

Análisis de las propiedades del sistema CaO – FeO – SiO₂ para su aplicación en escorias

Analysis of the properties of the CaO – FeO – SiO₂ system for its application in slags

GAMBOA-HERNÁNDEZ, Adriana†*, CAMPA-NÚÑEZ, Pantaleona, PEDROZA-FIGUEROA, Simón Alberto, MORENO-CASILLAS, Héctor Aurelio y SALCEDO-DÍAZ, Erika

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de La Laguna

ID 1^{er} Autor: *Adriana, Gamboa-Hernández* / ORC ID: 0000-0002-3355-1234, Researcher ID Thomson: K-2689-2018, CVU CONACYT ID: 409132

ID 1^{er} Coautor: *Pantaleona, Campa-Núñez* / ORC ID: 0000-0003-0787-2699, CVU CONACYT ID: 409160

ID 2^{er} Coautor: *Simón Alberto, Pedroza-Figueroa* / ORC ID: 0000-0002-1818-7737, CVU CONACYT ID: 176064

ID 3^{er} Coautor: *Héctor Aurelio, Moreno-Casillas* / ORC ID: 0000-0003-0740-6209

DOI: 10.35429/JOTI.2019.10.3.1.10

Recibido 2 de Abril, 2019; Aceptado 4 de Junio, 2019

Resumen

El estudio de los sistemas de fases ternarios en la pirometalurgia es muy utilizado para la adecuada formación de escorias, pues son un fundamento importante en establecer las condiciones de operación en la separación de elementos no deseados. En este rubro, el sistema CaO – FeO – SiO₂ es generalmente empleado para la determinación de la temperatura *liquidus* y otras propiedades en la metalurgia del Pb y Fe principalmente. En este artículo se revisan las propiedades principales de este sistema, tales como densidad, tensión superficial y conductividad eléctrica. Además, se lleva a cabo una recopilación en los valores obtenidos de la viscosidad hechas por distintos autores a diferentes composiciones y temperaturas, con la finalidad de comprobar la interacción que cada componente entrega al equilibrio del sistema. Mediante esta investigación se pretende obtener el conocimiento para predecir el comportamiento de las escorias que conlleva a la toma de decisiones que mejoren los procesos y esto es sólo a través de información confiable y consistente.

Viscosidad, escorias, sistemas ternarios

Resumen

The study of ternary phases systems in pyrometallurgy is used for the adequate formation of slags, because they are an important foundation in establishing the conditions of operation in the separation of undesired elements. In this area, the CaO - FeO - SiO₂ system is generally used for the determination of liquidus temperature and other properties mainly in the metallurgy of Pb and Fe. In this article we review the main properties of this system, such as density, surface tension and electrical conductivity. In addition, a compilation is carried out on the values obtained from the viscosity made by different authors at different compositions and temperatures, in order to verify the interaction that each component delivers to the equilibrium of the system. Through this research, the aim is to obtain the knowledge to predict the behavior of the slag that leads to making the decisions that improves the processes and this is only through reliable and consistent information.

Viscosity, slags, ternary phases system

Citación: GAMBOA-HERNÁNDEZ, Adriana, CAMPA-NÚÑEZ, Pantaleona, PEDROZA-FIGUEROA, Simón Alberto, MORENO-CASILLAS, Héctor Aurelio y SALCEDO-DÍAZ, Erika. Análisis de las propiedades del sistema CaO – FeO – SiO₂ para su aplicación en escorias. Revista de Invención Técnica 2019. 3-10:1-10

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: adrianag_08@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Es bien sabido que las escorias desempeñan un papel importante en la producción y refinación de metales. Las escorias contienen elementos que no se reducen o elementos oxidados, por lo que recoge algunos de los componentes indeseables en la mena y debido a su inmiscibilidad con el fundido metálico, separa del metal deseado sus componentes indeseables, ayuda a proteger al metal manteniendo su temperatura y previenen su oxidación, además de que reducen las pérdidas de calor desde la superficie y remueve inclusiones no metálicas (Kekkonen, Oghbasilasi, & Louhenkilpi, 2012). A pesar de la importancia de su función, las escorias siempre han sido un misterio para los metalúrgicos, principalmente en establecer las condiciones de la temperatura de fundición, el control de la partición de elementos mayores, menores y otros parámetros importantes del proceso (Gan & Lai, 2014; Heller et al., 2017; Raghunath, 2007).

Conocer con exactitud la composición de una escoria es muy difícil, debido a la complejidad que conlleva un material que fue tratado térmicamente combinado con varios fundentes y para simplificar su estudio se establece como base de la escoria, los óxidos que mayormente tiene en su composición (Chen & Zhao, 2014; Sakal, Kital, & Shigeno, 2000). Con los sistemas ternarios se determinan las fases en equilibrio que predominan a cierta temperatura, y en algunas ocasiones también se encuentran propiedades como las líneas de *liquidus* (temperatura de fusión), densidades, viscosidades, etc (K. Mills, 2011; Muhmood, Wang, Seetharaman, & Beijing, 2013; Persson, 2007). Según el proceso de estudio, es el área del sistema ternario de interés, pero no siempre este tipo de información se encuentra o están en rangos muy estrechos de composición (Kekkonen et al., 2012).

Para realizar la separación eficiente entre los metales y la escoria formada en distintos ámbitos metalúrgicos, se recurre al aumento de temperatura para mejorar la viscosidad de la escoria y se separe con poco arrastre mecánico de valores. En muchas ocasiones se eleva demasiado la temperatura de fusión porque no se tiene un fundamento termodinámico que establezca un límite seguro en el proceso.

Esta operación genera varios inconvenientes en las fusiones dentro del horno: el gasto innecesario de energía porque la mayoría suele trabajar con combustibles fósiles, aunque en otras ocasiones de utiliza la eléctrica, que combinado con los volúmenes de producción industriales que se maneja, es considerable el gasto; el aumento en las emisiones por rebasar puntos de sublimación y evaporación de varios compuestos; la pérdida de metales como el Cd, Zn y Pb que tiene puntos de ebullición menores y a temperaturas descontroladas pueden perderse en los gases; desgaste mayor en el material refractario interno del horno, por lo que se refleja en gastos mayores de mantenimiento; y que el aumento de temperatura siempre conlleva condiciones de aumento de seguridad que se tienen que atender para los empleados que manejan el equipo.

Sistema Ternario CaO – FeO – SiO₂

El sistema de escoria CaO- FeO -SiO₂ es de gran importancia tanto en la metalurgia ferrosa como en la no ferrosa. Un estudio de la termodinámica ayuda a comprender los diversos fenómenos del proceso para una optimización de las variables en los modelos de simulación que predicen el comportamiento de la operación. En estos casos, a menudo es necesario extrapolar los datos termodinámicos como funciones de temperatura y composición para recuperarlos en línea y esto conlleva al desarrollo de una descripción termodinámica adecuada de los sistemas de escoria de múltiples componentes, por lo que se habilita la extrapolación confiable de los datos termodinámicos (Hidayat, Shishin, Decterov, & Jak, 2017).

Los modelos se basan en una base de datos de equilibrio de fase y datos termodinámicos para varios sistemas binarios, por ejemplo: CaO-SiO₂, FeO-SiO₂, etc. Se considera que el sistema CaO-SiO₂ líquido está compuesto por CaO y SiO₂ y por especies asociadas tales como CaSiO₃ y Ca₂SiO₄. Las ecuaciones polinómicas se utilizan para representar estos datos para estas especies y para explicar los cambios bruscos en las propiedades termodinámicas en composiciones específicas (por ejemplo, donde ocurren brechas de miscibilidad) (K. Mills, 2011).

Las ecuaciones se utilizan para predecir los diagramas de fase de equilibrio y las actividades químicas, energías libres, entalpías, valores de C_p y T_{liq} y T_{sol} para sistemas ternarios, cuaternarios y superiores. Se supone que la mayoría de las fases cristalinas se mezclan de forma independiente en una serie de subrelaciones separadas. En los últimos años, estos modelos comerciales se han extendido al cálculo de propiedades físicas tales como densidades, viscosidades y tensiones superficiales de los sistemas de escoria. Las propiedades tales como la viscosidad involucran el movimiento de un líquido (Figura 1), la partícula de escoria sobre otro y esto está relacionado con la fuerza de la unión y la termodinámica proporciona una medida de la fuerza de la unión.

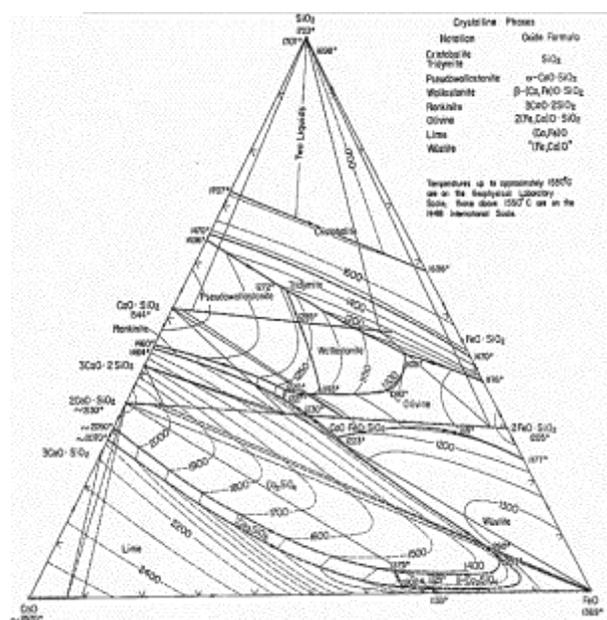


Figura 1 Sistema ternario CaO – FeOx – SiO₂, (Osborn & Muan, 1960)

Además de la industria ferrosa, en la industria del cobre y plomo también se utiliza, aunque la temperatura de la escoria en la del plomo es menor y está alrededor de 1000°C. Las escorias de silicato también se emplean en las plantas de gasificación de carbón y biomasa utilizados para generación de energía, y en la industria de fabricación de vidrio, etc. donde el conocimiento sobre sus viscosidades es necesario para mejorar la eficiencia de las operaciones.

De este diagrama, se observa que las temperaturas más bajas de liquidus están a 1093°C en la zona de la *olivina*.

El aumento de la concentración de CaO afecta el aumento de la temperatura *liquidus* mientras que aumentar el FeO, en varias zonas provoca la disminución de este parámetro.

Densidad

La densidad (ρ) es la propiedad termo - física directamente relacionada con la estructura de las escorias fundidas, debido a los cálculos de transferencia de calor y masa empleados para modelar y optimizar procesos a altas temperaturas.

La aplicación directa que tiene la densidad en los tratamientos para remover la escoria del mineral a obtener radica en un principio de separación físico el cual es el decantado. Las temperaturas elevadas al fundir el mineral de interés proporcionan a la mezcla de mineral, fundente y combustible un estado de agregación líquido el cual es de interés para hacer la separación de metal y escoria (K. Mills, 2011).

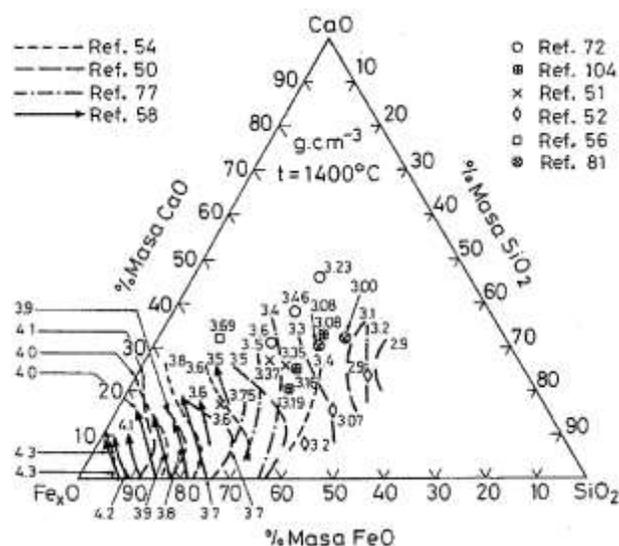


Figura 2 Densidad (g/cm^3) de CaO + Fe_xO + SiO₂ a 1400°C de varias fuentes, (Allibert et al., 1995)

El aumento de la densidad está en función de la composición y de la temperatura *liquidus* que se expresa en la figura 1. En áreas donde la temperatura de fusión es mayor, se encuentran valores de 4.1 de densidad mientras que, en el área de cerca de la olivina el valor es de 2.9, debido a la diferencia de 300°C entre la temperatura de fusión y la temperatura a la cual se hizo la medición.

A esta temperatura, el aumento de la concentración de FeO afecta el aumento de la densidad.

El resto del diagrama no es completado porque no se tiene una fase líquida a esta temperatura.

De la figura 3, considerando en las pruebas una concentración casi constante de SiO₂, la densidad aumento con el decremento de la concentración de CaO y el aumento del FeO (figura 3.a) pero aumentando la concentración de SiO₂, disminuye la densidad (figura 3.b).

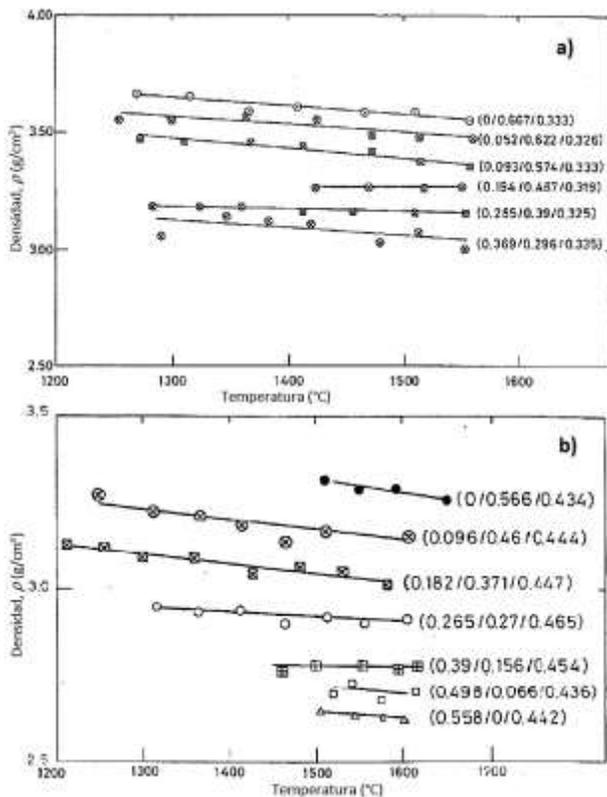


Figura 3 Efecto de la temperatura en la densidad en distintas composiciones (frac. molar de CaO / frac. molar FeO / frac. molar SiO₂) a la concentración cercana del SiO₂ de: a) 33% y b) 44% , (Allibert et al., 1995)

La escoria actúa como capa protectora del metal fundido, por lo que la densidad debe de ser menor para que flote y debido a la diferencia de densidades entre estos dos productos, es como se realiza la decantación de la escoria para su separación (Bellemans, De Wilde, Moelans, & Verbeken, 2018). En este sistema, para disminuir la densidad de la escoria se busca aumentar el contenido de SiO₂ y el incremento de la temperatura, así como la disminución del contenido del FeO.

Tensión superficial

Dentro del cuerpo de un líquido alrededor de una molécula actúan atracciones casi simétricas.

En la superficie, sin embargo, dicha molécula se encuentra sólo parcialmente rodeada por otras y, en consecuencia, experimenta una atracción hacia el cuerpo del líquido. Esta atracción tiende a arrastrar las moléculas superficiales hacia el interior, y al hacerla el líquido se comporta como si estuviera rodeado por una membrana invisible. Esta conducta se llama *tensión superficial* (σ), y es el efecto responsable de la resistencia que un líquido presenta a la penetración superficial, observable en la forma casi esférica de las gotas de lluvia, la forma esférica de las partículas de mercurio situadas en una superficie lisa. Los líquidos tienden a adoptar formas que minimicen su área superficial (Matsushita, Hayashi, & Seetharaman, 2015).

Desde el punto de vista puramente termodinámico, la tensión superficial puede considerarse como la tendencia de un líquido a disminuir su superficie hasta un punto en que su energía de superficie potencial es mínima, condición necesaria para que el equilibrio sea estable. En general, la tensión superficial disminuye con la temperatura, ya que las fuerzas de cohesión disminuyen al aumentar la agitación térmica.

La tensión superficial de las escorias está en función de la temperatura y su composición. Normalmente sus valores oscilan entre 200 y 600 mN.m⁻¹. Es una variable importante para la formación de las llamadas escorias espumosas requeridas en el afino de metales ya que facilitan un eficiente transporte de materia, al asegurar una gran superficie de contacto metal-escoria (De Almeida, Vieira, Bielefeldt, & Vilela, 2017). También es un factor a cuidar al cuidar al elevarse demasiado, que no se genere una espuma en la escoria que permita la pérdida de metales en ésta.

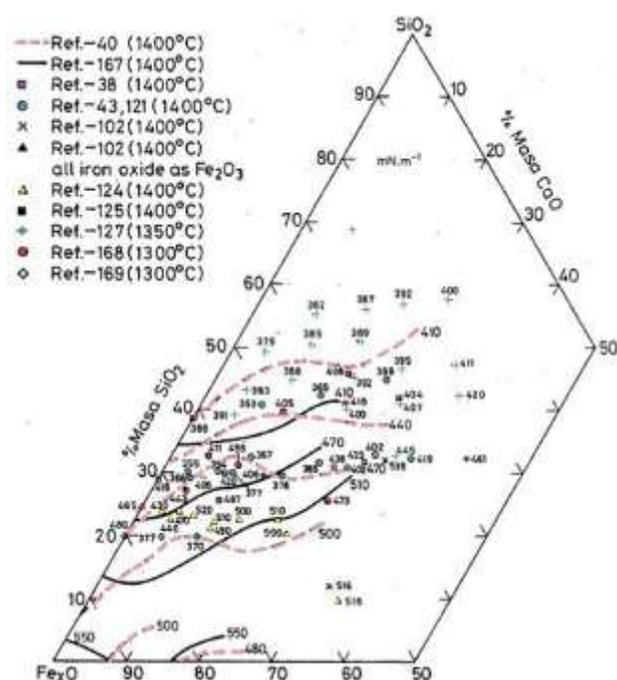


Figura 4 Tensión superficial desde 1300° a 1400°C, (Allibert et al., 1995)

En este sistema, la temperatura *liquidus* parece tener efecto en la tensión superficial, dado que se encuentra a la temperatura de la olivina, el menor valor de σ . También aumenta su valor cuando se disminuye la concentración de SiO_2 , mientras que sucede lo contrario con el FeO y el CaO . Cuando el óxido es Fe_2O_3 , el valor de la tensión superficial aumenta, a comparación con la formación de FeO pero se mantiene la misma tendencia antes descrita.

Con esto podemos predecir que una cantidad adecuada de SiO_2 generará valores menores de tensión superficial por lo que podría provocar la generación de espuma a niveles bajos de presión parcial dentro del horno.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica específica (κ) es una propiedad intrínseca de los materiales con la que se estima que tan buen o mal conductor de la electricidad es y está definida por el cubo de una solución de un metro de lado, por medio de la siguiente ecuación donde “c” es la concentración, “z” y “u” son la carga y la movilidad de especies iónica y “f” la constante de Faraday.

$$k = F \sum c_i z_i u_i \quad (1)$$

La ruta de la corriente eléctrica en el baño de escoria está determinada por la resistividad eléctrica, esto quiere decir que las variaciones en la impedancia del baño de escoria están asociadas principalmente a cambios en la resistividad eléctrica de la escoria. Por tal razón resulta de alta importancia poder contar con un modelo que permita determinar con la mayor aproximación posible el valor de la resistividad eléctrica de la escoria en el rango de temperaturas esperadas con composición química dentro de la zona de interés (K. C. Mills, Yuan, Li, & Zhang, 2013).

Según la figura 5 se muestra la conductividad eléctrica.

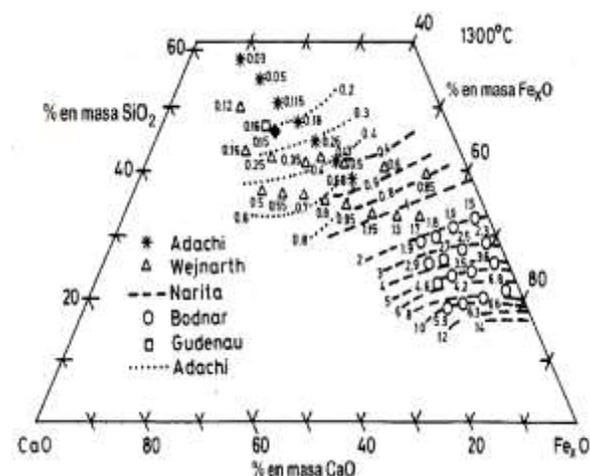


Figura 5 Conductividad iso-eléctrica ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) del sistema $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ a 1300°C, (Allibert et al., 1995)

Esta propiedad depende de la estructura cristalina, es por eso que disminuye conforme aumenta la masa de SiO_2 , pero es muy evidente su aumento cuando se incrementa la proporción de FeO en el sistema. La proporción de CaO no aporta una tendencia segura, en cambio la temperatura de *liquidus* si muestra un efecto según la referencia de Bodnar.

Esta propiedad se ve afectada con la temperatura de operación, aumentando sus valores conforme lo hace la temperatura. Hay que reconocer que la temperatura de 1300°C no favorece todas las zonas de medición, se visualiza un aumento en aquellas zonas donde la temperatura *liquidus* es más baja por 200°C, mientras que trabajar cerca del Fe_xO , donde la diferencia es nula, los valores se disparan demasiado, debido a la poca fluidez en esas composiciones.

Viscosidad

La viscosidad (η) es una medida de la habilidad de una capa de moléculas en moverse sobre una capa adyacente de moléculas y depende tanto de la temperatura como de la estructura del compuesto (Thomas, 1988). En la escoria fundida está relacionada con la estructura interna del óxido fundido y es muy sensible a los cambios de temperatura, composición de la escoria y presión parcial del oxígeno. Es muy usual que haya dificultades para ser medida con precisión por lo que métodos empíricos no son tan confiables.

Conforme aumenta la temperatura en la escoria, la oscilación entre los átomos también aumenta y por lo tanto la distancia entre átomos se hace mayor, por lo que la movilidad es mejor, haciendo que la viscosidad disminuya. También afecta la cinética de la corrosión en los refractarios que las contienen. En valores altos de esta propiedad, retrasan el movimiento a través de los poros y huecos que hay en el material refractario y se afecta también la velocidad de disolución del refractario ya que incide en el transporte molecular a través de la capa de interface refractario/escoria fundida.

En la operación, la viscosidad de la escoria puede tomarse como un indicativo de la facilidad en que será extraída del horno. Un ejemplo de esta situación se visualiza al aumentar mucho la temperatura de operación para manejar una escoria con mejor viscosidad, lo que ocasiona problemas no sólo de emisiones, de consumos descontrolados de energía (Elena, 2016; Kekkonen et al., 2012; K. Mills, 2011).

En general, la cantidad de SiO_2 y Al_2O_3 aumentan la viscosidad, mientras que los óxidos básicos como CaO , MgO , Na_2O , K_2O , FeO_x , CaF_2 , MnO y B_2O_3 la disminuyen. A bajas concentraciones de Al_2O_3 es equivalente al SiO_2 , pero cuando la fracción está arriba de 0.05, sus efectos dependen de la relación molar de $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{MgO})$ presente en la escoria, es decir, la basicidad también está vinculada a esta propiedad.

Se busca que la escoria tenga una viscosidad tan baja como sea posible.

En el caso de alta viscosidad en líquidos, las partículas pequeñas pueden permanecer atrapadas por largos periodos de tiempo por lo que se busca que esos sólidos puedan asentarse a una velocidad mayor, usando por ejemplo, la Ley de Stokes, en donde la viscosidad del flujo es inversamente proporcional a la velocidad de asentamiento (Bellemans et al., 2018).

Un número limitado de mediciones de viscosidad fueron reportadas en el sistema $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{CaO}$ por varias investigaciones (figura 6), y algunos de esos datos se resumieron en el Atlas de escoria.

Los datos reportados muestran dispersiones significativas en el rango de la composición relevante para escorias de fundición de cobre. La técnica de rotación se utilizó en las mediciones de viscosidad de Leiba y Komar, Kozakevitch, Roentgen et al., Williams et al., Kucharski et al., y Ji et al., todos los cuales usaron husillo de Fe y crisol en atmósfera de gas argón, excepto que Kucharski que usó juegos de Mo y mezclas de CO/CO_2 en $P_{\text{O}_2} = 6, 9, 10$ y 11 atm. Johannsen y Weize utilizaron el método de contrapeso para medir la viscosidad en gas con N_2 , el crisol fue de Fe y la bola de Pt, desafortunadamente la disolución de Fe de la escoria en Pt y la posible oxidación del Fe no se tuvieron en cuenta en su estudio.

Aumentar la cantidad de SiO_2 aumenta la viscosidad y el CaO tiene el efecto contrario si se mantiene fijo el SiO_2 . Los valores fueron relativamente menores cuando hay una diferencia mayor entre la temperatura de operación (1400°C) y la temperatura de *liquidus* de la concentración experimentada.

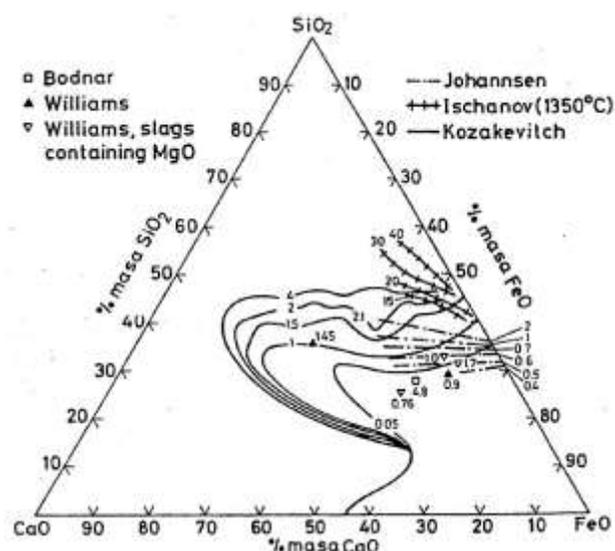


Figura 6 Viscosidades (poise = 10^{-1} Pa.s) del sistema ternario CaO – FeO – SiO₂ a 1400°C, (Allibert et al., 1995)

También se encontró que a baja concentración de SiO₂, las viscosidades aumentan con el aumento de la relación CaO/FeO. A una concentración alta de SiO₂, las viscosidades primero disminuyen y luego aumentan con la proporción creciente de CaO/FeO.

El aumento de la temperatura de operación genera valores menores de viscosidades debido a que la oscilación de átomos aumenta, los compuestos se desintegran y la distancia entre átomos aumenta. La movilidad de la escoria incrementa y por tanto la viscosidad decrece a medida que la temperatura aumenta.

El efecto de la temperatura en la viscosidad es mayor cerca de los límites de saturación cuando la microestructura de la escoria fundida es más compleja.

Viscosidad en función a la temperatura

La temperatura de operación en distintos procesos de la metalurgia del cobre, plomo y hierro son muy distintas, es por eso que no se puede tener un solo diagrama que anticipe el comportamiento de los compuestos en esas condiciones, más aún cuando hay más variables involucradas en un proceso industrial.

A continuación (tabla 1) se muestra la afectación de la temperatura sobre distintas composiciones específicas del sistema ternario realizado por el software FactSage 6.2 en un estudio realizado por Chen y colaboradores en el 2014.

Temp. liquidus K (°C)	Composición molar (%)			Temp. K (°C)	Viscosidad (Pa.s)
	SiO ₂	FeO	CaO		
1445 (1172)	33.4	59.4	7.2	1473	0.073
				(1200)	0.060
				1523	0.051
				(1250)	0.045
				1573	0.038
				(1300)	0.033
				1623	0.029
				(1350)	
				1673	
				(1400)	
				1723	
(1450)					
1773					
(1500)					
1428 (1155)	33.6	55.7	10.8	1523	0.063
				(1250)	0.054
				1573	0.046
				(1300)	0.040
				1623	0.035
				(1350)	0.031
				1673	
				(1400)	
				1723	
				(1450)	
				1773	
(1500)					
1459 (1186)	33.2	41.8	25.0	1523	0.085
				(1250)	0.068
				1573	0.055
				(1300)	0.046
				1623	0.039
				(1350)	0.034
				1673	
				(1400)	
				1723	
				(1450)	
				1773	
(1500)					
1427 (1154)	44.2	49.0	6.8	1473	0.319
				(1200)	0.243
				1523	0.187
				(1250)	0.144
				1573	0.110
				(1300)	0.095
				1623	0.077
				(1350)	
				1673	
				(1400)	
				1723	
(1450)					
1773					
(1500)					

1406 (113)	45.6	44.0	10.4	1423	0.414
				(1150)	0.292
				1473	0.219
				(1200)	0.166
				1523	0.134
				(1250)	0.106
				1573	0.089
				(1300)	0.074
				1623	
				(1350)	
				1673	
				(1400)	
				1723	
(1450)					
1773					
(1500)					
1381 (1108)	45.8	38.9	15.3	1573	0.256
				(1300)	0.189
				1623	0.145
				(1350)	0.113
				1673	0.093
				(1400)	
1723					
(1450)					
1773					
(1500)					
1400 (1127)	44.3	35.3	20.4	1473	0.505
				(1200)	0.350
				1523	0.257
				(1250)	0.196
				1573	0.152
				(1300)	0.120
				1623	0.096
				(1350)	
				1673	
				(1400)	
				1723	
(1450)					
1773					
(1500)					
1442 (1169)	42.6	33.0	24.4	1473	0.392
				(1200)	0.283
				1523	0.208
				(1250)	0.158
				1573	0.121
				(1300)	0.100
				1623	0.079
				(1350)	
				1673	
				(1400)	
				1723	
(1450)					
1773					
(1500)					
1529 (1256)	44.8	23.9	31.2	1623	0.338
				(1350)	0.241
				1673	0.175
				(1400)	0.132
1723					
(1450)					
1773					
(1500)					

Tabla 1 Composiciones y viscosidades pronosticadas en el FactSage, (Chen & Zhao, 2014)

Modelos para cálculo de viscosidades

Se han establecido varios modelos matemáticos en los últimos años, que buscan calcular la viscosidad en función tanto de la temperatura, como de la composición de las escorias. Estos modelos tienen su base en el fundamento experimental realizado por varios investigadores expertos en el campo. A continuación, se muestra en la tabla 2 un comparativo entre los modelos para determinar la viscosidad en un sistema determinado de escoria junto con las ecuaciones empleadas, la temperatura a la que se llevó la experimentación y algunas de las consideraciones importantes en la que se basó la medición.

Metodología o Modelo para determinar la viscosidad	Tipo de escorias	Temp. de operación	Parámetros utilizados para la medición
<i>Método de cilindro giratorio</i>	Al ₂ O ₃ -CaF ₂ -CaO-Cr ₂ O ₃ -FeO-Fe ₂ O ₃ -MgO-MnO-SiO ₂	1,200°C	M es el par, en las revoluciones por segundo, h la altura del husillo, r ₁ el radio del husillo y r ₀ el radio del crisol.
<i>Modelo de cálculo kv (2005)</i>	Fe _x O, Cu, SiO ₂ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Cu ₂ O	1150 a 1400°C	A 1250°C μ(poise) = 11,243 Kv - 3,481 A 1220°C μ(poise) = 13,935 Kv - 3,5234 A 1190°C μ(poise) = 15,797 Kv - 3,4322
<i>Método de plano inclinado (2005)</i>	Fe-SiO ₂	1000 a 1480°C	Kv en unos 0,5 poise, Incremento fracción molar del SiO
<i>Método capilar</i>	CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	1,200°C	r es el radio del capilar, p el gradiente de presión constante entre los extremos del capilar, v el volumen del líquido descargado, L la longitud del capilar, ρ la densidad del líquido y t el tiempo del experimento.

Método de caída de cuerpo	CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	1,200°C	g es la constante gravitacional, r el radio de la esfera, ρ _k y ρ _l las densidades de la bola y el líquido, respectivamente, S la velocidad de descenso o ascenso de la esfera, d el diámetro de la bola y D es el diámetro del crisol.
Método oscilante	CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	1,200°C	ρ es la densidad del líquido, τ el período de oscilación en un sistema vacío, el momento de inercia del sistema de oscilación, λ la disminución debida al efecto de amortiguación del líquido, r el radio del cilindro y d El espesor del cilindro.

Tabla 2 Tabla comparativa entre modelos para determinar la viscosidad en escorias, (Raghnath, 2007)

Conclusiones

El estudio de las escorias aún es un campo poco explorado debido a la inmensidad de condiciones diferentes a las que se enfrenta en la realidad la industria, por lo que su conocimiento teórico ha dado buenos resultados en el fundamento en el contexto operativo, pero aún falta por seguir avanzando en este rubro. La intención de este artículo es de dar un conocimiento básico y general en un diagrama de fases tan usado en la metalurgia extractiva como lo es el sistema CaO – FeO – SiO₂ porque tiene la particularidad del uso de componentes usados en la industria ferrosa y no ferrosa.

En función a lo visto en las secciones anteriores, para la generación de una escoria que tenga un bajo atrapamiento de valores en ella se busca:

- Minimizar la masa de escoria generada, por lo que el uso excesivo de fundentes (como el SiO₂ y CaO) puede afectar esta condición.

- Minimizar la densidad de la escoria, a fin de que sea ligera y el uso excesivo de FeO provoca el efecto contrario.
- Maximizar la tensión superficial de la escoria, en donde el aumento de FeO y CaO ayudan en cierto rango de composiciones.
- Maximizar la fluidez de la escoria, aumentando controladamente la temperatura y el uso de SiO₂ para generar una viscosidad baja y de este modo, permitir el asentamiento de partículas pequeñas que pudieran permanecer atrapadas en la escoria.

Los datos correctos en propiedades tan usadas como la viscosidad serán la base del desarrollo de un modelo confiable que permita el conocimiento del comportamiento de la escoria y por lo tanto, optimizar los procesos de extracción de metales a altas temperaturas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo a este trabajo al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de La Laguna por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación.

Referencias

- Allibert, M., Gaye, H., Geisler, J., Janke, D., Keene, B. J., Kirner, D., ... Woermann, E. (1995). *Slag Atlas.pdf*. (V. D. Eisenhüttenleute, Ed.), *Slag Atlas* (Segunda ed). Verlag Stahleisen GmbH.
- Bellemans, I., De Wilde, E., Moelans, N., & Verbeken, K. (2018). Metal losses in pyrometallurgical operations - A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. Heverlee, Belgium. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.08.001>
- Chen, M., & Zhao, B. (2014). Viscosity Measurements of SiO₂-“FeO”-CaO System in Equilibrium with Metallic Fe. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 46(2), 577–584. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0241-6>
- De Almeida, R. A. M., Vieira, D., Bielefeldt, W.

- V., & Vilela, A. C. F. (2017). Slag foaming fundamentals -A critical assessment. *Materials Research*, 20(2), 474–480. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0059>
- Elena, Z. (2016). A structure-based viscosity model and database, (basado en la termodinámica), 8.
- Gan, L., & Lai, C. (2014). A general viscosity model for molten blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 45(3), 875–888. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9983-9>
- Heller, H. P., Schürmann, M., Scholl, K., Haustein, N., Lychatz, B., & Falkus, J. (2017). Calibration problems with the viscosity measurement of liquid metallurgical slags. In *Journal of Physics: Conference Series* (p. 6). pais germany. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/790/1/012010>
- Hidayat, T., Shishin, D., Deckerov, S. A., & Jak, E. (2017). Critical thermodynamic re-evaluation and re-optimization of the CaO–FeO–Fe₂O₃–SiO₂ system. *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.11.009>
- Kekkonen, M., Oghbasilasie, H., & Louhenkilpi, S. (2012). *Viscosity models for molten slags*. Finlandia.
- Matsushita, T., Hayashi, M., & Seetharaman, S. (2015). Thermochemical and thermophysical property measurements in slag systems. *International Journal of Materials and Product Technology*, 22(4), 351. <https://doi.org/10.1504/ijmpt.2005.006464>
- Mills, K. (2011). The Estimation of Slag Properties. In *Southern African Pyrometallurgy 2011* (p. 56). South Africa.
- Mills, K. C., Yuan, L., Li, Z., & Zhang, G. (2013). Estimating viscosities, electrical & thermal conductivities of slags. *High Temperatures - High Pressures*, 21.
- Muhmood, L., Wang, L., Seetharaman, S., & Beijing, T. (2013). Studies of the Properties of Slags Towards Applications, (November 2015).
- Osborn, E. F., & Muan, A. (1960). *Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems*. (E. J. Orton, Ed.). American Ceramic Society.
- Persson, M. (2007). *Investigations of Slag Properties and Reactions*. stockholm.
- Raghunath, S. (2007). *High-temperature viscosity measurements in slags Boundary layer transition in hypersonic flows View project Laminar-turbulent transition View project*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/43495625>
- Sakal2, H., Klital, Y., & Shigeno, K. (2000). *An Equation for Accurate Furnace Type Slags from Prediction of the Viscosities Chemical Composition of Blast Takamichl lidal*. *ISIJ International* (Vol. 40).
- Thomas, B. (1988). *viscosities and activities in lead- smelting slags*. colorado.