

IMPACTO DEL CONSUMO DE CAL, COQUE, OXÍGENO Y HRD EN LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA DURANTE EL PROCESO DE ACERACIÓN PRIMARIA EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

Marlon Rojas¹, Olga Prado¹, Octavio Carvajal¹, Ricardo Higuerey²

(Recibido marzo 2013, Aceptado junio 2013)

¹SIDOR, ²UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela

marlondrj@gmail.com, herpra7@gmail.com, sirocc@gmail.com, higuereyricardo@yahoo.com

Resumen: En este trabajo se tiene como objetivo analizar y describir el impacto que tiene el consumo de cal, coque, oxígeno y el hierro de reducción directa (HRD) en el proceso de formación de escoria espumosa durante la fabricación de acero en un horno de arco eléctrico. Para ello se procedió a desarrollar un diseño experimental bajo el perfil de campo del tipo descriptivo; el cual se llevó a cabo mediante un seguimiento a coladas de acero provenientes del horno eléctrico HE – 5 de la acería de planchones de Sidor. En este sentido, fue necesario analizar las variables de control más influyentes en el acondicionamiento de la escoria espumosa, como: consumo de cal, coque, oxígeno y HRD; mismos que se correlacionaron con el índice de distorsión armónica (ITHD). Entre los resultados más significativos, se obtuvo que una eficiente escoria espumosa se forma con niveles estables del indicador IHTD (menores a 1%), para los cuales es necesario controlar el consumo de cal y coque en ambos patrones de carga metálicas que se emplea para la fabricación de acero.

Palabras clave: Diseño Experimental/ Escoria Espumosa/ Índice de Distorsión Armónica, Horno de Arco Eléctrico.

IMPACT OF CONSUMPTION OF CAL, COKE, OXYGEN AND HRD IN THE FORMATION OF SLAG FOAMY DURING STEELMAKING PRIMARY IN ELECTRIC ARC FURNACES

Abstract: This paper is to analyze and describe the impact of lime consumption, coke, oxygen and direct reduced iron (DRI) in the formation of foamy slag during the production of steel in an electric arc furnaces. To do this we proceeded to develop an experimental design under the profile descriptive field, which was carried out by monitoring heats of steel from the oven HE - 5 of the Sidor steelworks. In this sense, it was necessary to analyze the most influential control variables in the conditioning of the foamed slag, as consumption of lime, coke, oxygen and HRD; same that correlated with the level of harmonic distortion (ITHD). Among the most significant results, we found that efficient foamy slag is formed IHTD indicator stable levels (less than 1%), for which it is necessary to control the use of lime and coke in both metal loading patterns used to steelmaking.

Keywords: Experimental Design/ Slag Foaming/ Harmonic Distortion Index/ Electric Arc Furnaces

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen dos (2) tecnologías alternativas a nivel mundial que pueden seguir las empresas siderúrgicas para la fabricación de acero: *Proceso Siderúrgico Integral y Acería Eléctrica* [1]. Siendo esta última tecnología la que utiliza la empresa siderúrgica del Orinoco “Alfredo Maneiro” (Sidor, C.A.), la cual emplea hornos de arco eléctrico en la fase inicial de producción de acero a partir de un proceso de transformación del estado sólido al estado líquido de la materia prima totalmente metálica

(HRD, briquetas y chatarra), mediante la formación de arcos eléctricos generados por los electrodos de grafitos (por el pase de corriente eléctrica) al hacer contacto con la carga metálica.

En este sentido, cabe destacar que durante la fusión primaria, se forma sobre la superficie del acero fundido, una capa compuesta por todas aquellas impurezas contenidas en la carga metálica. Esta capa se le conoce comúnmente como “escoria”, el cual es de fundamental provecho que se encuentre en forma

espumosa, ya que de esta manera, se encontrará cubriendo los arcos eléctricos generados, asegurando que la corriente eléctrica se transfiera directamente al baño líquido para aprovechar el calor durante todo el ciclo del proceso, permitiendo así el uso de posiciones más alta de control de potencia sin necesidad de aumentar la carga térmica (por radiación) en las paredes refractarias del horno, logrando con ello incrementos en la eficiencia térmica en rango de 60 a 90 %. [2], [3]

En la actualidad, los operadores de los hornos por lo general controlan la formación de escoria espumosa el cual es identificado de manera visual y auditiva; sin embargo, los criterios utilizados para lograrlo están fuertemente influenciados por el empirismo, realizando cambios en la adición de las materias primas (coque, cal, oxígeno y HRD) en distintas concentraciones. Es decir, se debería contar con un patrón de carga estandarizado de las materias primas en cantidades óptimas que permita favorecer el proceso de formación de escoria espumosa durante todo el ciclo de aceración en el horno eléctrico.

Considerando además que la adición de una materia prima en mayor o menor proporción genera gran perturbación en la escoria, lo que influye en sus propiedades físicas y químicas (poco viscosa, índices de óxido de hierro muy altos, no espumosa, etc.), lo que hace difícil la obtención de los beneficios antes mencionados.

Partiendo de esto y en busca de la mejora continua, se ha planteado diseñar un modelo experimental que permita evaluar y detallar el suministro de los insumos (cal, coque, oxígeno y HRD), que se adicionan al horno eléctrico durante el proceso de aceración. Diseño que es posible mediante la medición de la amplitud de armónicas, mejor conocido como índice de distorsión armónica (ITHD).

La referencia [4] define el ITHD como un parámetro eléctrico, que mide la magnitud del ruido de las armónicas que se generan durante el funcionamiento del horno eléctrico de arco por medio de la magnitud de la armónica individual (I_h) y la demanda máxima de la corriente fundamental de carga (I_L), definida por la ecuación (1).

$$ITHD = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (I_h)^2} \cdot \frac{100\%}{I_L} \quad (1)$$

Dicho parámetro fue estudiado por [5], encontrando que cuando la escoria es plana (no espumosa) la magnitud del ruido es muy alta; en cambio, que cuando la escoria es espumosa, el arco eléctrico generado por los electrodos se encuentra sumergido en la escoria, permitiendo disminución en el ruido, tal y como se muestra en la Figura 1.

De modo que la elección de usar este medio sirve como una técnica de supervisión, para identificar perturbaciones que se generen durante el proceso de fusión del acero en el horno eléctrico, y correlacionar dicha perturbaciones con eventos específicos en cuanto a las variables del proceso que de una u otra forma están planteadas en el

modelo físico de formación de una escoria espumosa y así aumentar la eficiencia de todo el proceso.

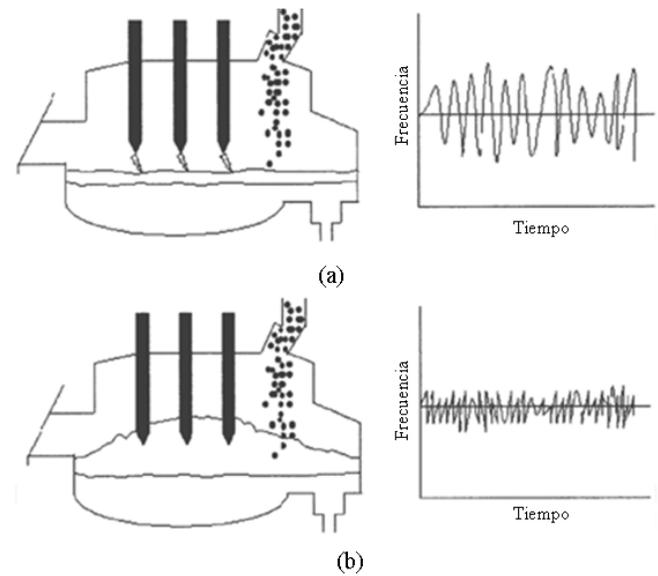


Figura 1. Frecuencia del ruido en el horno eléctrico. (a): sin escoria espumosa; (b): con escoria espumosa. [5]

Ante este contexto, importa destacar que una de las investigaciones recientes y de gran relevancia para este estudio, lo representa la investigación desarrollada por [6], quien estudió el efecto del contenido de óxido de hierro (FeO) disuelto en la escoria sobre el espesor de la misma, cuyos valores fueron correlacionados con el indicador ITHD.

Entre los resultados más relevantes demostró que el ITHD sirve como sistema de control siempre y cuando se trabaje con valores alrededor de 0,5% donde los parámetros de contaminación sónica no planificada son los menores, siendo 1% el tope máximo permisible para la formación de una escoria espumosa estable. Esto dado que para estos rangos del indicador ITHD, el autor demuestra que la escoria formada brindará características óptimas de espumabilidad y protección al material refractario, ya que aumentará en un espesor tal que permite cubrir los arcos eléctricos generados por los electrodos.

Como se puede notar, existe una correlación entre el parámetro ITHD y las condiciones de la escoria (altura y composición química), que puede funcionar como un soporte en el control del proceso de formación de escoria espumosa para su monitoreo continuo en tiempo real; siendo mucho más exacta que la apreciación empírica y por ende, este parámetro será utilizado como variable referencial para cuantificar el patrón de carga de cal, coque, oxígeno y HRD.

En este sentido, se indica al lector que el estudio se enfocó en el horno eléctrico HE-5, por contar en este horno con un registro continuo de los valores del indicador ITHD. Dicho horno eléctrico tiene una capacidad nominal de 200 toneladas con un transformador de 130 MVA. Además

cuenta con un sistema automatizado de regulación de electrodos, un sistema de alimentación continua de las materias primas. El sistema de sangrado es realizado a través del orificio excéntrico (EBT).

II. DESARROLLO

1. Diseño del modelo experimental

El modelo experimental que se desarrolló en la presente investigación consiste en un diseño *multifactorial 2⁴*,

cuyos arreglos se aplican como una herramienta que tienen como objetivo la búsqueda de estabilidad de procesos para garantizar que el producto sea consistente o robusto, dado que permiten investigar una gran cantidad de factores con pocas corridas experimentales, principalmente en la fase de exploración de impactos de las diferentes variables independientes sobre las variables respuestas. En este sentido se indica que en el caso de este estudio, las variables de interés se detallan en la Tabla I.

TABLA I. Variables utilizadas en el diseño experimental

Tipo de Variable	Definición Nominal	Definición Conceptual	Dimensión	Indicador
INDEPENDIENTE	Patrón de carga	Relación proporcional vinculada a la cantidad de consumo de las materias primas empleadas para la fabricación de un producto (acero).	HRD	Ton
			Coque	Kg
			Cal	Ton
			Oxígeno	Nm ³
DEPENDIENTE	ITHD	Es el parámetro de medición de la distorsión armónica que generan las fases de los electrodos al formar los arcos eléctricos.	Fase 1	%
			Fase 2	%
			Fase3	%

2. Recolección de los Datos

Sidor, cuenta con sistema automatizado de control de producción que calibra y monitorea las variables de proceso que inciden durante la fabricación de la colada de acero. Por medio de este sistema se procedió a la recopilación de los distintos datos de las variables a estudiar en el modelo experimental de manera directa en condiciones reales de operación.

Esto a la hora de realizar la primera medición de la temperatura del baño metálico, misma que corresponde cuando dentro del horno hay una carga total de aproximadamente entre 220 a 250 toneladas.

Conviene señalar que para la experimentación se estableció como criterio de selección un peso del charco metálico (pie líquido) de 50 toneladas, un tiempo de interrupción en la colada de acero menor o igual a 20 minutos y en el caso de utilizar un patrón de carga metálica mezcla, que tenga una proporción de 80% HRD y 20% chatarra (con un peso de chatarra igual a 40 toneladas).

3. Resultados

3.1. Cuantificación del consumo de cal, coque, oxígeno y HRD

En la figura 2, se muestra un gráfico de caja y bigote referido al consumo de HRD para las muestras obtenidas en la etapa de experimentación, en donde se puede notar claramente la variabilidad que existe en el proceso y que

se diferencia dependiendo del patrón de carga metálica que se utilice en la fabricación de acero. Encontrándose que el consumo de HRD evidentemente es mayor cuando se utiliza un patrón de carga metálica 100 % HRD, cuyo consumo promedio esta alrededor de 210 toneladas (con una variación de 174,2 hasta 253,1 toneladas); en comparación, cuando se utiliza una carga metálica de proporción 80% HRD y 20% chatarra, cuyo consumo promedio esta alrededor 171 toneladas (con una variación de 114,6 hasta 245,4 toneladas).

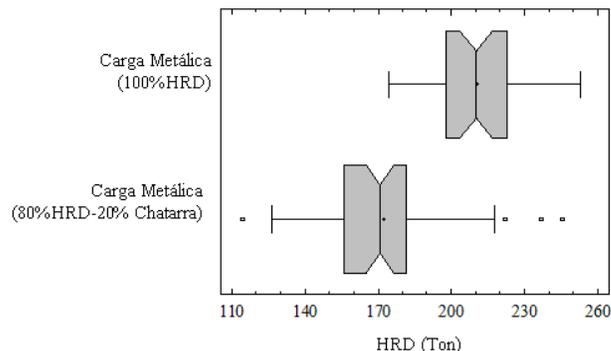


Figura 2. Gráfico de caja y bigotes para el consumo de HRD.

Cabe destacar que el análisis estadístico anterior se realizó de igual manera para el resto de las materias primas (cal, coque y oxígeno), los cuales aportaron información relevante referido a la variabilidad de su consumo durante el proceso de aceración; específicamente, en la etapa de

experimentación, permitiendo de esta forma, establecer rangos de consumos con una alta probabilidad de que se encuentre dentro de la media poblacional (con un 95% de confianza) en la etapa a la cual se recolectaron los datos, que para efecto de esta investigación vinculado a un diseño experimental, dichos rangos se utilizaron para representar los niveles de los factores respectivamente. Tales rangos se detallan en las Tablas II y III.

Tabla II. Niveles de los factores en el diseño experimental para una carga metálica 100 % HRD.

Factores	Unidades	Niveles de los Factores	
		Nivel bajo (-1)	Nivel Alto (+1)
Coque	Kg	200 ± 100	400 ± 100
Cal	Ton	17,75 ± 1,25	20,25 ± 1,25
Oxígeno	Nm ³	4810 ± 625	5950 ± 625
HRD	Ton	197,5 ± 12,5	222,5 ± 12,5

Tabla III. Niveles de los factores en el diseño experimental para una carga metálica 80 % HRD y 20% chatarra.

Factores	Unidades	Niveles de los Factores	
		Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (+1)
Coque	Kg	385 ± 128,6	642 ± 128,6
Cal	Ton	16,6± 1,8	20,4± 1,8
Oxígeno	Nm ³	3800 ± 833	5500 ± 833
HRD	Ton	148 ± 16	180± 16

3.2. Evaluación del impacto del consumo de cal, coque, oxígeno y HRD en el indicador ITHD

Al evaluar los efectos principales que tiene los factores cuando se pasa de un nivel bajo a un nivel alto a través del diseño experimental, se obtuvo que tanto el consumo de cal, como el consumo de HRD tiende a aumentar los valores del indicador ITHD. Efecto contrario son producidos con el consumo de coque y el oxígeno, pues, tienden a disminuir los valores del indicador ITHD.

El efecto producido por el consumo de coque se debe a que favorece la reducción del FeO; para así, formar hierro libre y monóxido de carbono (CO). Tal como se visualiza en la figura 3, donde es evidente que a medida que se aumenta la cantidad de carbón inyectado, va disminuyendo la concentración de FeO en la escoria, arrojando una correlación de R-cuadrada igual a 0,8373.

Es por ello, que un alto consumo de carbón implicaría mayor carbono disuelto en la escoria y menor grado de oxidación en la misma.

Por consiguiente, al darse las condiciones para que ocurra la reacción de reducción de FeO, mayor será la posibilidad de generación de burbujas de CO, el cual se desprenden del líquido, pasando a través de la escoria y contribuyen a que la escoria “espume”. Así pues, una escoria espumante crecerá y cubrirá los arcos

eléctricos, evitando el aumento de las perturbaciones dentro del horno y por ende la interpretación del registro de la disminución del indicador ITHD.

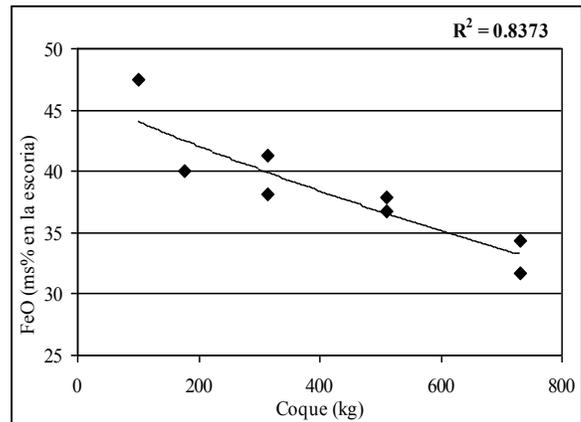


Figura 3. Efecto del consumo de carbón sobre el FeO disuelto en la escoria.

Por su parte, la contribución del consumo de oxígeno en el ITHD, se debe principalmente a la oxidación en la interfase metal-escoria, mediante la oxidación del hierro, tal como se observa en la figura 4. En donde a medida que se aumenta la inyección de oxígeno al horno, la concentración de FeO en la escoria aumenta significativamente, originando una dependencia directamente proporcional con una correlación de R-cuadrada igual a 0.7077.

Esto dado que un 20% proviene de reacciones en el metal, y el 80% de reacciones en la escoria [7]. En tal sentido, un mayor volumen de FeO en la escoria permite una alta velocidad de reacción con el carbono adicionado para así incrementar la producción de burbujas de CO, que a su vez permite una mejor estabilidad en el espumamiento de la escoria, donde el espesor aumentará hasta cubrir los arcos eléctricos. De este modo el incremento de oxígeno disminuirá los valores de ITHD.

Por su parte, ha de considerarse también el efecto descarburador del oxígeno al reaccionar con el carbono disuelto en la escoria y en el acero para la formación de monóxido de carbono.

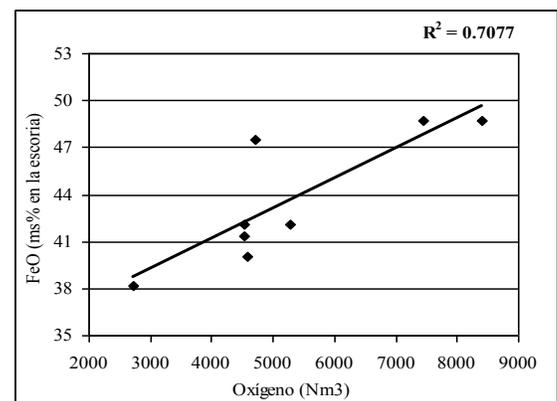


Figura 4. Relación entre el caudal de oxígeno inyectado al HEA y la concentración de FeO en la escoria.

Por otra parte, como se menciona anteriormente, el consumo de cal genera aumentos significativos en los valores del indicador ITHD. Esta conducta se explica, debido a que la cal aporta cantidades considerables de partículas sólidas de segunda fase en la escoria, entre la que se destaca el óxido de calcio (CaO), que contribuyen a equilibrar la basicidad y la viscosidad de la escoria. En este sentido se observó una relación directamente proporcional de las partículas CaO y FeO que se generan en la escoria, misma que se detalla en la figura 5; en donde es evidente que a medida que aumenta la concentración de CaO, el FeO disminuye y viceversa.

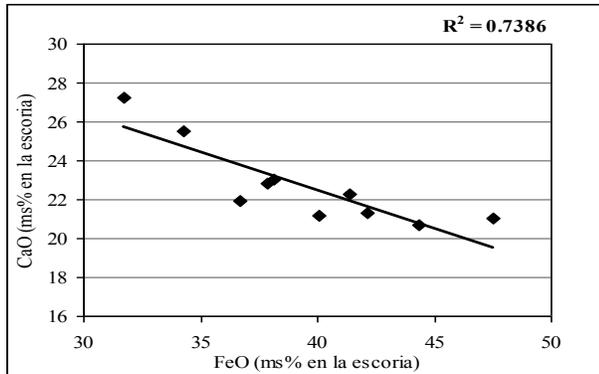


Figura 5: Relación de las concentraciones del %FeO y %CaO en la escoria.

De modo que, al mantener el consumo de oxígeno en su nivel bajo, la generación de FeO en la escoria se ve disminuida, por lo que habrá déficit de FeO. Lo cual se traduce en incrementos de partículas de CaO, que no reaccionan para formar fosfato de cal. De esta manera, permanecen en la escoria, junto con otras partículas suspendidas (FeO, MgO, SiO₂, P₂O₅ y Al₂O₃), formando precipitados de segunda fase sólida que si bien es cierto permiten estabilizar la escoria espumosa, dado que separaran las burbujas de CO generadas; no obstante, un aumento en exceso de las partículas causará desequilibrio en el espumamiento.

Pues mientras mayor sea la fracción sólida la fluidez de la escoria disminuye y cambia de cremosa a espumosa, y eventualmente a costrosa o sólida. [8]

Por lo que la espumidad podría caer drásticamente, disminuyendo el volumen de escoria y dejando de esta manera descubierto el arco eléctrico. En donde las perturbaciones dentro del horno incrementarían notablemente y por ende aumentos en el ITHD.

En el caso del consumo de HRD, el cual también produce aumentos en los valores del indicador ITHD, el mismo es producto de dos condiciones. La primera condición, se debe a un exceso de toneladas de HRD en la colada, generaría una concentración significativa en el centro del horno, justamente en las paredes adyacentes de los electrodos, reduciendo el espumamiento debido a un fenómeno de superficie que rompe las burbujas de monóxido de carbono. Dejando así, descubierto el arco

eléctrico y en este sentido el incremento de los valores de ITHD.

La segunda condición, se debe a que un incremento del contenido de HRD en el horno, implica un aumento de energía para poder fundirla, lo cual generaría una disminución de la eficiencia energética con aumentos de la temperatura en el proceso. En este sentido al aumentar la temperatura, aumenta el oxígeno disuelto en el acero y simultáneamente aumenta el FeO de la escoria (ver Fig. 6); y más aún manteniendo el consumo de carbón bajo, donde la cinética de reducción del óxido de hierro es desfavorecida.

En donde se desfavorece el espumamiento de la escoria, ya que tiende a fluidizarla, originando que el volumen de la misma sea reducido y no se sea el adecuado, por lo que las perturbaciones dentro del horno serían presenciadas y más aun si se trabaja con arcos largos. En donde se tendría pocos beneficios metalúrgicos y un desgaste brusco del material refractario.

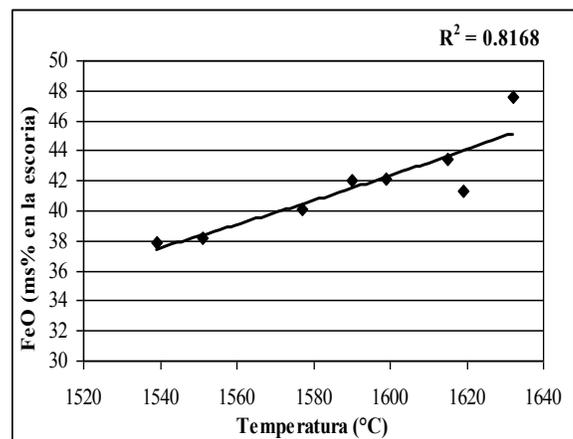


Figura 6: Efecto de la temperatura de colada sobre el grado de oxidación de la escoria.

3.3. Rango de control para el proceso de formación de escoria espumosa.

Para proponer un rango de control de los factores cal, coque, oxígeno y HRD, es necesario evaluar las posibles combinaciones de sus niveles, con el fin último de establecer cuál de ellos inducen a una eficiente formación de escoria espumosa, lo cual conviene destacar que se lograría con bajos niveles del indicador ITHD.

Para ello y para fines de este estudio se emplean superficies de respuestas para ambos patrones de carga metálicas debido a que el consumo de los factores es diferente, como se vio anteriormente.

En el mismo orden de ideas, importa indicar que para la construcción de los gráficos de superficies de respuestas dos factores (HRD y oxígeno) varían en aumento al mismo tiempo de forma continua, dado que así se adicionan en el horno durante el proceso de aceración. De modo, que el control de la escoria espumosa se logró controlando el consumo de cal y carbón en diferentes

niveles dentro del proceso de aceración, en la etapa de experimentación.

Obteniéndose como resultado para aquellos coladas de acero que se fabricaron utilizando una carga metálica constituida de 100% HRD, el control de la escoria espumosa en la etapa de experimentación se estableció manteniendo como primera condición un consumo de carbón en su alto nivel, en donde se aumentaría la velocidad de reducción del FeO disuelto en la escoria (producto de la reacción de oxidación del oxígeno con el hierro, ambos disueltos en el baño metálico), elemento que genera incrementos en la fluidez de la escoria causando disminución del espesor que permite captar las perturbaciones en el horno derivadas del arco eléctrico.

Así pues al reducir el FeO en la escoria, se generan grandes volúmenes de burbujas de monóxido de carbono y hierro libre. En donde el paso de CO a través de la escoria produce que la misma se espume, aumentando su espesor hasta cubrir los arcos eléctricos generados por los electrodos, disminuyendo los valores del indicador ITHD.

Por lo que, la segunda condición necesaria sería mantener la espumación de la escoria, mismo que se lograría con una adecuada viscosidad, que a su vez se garantiza con la suspensión de las partículas sólidas en la escoria.

Cabe destacar que las partículas sólidas a las cuales se hace referencia en el párrafo anterior, lo representa el contenido de CaO y MgO, que son adicionado al proceso con el consumo de cal; ya sea por un lado para neutralizar los óxidos de carácter ácidos, dotando a la escoria de basicidad y por el otro lado para proteger las paredes refractarias del horno. Estas partículas sólidas según [9] al disolverse en la escoria reaccionan con los elementos ácidos formando precipitados de segunda fase sólida, como los son Ca_2SiO_4 y magnesita-wustita respectivamente.

La estabilidad de la escoria espumosa lograda con los precipitados de segunda fase sólidas, se deben a que los mismos tienen una tensión superficial menor que la matriz de escoria insaturada, actuando como núcleos mejorando así la adsorción y retención de burbujas de CO generadas. [10]

No obstante en el momento en que la fracción de precipitados sea demasiado baja o demasiado alta, la escoria no espumará, ya que por un lado será demasiado líquida y por otro demasiado viscosa, tal como se ha venido observando y analizado desde el inicio.

Ante esto, el estudio se enfocó en encontrar un punto óptimo de partículas de segunda fase sólidas. Efecto que se logró operando con un consumo de cal en niveles medio, permitiendo de esta forma, cumplir con la segunda condición requerida para mantener la formación de escoria espumosa en la etapa de experimentación, cuando se emplea una patrón de carga metálica 100% HRD.

Esto, ya que con las dos condiciones establecidas se pudo visualizar una buena correlación tomando en cuenta los niveles del indicador ITHD, para los cuales se mantienen

estables (menores a 1%). La superficie de respuestas que explica este comportamiento, se observa en la Figura 7 y sin duda alguna representa la mejor opción a la hora de establecer condiciones ideales que permitan optimizar el proceso.

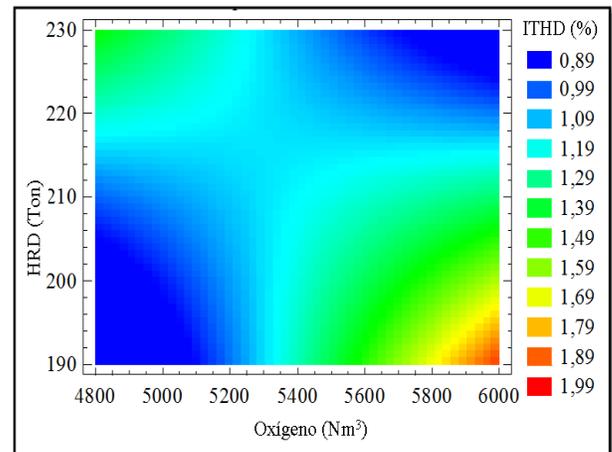


Figura 7. Contornos de la superficie de respuesta estimada para el ITHD en condiciones de alto nivel de consumo de carbón y medio nivel de consumo de cal, empelando un patrón de carga metálica 100 % HRD.

Por otra parte, en el caso de utilizar una carga metálica constituido de 80 % HRD y 20% Chatarra, se encontró que la estabilidad de la escoria espumosa que cumple con los mismo criterios establecidos en el caso anterior (en coladas con una carga metálica constituida de 100% HRD), se obtuvo teniendo como primera condición mantener un alto nivel de consumo de carbón y como segunda condición mantener un bajo nivel de consumo de cal.

Bajo este contexto, se noto un amplio rango de consumo de HRD y oxígeno para los cuales se tendrá valores significativamente bajos de ITHD (menores a 1%) y por ende una eficiente formación de escoria espumosa, tal y como se muestra en la Figura 8. Pero que en condiciones rutinarias de operación en el horno eléctrico es preciso que se siga manteniendo la condición de que el consumo de HRD y oxígeno aumente simultáneamente.

Las condiciones establecidas para este caso, se debe principalmente al consumo de HRD, que como se analizó anteriormente dicho consumo tiende a ser menor en comparación cuando en el proceso se utiliza una carga metálica constituida de 100% HRD. En este sentido la masa de los elementos químicos que aporta el HRD al proceso también es menor, tal es el caso del contenido de carbono.

De modo que al no considerar un consumo elevado de carbón las concentraciones de FeO en la escoria se incrementaría en un punto en que se desfavorecerá una óptima formación de escoria espumosa, por el incremento de la fluidez que causaría.

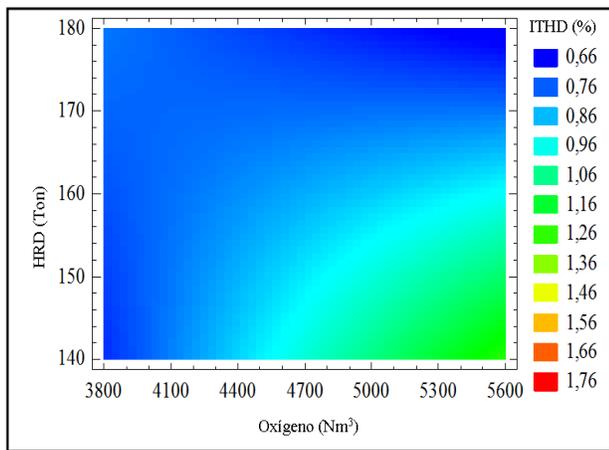


Figura 8. Contornos de la superficie de respuesta estimada para el ITHD en condiciones de alto nivel de consumo de carbón y bajo nivel de consumo de cal, empelando un patrón de carga metálica 80 % HRD y 20% chatarra.

Por su parte al utilizar chatarra, la cual proviene de recirculación interna (como despuntes, cortes, etc.) ó externa, la misma contiene un alto rendimiento metálico con bajos porcentajes de impurezas (como silicio y fósforo) y dado que el contenido de impurezas (como SiO₂) que aporta el HRD también es bajo, debido a su bajo consumo. Entonces de igual forma será la concentración de SiO₂ en la escoria. Por ello, el bajo consumo de cal estimado para este patrón de carga metálica, para compensar por un lado el efecto negativo de este compuesto, ya que tiende a dotar de acidez y por el otro lado y por el otro lado compensar la escoria con una adecuada precipitación de partículas sólidas.

IV. CONCLUSIONES

1. El consumo de coque y oxígeno tiende a disminuir los valores del indicador ITHD, favoreciendo el proceso de formación de escoria espumosa; cuyo efecto es contrario con respecto al consumo de HRD y cal, pues generan incrementos en los valores del indicador ITHD, desfavoreciendo la formación de escoria espumosa.
2. En el caso de utilizar un patrón constituido de 100% HRD en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, una disminución del índice ITHD (menores a 1%) que favorece la
3. estabilidad de la escoria espumosa en la etapa de experimentación, se logra manteniendo un consumo de coque alrededor de 300 ± 100 kilogramos y un consumo de cal aproximadamente entre 19 ± 1,5 toneladas.

4. En el caso de utilizar un patrón constituido de 80% HRD y 20% chatarra en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, una disminución del índice ITHD (menores a 1%) que favorece la estabilidad de la escoria espumosa en la etapa de experimentación, se logra manteniendo un consumo de coque entre 642 ± 128 kilogramos y un consumo de entre 17 ± 1,5 toneladas.

V. REFERENCIAS

1. Sitio Web Institucional. [página wb en línea], disponible: <http://www.alacero.org/acero/Paginas/ProcesoSiderurgico.aspx>.
2. Morales R. D., Conejo, A. N. y Rodriguez, H. H. Process dynamics of electric arc furnace Turing DRI meeting. Submitted to Metallurgical and Materials Transactions B, Mayo 2001.
3. Matsuura, H. y Fruehan, R. Slag Foaming in an electric arc furnace. ISIJ International, vol. 49, No. 10, Junio 2009, pp. 1530-1535.
4. Téllez, E. (Abril, 2011). Distorsión Armónica. Automatización, Productividad y Calidad, S.A. de C.V. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.watergymex.org/oloyemantenimiento.htm#Titulo5>.
6. Morales, R. et al. Concept of dynamic foaming index and its application to control of slag foaming in electric arc furnace steelmaking. IEEE, vol. 29, Enero 2002, pp. 445-453.
7. García, C. (2011). Optimización del proceso de formación de escoria espumosa en los hornos eléctricos de acerías de planchones de Sidor. Tesis de grado no publicado, Depto. Ing. Química, UNE "Francisco de Miranda", Punto Fijo.
8. Conejo, A. N., Torres, R. y Cuellar, E. Análisis industrial de la reducción del óxido de hierro mediante la inyección de finos de carbón al horno eléctrico de arco. IEEE. Vol. 35, No. 2, Enero 1999, pp. 111-125.
9. Pretorius, E. y Calister, R. Foamy slag fundamental and their practical application to electric furnace steelmaking. Presentado en la 56th conferencia de hornos eléctricos, 1998.
10. Mateos, J. (2010). Análisis y optimización de costos en una planta de procesado y producción de acero. Tesis de grado no publicado, Dept. Ing. Mecánica, Univ. Carlos III, Madrid.
11. Alameddine, S. et al. Innovation in EAF and in steelmaking processes. Presentado en la conferencia AIM, Milano, Italia, Mayo 27-28, 2009.