

INFLUENCIA DE LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA BÁSICA (CaO-MgO) EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EAF)

INFLUENCE OF BASIC SLAG (CaO - MgO) DECREASE IN POWER ON AN ELECTRIC ARC FURNACE (EAF)

Caterine Isabel Donoso Quimbita¹

¹ Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
e-mail: ¹cidonoso@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 10 (15)

RESUMEN

Para el proceso productivo de una acería resulta de suma importancia la formación de escoria espumosa básica para disminuir el tiempo de operación (POT) de un horno de arco eléctrico (EAF). El presente estudio considera que el proceso de fusión del acero se realiza en un EAF trifásico con electrodos de grafito de 18" de diámetro, además la chatarra metálica ferrosa reciclada se alimenta al EAF a través del sistema Consteel.

La calidad de la escoria se determina a partir del índice de basicidad binario (CaO/SiO₂) y de la cantidad de oxígeno gaseoso (O₂) disuelto en la misma. La inyección de oxígeno en la escoria se realiza a través de lanzas supersónicas ubicadas al interior del horno. La basicidad binaria con la que se trabajó se encuentra en el rango de 2,2 a 2,4 y el flujo de oxígeno suministrado a través de la lanza supersónica, evaluado por colada es de 1600 Nm³/h. La altura de la escoria espumosa generada bajo estas características corresponde a 50 cm, con lo cual se consigue cubrir el arco eléctrico generado por los tres electrodos durante el proceso de fusión.

El control operativo de la basicidad binaria en el rango mencionado ha permitido una disminución del tiempo de conexión

del horno de 4 min y 22 segundos, lo que representa una disminución promedio del consumo de energía eléctrica por colada de 0,5 MWh.

Palabras Clave:

Basicidad Binaria, Consteel, Electrodo, Escoria espumosa, Horno de arco eléctrico.

Abstract

For the production process of a steelworks it is extremely important to identify the degree of influence of the basic formation of foamy slag in reducing operating time (POT) of an electric arc furnace (EAF). This study considers the process of melting steel in a EAF from recycled ferrous scrap metal. This is Feeding through a system known as continuous feed Consteel. The EAF in which the present study is three phase three graphite electrodes of 18 inch of diameter, the electrodes are assembled in columns on the jaws consumables arm oven develops.

The foamy slag is a critical variable operation that is controlled from binary index slag basicity (CaO / SiO₂) and the supply of gaseous oxygen (O₂) through supersonic lances into the furnace. The binary basicity with which we worked is in the range of 2.2 to 2.4 and oxygen flow supplied through the supersonic lance, it is evaluated by casting

1600 Nm³ / h. The height of the foamed slag generated under these features corresponds to 50 cm, which is possible to cover the electric arc generated by the three electrodes during the melting process.

The operational control of these parameters has allowed a decrease oven connection time (POT) 4 min and 22 seconds, which represents an average decrease of energy consumption by pouring 0.5 MWh.

Keywords:

Binary basicity, Consteel, Electrodes, Foamy Slag, Electric Arc Furnace.

1. INTRODUCCIÓN

Diagramas ternarios y de saturación isotérmica

La metalurgia del acero considera no sólo la fabricación del acero propiamente dicho, sino también el equilibrio químico con el refractario que está en contacto directo con el acero. Este equilibrio se evalúa a través de diagramas isotérmicos para el sistema CaO-MgO vs FeO, a través del cual se puede determinar las características necesarias que debe poseer la escoria empleada en el proceso de fusión del acero.

En la Figura 1, se observa la distribución de la saturación de los óxidos básicos CaO y MgO en función del porcentaje de FeO presente en la escoria y las fases que corresponden a cada concentración. La fase líquida de la escoria (L) se forma mientras mayor es la concentración de óxido de hierro, hacia la derecha de la línea de equilibrio en color rojo se observa la coexistencia de la fase líquida y sólida, hacia la izquierda de la línea roja se observa la sobresaturación de los óxidos básicos CaO y MgO. La zona limitada entre la línea punteada y la línea roja corresponde a la zona de equilibrio para la formación de escoria espumosa. [1]

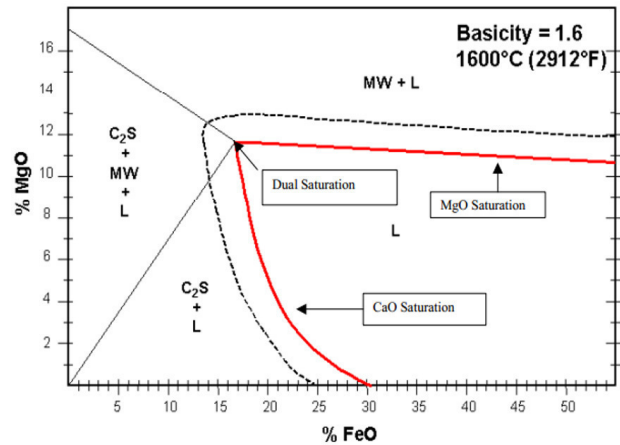


Figura 1. Diagrama de Saturación Isotérmico (ISD) para una basicidad constante de 1,6 y una temperatura de 1600°C

Figura 1. Diagrama de Saturación Isotérmico (ISD) para una basicidad constante de 1,6 y una temperatura de 1600°C

En la Figura 2, se muestra el diagrama ternario para el sistema CaO-SiO₂-MgO en el que se muestra las concentraciones de los tres óxidos y la fase en la que se encuentran.

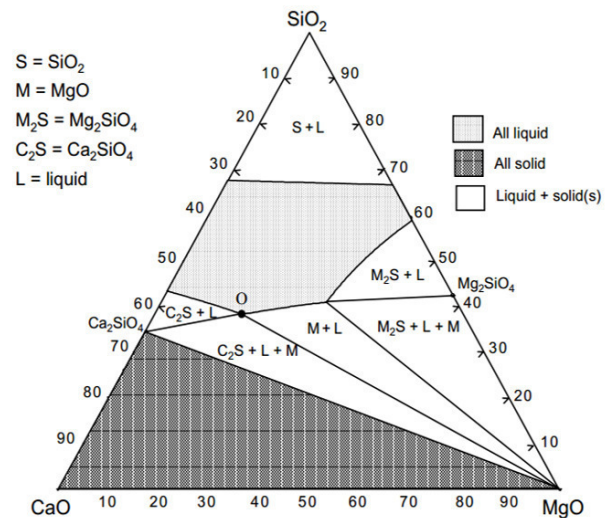


Figura 2. Diagrama ternario para el sistema CaO-MgO-SiO₂ a 1600°C

El punto “O” identificado en el diagrama ternario corresponde a una muestra de escoria cuya composición química es 17% de MgO, 43% de CaO y 40% de SiO₂, respecto a las fases este punto se encuentra en una zona de coexistencia líquido-sólido con saturación de MgO y Ca₂SiO₄.

Este diagrama es útil para identificar la composición química que debería tener una escoria espumosa óptima para la particularidad de cada proceso. [2]

$$B_2 = \frac{CaO}{SiO_2} \quad (Ec. 2)$$

Basicidad óptica de la escoria

Para el cálculo de la basicidad óptica de la escoria sin importar cuál sea su composición, se la puede realizar a través de la siguiente expresión:

$$\Lambda = X_{AO_x} \Lambda_{AO_x} + X_{BO_y} \Lambda_{BO_y} \dots \quad (Ec. 1)$$

Donde X es la relación entre la fracción molar del componente multiplicado por el número de átomos de oxígeno en la molécula del óxido respecto al sumatorio de la fracción molar del componente multiplicado por el número de átomos de oxígeno en la molécula del óxido de todos los componentes.

En la Tabla 1 se muestra los valores de basicidad óptica de los componentes más comunes de la escoria.

Tabla 1. Valores de basicidad óptica de algunos componentes de la escoria

| ÓXIDO | BASICIDAD ÓPTICA (Λ) |
|-------|--------------------------------|
| Na2O | 1.15 |
| CaO | 1.0 |
| MgO | 0.78 |
| CaF2 | 0.67 |
| TiO2 | 0.61 |
| Al2O3 | 0.61 |
| MnO | 0.59 |
| Cr2O3 | 0.55 |
| FeO | 0.51 |
| Fe2O3 | 0.48 |
| SiO2 | 0.48 |

Con base en las basicidades ópticas de cada componente se puede expresar para una escoria determinada la basicidad binaria (B2), que está dada por la siguiente expresión:

Mediante esta expresión se puede conocer la concentración de MgO que requiere la escoria para alcanzar el equilibrio o saturación en función de la basicidad binaria y una variación de temperatura, como se muestra en la Figura 3. [2]

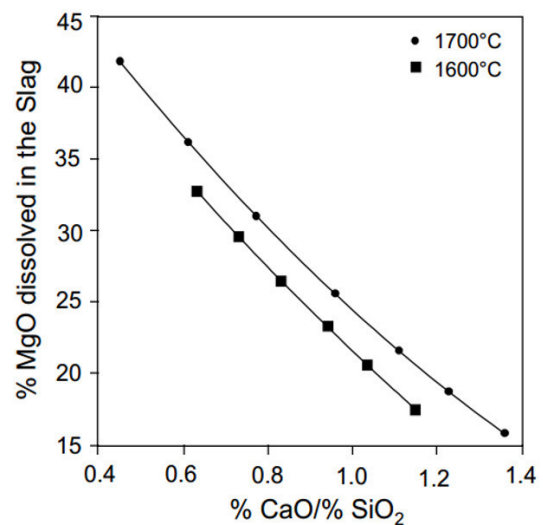


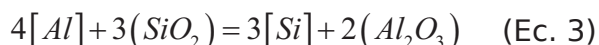
Figura 3. Requerimiento de MgO para la saturación de la escoria a 1600°C

Consideraciones Cinéticas

Muchos de los cálculos termodinámicos acerca de cómo determinar el equilibrio químico de los óxidos en la escoria ha sido un tema de mucha discusión, sin embargo en la práctica durante la fabricación del acero, no siempre se alcanza este equilibrio teórico. Por ello se trata de interpretar estas interacciones cinéticas bajo dos principios, el primero considera la escoria como un líquido y el segundo considera altas velocidades de agitación de tal manera que exista una interacción entre la escoria y el metal. La última consideración es la más utilizada sobre todo para el análisis de la capacidad de desulfuración de la escoria.

A través de las siguientes expresiones se muestra las consideraciones cinéticas para determinar las concentraciones de

equilibrio de cada componente en la escoria, la ecuación (3) muestra el equilibrio entre las moles de Al en la fase metálica [Al] y el óxido de aluminio en la fase escoria (Al_2O_3), de manera similar sucede con el equilibrio entre el óxido de silicio en la fase de escoria (SiO_2) y el silicio en la fase metálica [Si].



La ecuación 4 permite expresar la constante de equilibrio para la reacción de oxidación tanto del silicio así como del aluminio en función de las actividades. [2]-[4].

$$K = \frac{a_{Al_2O_3}^2 * a_{[Si]}^2}{a_{[Al]}^4 * a_{SiO_2}^3} \quad (\text{Ec. 4})$$

Mientras el contenido de oxígeno disuelto en el acero sea controlado por la relación de equilibrio en el contenido de silicio o aluminio en la fase de escoria y la fase metálica, el contenido de silicio [%Si] y aluminio [%Al] pueden ser calculados mediante las siguientes expresiones respectivamente. [3].

$$[\%Si] = \sqrt[3]{\frac{f_{Al}^4 * [\%Al]^4 * K * a_{SiO_2}^3}{a_{Al_2O_3}^2 * f_{Si}^3}} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$[\%Al] = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}^2 * f_{Si}^3 * [\%Si]^3}{f_{Al}^4 * K * a_{SiO_2}^3}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Estas expresiones se corresponden con las mediciones realizadas en espectrómetros de emisión óptica, empleados para determinar la composición química del acero que se está produciendo.

La acería de Pacific Steel incrementó el tiempo de campaña del refractario del EAF de 800 a 2614 coladas producidas, como resultado directo de la aplicación de la nueva práctica de escoria espumosa. La optimización de esta práctica tuvo influencia directa sobre la disminución del costo de producción, disminución del

consumo de energía, disminución del tap to tap e incremento de la productividad. [4]

La planta de acería se encuentra equipada con un transformador de 35 MVA, un EAF marca Krupp de 50 toneladas de capacidad, una lanza de inyección de oxígeno y carbono marca Moore. El consumo promedio de oxígeno es de 23 Nm³ por tonelada de acero líquido. El tiempo promedio de tap to tap es de 74 minutos. [5]

La metalurgia secundaria se realiza en un Horno Cuchara marca Krupp, en el cual se realiza el proceso de desulfuración, afinado químico y de temperatura del acero antes de enviar la colada a la Máquina de Colada Continua. El horno cuchara posee un sistema de agitación con argón mediante un tapón poroso ubicado en el piso de la cuchara, también posee un sistema para inyección de calcio envainado en alambre. [5]

Luego de realizar una evaluación de la escoria mediante un programa de simulación de escoria espumosa, se evidenció que existía una deficiencia de MgO, por lo que se decidió ser más conservadores y cambiar la práctica de fundentes agregando 1400 kg de cal siderúrgica y 400 kg de MgO por colada. Sin embargo esta práctica continuó mejorando hasta disminuir la adición de cal siderúrgica 800 Kg por colada, la adición de briquetas disminuyó a 300 kg por colada, con lo cual se obtuvo excelentes resultados de espumación de la escoria desde el inicio hasta el final de la colada. [6], [7]

Los resultados químicos de los análisis de escoria generados de la nueva práctica operativa muestran que el componente que mayor dispersión presenta es el FeO, debido a que una de las variables experimentales para la fabricación de escoria espumosa es el FeO formado por la inyección de oxígeno al baño metálico. Se observa también una dispersión considerable en el contenido de CaO lo cual se atribuye a la calidad de materia prima o al funcionamiento del sistema de dosificación de los fundentes, sin embargo

se observa que la basicidad ternaria busca estabilizarse en base a un promedio de SiO₂ procedente de la chatarra, esta corrección se logra gracias al dominio del proceso por parte del personal operativo.

El rendimiento del refractario mejora una vez que se optimiza la práctica de formación de escoria espumosa. A mediados del año 2000 inicia la práctica operativa con un histórico de 1046 coladas producidas por cada campaña de duración del refractario del EAF, sin embargo esta cifra cambia dramáticamente una vez implementadas las mejoras, la campaña de duración del refractario del EAF sube a 2614 coladas, lo que representa una disminución de la tasa de consumo de material monolítico y de masas de proyección de 3,59 kg/t que se tenía hasta el año 1999 a un nuevo estándar de consumo de 2,25 kg/t para el año 2001. La disminución notable del consumo de refractario puede ser expresada económicamente como un ahorro de 0,50 USD/t. [6], [7]

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en la presente investigación se describe a continuación:

Definición de la línea base en el proceso de fusión del EAF

Se realizó in situ una auditoría inicial, el primer paso durante la auditoría fue hacer un levantamiento de la información correspondiente a la caracterización química de la escoria y de las condiciones de operación de cada colada con la finalidad de encontrar una relación directa entre la formación de escoria espumosa y el tiempo de conexión del EAF, de tal manera que se pueda identificar potenciales opciones de mejora que optimicen el proceso.

Con la información obtenida a partir de la caracterización química de la escoria se elaboró los diagramas de saturación

binaria para identificar si la escoria formada en el baño líquido se encontraba en fase líquida por exceso de óxido de hierro, o sobresaturada por una dosificación excesiva de óxidos de calcio y magnesio durante la alimentación de la chatarra o en la zona de equilibrio para la formación de escoria espumosa.

Otros parámetros como el power on, power off, tap to tap y consumo de energía por colada se obtienen de mediciones en línea realizadas por un regulador ubicado a la entrada del transformador del EAF.

Análisis de las etapas del proceso y determinación de las variables críticas

Una vez definida la línea base, se analizó las etapas del proceso de producción de fusión y afino del acero que presentaban problemas, se estudió los motivos que generaban limitaciones en la optimización del proceso productivo

Definición de las opciones de mejora y selección de las opciones de mejora más viables

Como resultado del análisis de las causas de los problemas identificados en el levantamiento de la línea base del proceso productivo. Al unificar criterios, experiencias, necesidades y facilidades se enlistó una serie de opciones de mejora que eliminen o minimicen los problemas identificados en el proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros eléctricos de operación del EAF que se tomaron como referencia para la elaboración de los filtros en las figuras que se muestran a continuación son: Tiempo de conexión del EAF mínimo 50 min y tiempo de conexión máximo 70 min.

En la Figura 4 se muestra la evolución del

tiempo de conexión del EAF en un periodo de tres meses desde febrero hasta abril del 2015 en donde se observa en el mes de abril un incremento del 1,44% en el tiempo de conexión del EAF respecto al mes de marzo.

| Período Evaluado: 04/01/2015 al 30/04/2015 | | | | |
|--|-------|--------|--------|----------|
| Power on time (minutos) | | | | |
| | YTD | Feb-15 | Mar-15 | Abril-15 |
| Power On | 57.47 | 56.88 | 56.65 | 57.47 |

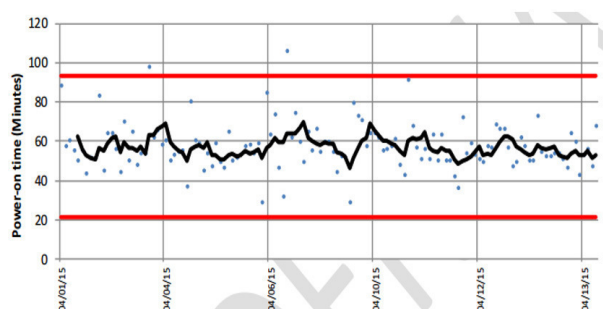


Figura 4. Tiempo promedio de conexión por colada evaluado mensualmente (min)

En la Figura 5 se observa el consumo de energía eléctrica promedio mensual (MWh) correspondiente a los meses de febrero a abril de 2015 en los que se evaluó la influencia de la escoria espumosa en la eficiencia del arco eléctrico. En el mismo sentido el consumo de energía eléctrica presenta un incremento de 1,7% en el mes de abril, respecto al mes de marzo.

| Período Evaluado: 04/01/2015 al 30/04/2015 | | | | |
|--|------|--------|--------|----------|
| Consumo de Energía Eléctrica | | | | |
| | YTD | Feb-15 | Mar-15 | Abril-15 |
| MWH | 17.7 | 17.7 | 17.5 | 17.8 |
| kWh/ton | 525 | 526 | 519 | 528 |
| Oxygen/ton | 47 | 55 | 57 | 56 |

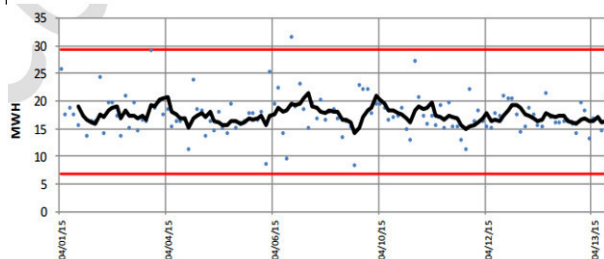


Figura 5. Consumo promedio por colada de energía eléctrica evaluado mensualmente (MWh)

Durante el análisis de las corrientes y balance de fases se observa un ligero cambio en el comportamiento de las corrientes que podría estar relacionado con los incrementos en el POT y MWh.

Adicionalmente se hizo una evaluación respecto a un parámetro de operación, que corresponde a la temperatura de vaciado o sangrado del EAF, el comportamiento de este parámetro es muy consistente, permitiendo determinar un valor promedio de 1619°C.

4. CONCLUSIONES

- Se observa que el tiempo conectado (POT) y los MWh presentan una tendencia a la alza cuando la formación de escoria no es del tipo espumosa, rica en CO y CO₂.
- La estabilidad de las tres fases también se ve afectada en ausencia de escoria espumosa, lo que repercute en la disminución de corriente destinada a la fundición de la chatarra, por tanto el consumo de energía eléctrica incrementa.
- Este estudio demuestra que la generación de escoria espumosa en un EAF demanda mayor oxidación de hierro mientras mayor es la concentración de CaO y MgO de acuerdo a los principios termodinámicos mencionados.
- Un incremento de 800 Nm³/h de oxígeno en el baño metálico permite una disminución de 5 min en el tiempo de conexión del EAF, lo que representa el incremento de la producción en una colada a diario.
- En la práctica resulta de gran utilidad la disponibilidad de espectrómetro de emisión óptica para la evaluación de las concentraciones de equilibrio de los diferentes metales y óxidos tanto en

la fase de escoria, así como en la fase metálica.

5. REFERENCIAS

- [1]. P.V. Riboud and H. Gaye, "Molten Slag Properties and their use in Steelmaking Process Control", 4 th International Conference on Molten Slags and Fluxes, ISIJ, Sendia, 1992.
- [2]. M. Faral and H. Gaye, "Metal Slag Equilibria", Second International Symposium on Metallurgical Slags and Fluxes, AIME, 1984
- [3]. A.A. Akberdin, "Calculation of the Equilibrium Phase Composition of Oxide Systems", Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Metally, N° 2, pp 20-28, 1989
- [4]. J. Björkvall, "Thermodynamic study of multicomponent slags-a model approach", Doctoral The Department of Materials Science and Engineering, Division of Metallurgy, Royal Institute Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [5]. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, "Slag Atlas", 2° edition Verlag Stahleisen GmbH, Germ 1995.
- [6]. E.T. Turkdogan, "Fundamentals of Steelmaking", The Institute of materials, The University Press, Cambridge, 1996, p.241.
- [7]. H.H. Rodriguez, A.N. Coneljo and R.D. Morales, "Theoretical analysis of the interfacial phenomena during the injection of carbón particles into EAF slags", Steel Research, 2001, pp.298-303.

6. BIOGRAFÍA



¹Caterine Donoso, Magister en Calidad Seguridad y Ambiente de la Facultad en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, UCE. Especialista en Metalurgia Extractiva. Ingeniera Química de la Escuela Politécnica Nacional. Especialista en Gestión de la Calidad INEN. Docente tiempo completo Ocasional, del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

| | |
|------------------|-----------------|
| Fecha recepción | 16 junio 2016 |
| Fecha aceptación | 15 octubre 2016 |