

Viscosidad y conductividad de escorias típicas en la producción de ferroníquel

Typical Slag Viscosity and Conductivity in the Ferronickel's Production

Fabio Raúl Pérez Villamil*

Resumen

Cerro Matoso S.A. procesa mineral laterítico de níquel. Sus actividades involucran: explotación minera, reducción, fusión vía Arco Eléctrico y refinación en hornos tipo cuchara. El producto ferroníquel es exportado en su totalidad. La operación de fusión se realiza en un horno eléctrico, y una de las variables de control de proceso más importante es la temperatura de la escoria, que depende de las relaciones de SiO_2 y magnesia (MgO), S/M, y de los porcentajes de alúmina (Al_2O_3). Cuando la relación S/M es baja, o en los casos de alúminas muy altas, las propiedades de la escoria, como viscosidad y resistividad, cambian ostensiblemente y resulta muy complicado drenarla del horno. Con valores calculados de viscosidad y conductividad eléctrica, a partir de una herramienta diseñada por la empresa, se procede a ubicar composiciones de escoria típicas en un diagrama modelo resultante de la operación en el año 2006.

Palabras clave: Conductividad Eléctrica, Escoria, Ferroníquel, Viscosidad.

Abstract

The company CerroMatoso processes lateritic nickel mineral. Its activities involve: mining operation, reduction, fusion via Electrical Arc and refinement in furnaces type spoon. The ferronickel product is completely exported. The fusion operation is made in an Electrical Oven. One of the most important variable to control de process, is the slag temperature, that depends on the relations of SiO_2 /Magnesia (MgO), (S/M), and from the percentage of aluminates (Al_2O_3). When the relation S/M is low, or in the cases of very high aluminates, the slag's viscosity and resistivity properties, change substantially and makes it very complicated to drain it off the furnace. A technique designed by the company in 2006, functions with some calculated viscosity and electrical conductivity' values, that allows locating the typical slag compositions in a diagram resulting model of the operation.

Key words: Electrical Conductivity, Ferronickel, Slag, Viscosity.

Ingeniero metalúrgico, magíster en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, docente catedrático Uptc, investigador Grupo de Materiales Siderúrgicos Uptc. fvillamil2001@hotmail.com

I. Introducción

La producción de ferroníquel en Cerro Matoso S.A. (CMSA) se realiza mediante el proceso RKEF (Rotary Klin Electric Furnace - Horno Rotatorio Horno Eléctrico), en el cual, por fusión de un material calcinado producido por reducción de mineral laterítico de níquel, se obtienen ferroníquel y material estéril. El material estéril, o escoria, presenta fenómenos físicos y químicos que es necesario estudiar en profundidad. La formación de esta escoria es del orden de 16 veces la cantidad de ferroníquel producido, entonces, con la operación actual tendríamos alrededor de 3800 toneladas/día de escoria por cada línea de producción por 320 toneladas de ferroníquel; los estériles, por su naturaleza ácida, requieren de controles muy precisos para garantizar la eficiencia del reactor involucrado, en este caso el Horno Eléctrico.

La investigación buscó, con la ayuda de una herramienta computacional, obtener los valores de viscosidad y conductividad eléctrica para escorias tratadas durante el año 2006, y ubicarlos en un plano, resultante de un pseudoternario obtenido de la manipulación de diagramas cuaternarios de las especies SiO₂, FeO, Al₂O₃, MgO (compuestos de la escoria).

La herramienta computacional usada es un desarrollo de la empresa Cerromatoso S.A., lograda después de estudios efectuados por Egil J. M. Jahsen, consultor noruego, quien creó el software SLAGAN con datos operacionales y ajustados a los principios fisicoquímicos y metalúrgicos que orientan el proceso.

II. Marco teórico

A. Características del yacimiento de mineral laterítico de Cerro Matoso S.A.

Geología de Depósito de Cerro Matoso S.A. La mina está localizada a 22 km al suroeste de la población de Montelíbano y a 28 km al sureste del municipio de Planeta Rica, en el departamento de Córdoba. Se conoce desde 1940, cuando fue

considerada un depósito de hierro. En 1958 la Hanna Mining Co. reconoció su importancia como fuente de níquel. La mena es una típica laterita, con una zona de meteorización estratificada, que conforma un cerro aislado de 2 x 1,7 km y 300 m de altura. El espesor de la zona meteorizada que constituye el depósito varía desde unos pocos metros hasta 100 m. La roca original es una harzburgita compuesta por olivino y enstatita, con leve serpentización o sin ella; aflora localmente en la parte oeste del depósito, en donde está separada por fallas de sedimentitas terciarias. Aunque otras rocas básicas no afloran, se presume su existencia.

Durante el proceso de meteorización, la sílice y el magnesio de la peridotita, junto con el níquel (0,2 - 0,3%), se precipitaron en la parte inferior de la zona de meteorización; en cambio, el hierro y la alúmina permanecieron cerca de la superficie como óxidos hidratados insolubles. El producto de este proceso es una masa cuyo perfil de meteorización está constituido por: canga, laterita, saprolito y peridotita saprolitizada. El níquel se encuentra en la saprolita en forma de garnierita, la cual rellena fracturas cuando su concentración es alta. Además, existe un "boxwork" silíceo, con venas de calcedonia y cuarzo en las zonas fracturadas, que es estéril cerca de la superficie y mena en las partes inferiores del depósito.

El níquel en estos minerales está asociado, por lo general, a óxidos y silicatos de hierro, magnesio y aluminio, principalmente, encontrándose compuestos como: NiO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, MgO, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂SiO₄, Ni₂SiO₄, (Ni,Fe)₂SiO₄ y (Ni,Mg)₂SiO₄. Los depósitos de lateritas niquelíferas son conocidos por presentar grandes diferencias en sus características químicas y físicas (ley de mineral, composición química, mineralógica, densidad, color, dureza, etc.) en distancias relativamente pequeñas, tanto a lo largo como a lo ancho y a profundidad. Debido a esa alta variabilidad resultan muy importantes las operaciones de homogeneización.

El depósito de Cerro Matoso tiene los siguientes tipos de roca: Peridotita saprolitizada, Saprolito verde alto en MgO, Saprolito verde bajo en MgO, Saprolito negro, Saprolito café, Canga negra y Taquilita.

Tabla 1. Composición química promedio de las rocas del depósito Cerro Matoso

Mineral	Peridotita Sapolizada	Sapolito Verde Alto MgO	Canga Negra	Sapolito Café Pit 1	Sapolito Café Pit 2	Taquilita	Sapolito Verde Bajo MgO
Ni	1.70 - 2.38	1.74 - 4.39	1.16 - 1.58	3.1 - 3.2	2.71 - 2.90	1.19 - 2.59	1.53 - 6.44
Fe	6.7 - 8.8	7.8 - 8.9	39.3 - 35.9	23.0 - 23.6	36.0 - 37.3	26.0 - 29.6	11.1 - 16.2
MgO	25.2 - 31.8	19.9 - 23.7	0.9 - 2.4	7.3 - 7.4	2.6 - 3.2	1.9 - 6.1	10.1 - 24.6
SiO ₂	44.0 - 50.6	49.5 - 57.1	5.0 - 14.8	34.1 - 38.9	15.4 - 16.1	30.8 - 40.2	40.8 - 50.4

Fuente: Cerro Matoso S.A. Documento entrenamiento operadores. 2006.

B. Proceso de reducción y fusión de mineral laterítico

El mineral es preparado mecánicamente por doble proceso de trituración y llevado a un secador rotatorio; luego se introduce en otro horno, también rotatorio, con una adición previa de agente reductor, en este caso carbón, y el producto de este reactor es un material reducido llamado calcina, que viene acompañado de impurezas como azufre y carbono. La calcina obtenida en el horno rotatorio es depositada en un carro de transferencia y llevada a la parte superior de un Horno Eléctrico, donde cae por gravedad. El sector de entrada en el horno de este material se decide por criterios de altura en los bancos de calcina que están en ese momento dentro de él y en función de las temperaturas del techo.

1) Reducibilidad

La reducibilidad o metalización es la facilidad con la cual puede removerse el oxígeno combinado con un metal (óxido). La velocidad de reducción depende muchísimo del tamaño de la partícula. El porcentaje de reducción o remoción de oxígeno en atmósfera reductora es obtenido por:

$$\% \text{ Reducción: } ((N_o - N) / N_o) * 100 \quad (1)$$

Donde:

N_o : Número de moles de oxígeno combinados originalmente con el metal.

N : Número de moles de oxígeno que quedan con el metal después de un tiempo de reducción t .

2) Mecanismo de reducción en el Horno Rotatorio

El Horno Rotatorio es un reactor gas-sólido, donde los gases de combustión fluyen en contracorriente con respecto al lecho de mineral que se desplaza por el movimiento de rotación y la inclinación del horno. En el calcinador se emplea el calor producido al quemar controladamente gas natural; este combustible facilita el intercambio de calor por contacto directo y permite evaporar la humedad libre, remover agua ligada a la estructura de los sólidos, reducir parcialmente el mineral y agregar una cantidad de calor apreciable a la carga del Horno Eléctrico.

De acuerdo con las temperaturas alcanzadas en el calcinador, este puede dividirse en tres zonas: Secado, Prerreducción y Reducción. En la zona de secado, con temperatura entre 30° y 100 °C, se elimina la humedad libre; en la zona de prerreducción ocurre la eliminación de humedad ligada y pérdida de volátiles entre los 100 y 600 °C, y en la tercera zona, donde la temperatura supera los 600 °C, se completa la pérdida de humedad ligada y se da la reducción de los óxidos de hierro y níquel por la acción de los agentes reductores: carbón, monóxido de carbono e hidrógeno gaseoso.

Reacciones de reducción. En el proceso de reducción se presentan, entre otras, las siguientes reacciones:

- Descomposición de la garnierita en olivino a temperaturas mayores a 800 °C,

$$2(\text{NiO},\text{MgO})_3 \cdot (\text{SiO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ ---- } 3(\text{NiO},\text{MgO})_2 \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \quad (2)$$
- Descomposición de la garnierita en piroxeno a temperaturas mayores a 600 °C,

$$2(\text{NiO},\text{MgO})_3 \cdot (\text{SiO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ ---- } (\text{NiO},\text{MgO}) + 2(\text{NiO},\text{MgO})\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \quad (3)$$
- Combustión del gas natural, que está constituido básicamente por metano,

$$\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \text{ ----- } 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} (\text{v}) \quad (4)$$
- Con temperatura adecuada y la presencia de carbón se presenta la reacción de Boudouard,

$$\text{CO}_2(\text{g}) + \text{C}(\text{s}) \text{ ----- } 2\text{CO} (\text{g}) \quad (5)$$
- Reacción del carbono con el vapor de agua desprendido,

$$\text{H}_2\text{O}(\text{v}) + \text{C}(\text{s}) \text{ ----- } \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2 (\text{g}) \quad (6)$$
- Descomposición de parte del metano (sólo en condiciones reductoras) que no reacciona con el oxígeno a temperaturas mayores a 500 °C,

$$\text{CH}_4 (\text{g}) \text{ ----- } \text{C}(\text{s}) + 2\text{H}_2 (\text{g}) \quad (7)$$
- Reducción de la hematita a magnetita a temperaturas mayores a 400 °C,

$$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \text{ ----- } 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2 \quad (8)$$
- Reducción de la magnetita a wustita entre 500 y 800 °C,

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \text{ ----- } 3\text{FeO} + \text{CO}_2 \quad (9)$$
- Reducción de los óxidos de hierro por otros agentes reductores,

$$\text{Fe}_2\text{O} + 3\text{H}_2 \text{ ----- } 2\text{FeO} + 3\text{H}_2\text{O} \quad (10)$$

$$\text{FeO} + \text{H}_2 \text{ ----- } \text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \quad (11)$$
- Reducción de los óxidos de níquel,

$$\text{NiO} + \text{CO} \text{ ----- } \text{Ni} + \text{CO}_2 \text{ a } 800 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$\text{NiO} + \text{H}_2 \text{ ----- } \text{Ni} + \text{H}_2\text{O} \quad (13)$$

$$\text{NiO} + \text{C} \text{ ----- } \text{Ni} + \text{CO} \quad (14)$$

3) Horno Eléctrico

El Horno Eléctrico es un reactor de 21 metros de diámetro, con electrodos tipo Söderberg dispuestos en forma triangular; alrededor de estos y en el centro se aplica un 55 a 65% de la carga; allí también se encuentra la zona de máxima temperatura; el 35-38% se dispone en una zona intermedia, y la carga restante sobre las paredes del horno. El material de las paredes ayuda en la generación de una costra "congelada" de protección contra el ataque de la escoria ácida (58% de sílice) al refractario magnésítico. La producción de escoria corresponde a 20 de las 24 horas de

operación, lo anterior en razón a que se debe fundir una gran cantidad de mineral para obtener el ferroníquel de 36% a partir de tenores de Ni, que son del orden del 2,0 %. La salida de escoria del horno se hace continuamente por dos piqueras, trabajando con cada una de ellas alternativamente. El metal también se evacúa por dos piqueras opuestas a la posición de las de escoria y por estas se está colando 42 a 50 toneladas de ferroníquel cada 3-4 horas.

Mecanismo de reducción en el Horno Eléctrico. El análisis de calcina que ingresa a este importante

reactor es el siguiente:

Fe total: 17,28% (Fe como Fe⁺²: 93,85%)

Ni total: 2,95% (Ni como Ni⁰: 29,05%)

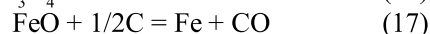
SiO₂: 52,00% MgO: 18,00% Al₂O₃: 2,10%

Carbono: 0,85%

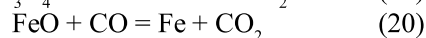
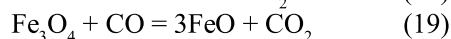
FeO: 20,92% Fe₂O₃: 1,52% NiO: 2,66%

Reacciones de reducción

Caso I: Reducción directa con carbono



Caso II: Reducción indirecta con CO



La reducción directa con carbono, definitivamente, tiene el mayor potencial de reducción a temperaturas superiores a los 700 °C. Su potencial de reducción también se incrementa con el incremento de la temperatura, y es la única alternativa para producir muchas ferroaleaciones como FeMn, FeCr y FeSi.

C. Escorias

Las escorias son mezclas fundidas formadas por óxidos y silicatos metálicos; pueden contener, entre otros, fosfatos y boratos. Las escorias se forman durante la fusión de menas o durante la refinación de metales brutos, y, generalmente, contienen elementos que no se reducen durante el proceso de reducción o elementos que se oxidan durante el proceso de refinación. El papel de la escoria es de extrema importancia, ya que:

- Recolecta impurezas no metálicas (ganga) del mineral y forma una fase separada del metal.
- Protege el baño fundido de la atmósfera y evita pérdidas excesivas de su calor.
- Puede eliminar de la fase metálica o aportar a ella un determinado elemento, como el azufre, el fósforo o el oxígeno.

Propiedades de las escorias

Propiedades físicas: Punto de fusión, densidad, tensión superficial y viscosidad.

Tensión superficial [1]. Es una propiedad bastante importante, ya que influye sobre la penetración de escoria en el refractario y en las *emulsiones* escoria-metal-gas. La tensión superficial de un líquido está influenciada por el carácter de los iones superficiales. La tensión superficial de las escorias líquidas es del orden de 0,3 a 0,5 J/m² y, en general, disminuye al aumentar el contenido de sílice [2].

Viscosidad. Se define como la relación del cizallamiento requerido para inducir una unidad de gradiente de velocidad. La viscosidad de las escorias de silicato usualmente disminuye con el incremento del contenido del óxido básico.

Factores que afectan la viscosidad. La viscosidad de los fluidos es afectada por la temperatura, la presión y, en el caso de mezclas, por la composición. En muchos sistemas metalúrgicos es de considerable importancia mantener las viscosidades de la escoria y el metal en un nivel suficientemente bajo, para asegurar un contacto satisfactorio en las operaciones de transferencia de masa y en las de fácil descarga del material. En el caso de las escorias, esta mínima viscosidad solo puede existir sobre un muy estrecho rango de composición, de manera que se requiere de un control muy cuidadoso.

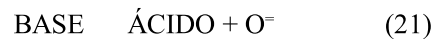
Temperatura de viscosidad crítica. La viscosidad de escoria fundida es una función de la temperatura y de su composición. Además, la formación de fases cristalinas puede causar un rápido aumento de la viscosidad. La temperatura a la cual el rápido incremento se inicia se llama Temperatura de Viscosidad Crítica (T_{cv}), y la escoria con la T_{cv} se categoriza como escoria cristalina. En reactores de gasificación de escorias, las fluctuaciones de temperatura cerca de la T_{cv} puede causar la acumulación de escorias dentro de ellos [3].

Coefficiente de viscosidad. Para una concentración dada de alúmina, la viscosidad del fundido se

incrementa con el incremento del contenido de sílice, y para una composición dada, el fundido llega a ser más viscoso con la disminución de la temperatura.

Propiedades químicas

Basicidad. Un ácido es un cuerpo capaz de suministrar uno o varios protones H^+ en soluciones acuosas, mientras una base puede captar este protón. En las escorias, donde la mayor parte de los constituyentes son óxidos, un ácido es aquel que puede absorber uno o varios aniones $O^=$ para formar un ión complejo, mientras una base es una fuente de iones $O^=$:



En la práctica industrial es común expresar la basicidad de una escoria por medio de algún número, frecuentemente llamado valor *B*. Se han sugerido distintas expresiones, como:

$$\frac{CaO}{SiO_2}, \frac{CaO - 4P_2O_5}{SiO_2}, \text{ o } \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (22)$$

Lo que estos cocientes tienen en común es que todos expresan solo aproximadamente la capacidad de la escoria, por ejemplo, para la desulfuración o para la defosforación. En tanto que la composición de la escoria no cambie drásticamente, cualquiera de estas relaciones podría servir con el propósito de describir la basicidad relativa de una escoria.

D. Viscosidad y conductividad en las escorias de Cerro Matoso

La viscosidad en el sistema MgO - FeO - SiO₂. Para medir la viscosidad de compuestos cuyas composiciones químicas caigan dentro del ternario MgO - FeO - SiO₂ se usan aparatos resistentes a altas temperaturas. El método más usado para medir viscosidad a altas temperaturas es el de *cilindro oscilante*, empleado por Towers y Kay, y el de *crisol rotatorio*, de Bockris, Lowe y Mackenzie. Las lecturas de la viscosidad de estos dos métodos se dan en unidades poises. El método de *rotación de crisol de Bob* es considerado por muchos autores el más exacto y confiable para mediciones de viscosidad a alta temperatura, comparado con otros, como el método Shvidkovski y el viscosímetro vibracional [4].

Viscosidad en escorias de minerales lateríticos. La viscosidad de la escoria formada durante el procesamiento pirometalúrgico de lateritas de níquel tiene una decisiva influencia en el proceso de producción de ferroníquel de níquel. Las mediciones a alta temperatura, hasta ahora realizadas de estas escorias, sugieren que los métodos de cilindro concéntrico, de caída de esfera y de oscilación pueden tener errores asociados del orden del 25% [5].

Existe un buen número de estudios sobre escorias sintéticas. En general, un incremento en la sílice y su relación con el óxido de hierro se refleja en un aumento de la viscosidad, y, a su vez, un aumento de MgO reduce los valores de viscosidad.

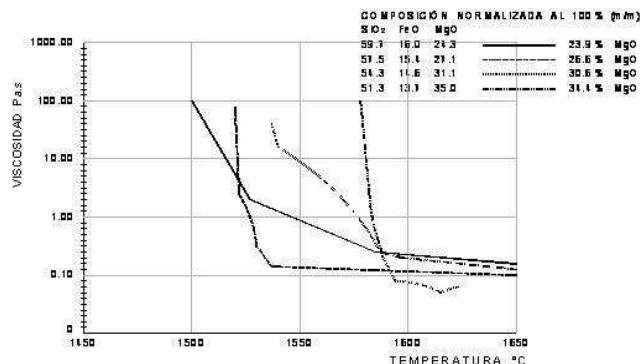


Figura 1. Relación viscosidad-temperatura de escoria sintética de laterita de níquel. Fuente: Broadbent C. P., Machingwuta N.C., The Physical Chemistry of Nickel Laterite Smelting Slags. 1994, Billiton Research B-V.

A una escoria laterítica de níquel industrial con un contenido de SiO₂ de 59,6%, de FeO de 15,5%, de MgO de 21,2% y de Al₂O₃ de 3,1% se le calculó la

viscosidad y la temperatura de fusión, usando la correlación de Urbain.

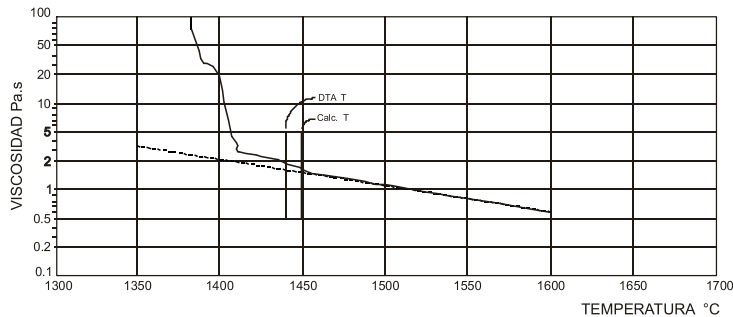


Figura 2. Relación entre la viscosidad y la temperatura para una escoria laterítica de níquel que contiene 59,6% de SiO₂, 15,5% de FeO, 21,2% de MgO y 3,1% de Al₂O₃.

Fuente: Broadbent C. P., Machingawuta N.C., The Physical Chemistry of Nickel Laterite Smelting Slags. 1994, Billiton Research B-V.

Medición de la conductividad eléctrica. La Comisión Electrotécnica Internacional definió como patrón de la conductividad eléctrica: un hilo de cobre de 1 m de longitud y 1 g de peso, que da una resistencia de 0,15388 Ω a 20 °C. Al anterior patrón se le asignó una conductividad eléctrica de 100% IACS (International Annealed Cooper Standard, Estándar Internacional de Cobre Recocido). A toda aleación de cobre con una conductividad mayor que 100% IACS se le denomina de alta conductividad (H.C., siglas en inglés). La conductividad k de una solución es por definición el inverso de la resistividad. La resistencia R de un conductor de sección transversal A y longitud L está dada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{L}{k \cdot A} \quad R = \frac{1 \cdot L}{k \cdot A} \quad k = \frac{1 \cdot L}{R \cdot A} \quad (23)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional tiene como unidades el siemens por metro ($S \cdot m^{-1}$). En la práctica, la conductividad eléctrica de una solución se expresa en siemens por centímetro (S/cm) o en microsiemens por centímetro ($\mu S/cm$). La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio por metro ($\Omega \cdot m$), y para

el caso de la resistividad de soluciones es el ohmio por centímetro ($\Omega \cdot cm$). A menos que se especifique de otro modo, la temperatura para la expresión de la conductividad o la resistividad es de 20 °C.

Para la medición de la resistividad en escorias se usa una celda de conductividad eléctrica (ver figura 3). El equipo cuenta con dos electrodos de grafito, montados en un tubo protector de alúmina. El mecanismo de medida es un alambre de molibdeno ($\varnothing = 1 \text{ mm}$), que es ensamblado en la punta de los electrodos de 4 mm, haciendo puente entre el material y los electrodos. La celda tiene externamente resistencias de grafito que calientan un crisol interno fabricado en molibdeno. La constante de la celda se determina con una solución (0,01-1,0) M de KCl [7].

La conductividad eléctrica en Cerro Matoso. El conocimiento de la conductividad/resistividad eléctrica de la escoria es esencial para la operación óptima del horno. Se han realizado mediciones de la conductividad eléctrica de las escorias de CMSA que pueden ser convertidas a resistencia del baño en el horno de CMSA mediante la siguiente expresión:

$$R_s = P_s \cdot k \quad (24)$$

Donde:

R_s = Resistencia de la escoria

P_s = Resistividad específica 1/(conductividad)

k = Constante de la celda = (Urquart =0.0036),
(Halved - Nilsen =0.0039) y (Persson =0.0045).

La ecuación de la siguiente forma genérica es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales:

$$\log X = \frac{a}{T} + b \quad (25)$$

Donde:

X representa la conductividad eléctrica en S/cm,

T es la temperatura en °K

a y b son parámetros que dependen de la composición.

III. Procedimiento experimental

A. Determinación de viscosidad y conductividad eléctrica

Con ayuda del software "SLAGAN4WIN, VERSIÓN 2.15 DEC. 2, 2003 by Egil J. M. Jahsen" [8], facilitado por la empresa Cerro Matoso, se procede a determinar la viscosidad y conductividad eléctrica de las muestras seleccionadas de composiciones de escorias del año 2006, teniendo en cuenta las composiciones de escorias típicas así: Al_2O_3 2,4% y 2,8% y relaciones de SiO_2/MgO de 2,70 y 2,84. El uso del software implica varios pasos, que se describen a continuación:

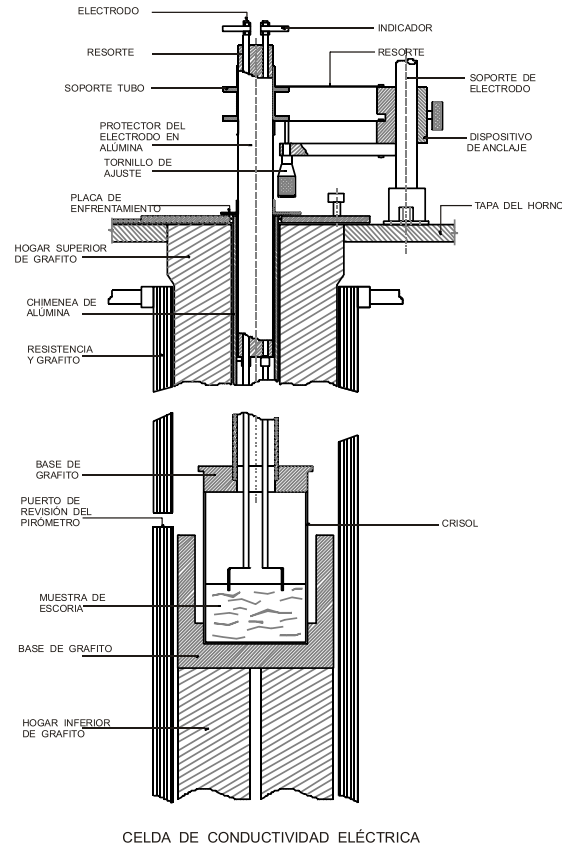


Figura 3. Celda para medición de conductividad eléctrica a altas temperaturas.

Fuente. Barati, Mansoor y Coley, Kenneth S. 2006. Electrical and Electronic Conductivity of CaO-SiO₂-FeO, Slags at Various Oxygen Potentials: Part II. Mechanism and a Model of Electronic Conduction. Metallurgical and Materials Transactions. Tomo 37B, No. 1; p. 51.

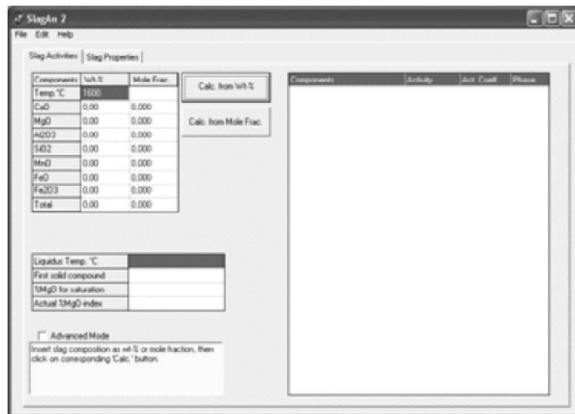


Figura 4. Presentación inicial del software

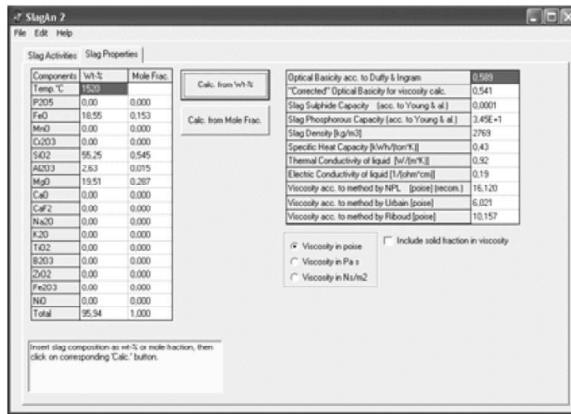


Figura 5. Propiedades definitivas de la escoria a las condiciones de operación

Paso 1: En los campos previstos se ubica la composición de la escoria, ya sea en porcentaje en peso o en porcentaje molar. Para el ejemplo se toma la composición de una escoria típica. En la figura 5 se presenta el menú principal con los valores de composición química ya ingresados de una escoria típica.

Paso 2: Con los datos de composición se obtiene inicialmente la temperatura de liquidus, que en este caso particular fue de 1435 °C. La figura 6 representa el primer cálculo de temperatura a la cual fundiría esa escoria con esa composición.

Paso 3: Una vez obtenida la temperatura de liquidus del compuesto se procede a encontrar la viscosidad y conductividad eléctrica en la ventana de propiedades de la escoria.

Paso 4: Con los datos iniciales, ahora fijamos la

temperatura real de colada y volvemos a revisar las propiedades de la escoria, que en este caso serán las propiedades definitivas a la temperatura del horno, que en el caso de CMSA se encuentra entre 1520 °C y 1560 °C.

Paso 5: Una vez incluida la temperatura de operación, se procede a conocer las nuevas características de la escoria en la ventana de propiedades de esta.

IV. RESULTADOS

A. Viscosidad y conductividad eléctrica

En la tabla 2 se presentan los datos obtenidos usando el software SLAGAN.

Los resultados de la tabla 2 se condensan en las siguientes gráficas. Para facilitar su comprensión se toma la parte pertinente del diagrama pseudoternario.

Tabla 2. Composición química, viscosidad, conductividad eléctrica y temperatura de muestras seleccionadas.
Composiciones típicas en la región de interés para el 2006.

Fecha	Al ₂ O ₃	Fe	FeO	Ni	SiO ₂	SiO ₂ /MgO	MgO	Viscosidad* Poises	Conductividad 1/(ohm*cm)	T Calculada	T Experimental	Diferencia
12-Ene-21:28:11	2,40	14,30	18,40	0,22	54,45	2,70	20,13	9,73	0,20	1428	1472	44,00
	Al ₂ O ₃	Fe	FeO	Ni	SiO ₂	SiO ₂ /MgO	MgO	Viscosidad* Poises	Conductividad 1/(ohm*cm)	T Calculada	T Experimental	Diferencia
19-Ene-06 14:30	2,40	13,53	17,41	0,16	56,44	2,84	19,90	9,55	0,16	1463	1523	60,00
20-Ago-06 18:12	2,40	15,05	19,36	0,18	55,71	2,84	19,59	9,63	0,20	1442	1486	44,00
31-Dic-06 18:11	2,40	15,00	19,30	0,22	54,46	2,84	19,18	9,71	0,20	1437	1488	51,00
10-Ene-19:24:11	2,40	13,60	17,50	0,23	56,84	2,84	20,01	9,54	0,16	1464	1521	57,00
	Al ₂ O ₃	Fe	FeO	Ni	SiO ₂	SiO ₂ /MgO	MgO	Viscosidad* Poises	Conductividad 1/(ohm*cm)	T Calculada	T Experimental	Diferencia
04-Jun-06 00:42	2,80	14,12	18,17	0,19	54,46	2,70	20,20	11,20	0,20	1411	1473	62,00
09-Jun-06 19:22	2,80	14,27	18,36	0,16	54,29	2,70	20,07	11,20	0,20	1410	1470	60,00
24-Jun-06 00:46	2,80	14,39	18,52	0,12	53,57	2,70	19,83	11,27	0,21	1405	1468	63,00
19-Dic-06 14:34	2,80	14,70	18,91	0,20	52,98	2,70	19,62	11,38	0,23	1398	1463	65,00
19-May-06 14:40	2,80	14,97	19,27	0,25	54,54	2,70	20,20	11,09	0,22	1403	1460	57,00
	Al ₂ O ₃	Fe	FeO	Ni	SiO ₂	SiO ₂ /MgO	MgO	Viscosidad* Poises	Conductividad 1/(ohm*cm)	T Calculada	T Experimental	Diferencia
29-Ene-06 04:53	2,80	13,84	17,80	0,16	55,42	2,84	19,49	11,16	0,17	1437	1498	61,00
10-Feb-06 17:04	2,80	13,35	17,18	0,11	56,21	2,84	19,78	11,07	0,16	1446	1508	62,00
29-Ago-06 08:58	2,80	15,93	20,50	0,19	53,66	2,84	18,91	11,32	0,24	1403	1464	61,00
02-Sep-06 02:06	2,80	13,11	16,86	0,10	56,30	2,84	19,84	11,06	0,15	1449	1533	84,00
11-Ene-17:15:11	2,80	14,06	18,09	0,14	55,40	2,84	19,50	11,07	0,18	1435	1495	60,00

* Valores de viscosidad por el método de Urbain. Fuente: Software propiedad de CMSA, "SLAGAN4WIN. VERSIÓN 2.15 DEC. 2, 2003 BY EGIL J. M. JAHSEN" y el autor.

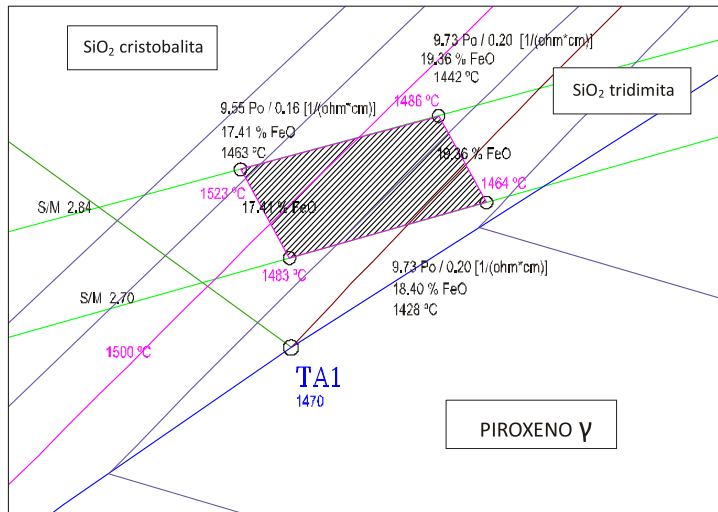


Figura 6. Ubicación de datos de temperatura, viscosidad y conductividad eléctrica de las composiciones que corresponden al pseudoternario 2,4% de Al₂O₃, y cortes verticales con relación SiO₂/MgO de 2,70 y 2,84.

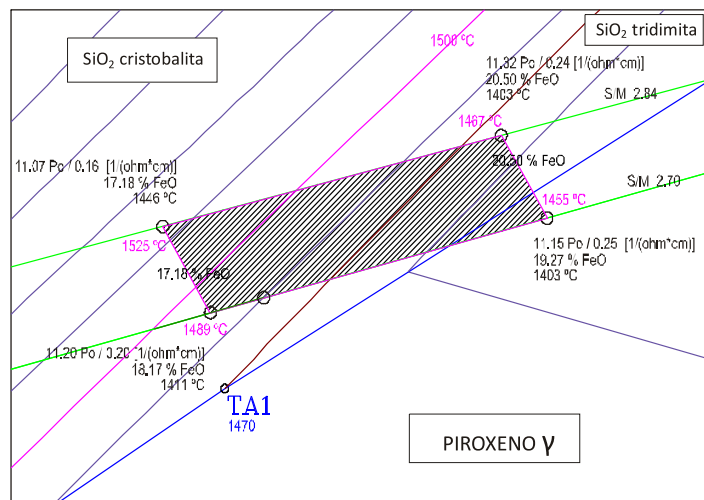


Figura 7. Ubicación de datos de temperatura, viscosidad y conductividad eléctrica de las composiciones que corresponden al pseudoternario 2,8% de Al₂O₃, y cortes verticales con relación SiO₂/MgO de 2,70 y 2,84.

Los valores de viscosidad que se obtienen a partir del *software* implementado están entre 9,54 y 9,73 poises, para composiciones con 2,4% de alúmina, y entre 11,06 y 11,38 poises, para escorias con contenidos de 2,8% de alúmina. Los reportes operativos internos de la compañía señalan que una escoria drena sin ninguna dificultad entre 6 y 9 poises, lo que equivale a considerar que estas escorias deben

ser coladas a mayores temperaturas, para alcanzar los valores de operación.

Las escorias definidas para determinar viscosidad y conductividad eléctrica representan los datos frontera vinculados a los extremos composicionales de 2,4% y 2,8% de alúmina y relaciones SiO₂/MgO de 2,70 y 2,84. Los datos de temperaturas experimentales con

las calculadas tienen diferencias en promedio de 59,4 °C, con un máximo de 84 °C y un mínimo de 44 °C.

En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores obtenidos con ayuda del software oscilan entre 0,16 y 0,20 ($\text{ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), para escorias con contenidos de 2,4% de alúmina, y entre 0,15 y 0,23, para escorias con 2,8% de alúmina. Las condiciones operativas señalan que estos valores deben estar entre 0,11 y 0,12 ($\text{ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$). Para alcanzar estos valores es necesario altos contenidos de FeO y de Al_2O_3 , como se observa en la tabla 2, donde los valores de conductividad aumentan de 0,16 a 0,20 ($\text{ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), al pasar de 17,41% a 19,36% de FeO, para 2,4% de Al_2O_3 , y aumenta, igualmente, de 0,16 a 0,24 ($\text{ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), para 2,8% de Al_2O_3 , al pasar de 16,86% a 20,50% de FeO.

V. Conclusiones

- Las diferencias de temperaturas calculadas con el software contra las experimentales de colada fueron del orden de 50 a 100 °C; esto significa operar en el rango hallado y lograr la combinación de viscosidad y conductividad eléctrica necesaria, que asegure un fácil drenado de la escoria.
- El software adquirido por la empresa responde a la necesidad sentida de contar con una herramienta propia para conocer de antemano los datos característicos de una escoria industrial de la naturaleza del proceso de CMSA.
- La viscosidad y la conductividad eléctrica contribuyen, como variables dependientes de la temperatura de liquidus, a la definición de la temperatura de colada. Para lograr un buen drenado de la escoria, es necesario mantener altos contenidos de FeO, alrededor del 18%, combinados con alúminas intermedias del orden de 2,6%; en esos rangos se tendrá una conductividad entre 0,16 y 0,20 y relaciones de SiO_2/MgO entre 2,7 y 2,8; esto permite mantener la escoria como una fase líquida, de la cual cristaliza cristobalita, y asegurar zonas de líquido remanente más amplias.

- Con los valores promedios de alúmina y de relación SiO_2/MgO hallados, se tienen viscosidades de 10 poises y conductividades eléctricas del orden de 0,16 ($\text{ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$). Bajo esas condiciones la escoria drena fácilmente, la temperatura de colada se puede mantener baja y la superficie de liquidus corresponde a la cristobalita en el diagrama ternario; y estas son condiciones ideales de operación.

Referencias

- [1] A. Bronson, G. Pierre. *Electric Furnace Slags. Electric Furnace Steelmaking*. 1985.
- [2] The United States Steel. *The Making, Shaping and Treating of Steel*.
- [3] Y. Kim and M. S. Oh. "Effect of Cooling Rate and Alumina Dissolution on the Determination of Temperature of Critical Viscosity of Molten Slag". *Fuel Processing Technology Department of Chemical Engineering, Hongik University, Seoul, 120-791, Korea*. Available online.
- [4] A. Kondratiev, E. Jak. "A Quasi-Chemical Viscosity Model for Fully Liquid Slags in the Al_2O_3 , Metallurgical and Materials Transactions"; V36B, *ProQuest Science Journals*, pp. 623-637, 2005.
- [5] C. P. Broadbent and N. C. Machingawuta. *The Physical Chemistry of Nickel Laterite Smelting Slags*. 1994, Billiton Research B-V.
- [6] M. Barati and K. Coley. "Electrical and Electronic Conductivity of $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$, Slags at Various Oxygen Potentials: Part II. Mechanism and a Model of Electronic Conduction". In: *Metallurgical and Materials Transactions*. Tomo 37B, No. 1; pp. 51-61. Feb. 2006.
- [7] Documentación Técnica del Horno Eléctrico, Cerro Matoso S.A. 2005.
- [8] J. M. Jahsen. Slagan4win. versión 2.15 dec. 2, 2003 by egil.

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2008

Fecha de aprobación: 22 de mayo de 2008