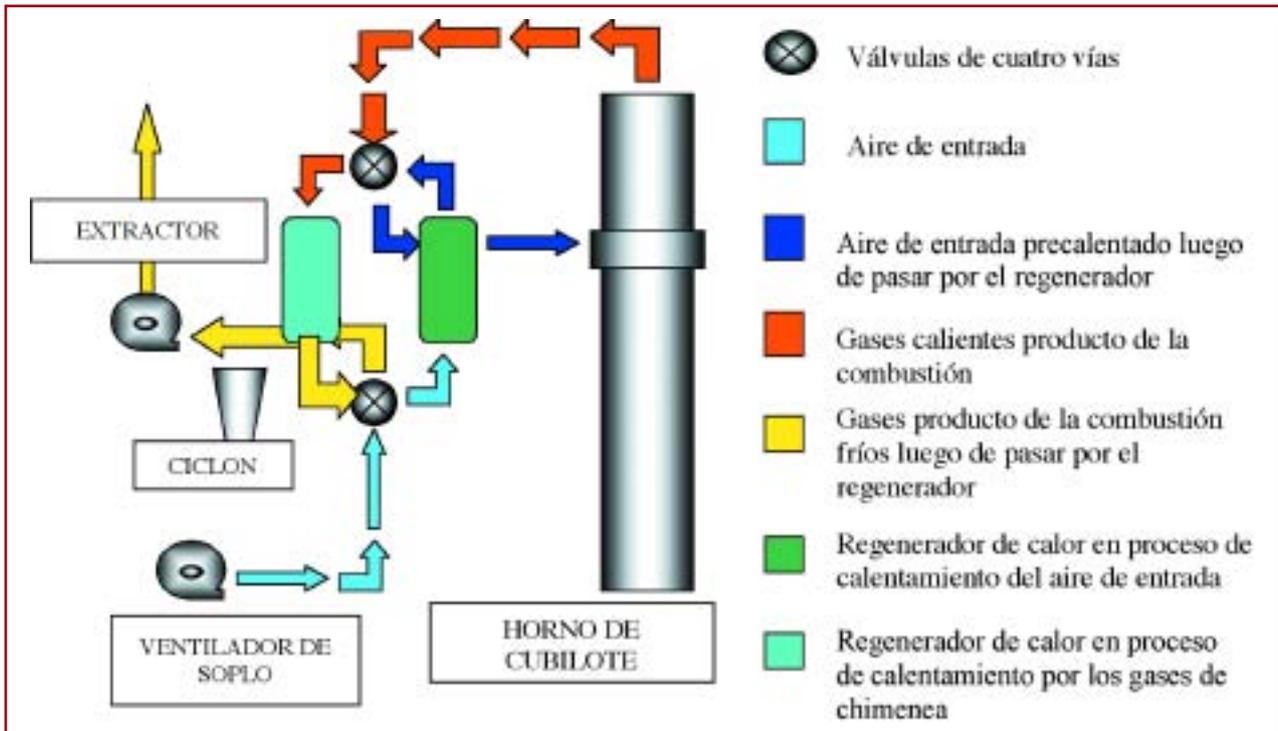


Figura 4. Esquema de funcionamiento del sistema de regeneración de calor del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia.

3. Se analizaron el O₂ y el CO₂ en los gases de combustión antes de pasar por el post-quemador.
 4. Se calculó la producción tomando como base el metal consumido con respecto al tiempo.
- Enfriamiento del cubilote y extracción de las muestras: Para enfriar el horno de cubilote se reemplazó el ai-

CONDICIONES DEL SOPLO						
Variable						Valor
Soplo total (aire + O ₂ de enriquecimiento) [Nm ³ /s]						0,108
Temperatura del soplo [°C]						410
Total %CO ₂ en el soplo						26,83
%O ₂ de enriquecimiento						5,83
Caudal de oxígeno puro adicionado [Nm ³ /s]						8,00E-3
Humedad relativa						65
CONDICIONES DE LA CARGA						
Material	Coque	Caliza	Carburo de silicio		Carga metálica	
			Granel	Briquetas	Acero	Hierro blanco
Peso [kg]	3,0	1,0	0,15	0,45	6,0	6,0
Tamaño [m]	0,037-0,078	0,025-0,038	0,02	0,05	0,002	0,01
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CARGA						
Carga metálica	%C	%Si		%Cu		
Hierro blanco	3,322	1,399		0,799		
Acero	0,062	0,002		0,007		
Carburo de silicio	%SiC	%Carbón libre	%Cemento	%SiO ₂		
Briquetas	36,00	27,00	10,00	27,00		
Granel	97,96	1,04	0,50	0,50		

Tabla 3. Condiciones de operación.

re del soplo por una corriente de nitrógeno gaseoso (~ 0.134 Nm³/s) con el fin de detener las reacciones de combustión y mantener una atmósfera inerte en la zona de fusión. Además se adicionó agua (~ 1,5 x 10⁻⁴ m³/s) por la puerta de carga. La finalización del proceso de enfriamiento se tomó como el momento en que el agua empezó a salir por las toberas. Durante el proceso se tomó la temperatura al nivel de las toberas (figura 5). La figura 6 (a) muestra el sistema de adición de agua por la puerta de carga y la figura 6 (b) es una vista general del proceso de enfriamiento. Se observa como sale vapor de agua del horno.

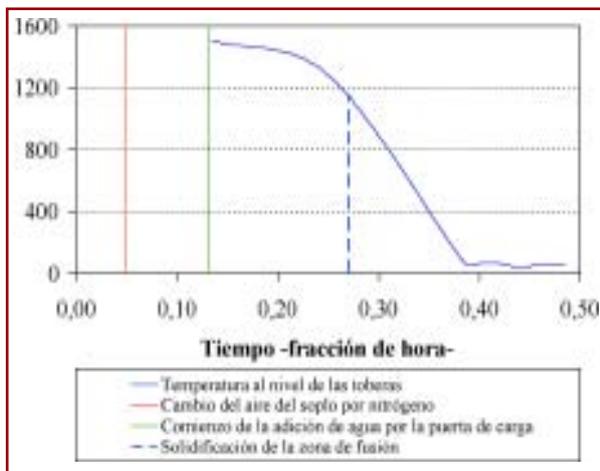


Figura 5. Evolución de la temperatura al nivel de las toberas durante el proceso de enfriamiento del horno.



Figura 6. (a) Adición de agua por la puerta de carga. (b) Imagen del apagamiento del horno de cubilote.

Una vez enfriado el horno se procedió a la extracción de las muestras de su interior. Con el fin de facilitar este proceso el horno se acondicionó para ser

Nivel	Distancia desde el nivel de las toberas [m]
0*	2,10
1	1,42
2	1,30
3	1,20
4	1,10
5	1,00
6	0,90
7	0,80
8	0,70
9	0,60
10	0,50
11	0,40
12	0,30
13	0,20
14	0,10
15**	0,000
16	-0,100
17	-0,200
18	-0,300

*Puerta de carga. ** Nivel de las toberas.

Tabla 4. Distancia desde el nivel de las toberas hasta el centro de cada nivel de muestreo.



Figura 7. Vista general de las condiciones de los materiales de carga luego del enfriamiento del horno. La primera figura corresponde al Nivel 4, la segunda al Nivel 9.

desarmado en cinco módulos. Los materiales se extrajeron en capas de ~0,1 m. En la tabla 4 se puede ver la distancia desde el nivel de las toberas hasta el centro de cada nivel. Los puntos de fusión del hierro y del acero se encontraron a 0,47 m y 0,15 m respectivamente por encima del nivel de las toberas. En la figura 7 se pueden ver algunas vistas generales del proceso de extracción de muestras. Las muestras metálicas extraídas fueron analizadas mediante espectrometría de Emisión Óptica.

Simulación: Las condiciones de operación de la colada se simularon con el programa CupolaMelt-I. Los valores de los parámetros usados para ajustar la simulación se pueden observar en la tabla 5.

RESULTADOS

La comparación entre los resultados experimentales y los de la simulación se pueden observar en la tabla 6. El CO en los gases de salida fue calculado con la ecuación 1. La ecuación requiere de los valores de O₂ en el aire del soplo y de O₂ y CO₂ en los ga-

ses de chimenea, además no considera el CO₂ producido por la calcinación de la caliza. La eficiencia de combustión (RC) se calculó utilizando la ecuación 2. Las desviaciones en los valores expresados en porcentaje se calcularon como la desviación absoluta. La desviación para la producción y la temperatura del metal en piqueta se calcularon como la desviación relativa.

$$CO_{(abstracción)} = 2(O_{2(soplado)} - CO_{2(chimenea)} - O_{2(chimenea)})$$

Ecuación 1

$$RC = \left(\frac{CO_{(chimenea)}}{CO_{2(chimenea)} + CO_{chimenea}} \right) \times 100$$

Ecuación 2

Los resultados de la caracterización de las muestras metálicas obtenidas tras el enfriamiento en los niveles por encima de las toberas se pueden ver en la tabla 7. Los valores en el nivel 0 (cero) correspon-

Parámetro	Valor
Fracción de la gota de metal expuesta al gas	0,63
Fracción de superficie del coque expuesta al gas	0,63
Fracción de calor de la reacción de combustión que permanece con los gases	0,95
Fracción de aire del soplo que entra en el cubilote	0,82
Ajuste del coeficiente de recuperación de carbono	1,20
Ajuste del coeficiente de difusión del S en el FeO	1,20
Fracción universal efectiva de área de transferencia de calor	0,40

Tabla 5. Parámetros usados para la simulación de la colada con el programa CupolaMelt-1 [22].

	Real	Simulación	Desviación
%CO _{2(chimenea)} [%volumen]	7,88	11,6	3,72%
%O _{2(chimenea)} [%volumen]	5,76	---	---
%CO _(chimenea) [%volumen]	26,4	24,1	2,30%
%C _(en piqueta) [%peso]	3,60	3,59	0,01%
%Si _(en piqueta) [%peso]	2,30	2,29	0,01%
Temperatura del metal _(en piqueta) [°C]	1.523	1,544 (piqueta) 1,525 (en el canal de colada)	0,13%**
Producción [kg/h]	339	324	4,42%
RC	22,98***	32,49***	9,51%

Nota: * Calculado con la ecuación 1. ** Se calcula con respecto a la temperatura en el canal de colada continua. *** Calculado con la ecuación 2.

Tabla 6. Comparación entre los resultados experimentales y los simulados.

Nivel	Distancia desde el nivel de las toberas [m]	Hierro			Acero		
		%C	%Si	%Cu	%C	%Si	%Cu
0 _{Carga}	2,10	3,322	1,399	0,799	0,062	0,002	0,007
1	1,42	---	---	---	---	---	---
2	1,30	---	---	---	0,047	0,000	0,010
3	1,20	3,155	1,318	0,833	0,062	0,000	0,009
4	1,10	3,191	1,336	0,822	0,062	0,000	0,009
5	1,00	3,101	1,336	0,836	0,030	0,000	0,008
6	0,90	---	---	---	0,069	0,000	0,007
7	0,80	3,163	1,298	0,844	0,051	0,000	0,008
8	0,70	3,220	1,379	0,823	0,058	0,000	0,012
9	0,60	3,407	1,275	0,800	0,058	0,000	0,008
10	0,50	3,392	1,341	0,783	0,062	0,000	0,007
11	0,40	3,211	1,252	0,803	0,035	0,000	0,007
12	0,30	3,038	1,372	0,818	0,124	0,000	0,006
13	0,20	3,237	1,045	0,734	0,124	0,000	0,006
14	0,10	2,717	0,896	0,673	---	---	---
15	0,00	3,150	1,217	0,758	---	---	---

Tabla 7. Resultados de la caracterización de las muestras metálicas extraídas del cubilote tras el enfriamiento.

den a los materiales de la carga. La comparación entre los perfiles experimentales y los simulados para el carbono y el silicio en el hierro y el acero se pueden observar en las figuras 8 y 9.

ANÁLISIS

Predicción del comportamiento global del cubilote

Los resultados experimentales y los simulados presentan un muy buen ajuste con respecto a la com-

posición, la temperatura y la producción del hierro final (ver tabla 6).

Análisis de las condiciones internas del cubilote

La relativa constancia de los valores experimentales de carbono y silicio en el hierro y en el acero en las regiones en los que se encuentran sólidos, demuestran que ni la carburación, ni la oxidación del carbono y el silicio avanzan en un grado significativo. Se notó un pequeño grado de carburación del a-

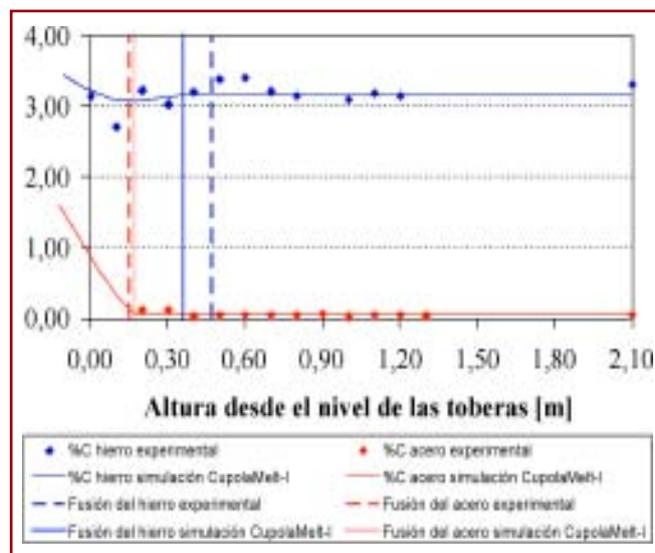


Figura 8. Perfiles de carbono en el hierro y el acero.

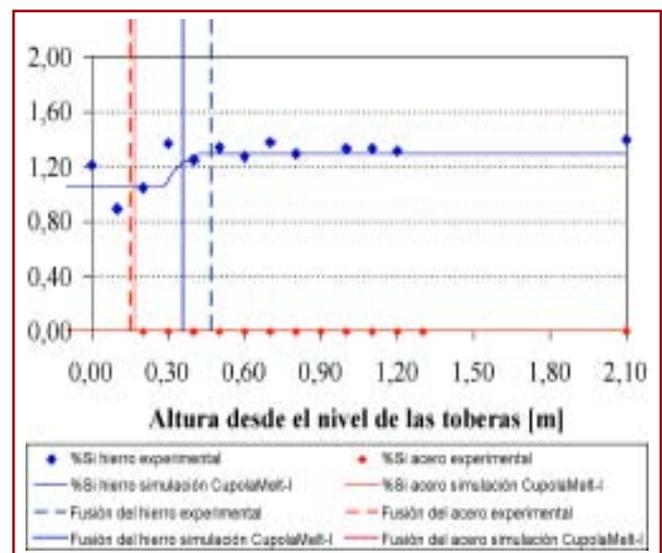


Figura 9. Perfiles de silicio en el hierro y el acero.

cero (de 0,05% a 0,10% C) a una pequeña distancia del punto de fusión.

El punto de fusión del hierro se localizó a 0,47 m por encima del nivel de las toberas, el punto de fusión obtenido de la simulación se encontró 0,12 m por debajo del punto experimental. Una vez fundido se encontró una disminución en el porcentaje de carbono. Un comportamiento similar se observó para el silicio. El ajuste entre los perfiles experimentales y los de la simulación fue bueno.

El aspecto más sorprendente del análisis fue la ausencia de acero en la región en la que los resultados experimentales y los simulados indican que éste se debería encontrar fundido (ver figuras 8 y 9). Es importante anotar que se encontró un buen ajuste entre los puntos de fusión del acero experimental y simulado (0,15 m y 0,17 m respectivamente). Por prudencia no se realizan especulaciones a este respecto hasta tanto no se realice el análisis de las condiciones por debajo del nivel de las toberas.

CONCLUSIONES

1. El buen ajuste entre los resultados experimentales y los simulados indican que el proceso de enfriamiento no altera de forma significativa las condiciones en el interior del cubilote.
2. Uno de los beneficios de la simulación es que ofrece explicaciones a los fenómenos observados.
3. Este estudio demuestra que mientras la carga metálica se encuentra sólida no ocurren cambios significativos en el carbono y el silicio en la carga metálica. Se notó una pequeña carburación del acero por encima de su punto de fusión.
4. Las gotas de hierro mostraron signos de decarburación luego de que este material de carga se funde, lo que se atribuye a las condiciones oxidantes en esta zona.
5. La correspondencia entre los resultados experimentales y los simulados indican que los fenómenos físicos y químicos en el horno de cubilote son independientes de su tamaño.
6. El impacto de la investigación en cubilotes pequeños y de las predicciones del CupolaMelt-I proporcionan un campo para el estudio del comportamiento de nuevos materiales en el cubilote y de mejoras en el proceso de fusión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero proporcionado por Katz Associates, el Departamento

de Energía de los Estados Unidos (DOE), la American Foundry Society (AFS) y la Universidad de Antioquia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N.E. Rambush and G.B. Taylor. "A New Method of Investigation the Behavior of Charge Material in an Iron-Foundry Cupola and Some Results Obtained". *Foundry Trade Journal*. 1945.
- [2] H. W. Lownie, Jr, D.E. Krause and C.T. Greenidge. "How Iron and Steel Melt in a Cupola". *AFS Transactions*. Volume 60. pp 766-771. 1952.
- [3] S. Katz, Private communication.
- [4] S. Katz, M.E. Bauer and T.J. Mutton, "Performance of Briquetted and Lump Silicon Carbide on Cupola Operations," *AFS Trans.*, 2004.
- [5] V. Stanek, B.Q. Li; J.Szekely. "Mathematical Model of a Cupola Furnace-Part I: Formulation and an Algorithm to Solve the Model". *AFS Transactions*. Volume 100. 1992.
- [6] W. Shu, W. Li and Z. Chen. *Cast Metal*. Volume 2. p 44-51. 1989.
- [7] C. Landefeld. "Chemical Process and Heat Loss in Cupola". *Foundry Processes their Chemistry and Physics*. Plenum Press New York. 1988.
- [8] H. Sun, R.D. Pehlke. "Kinetics of Oxidation of Carbon in Liquid Iron-Carbon-Silicon-Manganese-Sulfur Alloys by Carbon Dioxide in Nitrogen". *Metallurgical and Materials Transactions B*. Volume 26B, p 335-344. April 1995.
- [9] Olsson, R.G., Koump, V., Perzak, T.F. "Rate of Dissolution of Carbon in molten Fe-C Alloys". *Trans. Met. Soc. AIME*. Volume 236. pp 426-429. 1966.
- [10] Angeles, O., Geiger, G. H., Loper, Jr., C. R. "Factors Influencing Carbon Pickup in Cast Iron". *AFS Transactions*. Volume 76. pp 3-11. 1968.
- [11] A. Mihailovic and B. Marincek: *Arc. Eisenhüttenwes*, vol 44, 1973, pp 507-512.
- [12] V. Sahajwalla, R.D. Pehlke. "Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Carbon Transport in a Cupola". *AFS Transactions*. Volume 100, p 343-352. 1992.
- [13] V. Sahajwalla, R.D. Pehlke, C.F. Landefeld, S. Katz. "Modeling Key Cupola Reactions: Behavior of Carbon, Silicon and Manganese". *AFS Transactions*. Volume 99, p 269-276. 1991.
- [14] V. Sahajwalla, R.D. Pehlke. "Carbon Transfer in Iron Melting: Activity-Based Mathematical Model, Experimental Investigation and Implications in Cupola Melting". *AFS Transactions*. Volume 101, p 313-321. 1993.
- [15] V. Stanek, S. Katz, C. Landefeld, R. Pehlke, V. Sahajwalla. "Mathematical Model of a Cupola Furnace-Part VI: Role of the Holdup of Liquid Metal in the Coke Bed of the Shaft". *AFS Transactions*. Volume 101, pp 833-838. 1993.
- [16] V. Stanek; J. Szekely; V. Sahajwalla; R. Pehlke; C. Landefeld; S. Katz. "Mathematical Model of a Cupola Furnace-Part IV: Carbon Pickup, Metal Charge Oxidation and Cupola Shell Heat Losses". *AFS Transactions*. Volume 100, pp 459-466. 1992.
- [17] H. Sun, R.D. Pehlke. "Predictions of Liquid Cast Iron Composition Profiles in the Coke Bed of a Cupola". *AFS Transactions*. Volume 101, p 305-312. 1993.
- [18] H. Sun, R.D. Pehlke. "Predictions of Liquid Steel Composition Profiles in the Coke Bed of a Cupola". *AFS Transactions*. Volume 103, p 231-235. 1995.
- [19] Landefeld, C. F., Katz, S. "A Dual Stream Model of Carbon Pickup Based on Carbon Activity". *Cast Metals*. Volume 3. pp 163-171. 1990.
- [20] H. Sun, R.D. Pehlke. "Kinetics of Oxidation of Carbon in Liquid Iron-Carbon-Silicon-Manganese-Sulfur Alloys by Carbon Dioxide in Nitrogen". *Metallurgical and Materials Transactions B*. Volume 26B, p 335-344. April 1995.
- [21] H. Sun, R.D. Pehlke. "Kinetics of Oxidation of Multicomponent Liquid Iron Alloys by Oxidizing Gases Using Levitation Melting". *AFS transactions*. Volume 67, p 371-376. 1992.
- [22] S. Katz, V. Stanek and CF Landefeld, "Computer Assisted Cupola Operation. Part 1-Basic Cupola Model." *Cupola Handbook*, 6th Edition, American Foundry Society, Des Plaines, IL, p 27-2 - 27-10 (1999).
- [23] S. Katz. V. Stanek and C.F. Landefeld, "Part I-Basic Cupola Model". *Cupola Handbook*, 6th Edition, Chapter 27 (1999).
- [24] Vladimir Stanek. Internal report "Study of the silicon behavior added like carbide silicon in the cupola furnace". Praga, November, 2006.
- [25] H. Mejía, C. Silva, R. Aristizábal. "Incremento de productividad por recuperación de calor en gases de chimenea de un horno de cubilote". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. Número 28. pp 76-85. Abril de 2003.