

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y TEXTIL**



**“REDUCCION DE LAS PERDIDAS DE COBRE EN  
LAS ESCORIAS DEL PROCESO ISASMELT DE LA  
FUNDICION DE ILO DE SPCC”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
QUIMICO**

**PRESENTADO POR:**

**ALEJANDRO CUADROS ROJAS**

**LIMA - PERU**

**AÑO 2010**

## **DEDICATORIA**

La presente tesis la dedico a Dios por darme la vida y regalarme una familia maravillosa.

Con mucho amor para mis hijos Juan, Daniela, Diana, a mi esposa Paola y a mis Padres.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor de la presente tesis quiere expresar su agradecimiento a la Fundición de Cobre de SPC, por brindarle la oportunidad de realizar el trabajo de investigación, al Departamento de Metalurgia por brindarle su apoyo desinteresado.

Agradecer hoy y siempre a mi familia por brindarme su apoyo moral, alegría y fortaleza.

## RESUMEN

La Fundición de Ilo de Southern Peru, luego del proyecto de modernización donde cumpliera con el programa medioambiental PAMA, viene operando desde Diciembre del 2006 con un Horno Isasmelt, dos hornos rotatorios de separación de mata y escoria ú Horno de Separación, cuatro convertidores Peirce Smith, dos hornos de tratamiento de escorias, dos hornos de afino, dos ruedas de moldeo de ánodos, dos plantas de ácido sulfúrico y dos plantas de oxígeno.

La introducción de la tecnología Isasmelt trae consigo grandes cambios en los parámetros de operación de la Fundición, principalmente en el grado de la mata y en la composición química de las escorias afectando el contenido de cobre en las escorias producidas por el Horno Isasmelt.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad encontrar los parámetros tales como la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  y  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  que caracterizan a las escorias producidas por el Horno Isasmelt buscando disminuir el contenido de cobre en las mismas debido a que este se considera como pérdida.

Para lograr este propósito se toma como base los fundamentos termodinámicos del equilibrio mata - escoria. Por otro lado se hace uso del análisis estadístico de las muestras de escoria obtenidas durante el período Enero a Mayo del 2008.

Los resultados demuestran que la viscosidad de la escoria es afectada grandemente por el incremento de  $\text{SiO}_2$  o relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  y que esta mayor viscosidad trae consigo un mayor contenido de cobre en las escorias. También se ha demostrado termodinámicamente que para mantener controlado el contenido de magnetita en el Horno Isasmelt la temperatura no debe ser menor a 1 180°C y no es necesario incrementar demasiado la  $\text{SiO}_2$  sino que se debe mantener una relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  en la escoria menor a 0,82

Se ha concluido que para disminuir el contenido de cobre de las escorias en el Horno Isasmelt se deben controlar las principales causas como son: El contenido de Magnetita en el Horno de Separación debe ser menor a 8,5%, la temperatura de escoria debe estar entre 1 180 a 1 200°C, la relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  menor a 0,82 con un contenido de magnetita en el Horno Isasmelt entre 8-10% y el control de niveles de mata no mayor a 1,20 m para evitar contaminar la escoria por arrastre de mata.

## Índice

	<b>Página</b>
Dedicatoria	02
Agradecimientos	03
Resumen	04
Índice	05
Índice de Cuadros	08
Índice de Ilustraciones	09
Índice de abreviaturas	13
Capítulo 1	
1. Introducción	14
1.1. Antecedentes Generales	14
1.2. El Proceso Isasmelt de SPCC	17
1.2.1. El Horno Isasmelt de SPCC	19
1.2.2. El Horno de Separación de SPCC	22
1.3. Variables de proceso Isasmelt	26
1.4. Descripción del problema	27
1.5. Justificación del Trabajo de Tesis	29
1.6. Objetivos del Trabajo de Tesis	29
1.7. Hipótesis de Trabajo	30
Capítulo 2	
2. Marco teórico de referencia	31
2.1. Antecedentes teóricos	31
2.1.1. Introducción	31
2.1.2. Sistema Binario FeO - SiO <sub>2</sub>	31
2.1.3. Sistema Ternario FeO - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub>	33
2.1.4. Sistema Ternario CaO – FeO - SiO <sub>2</sub>	34
2.1.5. Sistema Ternario FeO- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	35
2.1.6. Comportamiento Sulfuro Oxido	36
2.1.7. Densidad de Escorias Fayalíticas	37
2.1.8. Viscosidad de Escorias Fayalíticas	39
2.2. Fundamentos teóricos	45
2.2.1. Pérdidas Mecánicas de Cobre	46



## Índice de Cuadros

	<b>Pagina</b>
Tabla 1-1 Análisis Químico de Escoria del Horno de Separación	27
Tabla 2-1 Composiciones Químicas de las fronteras de la Fayalita	32
Tabla 2-2 Composición de líquidos inmiscibles saturados con SiO <sub>2</sub> en el sistema FeS-FeO-SiO <sub>2</sub> a 1 200°C	37
Tabla 2-3 Composición de líquidos inmiscibles saturados con SiO <sub>2</sub> en el sistema cuaternarios Cu <sub>2</sub> S-FeS-FeO-SiO <sub>2</sub> a 1 200°C	37
Tabla 2-4 Densidades de óxidos puros	38
Tabla 2-5 Viscosidad de óxidos puros	41
Tabla 2-6 Composición de escorias de figura 2-13.	43
Tabla 2-7 Tiempo de Sedimentación de gotas de mata a través de una capa de escoria de 50 cm	47
Tabla 2-8 Valores del coeficiente "A" para estimar la solubilidad del cobre oxidado en escorias de silicatos de hierro	56
Tabla 4-1 Cuadro comparativo de Análisis Químicos de escorias de Horno de Separación y Horno Reverbero utilizado en el diagrama FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	73
Tabla 4-2 Cuadro comparativo de Análisis Químicos de escorias de Horno de Separación y Horno Reverbero utilizado en el diagrama SiO <sub>2</sub> - CaO - "FeO"	74
Tabla 4-3 Pérdidas de cobre solubles por el Modelo de Sehnalek e Imris	75
Tabla 4-4 Pérdidas de cobre solubles por el Modelo de Nagamori para A = 26,7 y P <sub>SO2</sub> = 0,375 atm	77
Tabla 4-5 Pérdidas de cobre solubles por el Modelo de Nagamori para A = 35,9 y P <sub>SO2</sub> = 0,375 atm	79
Tabla 4-6 Composición de escorias con viscosidades adecuadas	85
Tabla 4-7 Análisis Estadístico de Escorias de los Hornos de Separación para Modulo Kv < 1.4	88
Tabla 4-8 Análisis Estadístico de Escorias de los Hornos de Separación para Modulo Kv [1.4 – 1.5]	89

Tabla 4-9 Análisis Estadístico de Escorias de los Hornos de Separación para Modulo Kv > 1.5	90
Tabla 4-10 Efecto de la Relación SiO <sub>2</sub> /Fe en la Viscosidad	92
Tabla 4-11 Consumo de Fundentes y peso de escoria retirada	92
Tabla 4-12 Pérdidas de Cobre en escorias de deposito	92
Tabla 4-13 Distribución de Pérdidas de Cobre en escorias actuales SPCC	93
Tabla 4-14 Angulo Escoriado en función de Nivel de Mata	95
Tabla 4-15 Cuadro Resumen de Actividades de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	100
Tabla 4-16 Influencia de la actividad de FeO en la actividad de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	101



4.7.2.	Efecto de relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ en la masa de escoria	92
4.8.	Análisis de causas operativas que influyen en las pérdidas de cobre.	93
4.8.1.	Control de inventarios de mata	94
4.8.2.	Control de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ en Horno Isa e influencia de relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$	95
4.8.2.1.	Actividad de $\text{FeS}$ en mata de Horno Isa	96
4.8.2.2.	Actividad de $\text{FeO}$ en escoria de Horno Isa	97
4.8.2.3.	Actividad de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ en Horno Isa	99
Capítulo 5		
5.	Conclusiones y Recomendaciones	102
5.1.	Introducción	102
5.2.	Conclusiones	104
5.3.	Limitaciones	105
5.4.	Recomendaciones	105
Bibliografía		108
Apéndices		110
Tablas		121

## Índice de Ilustraciones

	<b>Página</b>
Figura 1-1 Diagrama de Flujo de Fundición de Ilo de SPCC antes del proyecto de Modernización	15
Figura 1-2 Diagrama de Flujo Actual de Fundición de Ilo de SPCC	16
Figura 1-3 Diagrama de Flujo del proceso Isasmelt de SPCC	17
Figura 1-4 El Horno Isasmelt de SPCC	19
Figura 1-5 Pantalla del Sistema de Control de Procesos	21
Figura 1-6 Horno de Separación de SPCC	23
Figura 1-7 Piquera de mata y escorias en Horno de Separación	23
Figura 1-8 Vista del sistema de medición del Horno de Separación	24
Figura 1-9 Cálculo de inventarios de Mata y Escoria	25
Figura 1-10 Porcentaje de cobre en escorias de los Hornos de Separación	28
Figura 1-11 Contenido de magnetita y porcentaje de cobre en escoria	28
Figura 2-1 Diagrama de fases FeO-SiO <sub>2</sub> en contacto con hierro metálico. Se muestra el contenido de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en el líquido	32
Figura 2-2 Diagrama de fases del sistema FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> e isobaras de presión de oxígeno	33
Figura 2-3 Diagrama de fases del sistema CaO-“FeO”-SiO <sub>2</sub>	34
Figura 2-4 Diagrama de fases del sistema FeO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	35
Figura 2-5 Diagrama de Fases FeO-SiO <sub>2</sub> -FeS a 1 200°C	36
Figura 2-6 Relación de densidad y composición de escoria de silicato de hierro en contacto con hierro sólido a 1 410°C	38
Figura 2-7 Relación de Densidad y Temperatura del liquido 2FeO.SiO <sub>2</sub>	39
Figura 2-8 Estructura Tetraedro de la SiO <sub>2</sub>	40
Figura 2-9 Estructura típica de la SiO <sub>2</sub> la cual se rompe con los óxidos básicos	40
Figura 2-10 Isotermas de Viscosidad para el sistema SiO <sub>2</sub> -FeO en contacto con hierro sólido	41
	42

Figura 2-11 Líneas de Isoviscosidad y efecto de CaO en la viscosidad en el sistema CaO-FeO-SiO <sub>2</sub>	
Figura 2-12 Influencia de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la viscosidad de escorias.	43
Figura 2-13 Efecto de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la viscosidad en escorias del Horno de limpieza de la Fundición de Naoshima	44
Figura 2-14 Efecto de la temperatura en la viscosidad de escorias de la industria del cobre	45
Figura 2-15 Solubilidad de cobre en escorias fayalíticas a 1 200 y 1 300°C desde Nagamori	55
Figura 2-16 Comparación de datos de solubilidad de cobre en escorias de silicato de fierro saturadas con sílice, conteniendo CaO	57
Figura 2-17 Contenido de azufre en escorias comerciales en función del grado de mata	58
Figura 2-18 Actividad del azufre en escorias saturadas con sílice en función del grado de mata	58
Figura 2-19 Cobre oxídico, cobre sulfídico y cobre total en escorias comerciales de reverbero	60
Figura 2-20 Comparación de los modelos desarrollados por Nagamori con datos de escorias industriales	61
Figura 3-1 Cucharón de muestreo de mata de Horno de Separación SPCC	63
Figura 3-2 Paleta de muestreo de escoria de Horno de Separación SPCC	64
Figura 3-3 Cucharón de muestreo de mata y escoria de Horno Isasmelt SPCC	64
Figura 3-4 Paleta y muestra de escoria de Horno Reverbero SPCC	65
Figura 3-5 Vibratory Ring Pulverizar TM/G1500	66
Figura 3-6 Barril de pulverizado de muestras de mata y escoria	67
Figura 3-7 Pirómetro Mikron M-78, corte de la cámara de instalación	67
Figura 3-8 Saturation Magnetization Analyzer, M-135	69
Figura 3-9 X-ray Fluorescent Spectroscopy X-Met920	69
Figura 4-1 Escorias de SPCC en el Diagrama FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	72

Figura 4-2 Escorias de SPCC en el diagrama ternario $\text{SiO}_2$ -“FeO”- CaO	73
Figura 4-3 Modelo de Sehnalek e Imris	75
Figura 4-4 Modelo de Nagamori para condiciones del Horno Isasmelt A=26,7 y $P_{\text{SO}_2}$ 0,375 atm	76
Figura 4-5 Modelo de Nagamori para condiciones del Horno Isasmelt A=35,9 y $P_{\text{SO}_2}$ 0,375 atm	78
Figura 4-6 Efecto de Modulo Kv en la Viscosidad de la escoria de SPCC	80
Figura 4-7 Tendencia de operación para una fusión de 140 tph de concentrado	81
Figura 4-8 Tendencia de operación para una fusión de 170 tph de concentrado	82
Figura 4-9 Relación de tiempo de sedimentación y tamaño de partícula	83
Figura 4-10 Efecto de la Relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ en la viscosidad de escoria SPCC	84
Figura 4-11 Efecto de la Relación $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ en la Viscosidad	85
Figura 4-12 Efecto de $\text{Al}_2\text{O}_3$ en la Viscosidad de escoria SPCC	86
Figura 4-13 Relación de tamaño de partícula y tiempo de sedimentación	86
Figura 4-14 Efecto de la relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ en el sistema ternario $\text{SiO}_2$ – “FeO” – CaO	91
Figura 4-15 Calculo de Ollas de mata disponibles	94
Figura 4-16 Actividades de FeS y $\text{Cu}_2\text{S}$ en la fase mata a 1 300°C	97
Figura 4-17 Actividad del FeO y $\text{Fe}_3\text{O}_4$ para escorias de composición promedio del Horno Isasmelt a 1 300°C	98
Figura 4-18 Región Homogénea de fayalita a diferentes Temperaturas	99
Figura A-1 Correlación de actividades de FeS de la figura 4-16	117
Figura A-2 Correlación de actividades de $\text{Cu}_2\text{S}$ de la figura 4-16	117

## **Capítulo I**

### **Introducción**

#### **1.1. Antecedentes Generales**

La Fundición de Ilo está localizada a 17 Km. al Norte del Puerto de Ilo del departamento de Moquegua, y forma parte del complejo minero-metalúrgico de Southern Peru Copper Corporation (SPCC), que es la compañía minera más grande en el Perú y una de las diez compañías productoras de cobre más grandes del mundo. El complejo minero-metalúrgico de SPCC está constituido por las minas y concentradoras de Toquepala y Cuajone, una Planta de Lixiviación, Extracción por Solventes y Electro deposición, una Fundición de concentrados y una Refinería de Cobre.

La Fundición de Ilo inició sus operaciones en 1960 y estuvo constituida por dos hornos Reverbero, siete Convertidores Peirce Smith o CPS, un Convertidor Modificado Teniente o CMT, una Planta de Acido Sulfúrico, una Planta de Oxígeno, dos Plantas de Moldeo e instalaciones auxiliares tal como se muestra en la figura 1-1.

En febrero del 2007 la Fundición de Ilo, basado en su compromiso con el Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA), inició la operación de su nuevo horno de fusión en baño, denominado Horno Isasmelt, en reemplazo de dos Hornos de Reverbero y un Convertidor Teniente, este último instalado en 1995. La capacidad de fusión de la fundición actual fue diseñada para mantener la misma fusión anual de 1 200 000 t de concentrados de cobre.

El Horno Isasmelt se encuentra asociado a un caldero de recuperación de calor y un precipitador electroestático, cuatro convertidores Peirce Smith, dos en soplado, uno en espera y uno en mantenimiento, tres precipitadores electroestáticos, dos plantas de ácido, dos plantas de oxígeno, dos plantas de efluentes, una planta de moldeo de ánodos, dos hornos de limpieza de escoria y plantas auxiliares de servicios. El proceso actual se lleva a cabo tal como se muestra en la figura 1-2. El diseño vertical del sistema de gases favorece la disminución del particulado en los gases de proceso y mejora el manejo de gases que finalmente son tratados en las plantas de acido sulfúrico.

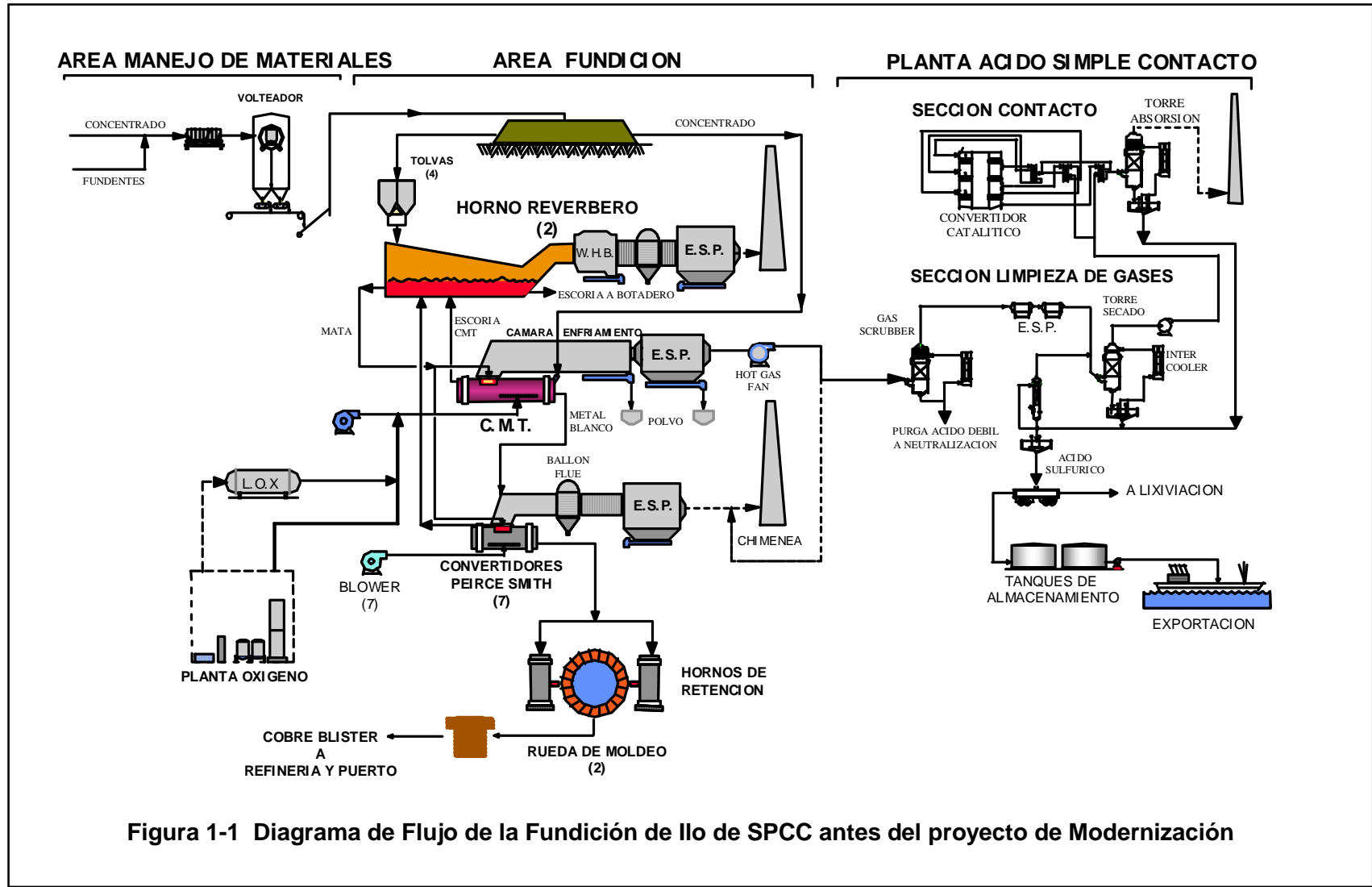
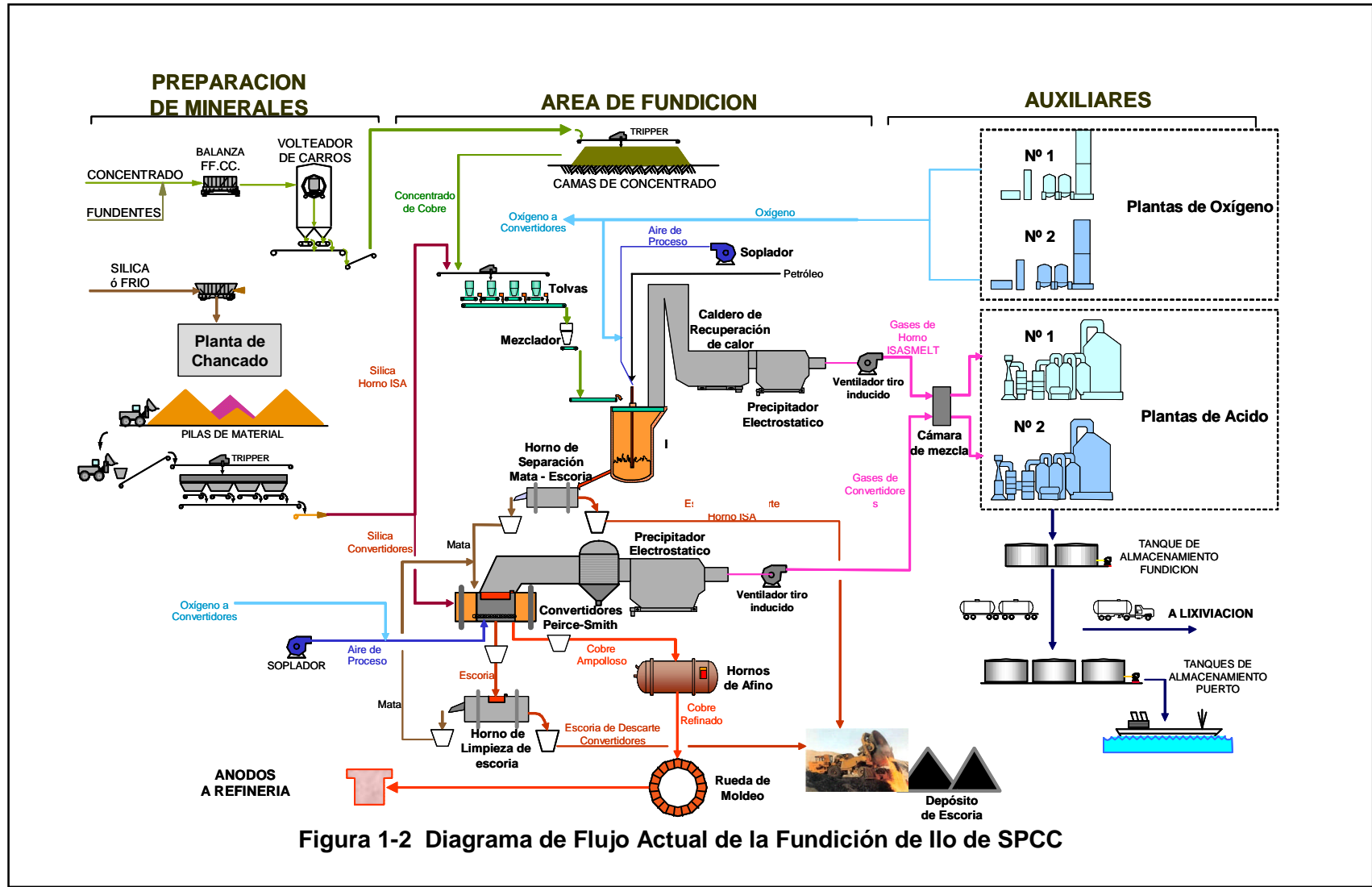
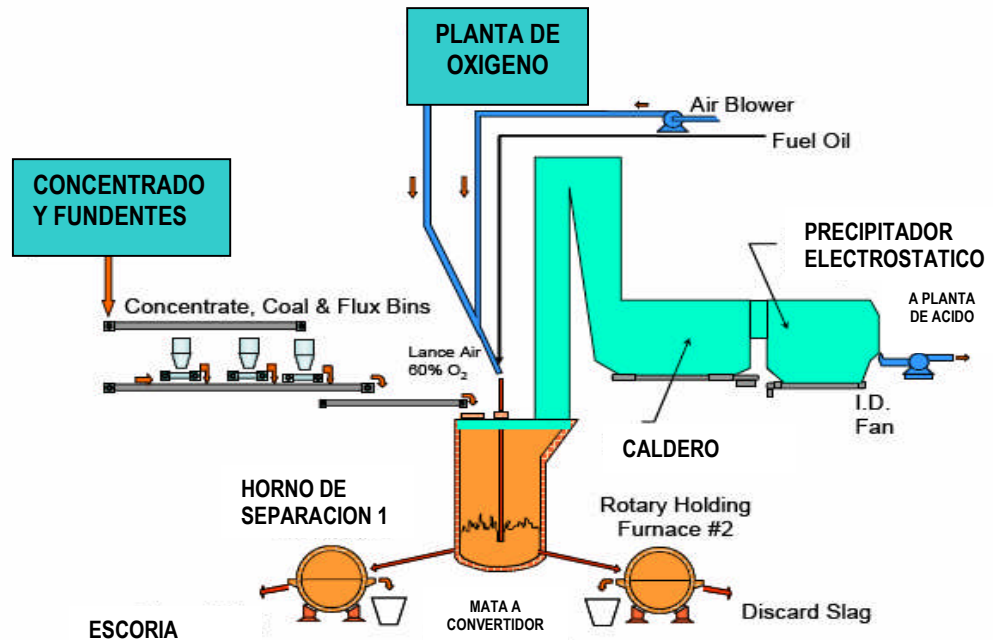


Figura 1-1 Diagrama de Flujo de la Fundición de Ilo de SPCC antes del proyecto de Modernización



## 1.2. El Proceso Isasmelt de SPCC



**Figura 1-3 Diagrama de Flujo del proceso Isasmelt de SPCC<sup>(23)</sup>**

El proceso ISASMELT es un proceso de fusión en baño de concentrados de cobre utilizando una lanza "Isasmelt". La punta de la lanza es inmersa en un baño de escoria fundida, que está contenida dentro de un horno vertical estacionario revestido interiormente con ladrillo refractario, cuyas dimensiones interiores son de 4,4 m. de diámetro y 14,6 m. de altura. A través de la lanza se inyecta aire enriquecido con oxígeno en un baño de escoria líquida, originando una alta turbulencia en el baño fundido. La carga húmeda es alimentada desde la parte superior del horno, esta cae dentro del baño turbulento y reacciona violentamente con el oxígeno inyectado por la lanza, de esta manera se consigue una alta velocidad de fusión en un volumen de baño relativamente pequeño.

El Horno Isasmelt de la Fundición de Ilo tiene una capacidad de diseño de 181,7 tph y una capacidad nominal de 165 tph de concentrados, ambas en base seca. Considerando una disponibilidad del horno de 86,5% y una duración de campaña de 2 años, al final de este periodo se realiza un paro por reparación



general de 26 días, la capacidad de fusión anual de concentrados del Horno Isasmelt es de 1 200 000 t de concentrado de cobre.

La temperatura del baño es controlada con el porcentaje de enriquecimiento y adición de petróleo diesel a través de la lanza, también adicionando carbón y material frío recirculante junto a la carga húmeda que ingresa al horno a través del sistema de alimentación. El aire de proceso que es inyectado por la lanza es enriquecido con oxígeno que varía en un rango de 60 a 65% de oxígeno. La lanza "Isasmelt" tiene un diámetro de 450 mm en su extremo inferior. La lanza es sumergida en el baño fundido a una profundidad prefijada, mediante un control automático a fin de prolongar su duración. El cambio de lanza significa una parada de la fusión de concentrados y se efectúa durante mantenimientos programados que demoran alrededor de 40 a 60 minutos.

El material fundido es retirado del Horno Isasmelt cuando este alcanza un nivel de baño de 1,9 m a través de un agujero de colada y transferido a través de canales de cobre refrigerados hacia uno de los hornos cilíndricos horizontales denominados Hornos de Separación, la colada del material fundido termina cuando el nivel llega a 1,0 m de nivel procediendo a tapar el agujero de la placa refrigerada, el material fundido es sangrado hacia los hornos de separación en forma intercalada. Estos hornos son rotatorios y en ellos se efectúa la separación de la mata y escoria, las cuales son retiradas por piqueras colocadas en lados opuestos del lado cilíndrico y de diferentes diseños, la mata se retira del fondo y la escoria de la superficie del horno, mediante la rotación adecuada de los hornos. La mata es transferida en ollas de 6,3 m<sup>3</sup> a los convertidores Peirce Smith mediante grúas puente, mientras la escoria de descarte es transportada en ollas de 20,5 m<sup>3</sup> por camiones especiales hacia los depósitos de almacenamiento.

Los gases son evacuados por la parte superior del Horno Isasmelt hacia el caldero de recuperación de calor, tras ser enfriados pasan por un precipitador electroestático de 5 campos donde se limpian de los polvos y se envían posteriormente a la cámara de mezcla donde se juntan con los gases de los convertidores para luego ser conducidos a las plantas de ácido sulfúrico 1 y 2.

### 1.2.1 El Horno Isasmelt

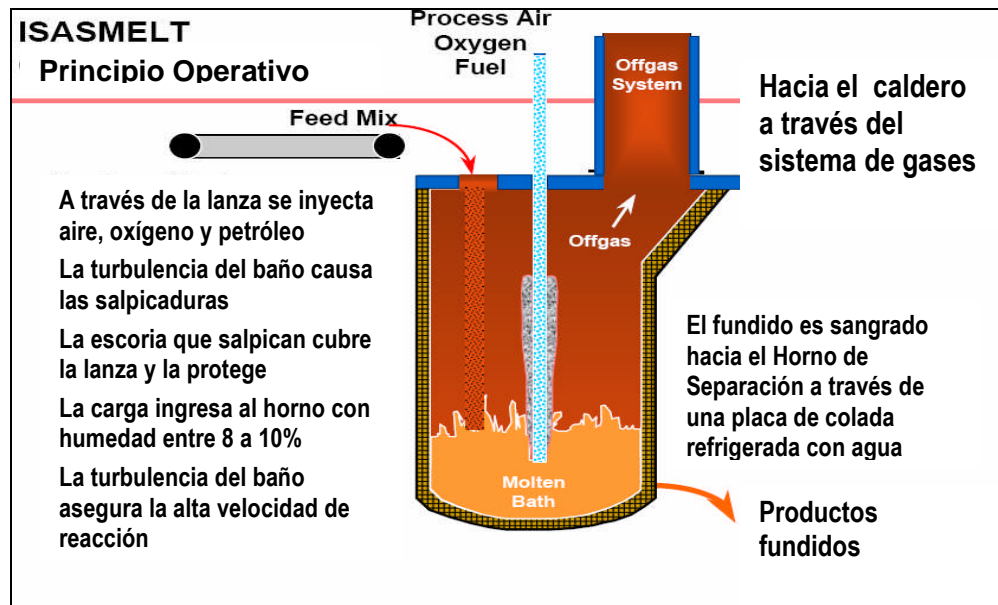


Figura 1-4 El Horno Isasmelt de SPCC<sup>(23)</sup>

El Horno Isasmelt como se muestra en la figura 1-4, es básicamente un reactor cilíndrico vertical de coraza de hierro cuya base tiene forma cóncava y esta interiormente revestido por ladrillo refractario de cromo magnesita, la parte vertical inferior tiene forma cilíndrica y la parte superior en una de las caras tiene forma cónica. La coraza de acero del Horno Isasmelt de SPCC tiene 5,5 m por 17,0 m de altura total, la instalación refractaria considera dos capas de ladrillo, una capa de ladrillo aislante que tiene un espesor de 100 mm y otra capa de ladrillo de cromo magnesita con un espesor de 450 mm la cual estará en contacto con el material fundido. Las dimensiones internas del Horno Isasmelt son: diámetro de 4,4 m y altura de 14,6 m.

El techo del horno esta construido de paneles de tubos que forman parte del caldero, este techo contiene el puerto de adición de concentrados, puerto de la lanza y la salida de gases.

Los materiales alimentados están compuestos por los concentrados de cobre de Cuajone y Toquepala con 27 % Cu en promedio, carbón, recirculante, fundentes como sílica y coquina, que previamente pasan por un mezclador de paletas donde se uniformiza la carga y se incrementa la humedad hasta 9,5 %.

Posteriormente la mezcla es alimentada por la faja a través del puerto de carga, el cual se encuentra en la parte superior del techo del horno, a un lado de la posición central tal como se observa en la figura 1-4. La preparación de la alimentación es simple a través de tolvas individuales con balanzas alimentadoras de alta precisión. El aire enriquecido entre 60-65 % y el petróleo diesel son inyectados a través de la lanza, el cual esta sumergida en el baño produciendo una alta agitación, la cual asegura una rapidez en la cinética de reacciones químicas y una buena mezcla del baño, esta agitación también ocasiona salpicaduras las que se enfrían alrededor de la lanza formando una capa protectora. El Horno Isasmelt produce un material fundido que es una mezcla de mata conteniendo aproximadamente de 62 % Cu y escoria ferro-silicatada con un contenido no mayor a 10% de magnetita.

Por la parte superior del horno salen los gases con alto contenido de dióxido de azufre y pasan a través de un caldero recuperador de calor diseñado para minimizar el arrastre de polvos gruesos, luego los gases a una menor temperatura pasan a través de un precipitador electroestático de cinco campos donde es limpiado del polvo fino, finalmente los gases limpios son procesados en las plantas de ácido sulfúrico.

La lanza "Isasmelt" es fabricada de acero refractario y tiene una longitud de 19 m con un diámetro interno de 450 mm, internamente tiene un mezclador que asegura la refrigeración de las paredes de la punta, formando una capa protectora alrededor de la misma. El sistema de izaje es manejado por un motor eléctrico que tiene un encoder y un programa en el panel de control el cual realiza una secuencia automática que controla los movimientos de subida y bajada de la lanza. La altura de la lanza con respecto a la base interior del horno se calcula en función de una referencia ubicada en el puerto de la lanza y a la posición de la lanza. Antes que la lanza baje al interior del horno se coloca la punta al mismo nivel de referencia y se presiona el botón del cero de la lanza, esto se hace cada vez que se cambie o se tenga desgaste en la punta de la lanza.

Altura de la Lanza = [15,80 – Posición de la lanza], en metros

El control de nivel de baño se hace mediante un sistema automático que censa la presión en la punta de la lanza, que indica la profundidad de la lanza dentro del baño.

Adicionalmente el Horno Isasmelt tiene un splash block refrigerado insertado al inicio de la zona cónica con el fin de disminuir las salpicaduras hacia la parte superior, también tiene dos agujeros de colada a través dos placas de cobre refrigeradas cada una con sus canales de cobre que son refrigerados con agua. La medición de la temperatura de baño se realiza a través de termocuplas instaladas dentro de un termopozo cerámico que atraviesa la pared del horno teniendo contacto con el baño líquido, dos de ellas a 0,80 m y las otras dos a 1,2 m del nivel de los baños, norte y sur respectivamente.

El grado de mata, la química de la escoria y la temperatura del baño son importantes para una operación exitosa del Horno Isasmelt.

VARIABLES DE FUSION PRE FIJADAS			
Concentrado Tolva 5 Proporcion del Total (%) In Service	40.1 t/h	33.40 %	
Concentrado Tolva 6 Proporcion del Total (%) In Service	40.0 t/h	33.30 %	
Concentrado Tolva 7 Proporcion del Total (%) In Service	40.0 t/h	33.30 %	
<b>Total Concentrado alimentado</b>	<b>120.0 t/h</b>		
<b>Coquina Flux Tolva 2</b> Tolva de alimentación (t/h) In Service	<b>0.00 t/h</b>		
<b>Silica Flux Tolva 3</b> Tolva de alimentación (t/h) In Service	<b>8.02 t/h</b>		
<b>Carbón Tolva 4</b> Tolva de alimentación (t/h) In Service	<b>1.5 t/h</b>		
<b>Frio Recirculante Tolva 5</b> Tolva de alimentación (t/h) In Service	<b>0.0 t/h</b>		
<b>Tolva de polvo recirculante</b> Tolva de alimentación (t/h) In Service	<b>0.0 t/h</b>		
			Flujo de Diesel <b>390 Lt/hr</b>
			Enriquecimiento de oxigeno <b>60.0 %</b>
			Grado de Mata <b>59 %Cu</b>
			Humedad mezcla <b>9.0 %</b>
			Capacidad de Blower <b>36,000 Nm3/hr</b>
			Capacidad de Oxigeno <b>39,000 Nm3/hr</b>
			Factor de aire (0 to 2.5) <b>1.000</b>
			Factor de silica (0 to 2.5) <b>1.000</b>
			Factor de coquina (0 to 2.5) <b>0.00</b>
			Oxigeno Requerido <b>22,727 Nm3/hr</b>
			Aire de blower Requerido <b>20,396 Nm3/hr</b>
			Requerimiento de Agua Paddle Mixer <b>38.3 Lt/mi</b>
Transferencia de las variables prefijadas como valores operativos			

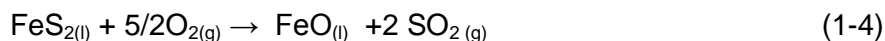
Figura 1-5 Pantalla del Sistema de Control de Procesos <sup>(23)</sup>

El flujo de aire y oxígeno alimentado es calculado por un modelo incorporado en el PCS (Panel Control System) tomando como base el grado de mata objetivo de 62%, las composiciones químicas de los concentrados y el % de enriquecimiento requerido; la alimentación de fundentes (sílica, coquina) son calculados considerando las composiciones de los concentrados y fundentes

teniendo en cuenta una relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,80 y una relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  de 6,5. Véase la figura 1-5.

Los pequeños ajustes para conseguir el grado de mata se realiza variando el factor de aire y para ajustar la calidad de la escoria se hacen en función de los factores de sílica y coquina. El control de magnetita no debe ser mayor a 10%, esto se controlará en función del factor de sílica y/o factor de aire según sea el caso.

Las reacciones principales se muestran a continuación:



### 1.2.2 Los Hornos de Separación

El Horno de Separación es básicamente un reactor cilíndrico horizontal de coraza de hierro, véase figura 1-6 (A), que interiormente esta revestido por ladrillo refractario de cromo magnesita. En el Horno de Separación de SPCC la coraza de acero tiene 4,7 m por 15,3 m de longitud total, la instalación refractaria considera hasta dos capas ladrillo aislante en la base y en el techo del horno y una capa de ladrillo de cromo magnesita que estará en contacto con el material fundido, resultando el diámetro interno del horno con 3,75 m y una longitud de 14,4 m.

El Horno de Separación esta provisto de un puerto de carga en una de las paredes no cilíndricas, véase figura 1-6 (B) por donde recibe la carga fundida del Horno Isasmelt que es una mezcla de mata y escoria, también esta provisto de dos piqueras en la zona cilíndrica con diferentes diseños para optimizar el retiro de la mata por uno de los lados y escoria el otro lado, véase figura 1-7.

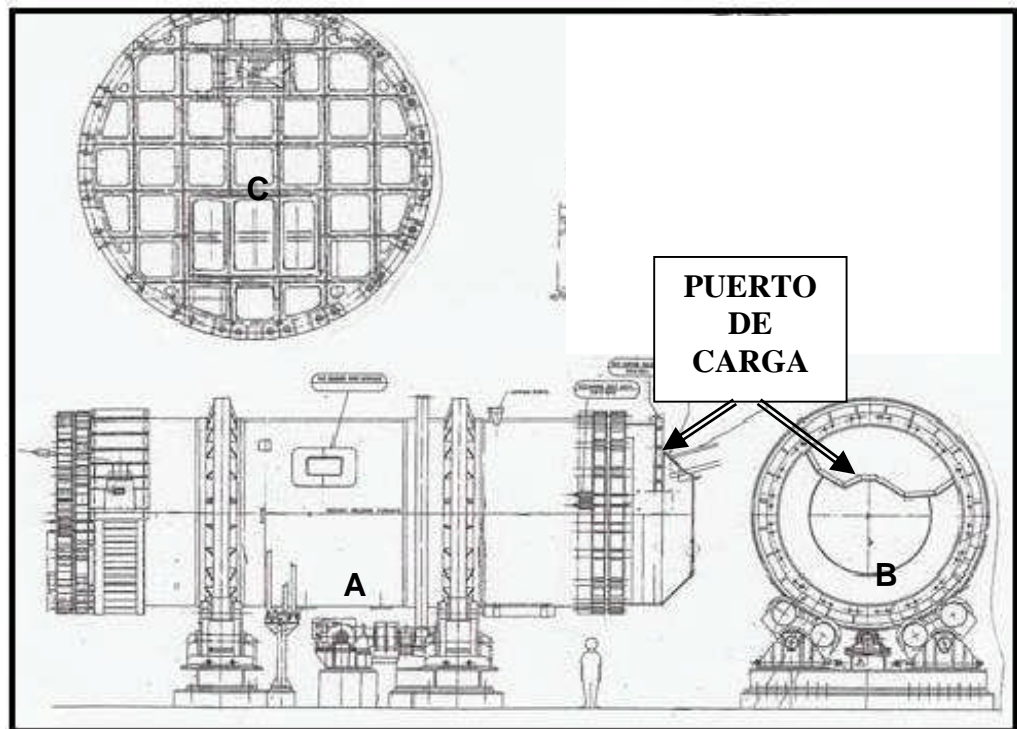


Figura 1-6 Horno de Separación de SPCC <sup>(23)</sup>

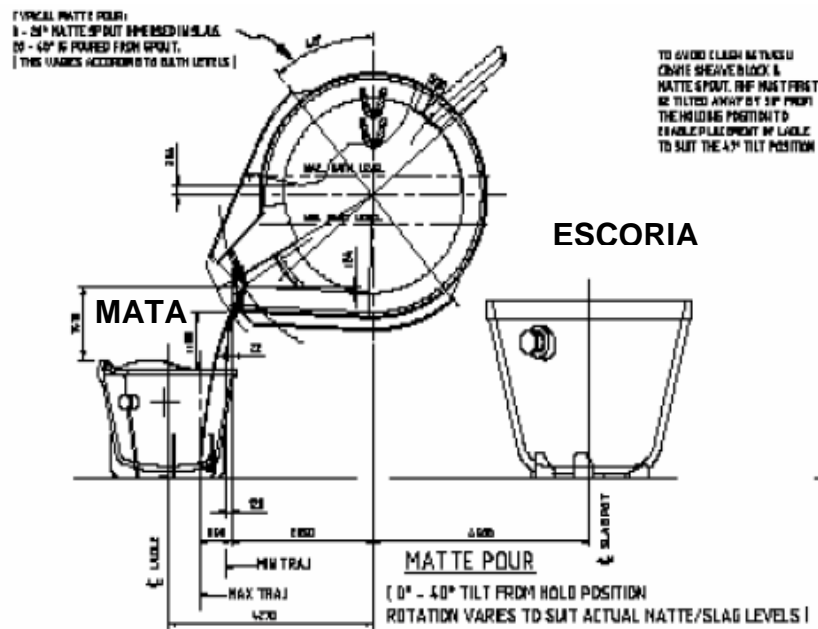
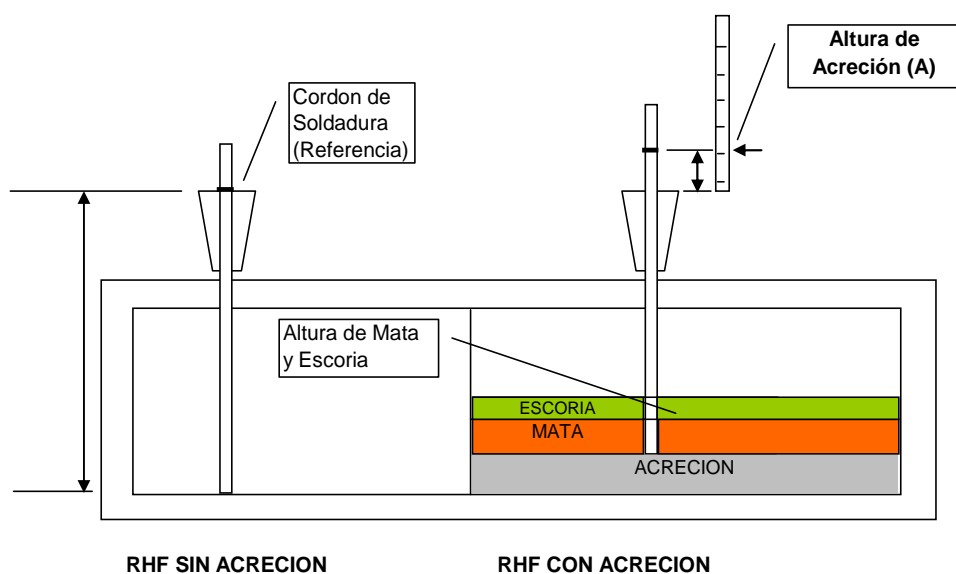


Figura 1-7 Piqueras de mata y escoria en Horno de Separación <sup>(23)</sup>

La rotación del Horno de Separación es manejada mediante un sistema hidráulico la cual mueve una cadena que esta conectada al horno a través de una cremallera instalada en el casco cilíndrico. El horno puede rotar hasta  $25^\circ$  para el lado de la escoria y hasta  $-55^\circ$  para el lado de la mata, véase figura 1-7.

La temperatura en el horno se mantiene entre  $1\ 180 - 1\ 200^\circ\text{C}$  con un quemador oxi-fuel localizado en una de las paredes no cilíndricas, véase figura 1-6 (C) y un quemador aire/petróleo en el techo. El quemador de pared entrega la mayor parte de la energía requerida y el quemador de techo asegura una mejor distribución de la temperatura a través de todo el horno. Los quemadores se atomizan con vapor saturado para asegurar una buena eficiencia de combustión y pueden utilizar como combustible petróleo R-500 ó diesel.

Los gases de combustión son retirados a través de una campana colectora que esta instalada en el puerto de carga los cuales van al sistema de higiene de gases.



**Figura 1-8 Vista del sistema de medición del Horno de Separación**

La medición de los niveles de mata, escoria y acreciones formadas en el piso se hacen a través de dos puertos de medición que son agujeros en el techo por donde ingresa una barra, la mata y escoria se pega en la barra, una vez que la barra esta en su posición fuera del horno se toman las medidas con una regla determinando los niveles de mata y escoria, el espesor de la acreción se

determina en base a la parte de la barra que no ingreso dentro del horno con respecto a una referencia en la barra que se hizo cuando el horno estaba nuevo y sin acreciones, véase figura 1-8. La medición del horno se realiza con una frecuencia de una hora por lo menos.

Para el control de los inventarios de mata y escoria se tiene en el panel de control un modelo geométrico del horno para calcular los inventarios de mata y escoria en base a los niveles medidos con la barra, véase figura 1-9.

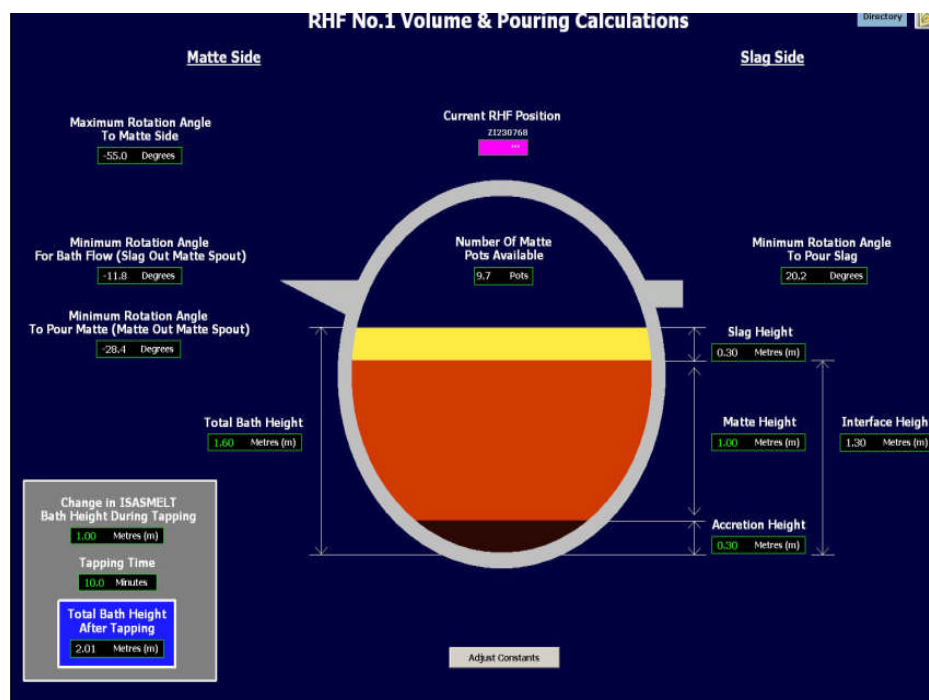


Figura 1-9 Cálculo de Inventarios de Mata y escoria <sup>(23)</sup>

La adición de hierro fundido es de 2-6 t/día y se realiza a través de 2 puertos ubicados en el techo del horno, uno de los puertos esta ubicado cerca al centro del horno y otra esta ubicado cerca de los puntos de descarga. El hierro fundido es cargado periódicamente para controlar el espesor de las acreciones en la base del horno. El hierro fundido también puede ser cargado por el puerto de carga a través del canal de colada.

Los blocks de cobre que están instalados en el puerto de carga, puerto de hierro fundido, piqueta de escoria, piqueta de mata y los blocks refractarios instalados en los quemadores de pared y techo están refrigerados con agua de refrigeración del sistema de enfriamiento.



Desde el punto de vista del proceso el horno de separación recibe una mezcla de material fundido del Horno Isasmelt, la cual esta constituida por mata y escoria que se separan en diferentes fases físicas. Esto significa que tienen diferentes propiedades físicas y químicas de las cuales la más importante es la inmiscibilidad debido a que tienen diferente densidad. Por lo tanto la mezcla de mata y escoria en un baño en reposo, se separa en dos fases la mata permanecerá en el fondo del horno y la escoria flotará encima del mismo. Algunas gotas de mata quedarán suspendidas en la fase escoria, pero si el baño esta en reposo y el horno se mantiene caliente, en un tiempo estas gotas sedimentarán, ingresando a la fase mata del baño. Este principio es conocido como "sedimentación de la escoria". De esta forma se producirá una escoria limpia y baja en cobre.

Debido a la separación de las dos fases, la escoria puede retirarse por la parte superior del baño, mientras que la mata desde el fondo del baño.

Si el baño de escoria del Horno de separación es alterado durante la sedimentación por agitación, pérdida de temperatura y composición química; entonces, el contenido de cobre en la escoria se incrementará.

Durante el escoriado la rotación del Horno de Separación debe ser lenta y progresivamente para minimizar el arrastre de cobre en la escoria. Sin embargo para el retiro de mata la rotación debe ser rápida para minimizar la presencia de escoria en la mata.

### 1.3. Variables del proceso Isasmelt

La regla de las fases determina los grados de libertad "F"; es decir, el número de variables independientes en un sistema en equilibrio de tal manera que se cumpla la relación,  $F = C - P + 2$ , donde "C" es el número de componentes del sistema y "P" es el número de fases en equilibrio.

El sistema básico durante la fusión en el Horno Isasmelt esta formado por seis componentes principales,  $C = 6$  (Cu, Fe, S, O, CaO y  $\text{SiO}_2$ ) y tres fases,  $P = 3$  (mata, escoria y gas). Entonces, de acuerdo con la regla de las fases será necesario fijar cinco variables independientes,  $F = 5$ , para especificar el equilibrio del sistema. Por razones prácticas son seleccionadas las siguientes variables:

- ✓ El contenido de cobre en la mata que depende directamente del total de oxígeno alimentado al proceso.

- ✓ El contenido de sílice en la escoria que se determina por la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  en la escoria que depende de la sílica alimentada al proceso.
- ✓ El contenido de óxido de calcio en la escoria es fijado por la relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  en la escoria que depende de la coquina alimentada al proceso.
- ✓ La presión parcial del anhídrido sulfuroso o  $P_{\text{SO}_2}$  que está dado por el contenido de  $\text{SO}_2$  en los gases evacuados depende del % de enriquecimiento de oxígeno.
- ✓ La temperatura del sistema.

#### 1.4. Descripción del problema

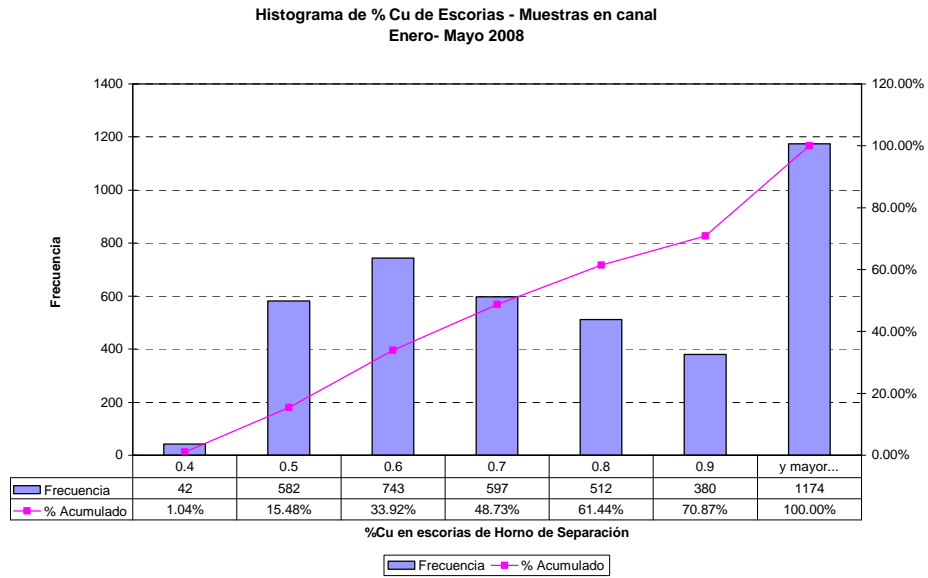
En la tabla 1-1 se muestra el resultado estadístico de los análisis químicos de las escoria donde se observa que el contenido de cobre en la escoria esta por encima de 0,7% de Cu. En la figura 1-10 se muestra la frecuencia acumulada del % de Cu obtenidos en las muestras de canal entre los meses de Enero a Mayo del 2008, la frecuencia de las pérdidas menores a 0,7% de Cu alcanza solo el 48.93% del total de muestras.

**Tabla 1-1: Análisis químico de escoria del Horno de Separación**

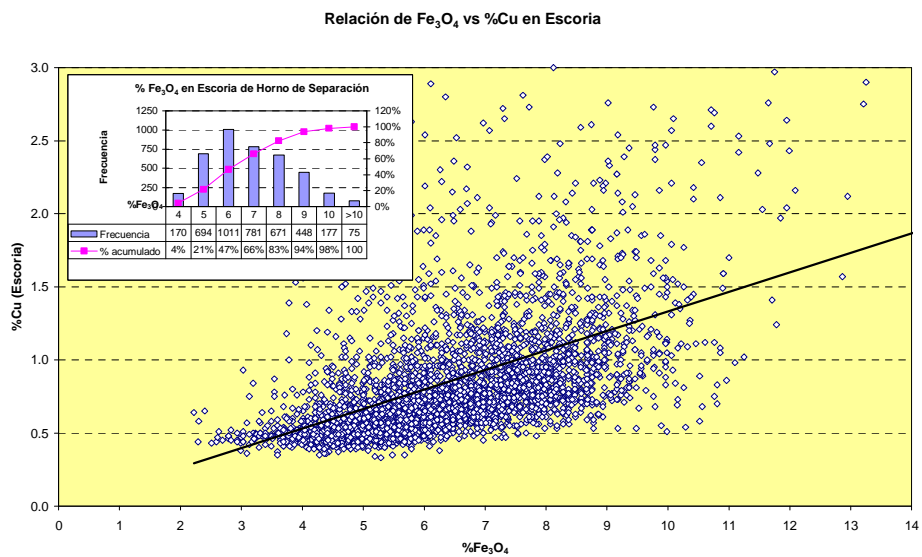
Componentes	Promedio <sup>(*)</sup> (%)	Mínimo <sup>(*)</sup> (%)	Máximo <sup>(*)</sup> (%)	Proyecto (%)
<b>Cu</b>	<b>0,85±0,49</b>	<b>0,33</b>	<b>6,87</b>	<b>0,7</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>32,0±1,2</b>	<b>37,1</b>	<b>26,0</b>	<b>34,3</b>
<b>Fe</b>	<b>38,8±1,2</b>	<b>43,4</b>	<b>30,5</b>	<b>38,9</b>
<b>FeO</b>	<b>44,0±2,5</b>	<b>50,0</b>	<b>31,7</b>	
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	<b>6,4±1,7</b>	<b>2,2</b>	<b>14,4</b>	<b>8,50</b>
<b>CaO</b>	<b>4,2±0,4</b>	<b>2,8</b>	<b>5,9</b>	<b>4,9</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>5,4±1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>12,2</b>	
<b>SiO<sub>2</sub>/Fe</b>	<b>0,83±0,04</b>	<b>0,67</b>	<b>0,97</b>	<b>0,90</b>
<b>SiO<sub>2</sub>/CaO</b>	<b>7,7±0,78</b>	<b>5,38</b>	<b>10,28</b>	<b>7,00</b>

(\*) Análisis Estadístico de mes de Enero – Mayo 08.

Fuente: Laboratorio Metalúrgico de Fundición SPCC



**Figura 1-10 Porcentaje de Cobre en escorias de los Hornos de Separación**



**Figura 1 -11 Contenido de magnetita y porcentaje de cobre en escoria**

En la figura 1-11 se muestra el efecto que tiene el contenido de magnetita de la escoria en el contenido de cobre de la escoria, también se muestra la frecuencia de las variaciones de los contenidos de  $Fe_3O_4$ .

### **1.5. Justificación del Trabajo de Tesis**

El contenido de cobre en la escoria de los hornos de separación tiene una alta desviación estándar y se encuentra por encima de lo esperado de acuerdo al diseño del proyecto, tal como se muestra en la tabla 1-1 de la página 27, lo cual constituye una preocupación para el proceso en la Fundición de Ilo, debido a que la totalidad de la escoria de los Hornos de Separación es de descarte las cuales son almacenadas en los depósitos correspondientes.

Con el diseño actual de la Fundición existe dificultad en reprocesar escorias con alto contenido de cobre debido a que los convertidores Peirce Smith procesan matas de alto porcentaje de cobre (62%) y no hay suficiente energía para el reprocesamiento de material frío, lo que se constituye en pérdida económica cuando hay un contenido de cobre en las escorias mayor al diseño.

Teóricamente se ha determinado que las pérdidas de cobre pueden ser dividido en dos grupos principales: pérdidas mecánicas y pérdidas físico químicas.

Las pérdidas mecánicas dependen principalmente del tiempo de sedimentación que es función de las densidades y viscosidad. Por otro lado las pérdidas físico químicas se presentan como la disolución de sulfuro de cobre y de óxido de cobre que dependen directamente del porcentaje de cobre de la mata y de la temperatura.

Las consideraciones delineadas en los párrafos precedentes enfatizan la importancia de una investigación minuciosa de los factores que afectan la alta desviación estándar en los contenidos de cobre de las escorias de los hornos de Separación de Southern Peru Copper Corporation.

### **1.6. Objetivos del Trabajo de Tesis**

#### **Objetivo General**

Estudiar la interrelación de las variables de proceso que determinan el contenido de cobre en las escorias de los Hornos de Separación de Southern Peru Copper Corporation (SPCC).

### **Objetivos Específicos**

- ◆ Determinar las pérdidas físico químicas de cobre de equilibrio esperadas en función del grado de mata y temperatura.
- ◆ Estudiar las variaciones de viscosidad por efecto de temperatura, composición de escoria, relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  y contenido de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en la escoria de los Hornos de Separación.
- ◆ Determinar las pérdidas de cobre mecánicas esperadas y analizar el efecto de la viscosidad y el tiempo de sedimentación.
- ◆ Investigar el efecto de la calidad de la Sílica en el proceso del Horno Isasmelt para el control de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y su efecto en las pérdidas de cobre y también su efecto en la composición de escoria de los Hornos de Separación.
- ◆ Identificar las causas operativas que ocasionan una mayor pérdida de cobre en la escoria de los Hornos de separación.
- ◆ Determinar los parámetros operativos que determinan los contenidos de cobre en la escoria menores a 0,7%.

### **1.7. Hipótesis de Trabajo**

- Es posible disminuir las pérdidas de cobre (origen mecánico) en las escoria de los Hornos de Separación controlando la viscosidad de la escoria en base a composición de escoria y temperatura de operación; es decir, a las relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  y contenido de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .
- La calidad del fundente sílica influye directamente en el control de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  del Horno Isasmelt y por ende en la calidad de la escoria del Horno de Separación afectando grandemente la viscosidad por variaciones en la relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  y  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ .

## Capítulo II

### Marco teórico de referencia

#### 2.1. Antecedentes teóricos

##### 2.1.1. Introducción

Las escorias fayalíticas de fundición se forman a partir de óxidos de la carga al horno y de los óxidos formados durante la oxidación en la etapa de fusión-conversión. Las escorias contienen:

Fe (como FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y en menores cantidades MgO y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

“El secreto de la extracción de cobre desde concentrados de cobre no es producir cobre sino es como producir una buena escoria<sup>[8]</sup>”

Las características de una buena escoria deben ser:

- Inmiscibles con la fase mata
- Baja temperatura de fusión
- Baja disolución de cobre
- Baja densidad y baja viscosidad, es decir la escoria debe ser fácilmente manejable durante el proceso; esto es, debe existir una correlación entre baja densidad y una buena fluidez.

##### 2.1.2. Sistema Binario FeO-SiO<sub>2</sub>

El sistema binario proporciona la idea más fundamental de la composición de la escoria en la pirometalurgia del cobre. Hay un rango bastante ancho cercano a la fayalita (2FeO.SiO<sub>2</sub>) en el diagrama de fase binario mostrado en la figura 2-1. En la tabla 2-1 se muestran la composición química de las fronteras de la fayalita.

**Tabla 2-1. Composiciones químicas de las fronteras de la Fayalita**

Frontera	FeO	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Fe
Fayalita- Tridimita	62,0	38,0	0,79
Fayalita (2FeO.SiO <sub>2</sub> )	70,5	29,5	0,54
Wustita-Fayalita	76,0	24,0	0,41

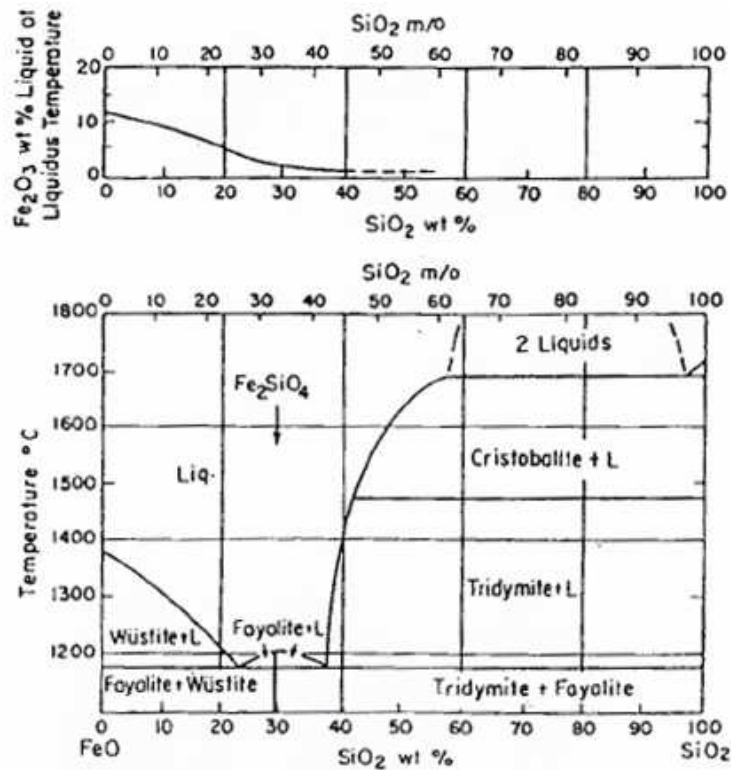


Figura 2-1 Diagrama de fases FeO – SiO<sub>2</sub> en contacto con hierro metálico. Se muestra el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el líquido<sup>[13]</sup>.

### 2.1.3. Sistema Ternario FeO- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

La figura 2-2 muestra la superficie líquida ABCD del sistema ternario FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, también muestra las termo isóbaras y las isóbaras de presión de oxígeno en equilibrio.

La región ABCD determina el rango de composición dentro del cual las escorias son completamente líquidas a las temperaturas normales de fusión; es decir, a 1 200°C. Esta zona de escorias líquidas está limitada por cuatro regiones de saturación de fases sólidas, de las cuales la saturación con hierro sólido (BC) y saturación con FeO (CD), no se observan en los hornos de fusión conversión, debido al bajo potencial de oxígeno que no se logra conseguir y al contenido de sílice de las escorias industriales. La línea AB que representa la saturación con

sílice es de gran importancia, puesto que la separación óptima entre mata y escoria se obtiene bajo condiciones cercanas a la saturación. En la figura 2-2 se muestra que el contenido de sílice en la escoria requerido para la saturación varía entre 35-40%  $\text{SiO}_2$ , esto es válido para los análisis normalizados en este diagrama. Otro aspecto de gran importancia es la línea de saturación con magnetita sólida (AD). La posición del límite indica que la magnetita sólida será una fase de equilibrio cuando la presión de oxígeno de los gases del horno es mayor a  $10^{-9}$  atm (punto C) o  $10^{-8}$  atm a la saturación con sílice (punto D).

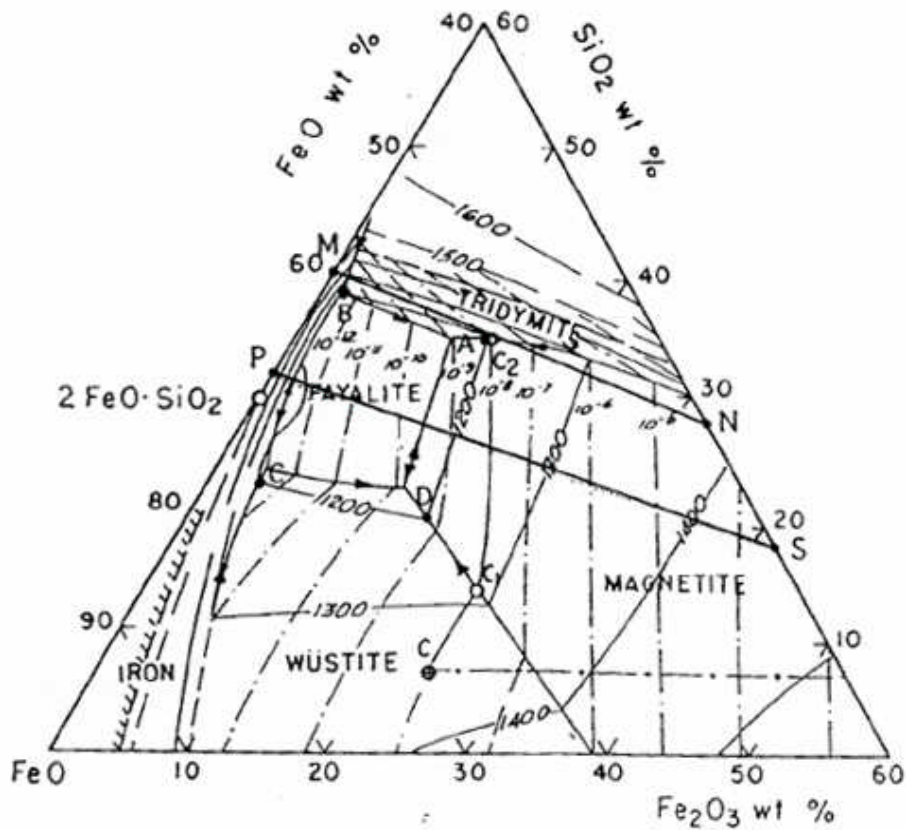


Figura 2-2 Diagrama de fases del Sistema FeO- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiO<sub>2</sub> e isóbaras de presión de oxígeno<sup>[13]</sup>



### 2.1.4. Sistema Ternario CaO- "FeO"-SiO<sub>2</sub>

La investigación de este sistema ternario fue realizada por primera vez por Bowen quien investigó para la región de alta sílice. Allen y Snow investigaron para la región de baja sílice. Después Muan y Osborn construyeron el diagrama completo en base a data experimental. El estudio del sistema consideró que todo el hierro estaba dado como FeO, el cual actualmente representa la mezcla FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La figura 2-3 muestra la superficie líquida ABC, esta zona tiene un punto de fusión alrededor de 1 150°C. La adición de CaO al sistema FeO-SiO<sub>2</sub> aparentemente disminuye la temperatura de fusión.

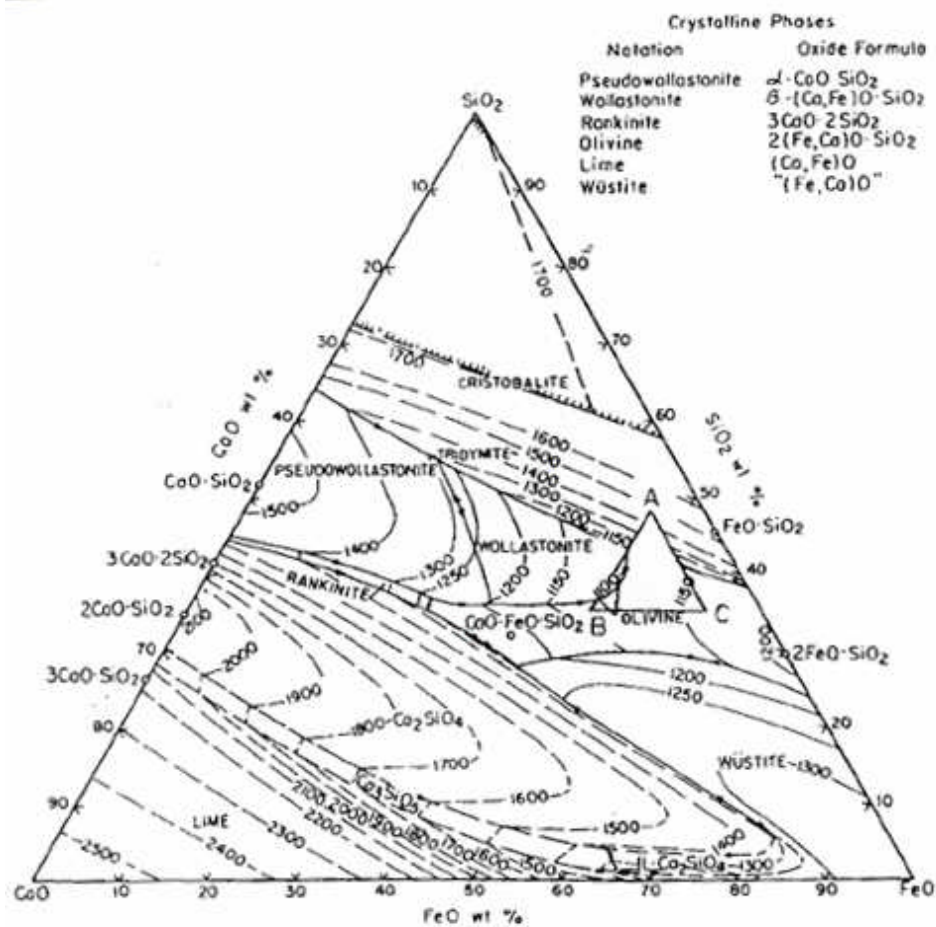


Figura 2-3 Diagrama de Fases del sistema CaO-FeO-SiO<sub>2</sub><sup>[13]</sup>

### 2.1.5. Sistema Ternario "FeO"- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$

El sistema "FeO"-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ , en equilibrio con hierro metálico ha sido estudiado por varios investigadores. El resultado ha sido usado para evaluar el efecto de la adición de alúmina en la temperatura de escorias fayalíticas. Similar al caso anterior, el estudio considero que todo el hierro esta dado como FeO. La figura 2-4 muestra la superficie triangular con un una temperatura de fusión de 1 150°C muy cerca de la región de la fayalita.

La  $\text{Al}_2\text{O}_3$  existente disminuye la temperatura de fusión para contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menores a 12%, sin embargo es un elemento no favorable porque incrementa considerablemente la viscosidad.

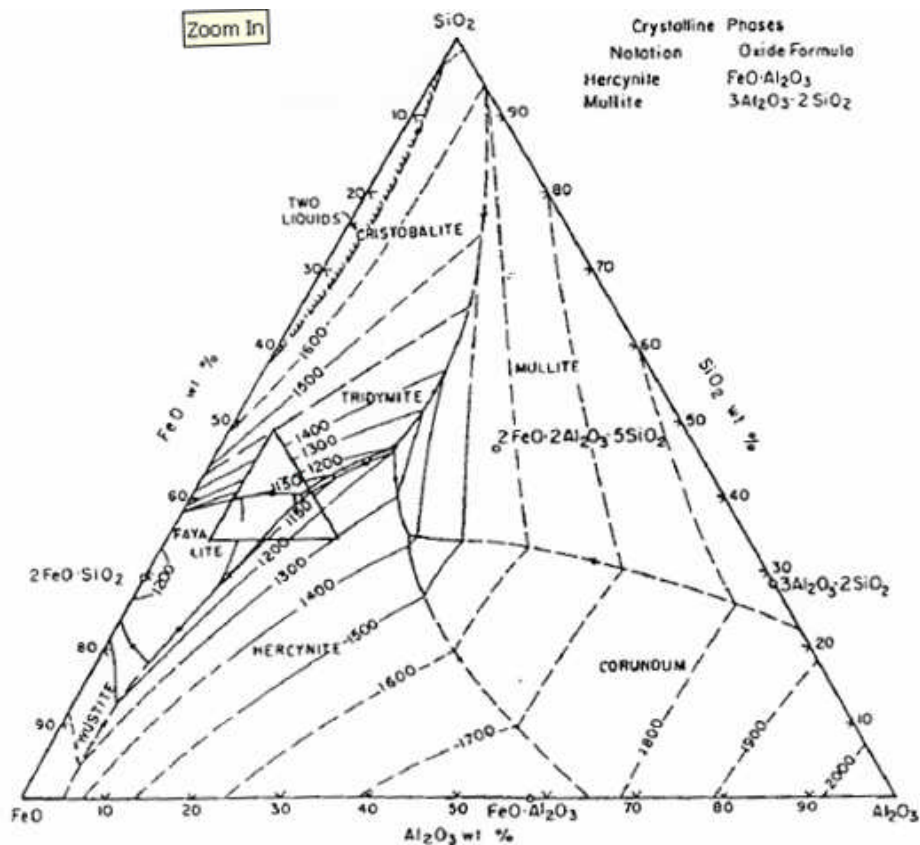


Figura 2-4 Diagrama de fases del sistema  $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  [13]

### 2.1.6. Comportamiento Sulfuro - Óxido

La separación de mata y escoria se obtiene por la adición de  $\text{SiO}_2$ , explicado mediante el sistema  $\text{FeO-FeS-SiO}_2$ . El  $\text{FeO}$  y  $\text{FeS}$  son miscibles en un amplio rango de composición sin la presencia de  $\text{SiO}_2$ ; es decir, sino hay  $\text{SiO}_2$  en el sistema sulfuro-óxido es en gran parte una sola fase y no es posible ninguna separación mata-escoria. (Véase figura 2-5).

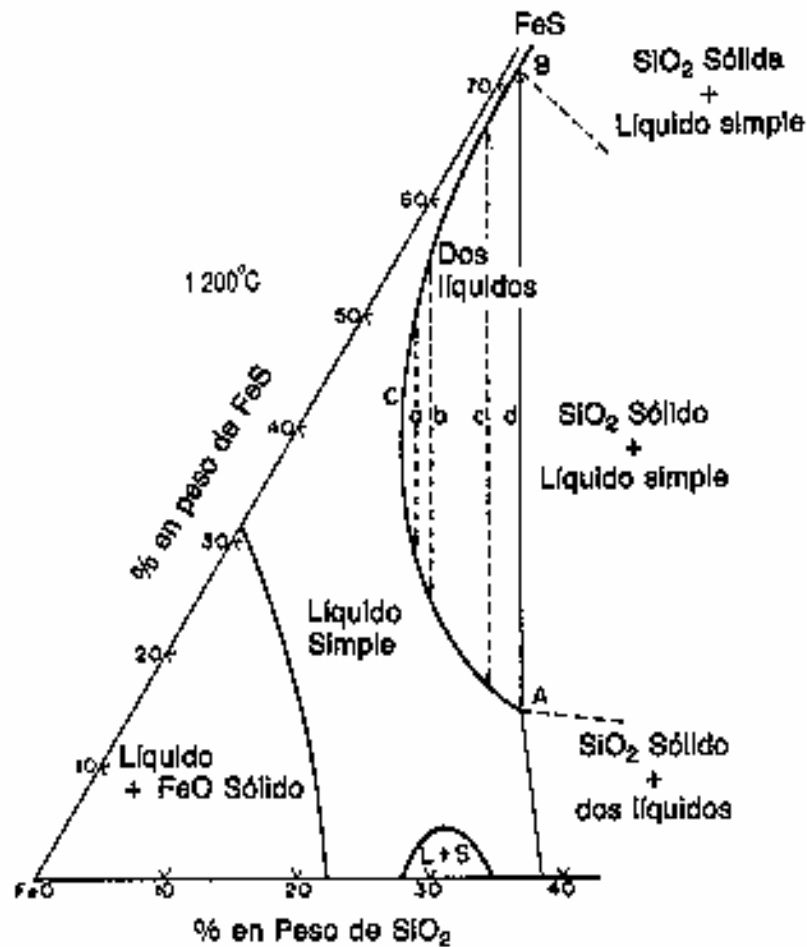


Figura 2-5 Diagrama de fases  $\text{FeO-SiO}_2\text{-FeS}$  a  $1200^\circ\text{C}$   
(Toguri y colaboradores, 1964)<sup>[25]</sup>

La adición de  $\text{SiO}_2$  causa un fundido de oxisulfuro que se separa en dos fases inmiscibles, una primera fase fundida rica en sulfuros y otra fase fundida rica en óxidos descrita por las líneas conjugadas a, b, c y d en la curva ACB de la figura 2-5. Los puntos A y B son puntos saturados con  $\text{SiO}_2$  y sus composiciones son mostradas en la tabla 2-2.

**Tabla 2-2 Composición de líquidos inmiscibles saturados con  $\text{SiO}_2$  en el sistema  $\text{FeS-FeO-SiO}_2$  a 1 200°C<sup>[25]</sup>**

	<b>FeO</b>	<b>FeS</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub>/Fe</b>
A (Escoria)	54,82	17,90	27,28	0,65
B (Mata)	27,42	72,42	0,16	-

Sin embargo, el sistema cuaternario  $\text{Cu}_2\text{S-FeS-FeO-SiO}_2$  es más interesante, en él sucede el mismo fenómeno de separación. Aún más, la separación de mata escoria es mucho mejor que en el sistema ternario  $\text{FeS-FeO-SiO}_2$ , como se muestra en la tabla 2-3.

**Tabla 2-3 Composición de líquidos inmiscibles saturados con  $\text{SiO}_2$  en el sistema cuaternario  $\text{Cu}_2\text{S-FeO-FeS-SiO}_2$  a 1 200°C**

	<b>FeO</b>	<b>FeS</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Cu<sub>2</sub>S</b>	<b>SiO<sub>2</sub>/Fe</b>
(Escoria)	57,73	7,59	33,83	0,85	0,75
(Mata)	14,92	54,69	0,25	30,14	-

### 2.1.7. Densidad de Escorias Fayalíticas

La densidad de la escoria disminuye con el incremento de  $\text{SiO}_2$  tal como se muestra en la figura 2-6.

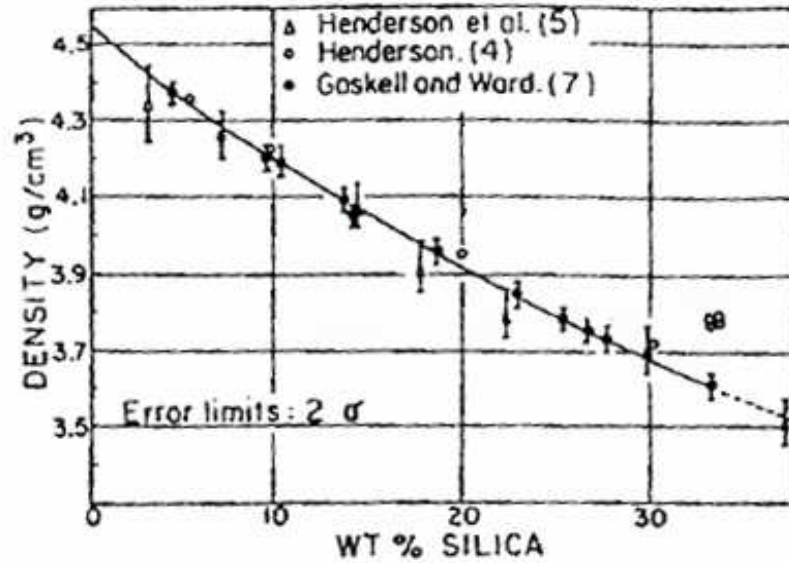


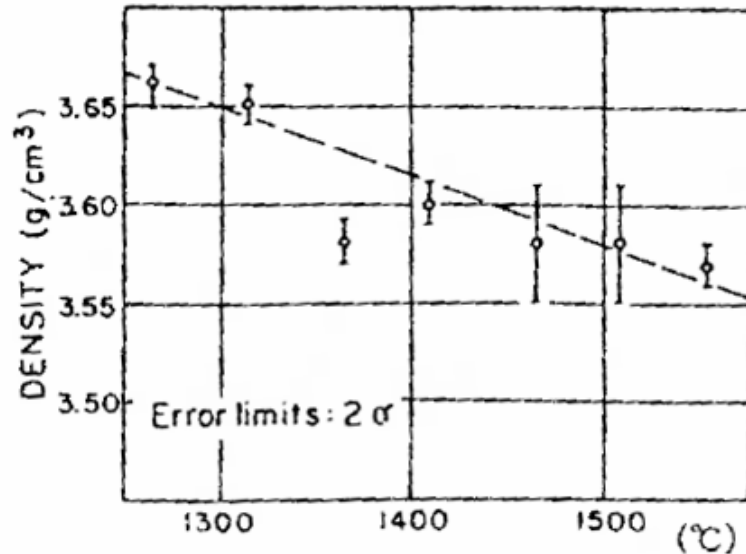
Figura 2-6 Relación de Densidad y composición de escoria de silicatos de hierro en contacto con hierro sólido a 1410°C<sup>[13]</sup>.

Los constituyentes comunes en las escorias son los óxidos, en la tabla 2-4 se muestran las densidades de los óxidos puros.

Tabla 2-4 Densidades de Óxidos Puros<sup>[13]</sup>

Óxidos	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)
FeO	4,6	1 400
SiO <sub>2</sub>	2,1	1 935
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	2 030
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,0-5,5 (sólido)	1 597

Usualmente, la densidad disminuye con la adición de materiales de menor densidad y con el incremento de la temperatura, como muestra la figura 2-7.



**Figura 2-7 Relación de Densidad y Temperatura del líquido  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ <sup>[13]</sup>.**

### 2.1.8. Viscosidad de Escorias Fayalíticas

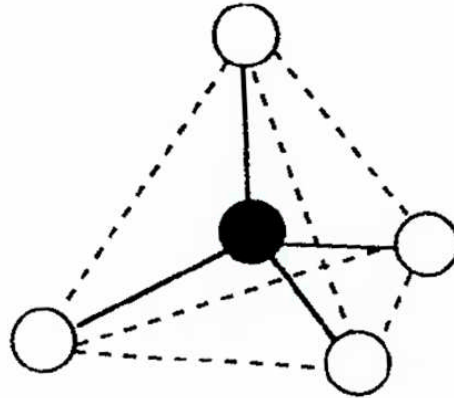
Hay dos factores que afectan la viscosidad de la escoria. Uno de ellos es la alta viscosidad debido a los óxidos ácidos y el otro, por el alto punto de fusión. La  $\text{SiO}_2$  es típicamente un óxido ácido y a mayor presión parcial de oxígeno la escoria tendrá un mayor punto de fusión, como se muestra en la figura 2-2.

Uno de los puntos débiles de la  $\text{SiO}_2$  como fundente es su alta viscosidad. La estructura de la sílice es un tetraedro, constituido por cuatro átomos de oxígeno rodeando a un átomo de silicio, tal como se muestra en la figura 2-8.

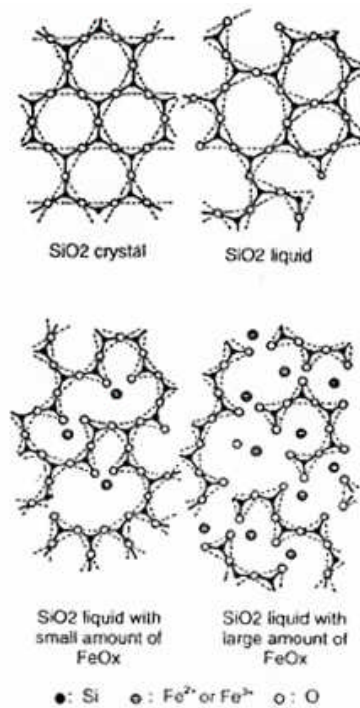
En cada esquina del tetraedro se encuentra un átomo de oxígeno que es compartido por dos tetraedros.

En la  $\text{SiO}_2$  fundida, algunos de estos enlaces en los átomos de oxígeno son rotos, pero todavía la red permanece íntimamente enlazada, teniendo muy alta viscosidad. Por la estructura de red que forma la  $\text{SiO}_2$  se le llama un óxido ácido o formador de red. Por otro lado un óxido básico es un rompedor de red, entre estos óxidos básicos se pueden citar al  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  que ayudan a romper las redes

de la  $\text{SiO}_2$ . Si se adicionan mas óxidos básicos la estructura se rompe en pequeñas unidades con una disminución notable de la viscosidad, (véase figura 2-9).



**Figura 2-8 Estructura Tetraedro de la  $\text{SiO}_2$**



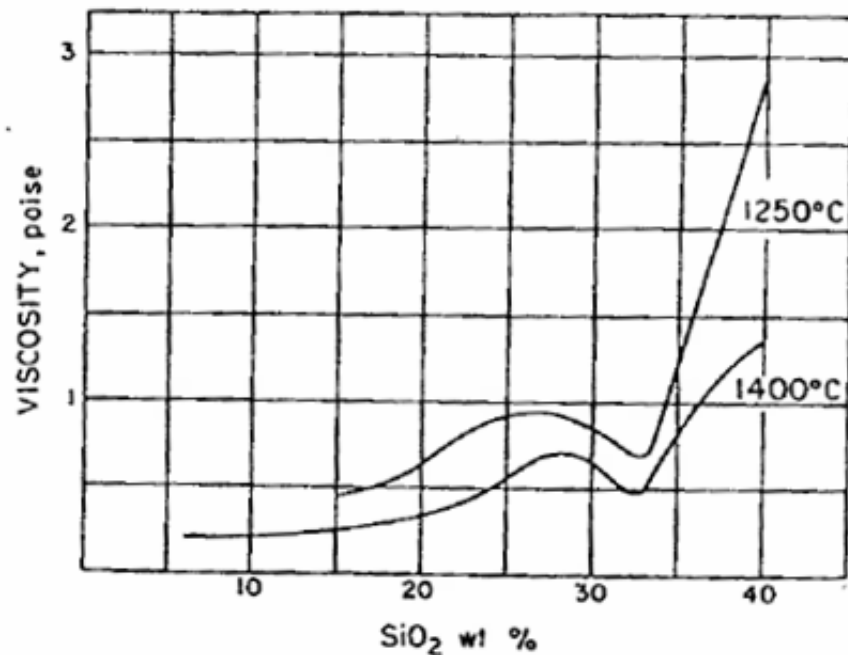
**Figura 2-9 Estructura típica de la  $\text{SiO}_2$  la cual se rompe con los óxidos básicos<sup>[13]</sup>.**

En la tabla 2-5 se muestra la alta viscosidad de la  $\text{SiO}_2$  comparada con los otros componentes de la escoria.

**Tabla 2-5 Viscosidad de óxidos puros<sup>[13]</sup>**

Óxidos	Temperatura (°C)	Viscosidad (poise)
$\text{SiO}_2$	2 000	$5 \times 10^7$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2 100	0,5
CaO	Cerca al punto de fusión	< 0,5
FeO	1 400	0,2

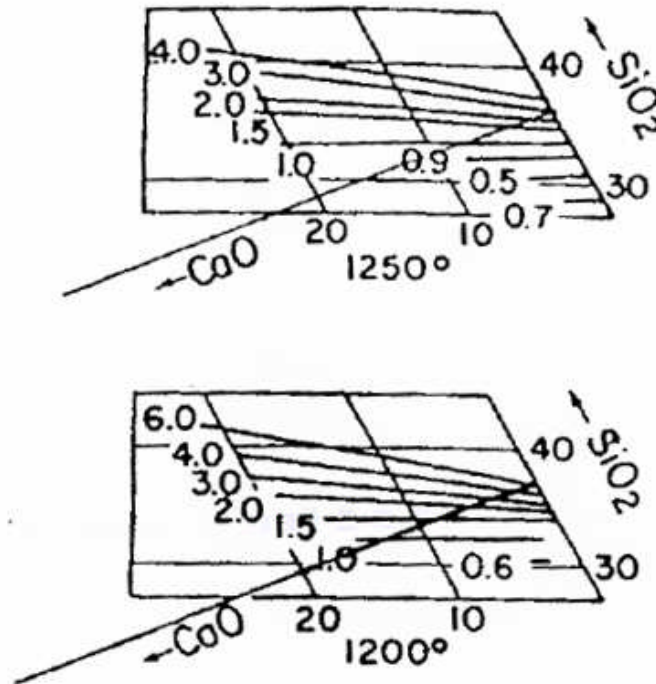
La figura 2-10 muestra el incremento de la viscosidad cuando se incrementa el contenido de  $\text{SiO}_2$  en las escorias Fayalíticas.



**Figura 2-10 Isotermas de Viscosidad para el sistema  $\text{SiO}_2$ -FeO en contacto con hierro sólido<sup>[13]</sup>.**

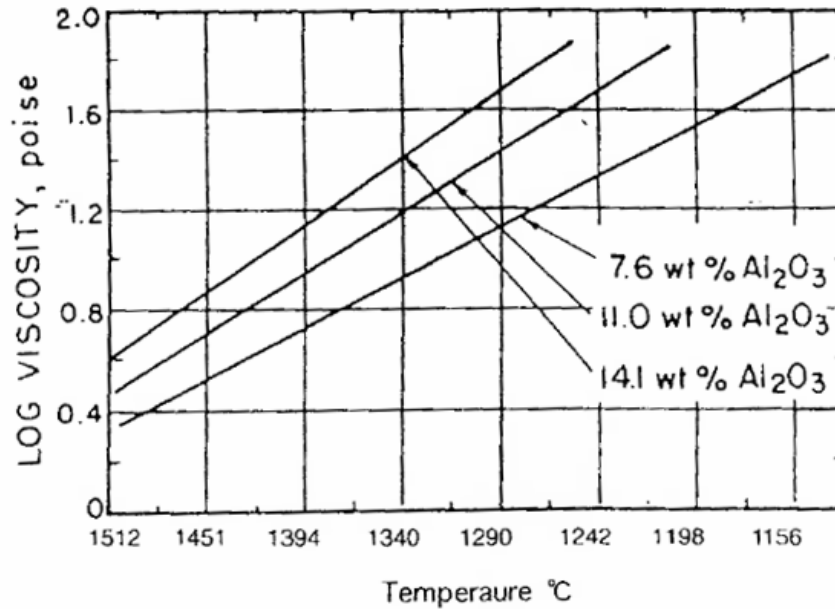


El CaO disminuye la viscosidad de las escoria fayalíticas tal como se puede observar en la figura 2-11 a 1 200 y 1 250 °C.



**Figura 2-11 Líneas de Isoviscosidad (poise) y efecto de CaO en la viscosidad en el sistema CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>**

La alúmina incrementa notablemente la viscosidad. Esta relación fue confirmada en las escorias de la Fundición de Naoshima tal como se muestra en las figuras 2-12 y 2-13, respectivamente.

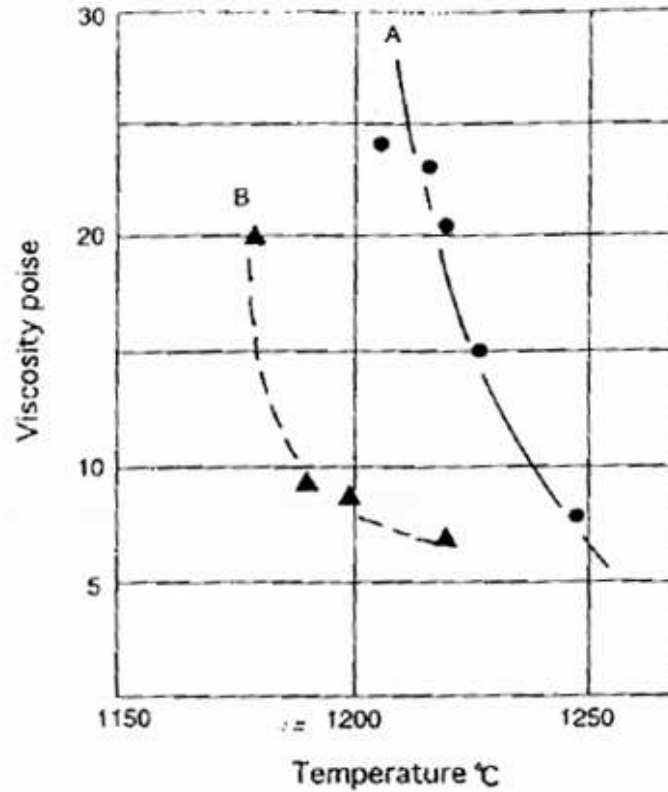


**Figura 2-12 Influencia de la Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la viscosidad de escorias. Escoria estándar: SiO<sub>2</sub> 41,8%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 7,6% CaO 25,3%, FeO 25,3%, % wt.**

**Tabla 2-6. Composición de escorias de figura 2-13<sup>[8]</sup>**

	SiO <sub>2</sub>	Fe	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Escoria A	28,9	42,6	3,8	6,6
Escoria B	29,3	43,8	3,7	3,8

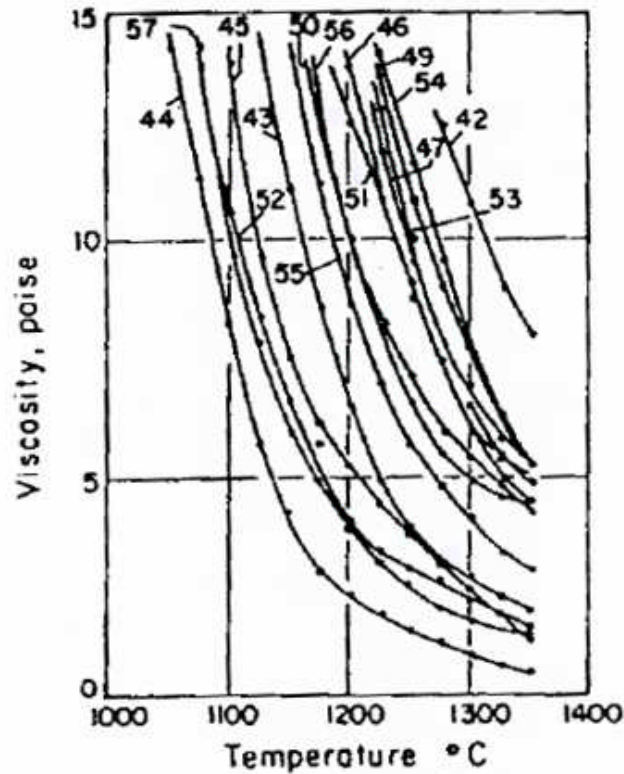
En la tabla 2-6 se muestra los datos de composición de escoria utilizados en el gráfico de la figura 2-13, a las que se determinaron experimentalmente sus viscosidades.



**Figura 2-13 Efecto de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en la viscosidad en escoria del Horno de limpieza de la Fundición de Naoshima<sup>[13]</sup>**

La alúmina es una de las mayores gangas que contienen los concentrados de cobre y los fundentes como la sílica roca. El comportamiento del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es conocido por los cambios que produce en las características de la escoria, es un anfótero que se comporta como un formador o rompedor de redes de acuerdo a la composición de la escoria.

En la figura 2-14 se muestra el efecto de la temperatura en la viscosidad de escorias industriales típicas provenientes de un Horno Reverbero.



**Figura 2-14 Efecto de la temperatura en la viscosidad de escorias de la industria del cobre<sup>[13]</sup>**

## 2.2. Fundamentos teóricos

Al tratar el tema de las pérdidas de cobre en las escorias debe distinguirse entre el cobre que está en la forma de gotas de mata ó metal suspendido en la escoria (mecánicamente atrapado) y aquel que se encuentra disuelto en la escoria líquida, como de iones Cobre(I).

El cobre suspendido (mecánicamente atrapado) puede sedimentarse si se le da suficiente tiempo para que ello ocurra, lo que depende de la velocidad de sedimentación y esta a su vez de la viscosidad de la escoria, densidad de la mata, densidad de la escoria y del tamaño de gota que sedimenta.

Teniendo en consideración, tanto la forma sulfurada como la oxidada, el cobre disuelto tiene un valor de equilibrio metal - escoria y depende de las

condiciones físico químicas que caracterizan a los sistema involucrados y ha sus diagramas de fases. Las variables físico químicas más importantes son: el grado de mata, composición de la escoria, el potencial de oxígeno y azufre en el sistema y la temperatura.

Siendo determinadas por los equilibrios propios del sistema, las pérdidas de cobre soluble representan un mínimo inevitable en cualquier proceso.

En general, las pérdidas de cobre en la escoria pueden ser divididas en dos grupos principales: Pérdidas mecánicas y pérdidas fisicoquímicas.

### 2.2.1. Pérdidas mecánicas de cobre

El cobre suspendido en forma de gotas de mata o  $\text{Cu}_2\text{S}$  atrapadas mecánicamente, en las inclusiones de mata constituye una fracción importante de la pérdida total del cobre en la escoria. Trabajos experimentales y estudios industriales han estimado que el cobre atrapado mecánicamente puede variar entre el 65 al 80 % del total de pérdidas de cobre en la escoria.

#### 2.2.1.1. Ley de Stokes

La velocidad de separación de mata de la escoria depende de ciertos factores físicos tales como la viscosidad de la escoria, la diferencia de densidades entre la mata y escoria y el tamaño de partículas de mata. Al tenerse gotas de mata o de  $\text{Cu}_2\text{S}$  en suspensión en la fase escoria ellas sedimentaran de acuerdo a la ley de Stokes:

$$U = \frac{g \cdot D^2 \cdot (\rho_m - \rho_{esc})}{18\eta} \quad (2-1)$$

Donde: U es la velocidad de sedimentación (cm/seg), g es la aceleración de la gravedad ( $980,6 \text{ cm/seg}^2$ ),  $\rho_m$  es la densidad de la gota de mata ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_{esc}$  es la densidad de la escoria ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\eta$  es la viscosidad de la escoria líquida (Poise) y, D es el diámetro de la gota de mata (cm).

Spira y Themelis aseveran que las gotas de metal suspendidas en la escoria que se detectan en la escorias solidificadas presentan diámetros entre 5 y 100  $\mu\text{m}$ .

La viscosidad de la escoria se puede considerar igual a 100 cP ó 1 Poise. La densidad de la mata de 40% Cu es  $4,3 \text{ g/cm}^3$  y la de la escoria es  $3,4 \text{ gr/cm}^3$ . La capa de escoria a través de la cual deben sedimentar las partículas se puede suponer de 50 cm.

**Tabla 2-7 Tiempo de sedimentación de gotas de mata a través de una capa de escoria de 50 cm**

D( $\mu\text{m}$ )	D(mm)	$\eta = 500 \text{ cP}$ , t (min)	$\eta = 100 \text{ cP}$ , t (min)
5	0,005	339 928	67 985
20	0,02	21 245	4 249
100	0,1	849,8	170
200	0,2	212,5	42,5
1000	1,0	8,5	1,7

Como se observa en la tabla 2-7, se puede confirmar que para una gota de 1 mm de diámetro, el tiempo de sedimentación en un espesor de escoria de 50 cm estará en un rango de 1,7 a 8,5 minutos para una viscosidad de escoria entre 5 y 1 Poises, respectivamente; de allí la importancia del factor viscosidad.

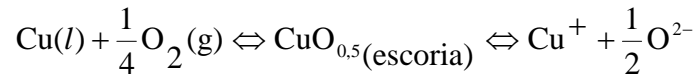
### 2.2.2. Pérdidas Físico Químicas de cobre

La disolución de cobre en las escorias se produce debido a la solubilidad parcial entre las fases presentes. Se sabe que el  $\text{Cu}_2\text{S}$  es soluble en  $\text{FeO}$  líquido (véase Tabla 2-3). Sin embargo, la presencia de  $\text{SiO}_2$  en la escoria produce la inmiscibilidad mata – escoria por lo que es muy importante el uso de este fundente en una composición adecuada para evitar la disolución de cobre en la forma sulfurada.

Por otra parte, el  $\text{Cu}_2\text{O}$  es bastante soluble en escorias fayalíticas y están determinadas por las condiciones de oxidación del baño.

### 2.2.2.1. Solubilidad de cobre en escorias

Para estudiar la solubilidad del cobre en la forma óxido, basta considerar un equilibrio metal-escoria, en el que se tendrá la reacción de disolución indicada; se debe tener en cuenta esta reacción para el cálculo de la actividad del cobre.



$$K = \frac{a_{\text{CuO}_{0,5}}}{a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}} = \frac{\gamma_{\text{CuO}_{0,5}} \cdot X_{\text{CuO}_{0,5}}}{a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}$$

Por lo que la solubilidad, en la forma de fracción molar del óxido de cobre está dada por:

$$X_{\text{CuO}_{0,5}} = \frac{K \cdot a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{\gamma_{\text{CuO}_{0,5}}}$$

El porcentaje en peso de cobre se puede expresar usando la relación:

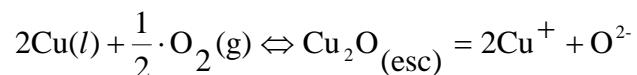
$$\% \text{Cu} = \frac{X_{\text{CuO}_{0,5}} M_{\text{Cu}}}{M_{\text{Escoria}}} \times 100$$

Combinados ambas expresiones se obtiene:

$$\% \text{Cu}_{(\text{esc})} = 100 \cdot \frac{M_{\text{Cu}}}{M_{\text{Escoria}}} \cdot \frac{K \cdot a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{\gamma_{\text{CuO}_{0,5}}} \quad (2-2)$$

De la ecuación 2-2 se puede deducir que el contenido de cobre disuelto en la escoria es proporcional a la presión parcial de oxígeno elevada a un cuarto, a la actividad del cobre e inversamente proporcional al coeficiente de actividad del  $\text{CuO}_{0,5}$  en la escoria.

Alternativamente también se puede emplear el tratamiento iónico de las escorias como sigue:



$$K = \frac{\left(a_{\text{Cu}_2\text{O}}\right)^{1/2}}{a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}} = \frac{\left(\gamma_{\text{Cu}_2\text{O}}^{\pm}\right)^{1/2} \cdot \left(X_{\text{Cu}^+}\right) \cdot \left(X_{\text{O}^=}\right)^{1/2}}{a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}$$

Donde se considera que:  $\gamma_{\text{Cu}_2\text{O}}^{\pm} = \left(\gamma_{\text{Cu}^+}^2\right) \cdot \left(\gamma_{\text{O}^=} \right)$

Con lo que la solubilidad será:  $X_{\text{Cu}^+} = \frac{K \cdot a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{\left(\gamma_{\text{Cu}_2\text{O}}^{\pm} \cdot X_{\text{O}^=} \right)^{1/2}}$

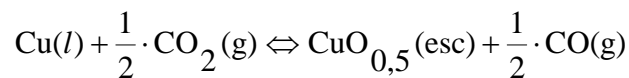
Y finalmente se obtiene una expresión similar:

$$\% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{Ox}} = 100 \cdot \frac{M_{\text{Cu}}}{\overline{M}_{(\text{esc})}} \cdot \frac{K \cdot a_{\text{Cu}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{\left(\gamma_{\text{Cu}_2\text{O}}^{\pm} \cdot X_{\text{O}^=} \right)^{1/2}} \quad (2-3)$$

Puede observarse que ambos tipos de tratamiento conducen a expresiones muy similares, con la diferencia de que la segunda expresión explica la dependencia de la concentración de los iones oxígeno; es decir, de la basicidad, haciendo ver que mientras más básica es la escoria menor será su solubilidad en el cobre oxidado.

El coeficiente de actividad del  $\text{CuO}_{0,5}$  se puede obtener al conocer la actividad del cobre en el metal  $a_{\text{Cu}}$ , la presión parcial de oxígeno de equilibrio  $P_{\text{O}_2}$ , para determinada razón de  $\text{CO}/\text{CO}_2$  y del análisis de cobre en la escoria.

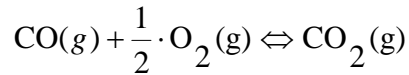
En condiciones de equilibrio y bajo atmósfera controlada de  $\text{CO}-\text{CO}_2$ , la ecuación 2-2 y 2-3 puede expresarse como:



$$\Delta G^\circ = 16,260 - 3,16T \quad \text{cal/mol}$$

La razón  $\text{CO}/\text{CO}_2$  está relacionada con el valor de  $P_{\text{O}_2}$  por la reacción:





$$\Delta G^\circ = -67,500 - 20,75 T \quad \text{cal/mol}$$

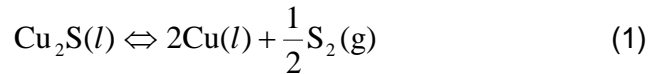
Bajo estas condiciones experimentales, el valor de la actividad del  $\text{CuO}_{0,5}$  en la escoria queda expresado por:

$$a_{\text{CuO}_{0,5}}(\text{esc}) = K \cdot a_{\text{Cu}} \cdot \left[ \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

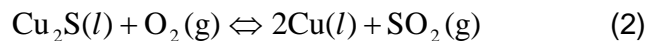
Esta técnica experimental para calcular la  $a_{\text{CuO}_{0,5}}$  ha sido usada ampliamente por muchos investigadores (véase la figura 2-15).

#### 2.2.2.2. Solubilidad del cobre en escorias con Azufre

En el caso del equilibrio de escoria con mata, la actividad del cobre en la mata debe calcularse a partir del siguiente equilibrio:

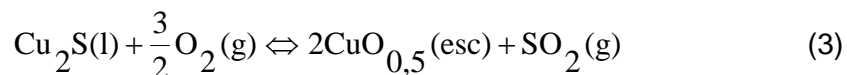


Alternativamente es ventajoso considerar para escorias en equilibrio con mata la siguiente reacción:



De acuerdo a lo anterior, la actividad del cobre en la mata, además de depender de la ley de la mata que determina  $\text{Cu}_2\text{S}$ , depende de la presión parcial de azufre en equilibrio, según la ecuación (1), o bien de las presiones parciales de  $\text{O}_2$  y  $\text{SO}_2$ , ecuación (2).

También se puede expresar la disolución como:



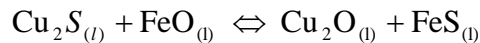
$$\Delta G^\circ = -54,500 \text{ cal a } 1473^\circ \text{K}$$

$$K = \frac{\left(a_{\text{CuO}_{0,5}}\right)^2 \cdot P_{\text{SO}_2}}{a_{\text{Cu}_2\text{S}} \cdot \left(P_{\text{O}_2}\right)^{3/2}}$$

$$a_{\text{CuO}_{0,5}} = \gamma_{\text{CuO}_{0,5}} \cdot X_{\text{CuO}_{0,5}} = \left[ \frac{K \cdot a_{\text{Cu}_2\text{S}} \cdot \left(P_{\text{O}_2}\right)^{3/2}}{P_{\text{SO}_2}} \right]^{1/2} \quad (2-5)$$

De la ecuación (3) se desprende que el contenido de óxido de cobre en la escoria dependerá de la ley de la mata, y en forma inversa de la presión parcial de  $\text{SO}_2$ . Si se calcula la solubilidad del cobre a partir de la ecuación (3), se obtienen valores menores más bajos. Esto se debe a que como el  $\text{FeS}$  es soluble en las escorias, así como también el  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

Una alternativa para expresar la pérdida de cobre a la forma de óxido disuelto es mediante la ecuación:



$$K = \frac{a_{\text{Cu}_2\text{O}} \cdot a_{\text{FeS}}}{a_{\text{FeO}} \cdot a_{\text{Cu}_2\text{S}}} \quad \text{y} \quad a_{\text{Cu}_2\text{O}} = a_{\text{CuO}_{0,5}}^2 = K \frac{a_{\text{FeO}} \cdot a_{\text{Cu}_2\text{S}}}{a_{\text{FeS}}}$$

$$X_{\text{CuO}_{0,5}} = \left( \frac{K a_{\text{FeO}} a_{\text{Cu}_2\text{S}}}{a_{\text{CuO}_{0,5}} a_{\text{FeS}}} \right)^{1/2} \quad (2-6)$$

Se deduce de esta expresión que a medida que la ley de la mata en equilibrio con escoria aumenta, la  $a_{\text{Cu}_2\text{S}}$  se hace mayor y  $a_{\text{FeS}}$  se hace mas pequeña, por lo que  $X_{\text{CuO}_{0,5}}$ , aumenta al aproximarse la ley de la mata a  $\text{Cu}_2\text{S}$  puro, la  $a_{\text{FeS}}$  tiende a valores muy pequeños, por lo que la solubilidad del cobre aumenta en

forma muy pronunciada. Esto puede observarse en las figuras 2-19 y 2-20, respectivamente donde se ve que para matas sobre 60% Cu, la solubilidad de cobre oxidado es mayor que la de cobre sulfurado.

### 2.2.3. Modelos Termodinámicos

El concepto de disolución oxídica y sulfídica del cobre fue desarrollado por Sehnalek y Imris<sup>[12]</sup>, e independientemente por Nagamori<sup>[18]</sup>, estos estudios han mejorado sustancialmente el conocimiento y la comprensión de los mecanismos de pérdida de cobre en las escorias.

De acuerdo a este concepto el cobre total disuelto en la escoria es la suma de cobre oxidado y cobre sulfurado, a continuación se muestran los conceptos desarrollados por los investigadores.

#### 2.2.3.1. Modelo termodinámico desarrollado por Sehnalek e Imris

La influencia del azufre sobre la solubilidad del cobre en la escoria fue correlacionada en forma preliminar por SEHNALEK E IMRIS<sup>[12]</sup>. Ellos concluyeron, en base ha antecedentes bibliográficos, consideraciones termodinámicas y resultados experimentales, que las pérdidas de cobre por disolución en las escorias se originan por la solubilidad del  $\text{Cu}_2\text{S}$  y  $\text{Cu}_2\text{O}$  y son básicamente función de la ley de la mata.

En términos generales, ellos plantearon lo siguiente:

$$\% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{d}} = \% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{Cu}_2\text{O}} + \% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{Cu}_2\text{S}} \quad (2-7)$$

Donde:

$$\% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{d}} = \text{cobre total disuelto en la escoria.}$$

$$\% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{Cu}_2\text{O}} = \text{cobre en la escoria asociado a } \text{Cu}_2\text{O}$$

$$\% \text{Cu}_{(\text{esc})}^{\text{Cu}_2\text{S}} = \text{cobre en la escoria asociado a } \text{Cu}_2\text{S}$$

Los autores desarrollaron un modelo para predecir las pérdidas de cobre en la escoria sobre la base de consideraciones termodinámicas y asumiendo una solución iónica ideal.

El modelo desarrollado por SEHNALEK E IMRIS<sup>(12)</sup> predice que las pérdidas de cobre debido al fenómeno de solubilidad puede expresarse como:

$$\%Cu_{(esc)}^d = A \cdot \left( \frac{X_{Cu_2S}}{1 - X_{Cu_2S}} \right)^{1/2} + B \cdot \left( X_{Cu_2S} \right)^{1/2} \quad (2-8)$$

Donde:

$$A = \frac{a_{FeO}}{K_3} \cdot \frac{1}{K_2}, \quad B = \frac{1}{K_1}$$

$X_{Cu_2S}$  : Fracción molar de  $Cu_2S$  en la mata.

$a_{FeO}$  : Actividad del  $FeO$  en la escoria.

$K_1, K_2, K_3$  : constantes de equilibrio de las reacciones químicas involucradas.

El primer término de la ecuación esta relacionada con el cobre disuelto en la escoria, asociado al  $Cu_2O$ , y el segundo término al cobre disuelto en la escoria asociada al  $Cu_2S$ . De lo anterior se desprende que las pérdidas de cobre en la escoria originadas por el fenómeno de la solubilidad de  $Cu_2O$  dependen no sólo del contenido de cobre en la mata y la temperatura, sino también de la actividad del  $FeO$  en la escoria. Por otro lado, las pérdidas de cobre debido a la solubilidad del  $Cu_2S$  son sólo función de la ley de la mata.

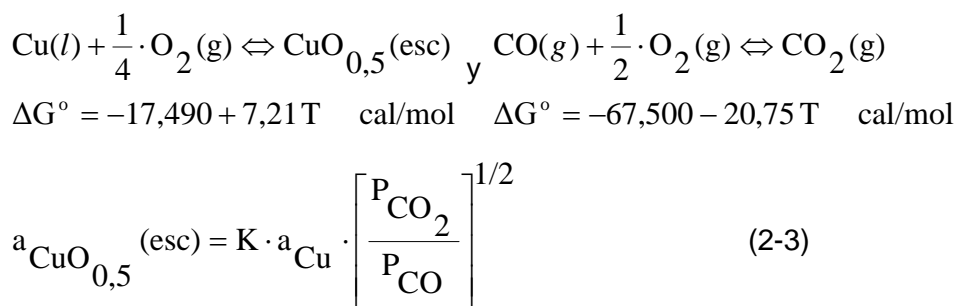
### 2.2.3.2. Modelo termodinámico desarrollado por Nagamori

De acuerdo al concepto propuesto por Nagamori<sup>[18]</sup>, el cobre total disuelto en la escoria es la suma de cobre oxidado y cobre sulfurado, esto es:

$$\%Cu_{(esc)}^d = \%Cu_{(esc)}^{Ox} + \%Cu_{(esc)}^{Sul} \quad (2-9)$$

### 2.2.3.2.1. Disolución oxidica de cobre

Para el cálculo del porcentaje de cobre oxidado  $\%Cu_{(esc)}^{Ox}$  Nagamori desarrolló una serie de pruebas experimentales considerando el caso del estudio de equilibrio cobre-escoria bajo presión parcial controlada de oxígeno.



Datos experimentales obtenidos en los estudios realizados por Nagamori, para escorias no saturadas en sílice, en equilibrio con cobre puro ( $a_{Cu} = 1$ ), se muestran en la figura 2-15.

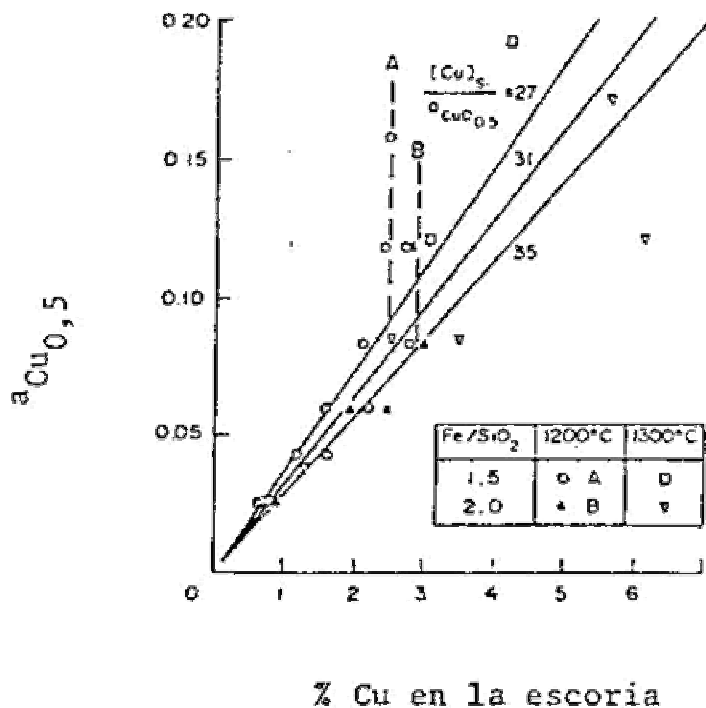
De estas pruebas Nagamori determinó una relación independiente para cada temperatura:

$$\%Cu_{(esc)}^{Ox} = 27 \cdot a_{CuO_{0,5}} \quad R = 1,5$$

$$\%Cu_{(esc)}^{Ox} = 35 \cdot a_{CuO_{0,5}} \quad R = 2,0$$

$$\text{Donde: } R = \frac{Fe}{SiO_2}$$

El planteamiento anterior indica que la solubilidad del cobre tiende a cero cuando la actividad del  $CuO_{0,5}$  tiende a cero. Por lo tanto, el cobre sólo puede ser disuelto después que comienza la oxidación y no puede existir solubilidad de cobre elemental. Sin embargo, estos resultados sólo serían particularmente válidos para escorias tales como las producidas durante la segunda etapa de la conversión tradicional, o bien, en los procesos de fusión-conversión continua, debido a que en este estudio se equilibró cobre puro y escoria.



**Figura 2-15: Solubilidad de Cobre en escorias fayalíticas a 1200 y 1300°C desde NAGAMORI et al<sup>[16]</sup>**

Finalmente, según los resultados de Nagamori es posible expresar el contenido de cobre oxidado en la escoria como:

$$\%Cu_{(esc)}^{Ox} = A \cdot a_{CuO_{0.5}} \quad (2-10)$$

Las relaciones del tipo  $\%Cu_{(esc)}^{Ox} = A \cdot a_{CuO_{0.5}}$  son razonablemente adecuadas para estimar la solubilidad del cobre oxidado bajo diferentes condiciones. Sin embargo, la aplicación de estas ecuaciones es generalmente limitada a la composición de las escorias usadas en las investigaciones que se indican en la Tabla 2-8.

Entre los trabajos más importantes<sup>[16]</sup> que han usado similar técnica experimental se encuentran los de TOGURI, ALTMAN y ELLIOT, entre otros.

TOGURI equilibraron escorias de silicato de hierro conteniendo alrededor de 6% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , con aleaciones cobre-oro en el rango de 1 250°C–1 350°C y con presiones parciales de oxígeno en el rango de  $10^{-10}$  a  $10^{-6}$  atm.

ALTMAN y ELLIOT midieron la solubilidad del cobre en escorias saturadas con sílice a 1 250°C y 1 300°C respectivamente, utilizando aleaciones cobre-oro.

Los resultados obtenidos por estos dos autores se muestran en la figura 2-16 de la pagina 58, en la cual sé grafica el contenido de cobre disuelto en la escoria en función de la actividad del  $\text{CuO}_{0.5}$ .

**Tabla 2-8: Valores del coeficiente “A” para la estimación de la solubilidad del cobre oxidado en escorias de silicato de hierro<sup>[16]</sup>**

Tipo de Escoria	Temperatura(°C)	Valor de A
<u>Escoria no saturada en sílice</u> Fe/SiO <sub>2</sub> =1.5 ; 8 + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 200 -1 400°C	27,0
Fe/SiO <sub>2</sub> =2.0 ; 8 + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 200 -1 400°C	35,0
<u>Escoria saturada en sílice</u> Libre de alúmina	1 200 -1 400°C	35,9
Conteniendo solo CaO hasta 11%	1 300 °C	A=35,02-0,835x donde x=%CaO
Conteniendo solo MgO hasta 4%	1 300 °C	33,7
Conteniendo solo Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hasta 8%	1 300 °C	34,2
Conteniendo Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> entre 11-14%	1 300 °C	30,0
Conteniendo CaO – 5% y Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3%	1 300 °C	26,7
Conteniendo CaO – 9% y Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 12%	1 300 °C	22,7

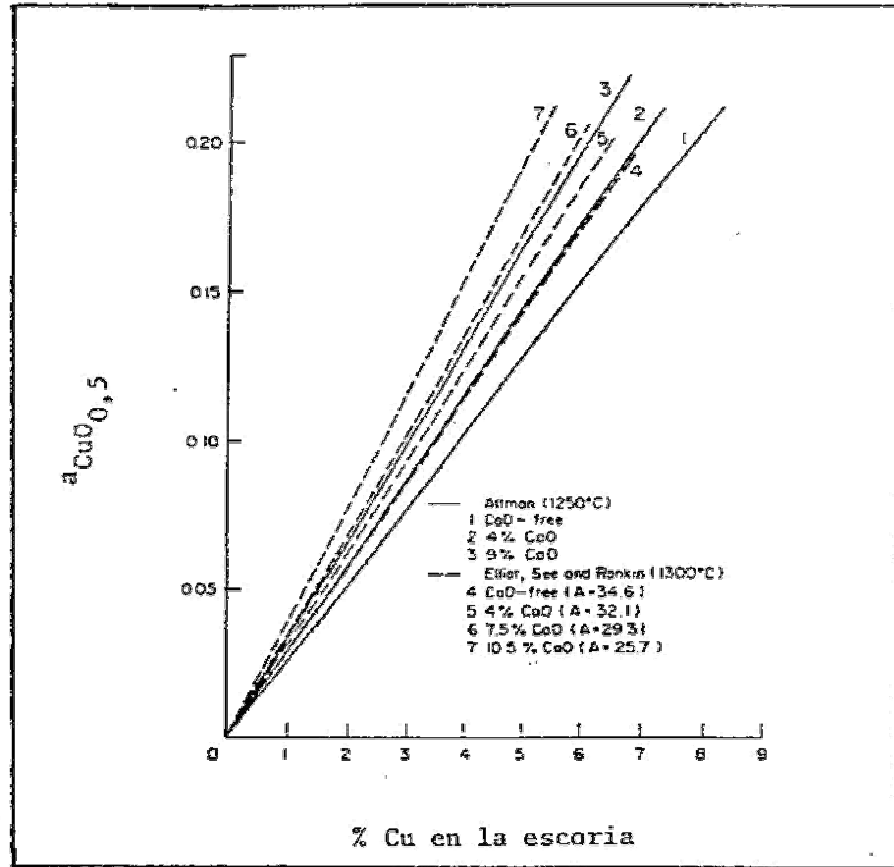


Figura 2-16 Comparación de datos de solubilidad de cobre en escorias de silicato de hierro saturadas con sílice, conteniendo CaO. Desde ALTMAN et al<sup>[16]</sup> y ELLIOT et al<sup>[16]</sup>

#### 2.2.3.2.2. Disolución sulfídica de cobre

Por otra parte, NAGAMORI<sup>[18]</sup> desarrolló en forma independiente el concepto de disolución de cobre sulfurado  $\%Cu_{(esc)}^{sul}$ . En su trabajo implementó una técnica experimental para preparar escorias libres de mata atrapado y midió la solubilidad del cobre en escorias fayalíticas saturadas con hierro y sílice a 1 200°C. Se

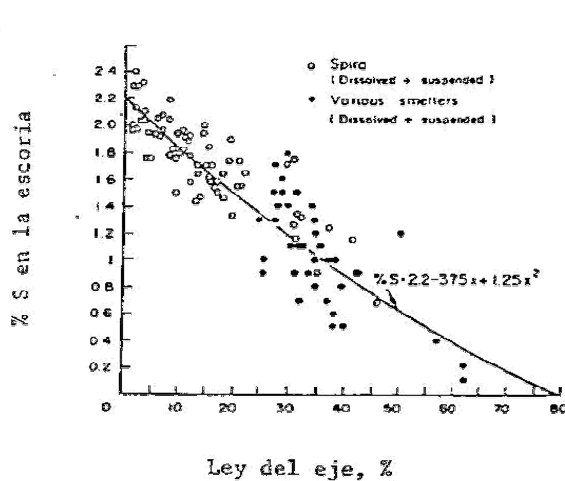


encontró que la solubilidad del cobre es considerablemente mayor que la atribuida a pérdidas debido a disolución oxidica, señaladas en una serie de investigaciones.

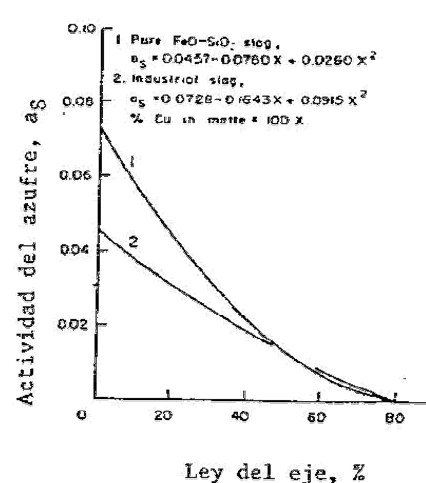
La solubilidad del cobre en la escoria fue relacionada con la presencia de azufre y con el concepto de solubilidad sulfídica, desarrollado sobre la base de propiedades termodinámicas de la escoria y de la mata.

La relación entre el contenido de azufre en escorias de hornos reverberos y el grado de mata se muestran en la figura 2-17, y la relación entre actividad del azufre en la escoria y el grado de mata se muestra en la figura 2-18.

Las escorias industriales presentan además de diferencias en el potencial de oxígeno, una baja actividad de azufre, lo que se debe en parte a la presencia de óxidos, tales como CaO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La disminución de la actividad del azufre tiene una alta influencia sobre la disminución del contenido de cobre disuelto en escorias del horno de reverbero.



**Figura 2-17** Contenido de azufre en escorias comerciales en función del grado de mata<sup>[18]</sup>



**Figura 2-18** Actividad del azufre en escorias saturadas con sílice en función del grado de mata<sup>[18]</sup>

NAGAMORI<sup>[18]</sup> presentó tres modelos alternativos para predecir la disolución de compuestos de cobre asociados al enlace Cu – S. La solubilidad del cobre y la fracción aniónica de azufre en la escoria. Entonces; el porcentaje de cobre debido al enlace Cu–S será:

$$\% Cu(\text{enlace Cu - S}) = X_{S(\text{esc})}^- \cdot X_{Cu(\text{esc})}^+$$

Donde, X = fracción aniónica y catiónica, respectivamente.

De la ley de distribución de Nerst's se obtiene:

Fracción catiónica de Cu en la escoria =  $K' (Cu)_{\text{mata}}$

Por lo tanto:

$$\% Cu_{(\text{esc})}^S = K' \cdot K'' [S]_{\text{esc}} \cdot [Cu]_{\text{mata}} \quad (2-11)$$

Donde  $K'$  y  $K''$  son constantes de proporcionalidad.

$[S]_{\text{esc}}$  : contenido de azufre en la escoria.

$[Cu]_{\text{mata}}$  : contenido de cobre en la mata.

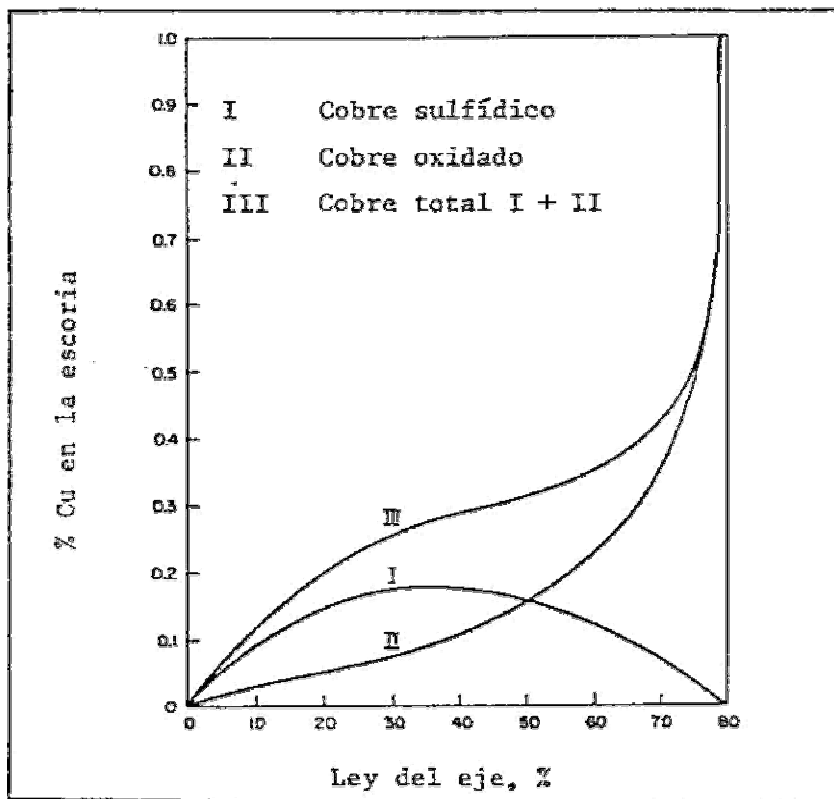
Los modelos presentados por NAGAMORI<sup>[18]</sup> están basados en tres interpretaciones de los últimos términos de la ecuación (2-11).

Estos modelos fueron aplicados en escorias industriales y el cobre sulfurado en la escoria es expresado en términos prácticos en función de los contenidos de azufre en la escoria y de cobre en la mata.

Por ejemplo, los términos  $a_{CuS_{0,5}}$ ,  $a_{Cu_2S}$  y  $a_{Cu}$  pueden expresarse en función de la ley de mata. Escogiendo  $a_{Cu_2S} = 0.0127 [\%Cu]_{\text{mata}}$ , la fracción de cobre sulfurado para escorias industriales está dada por:

$$(\% Cu)_{\text{esc}}^{\text{Sul}} = 0,00495 \cdot [S]_{\text{esc}} \cdot [Cu]_{\text{mata}} \quad (2-12)$$

La disolución de cobre en forma sulfídica, calculada mediante la ecuación anterior, es representada en la figura 2-19, conjuntamente con la fracción de cobre disuelto en forma oxidada y con el cobre total disuelto calculado como la suma de ambos.



**Figura 2-19 Cobre oxidado, cobre sulfídico y cobre total disuelto en escorias comerciales de Reverbero<sup>[18]</sup>**

De la figura 2-19 se desprende que la disolución sulfídica es importante sólo en matas con 60% de cobre o menos, mientras que la disolución oxidada es un mecanismo significativo para la solubilidad del cobre con matas de alta ley (sobre 60% Cu); es decir se aplica en la conversión o en procesos de fusión-conversión continua.

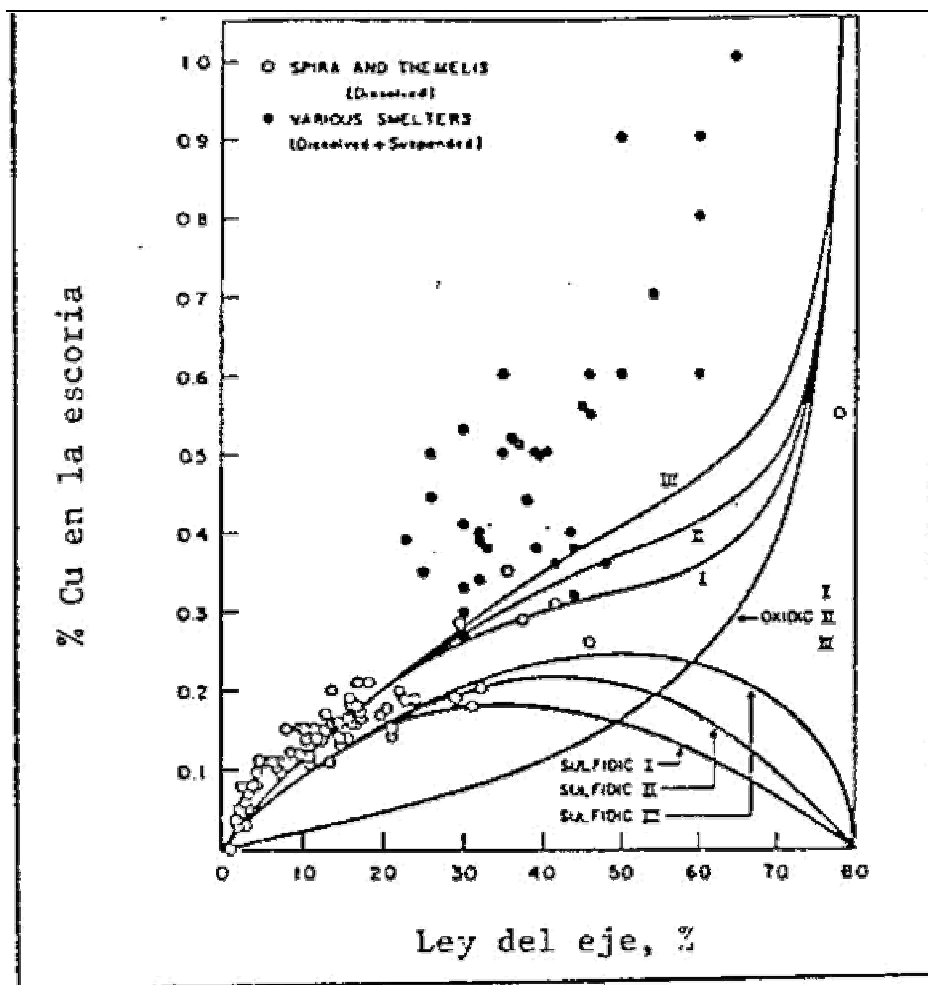


Figura 2-20 Comparación de los modelos desarrollados por Nagamori<sup>[18]</sup> con datos de escorias industriales.

De la Figura 2-20 se desprende que el cobre total disuelto en escorias industriales varía entre 0,4 y 0,5%, para matas con 55 a 65% de cobre, lo cual representa aproximadamente un 60% del cobre total en la escoria, el 40% restante corresponde a cobre atrapado mecánicamente.

#### 2.2.4. Pérdida de cobre total

Las pérdidas de cobre totales deben incluir las pérdidas mecánicas y las pérdidas físico químicas<sup>[17]</sup>, un parámetro que afecta proporcionalmente estas dos pérdidas es la cantidad de escoria que se produce en los procesos de fusión y conversión siendo tres los factores que contribuyen a tal efecto: Calidad de la sílice, cantidad de la sílice y ley de la mata. Adicionalmente podrían presentarse condiciones operativas que incrementan aún más las pérdidas mecánicas de cobre en la escoria, tal como los altos inventarios de mata, que ocasiona arrastre de mata durante el escoriado. Dichas pérdidas se expresan como porcentaje:

$$\%Cu_t = \%Cu_{mec} + \%Cu_{soluble}$$

*Pero :*

$$\%Cu_{soluble} = \%Cu_{Cu_2O} + \%Cu_{Cu_2S}$$

Entonces; reemplazando se tiene:

$$\%Cu_{total} = \%Cu_{mec} + \%Cu_{Cu_2O} + \%Cu_{Cu_2S} \quad (2-13)$$

## Capítulo III

### Metodología de la investigación

#### 3.1. Herramientas de muestreo

- a) Cuchara para el muestreo de mata del Horno de Separación como la mostrada en la figura 3-1.
- b) Paleta para el muestreo de escoria de Horno de Separación que se puede ver en la figura 3-2.
- c) Cucharón para el muestreo de mata - escoria del Horno Isasmelt que se puede observar en la figura 3-3.
- d) Paleta para el muestreo de escoria de los Hornos Reverberos que es mostrada en la figura 3-4.



**Figura 3-1 Cucharón de muestreo de mata de Horno de Separación SPCC**



**Figura 3-2 Paleta de muestreo de escoria de Horno de Separación SPCC**



**Figura 3-3 Cucharón de muestreo de mata y escoria del Horno Isasmelt SPCC**



**Figura 3-4 Paleta y muestra de escoria de Horno Reverbero SPCC**

### **3.2 Equipos e Instrumentos de Análisis:**

- a) El Pulverizador de muestras o “Vibratory Ring Pulverizer TM/G1500” que es mostrado en la figura 3-5. Este pulverizador permite preparar muestras de 13 mm de tamaño máximo de partículas de materiales duros como minerales de hierro, aleaciones de hierro, etc. Las muestras se colocan en un depósito que internamente tiene unos anillos concéntricos que se coloca en el equipo y que con la vibración pulveriza las muestras. El tiempo de pulverizado es de 250 s el cual es suficiente para pulverizar la muestra mas dura que es la mata del Horno Isasmelt. La figura 3-6 muestra el depósito de anillos concéntricos.
- b) El Pirómetro Mikron o “Two-color Fiber Optics Infrared Thermometer M-78” que se observa en la figura 3-6, fue utilizado para medir la temperatura de baño durante el proceso de retiro de escoria directamente del canal del horno de separación. El pirómetro Mikron esta basado en el procesamiento de dos niveles de radiación infrarroja de dos longitudes de onda cercanas, no midiendo el valor absoluto de la energía detectada, sino la proporción, ignorando el error causado por la emisividad y la obstrucción parcial del



campo de visión del objetivo. Las especificaciones técnicas del pirómetro son:

- ◆ Precisión: 1% del intervalo completo de la escala (estado 1.0 para la emisividad del objetivo).
- ◆ Resolución:  $\pm 0,01\%$  del intervalo completo de la escala.
- ◆ Repetibilidad:  $\pm 0,25\%$  del intervalo completo de la escala.
- ◆ Tiempo de respuesta: 1 s estándar.

Para efectos del presente trabajo los pirómetros “Micrón” de los Hornos de Separación, fueron calibrados en el laboratorio de instrumentación de SPCC bajo condiciones controladas de temperatura y emisividad de tal manera que se garantizó la precisión de los equipos para todos los intervalos de temperatura de operación de los reactores de Fundición.

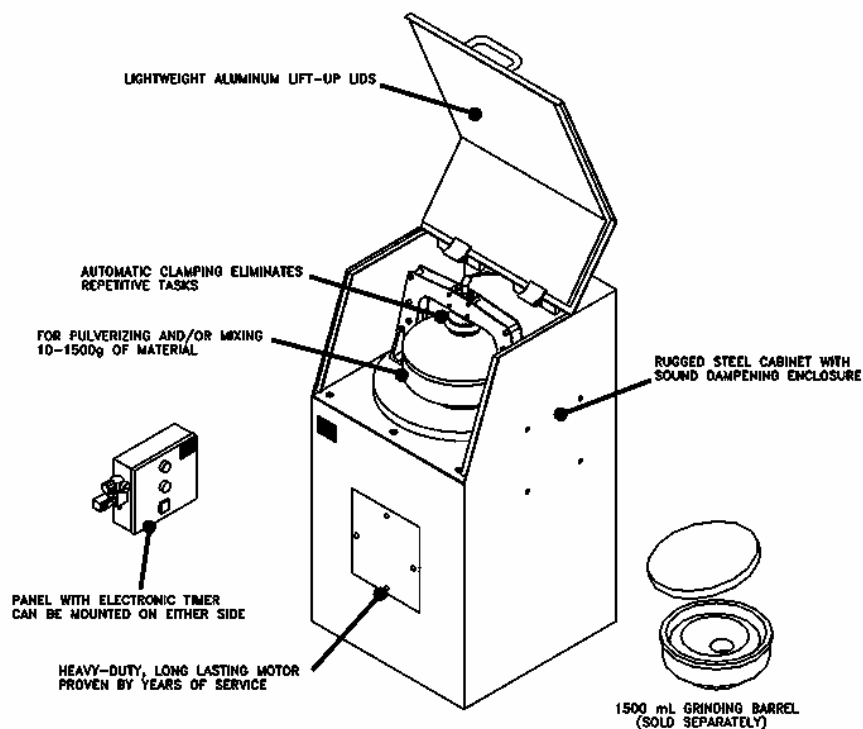
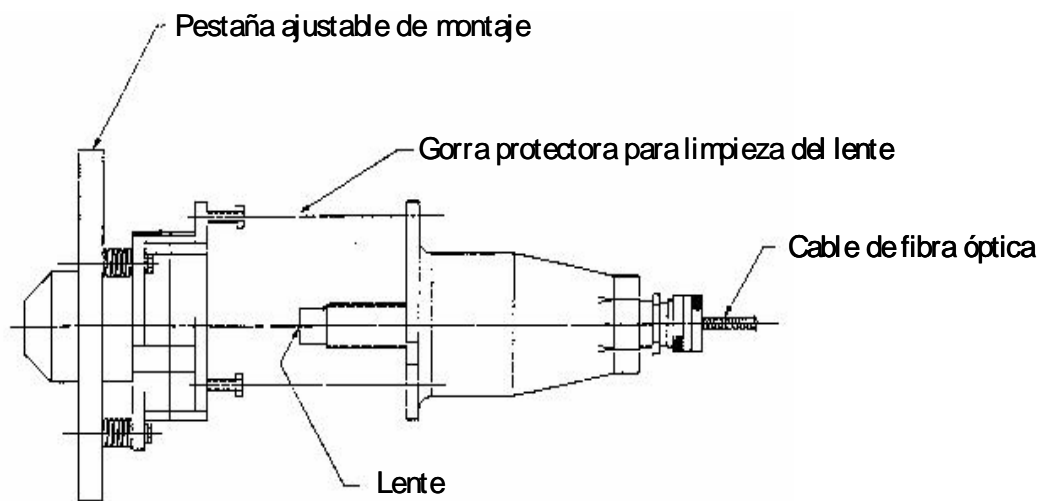


Figura 3-5 Vibratory Ring Pulverizar TM/G1500



**Figura 3-6 Barril de pulverizado de muestras de mata y escoria**



**Figura 3-7 Pirómetro Mikron M-78, corte de la cámara de instalación**

- c) El Analizador Satmagan o "Saturation Magnetization Analyzer M135" que se ve en la figura 3-8, fue utilizado para determinar la concentración de magnetita, en las muestras. Este analizador esta basado en la medición del

momento magnético después que el componente magnético en la muestra ha sido magnetizado por saturación.

Las especificaciones técnicas del Analizador Satmagan son:

- ◆ Tipo de muestra: Sólido o muestra en polvo (granos menores a 150  $\mu\text{m}$  (malla 100).
- ◆ Rango de medición: de 0 a 100% en peso
- ◆ Reproducibilidad: 0,2% en peso.
- ◆ Limite de detección: usualmente 0,1% en peso.

Para efectos del presente trabajo el Analizador "Satmagan" fue calibrado en el laboratorio de análisis químico de SPC, con varias muestras patrón de contenidos conocidos y variados de magnetita, de tal manera que se garantizó la precisión del analizador para las muestras del Horno de Separación y para el Horno Isasmelt.

- d) El Analizador Metorex o "X-ray Fluorescence Spectroscopy X-Met920" que es mostrado en la figura 3-9, fue utilizado para determinar las concentraciones de Cu, Fe, S,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y CaO. Este analizador esta basado en que los elementos presentes en una muestra emiten rayos-X característicos cuando son expuestos a una fuente primaria de rayos-X o rayos gamma. Los granos de la muestra en análisis deben ser menores a 20  $\mu\text{m}$  (malla 635) y contener menos de 5% de humedad.

La precisión del analizador "Metorex" depende de la calibración que se hace con muestras patrón de composición conocida, las que fueron previamente analizadas por métodos analíticos clásicos confiables.

La calibración del analizador "Metorex" se hizo periódicamente y en forma aleatoria, siguiendo los procedimientos de calibración, para garantizar la precisión del equipo en el análisis de las muestras del Horno de Separación y Horno Isasmelt de SPCC.



Figura 3-8. Saturation Magnetization Analyzer, M135



Figura 3-9. X-ray Fluorescence Spectroscopy X-Met920

### 3.3. Técnicas de Muestreo

La toma de las muestras de escoria de los Hornos de Separación se realizó colocando la paleta de muestreo directamente en el chorro de escoria cuando esta fluía durante el llenado de la olla de escoria en el momento de su evacuación a  $\frac{1}{4}$  de olla,  $\frac{1}{2}$  olla y  $\frac{3}{4}$  de olla.

La toma de las muestras de mata del Horno de Separación se realizó colocando el cucharón de muestreo directamente del chorro de mata durante el llenado de la olla de mata en el momento de su evacuación a  $\frac{1}{2}$  olla.

La toma de las muestras de escoria del Horno Isasmelt se realizó colocando el cucharón directamente en el chorro del canal de colada cuando esta fluye durante a través del canal y el nivel de baño del Horno Isasmelt está en 1,2 m.

La toma de las muestras de mata del Horno Isasmelt se realizó colocando el cucharón directamente en el chorro del canal de colada al inicio de la colada ó cuando el nivel de baño del H. Isa está en 1,8 m.

### 3.4. Procesamiento de la información

Se analizaron 4 282 muestras de escoria de los Hornos Reverbero SPCC, correspondientes a los meses de operación entre Enero a Diciembre del 2006. La información se consignó en tabla 3-1 del Apéndice.

Se tomaron y analizaron 4 024 muestras de escoria de los Hornos de Separación, correspondientes a los meses de operación entre Enero a Junio del 2008. La información se tabuló en la tabla 3-2 del Apéndice.

Se calculó la composición ternaria  $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  de los análisis promedios de las escorias de los Hornos Reverberos y de los Hornos de Separación. Los resultados se muestran en el capítulo 3. Un ejemplo del cálculo se encuentra en el Apéndice 1.

Se calculó la composición ternaria  $\text{CaO-FeO-SiO}_2$  de las escorias de los Hornos Reverberos y de los Hornos de Separación. Los resultados se muestran en el capítulo 3. Un ejemplo del cálculo se encuentra en el Apéndice 2.

Se calculó el modulo de viscosidad, Kv y se estimó las viscosidades de las escorias de los Hornos Reverberos y de los Hornos de Separación. La información se tabuló en las tablas 3-1 y 3-2. Asimismo se calcula el efecto de la viscosidad en el tamaño de partícula de mata en suspensión para 20 minutos de

sedimentación. Los resultados se muestran en el capítulo 3. Un ejemplo de cálculo se encuentra en el Apéndice 3.

Se realiza un análisis estadístico de las muestras de los Hornos de Separación teniendo como base los rangos de viscosidad estimados y las pérdidas de cobre esperadas. Los resultados se muestran en el capítulo 3.

Se realiza un recalcu del modelo de Shenalek y del modelo de Nagamori para las condiciones de operación del Horno Isasmelt para estimar las pérdidas de cobre por solubilidad. Los resultados se muestran en el capítulo 3. Ejemplos de cálculo se encuentra en los Apéndices 4 y 5, respectivamente.

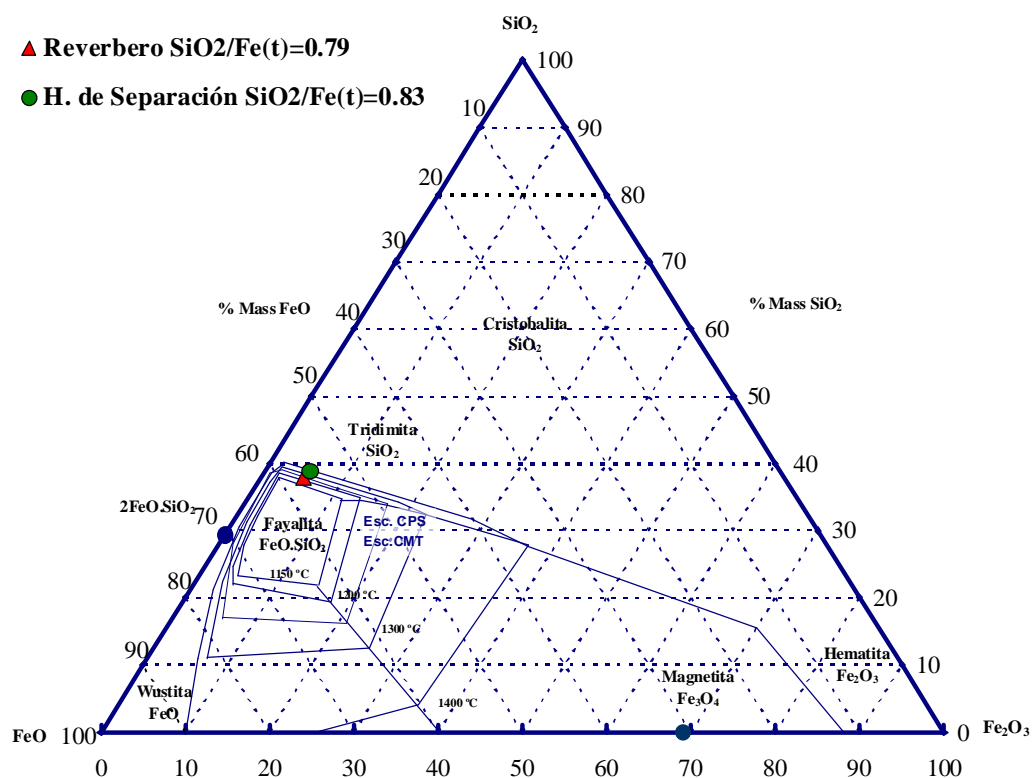
Se calcula las actividades de la magnetita para las condiciones de operación del Horno Isasmelt y se estima la actividad del FeO con ayuda de diagramas. Los resultados se muestran en el capítulo 3. Un ejemplo de cálculo se encuentra en apéndice 6.

## Capítulo IV

### Discusión y Resultados

#### 4.1. Análisis del sistema ternario FeO- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

En la figura 4-1 se muestra la ubicación de escoria de los Hornos Reverberos obtenidos durante el año 2006 y las muestras actuales de los Hornos de Separación del período de Enero a Mayo del 2008, de los que podemos afirmar que las escorias actuales están más pegadas a la zona de la tridimita. Por otro lado, del diagrama binario FeO-SiO<sub>2</sub> (Figura 2-1) se encontró que la fayalita tiene una relación SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>(FeO)</sub> de 0,54 y que la tridimita se inicia con una relación SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>(FeO)</sub> de 0,79, considerando esto, si la relación SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>(FeO)</sub> es mayor a 0,79 estaremos dentro de la zona de tridimita.



**Figura 4-1 Escorias de SPCC en el Diagrama FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>**

En la tabla 4-1 se muestran ambas relaciones SiO<sub>2</sub>/Fe, una considerando el hierro total del sistema; es decir, todo el Fe que proviene del FeO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y en el otro caso considerando el hierro que proviene del FeO del sistema sin considerar a la Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como aporte de FeO. La figura 4-1 muestra que se

considera el sistema ternario FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, ambas escorias estarían en la zona de la tridimita.

**Tabla 4-1 Cuadro Comparativo de Análisis Químicos de Horno de Separación y Horno Reverbero utilizados en el Diagrama FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>**

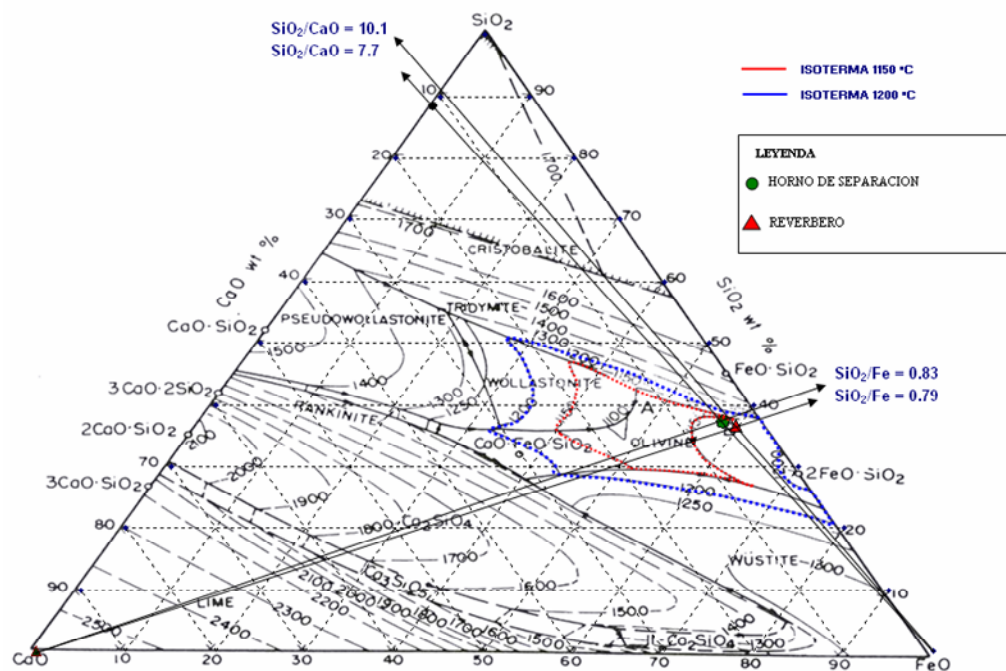
Muestra de Escoria	FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>(tot)</sub> <sup>(*)</sup>	SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>(FeO)</sub> <sup>(**)</sup>
H. de Separación	44,0	6,4	32,0	0,83	0,90
H. Reverbero	46,4	6,2	32,0	0,79	0,86

(\*) "Fe" calculado del hierro del sistema Fe= [Fe<sub>(FeO)</sub>+Fe<sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</sub>]

(\*\*)Fe calculado del hierro que proviene del FeO sin considerar a la Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### 4.2. Análisis del Ternario SiO<sub>2</sub>-"FeO"-CaO

En la figura 4-2 se muestra la ubicación de las escorias en el sistema ternario SiO<sub>2</sub>-"FeO"-CaO, las escorias actuales de los Hornos de Separación para una relación SiO<sub>2</sub>/Fe de 0,83 se encontraría en la zona de tridimita, sin embargo el CaO lo lleva a una zona liquida de temperatura entre 1150 a 1160°C.



**Figura 4-2 Escorias de SPCC en el diagrama ternario SiO<sub>2</sub>-"FeO"-CaO**



La tabla 4-2 muestra que las escorias de los reverberos se encontraban en una relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,79 y  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  de 10. Por otro lado el modulo de viscosidad de las escorias de Horno Reverberos es 1,51 a pesar de un menor contenido de CaO pero contiene un mayor contenido de "FeO", esto le proporciona una menor viscosidad con respecto a la escoria del Horno de Separación que tiene un modulo de 1,46 con mayor contenido de CaO y menos de "FeO".

**Tabla 4-2 Cuadro Comparativo de Análisis Químicos de Horno de Separación y Horno Reverbero utilizados en el Diagrama  $\text{SiO}_2$ -"FeO"-CaO**

Muestra de Escoria	$\text{SiO}_2$	CaO	"FeO" <sup>(*)</sup>	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_{(\text{tot})}$ <sup>(**)</sup>	$\text{SiO}_2/\text{CaO}$	Kv
H. de Separación	32,03	4,16	49,95	0,83	7,71	1,46
H. Reverbero	32,15	3,18	52,51	0,79	10,11	1,51

(\*) "FeO" calculado del hierro total del sistema  $\text{Fe} = [\text{Fe}_{(\text{FeO})} + \text{Fe}_{(\text{Fe}_3\text{O}_4)}]$

(\*\*) Fe total que proviene del "FeO" sin considerar a la  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

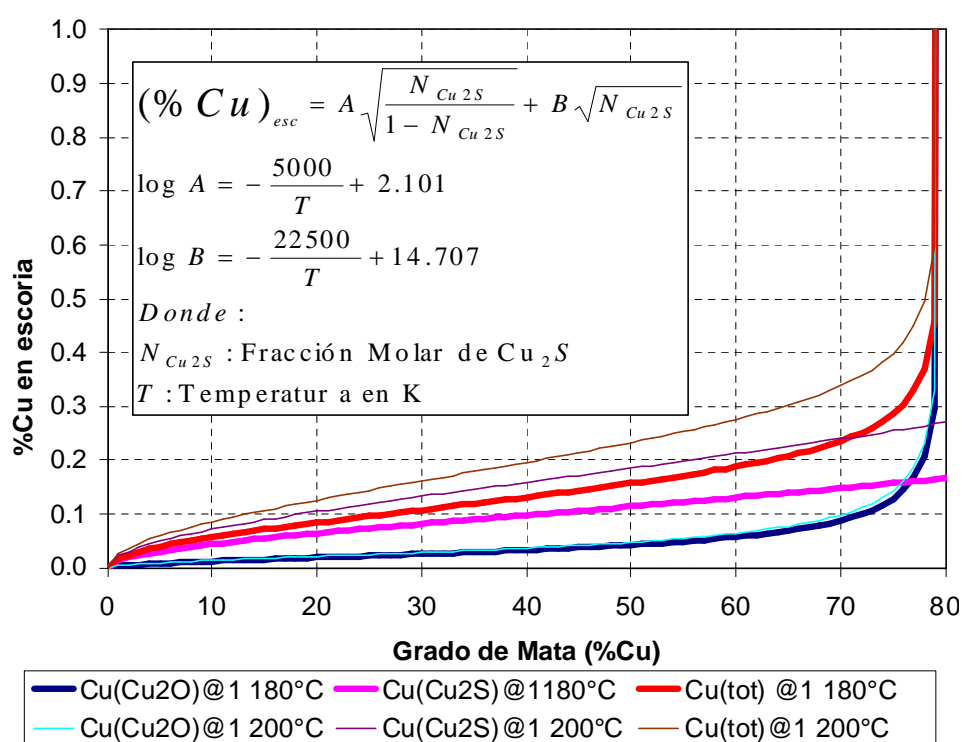
### 4.3. Determinación de pérdidas físico químicas de cobre

En la figura 4-3 se muestra las pérdidas fisicoquímicas de cobre esperadas de acuerdo a modelo desarrollado por Sehnalek e Imris, el primer término representa las perdidas de cobre debido a la solubilidad del  $\text{Cu}_2\text{O}$  y el segundo término representa a las pérdidas debido a la solubilidad del  $\text{Cu}_2\text{S}$  para temperaturas entre 1 180 y 1 200°C. Este modelo tiene una consideración semi empírica en su concepción siendo muy sensible a la temperatura proporcionando valores relativamente bajos a las condiciones de operación del Horno Isasmelt. El Horno Isasmelt opera entre 1 180 - 1 200°C, esta temperatura es menor que otras tecnologías como el CMT, Noranda, Flash, etc que normalmente operan por encima de 1 250°C.

En la tabla 4-3 se observa que las pérdidas de cobre esperadas de acuerdo al modelo de Sehnalek e Imris estaría entre 0,18 y 0,29 %Cu.

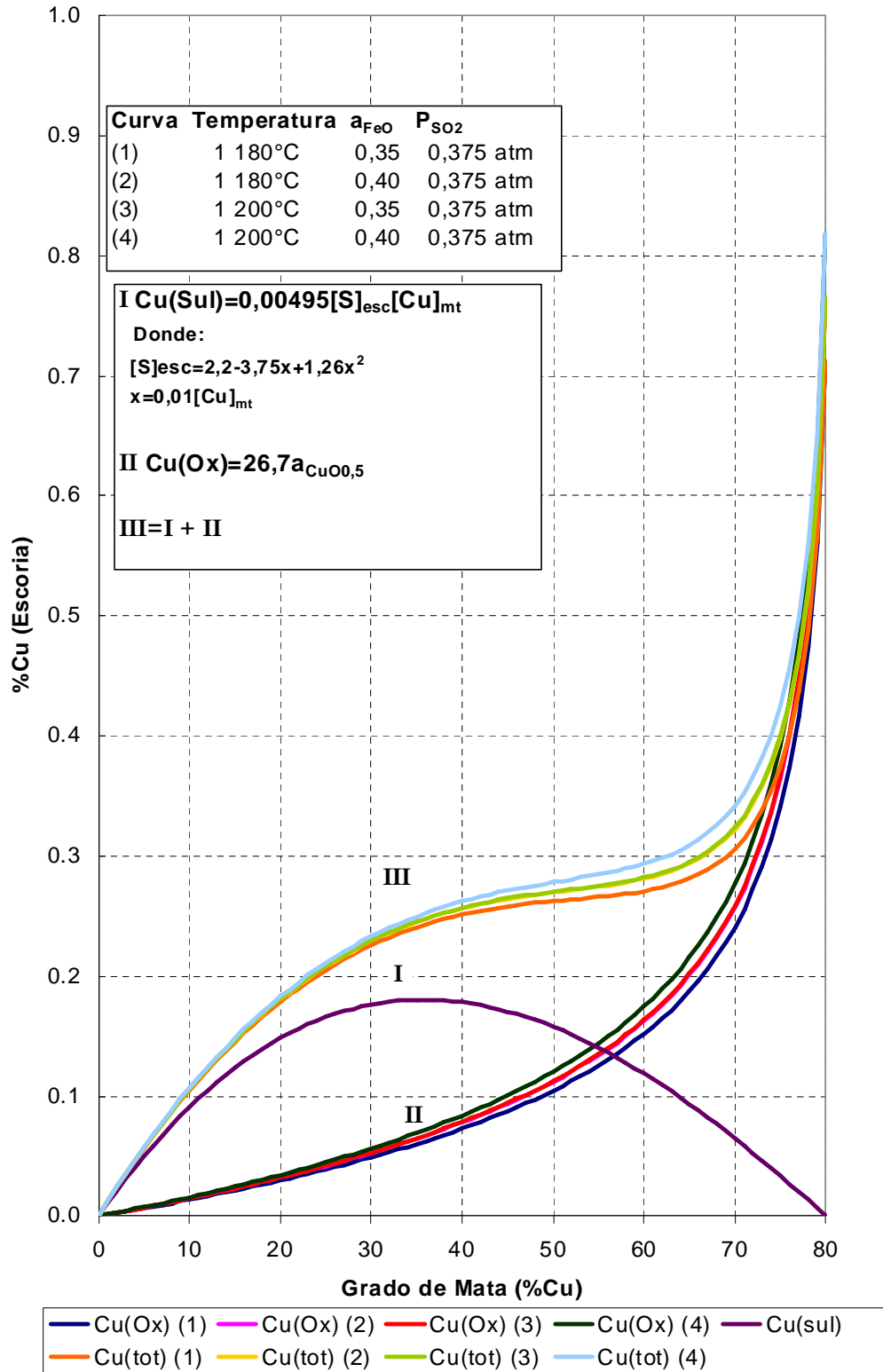
**Tabla 4-3 Pérdidas de cobre soluble por Modelo Sehnalek e Imris**

Temperatura (°C)	Grado de mata (%Cu)						
	58	59	60	61	62	min	max
1 180	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,18	0,20
1 200	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,27	0,29



**Figura 4-3 Modelo de Sehnalek e Imris**

En la figura 4-4 se ven las pérdidas de cobre fisicoquímicas esperadas de acuerdo a modelo desarrollado por Nagamori para las condiciones de operación del Horno Isasmelt considerando A igual a 26,7 la cual considera ~5 %CaO y ~3 %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 1 300°C, donde el primer término (I) representa las pérdidas de cobre debido a la solubilidad del Cu<sub>2</sub>S, el segundo término (II) representa a las pérdidas debido a la solubilidad del Cu<sub>2</sub>O. Ambos son dependientes del grado de mata, actividad del FeO, presión de SO<sub>2</sub> y temperatura, finalmente las pérdidas de cobre solubles totales (III) sería la suma de ambas.



**Figura 4-4 Modelo de Nagamori para condiciones del Horno Isasmelt  
 $A=26,7$  y  $P_{SO_2}$  0,375 atm**

En la tabla 4-4 se puede observar que las pérdidas de cobre solubles de acuerdo al modelo de Nagamori para las condiciones de operación del Horno Isasmelt estaría entre 0,27 y 0,32 %Cu.

**Tabla 4-4 Pérdidas de cobre solubles por Modelo de Nagamori A=26,7 y  $P_{SO_2}=0,375$  atm**

Temperatura (°C)	Actividad $a_{FeO}$	Grado de Mata (%Cu)						
		58	59	60	61	62	min	max
1 180	0,35	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
1 180	0,40	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,28	0,29
1 180	0,50	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30	0,31
1 200	0,35	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,28	0,29
1 200	0,40	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,29	0,30
1 200	0,50	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,31	0,32

En la figura 4-5 se muestra las pérdidas de cobre fisicoquímicas solubles de acuerdo a modelo desarrollado por Nagamori para las condiciones de operación del Horno Isasmelt considerando A igual a 35,9 la cual considera una escoria saturada en sílica, libre de %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 1 200 y 1 400°C. De acuerdo a la tabla 2-8 es el valor mas alto de A con lo cual se obtiene mayores pérdidas de cobre por la mayor solubilidad del Cu<sub>2</sub>O.

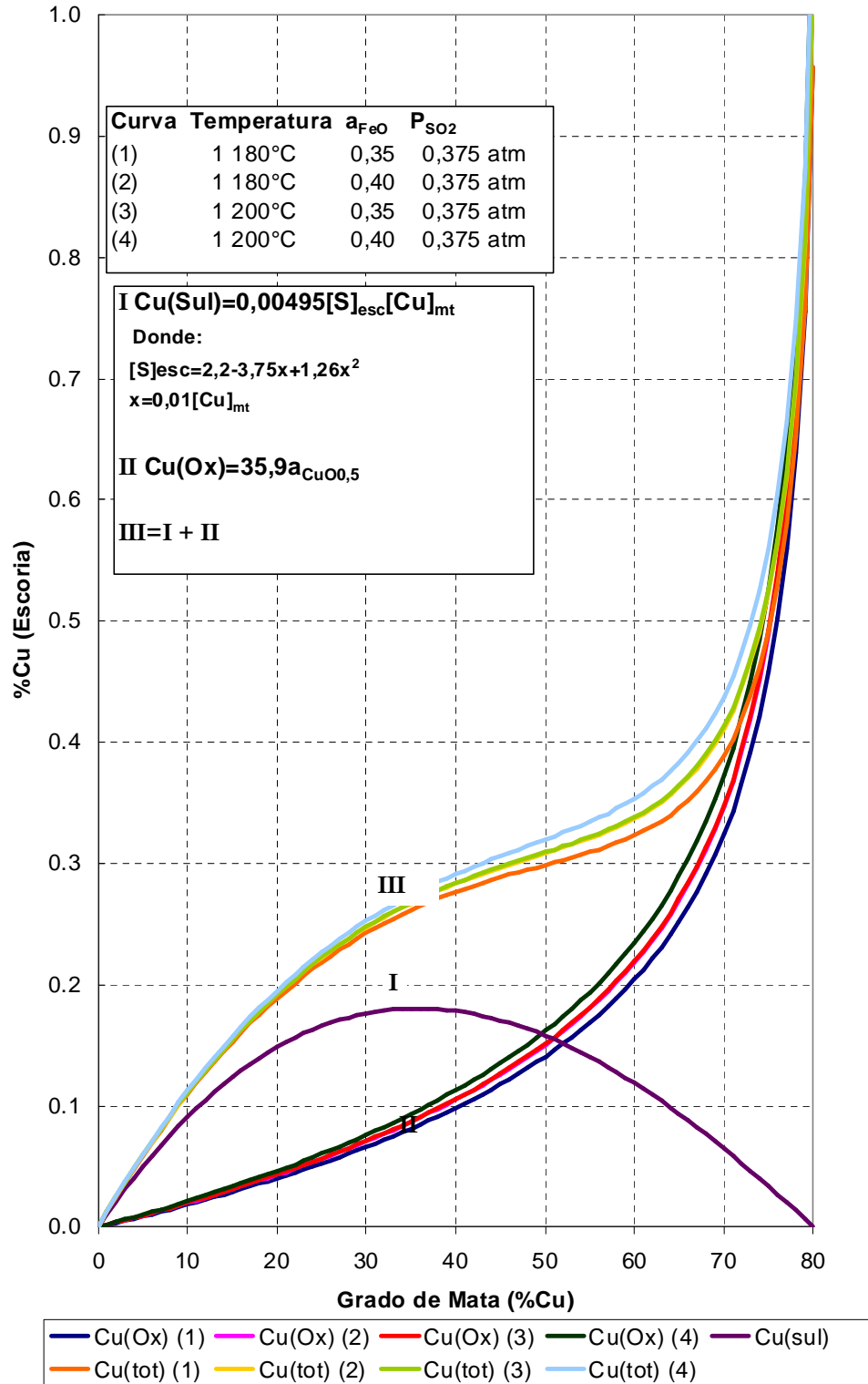


Figura 4-5 Modelo de Nagamori para  $A=35,9$   $P_{SO_2}$  de 0,375 atm.

En la tabla 4-5 se muestra que las pérdidas de cobre solubles de acuerdo al modelo de Nagamori se incrementan ligeramente con respecto aun sistema con CaO y se encuentra entre 0,32 y 0,39%Cu.

**Tabla 4-5 Pérdidas de cobre solubles por Modelo de Nagamori A=35,9 y  $P_{SO_2}=0,375$  atm**

Temperatura (°C)	Actividad $a_{FeO}$	Grado de Mata (%Cu)						
		58	59	60	61	62	min	max
1 180	0,35	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,32	0,33
1 180	0,40	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,33	0,35
1 180	0,50	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,35	0,37
1 200	0,35	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,33	0,34
1 200	0,40	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,35	0,36
1 200	0,50	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,37	0,39

El modelo de Nagamori tiene bases netamente termodinámicas y los cálculos obtenidos tomando como base las condiciones de operación del Horno Isasmelt se acercan bastante a los encontrados en diferentes trabajos de investigación.

#### **4.4. Determinación del efecto de la viscosidad en las pérdidas de cobre mecánicas.**

La viscosidad de la escoria puede ser calculada mediante el modelo Kv desarrollado por Toguri<sup>[3]</sup>, el cual se basa en datos bibliográficos de la viscosidad y se ajusta a un índice denominado Kv que representa la relación porcentual “base/acido”, conocida en la industria siderúrgica como índice de basicidad.

$$K_v = \frac{FeO + Fe_3O_4 + CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (3-1)$$

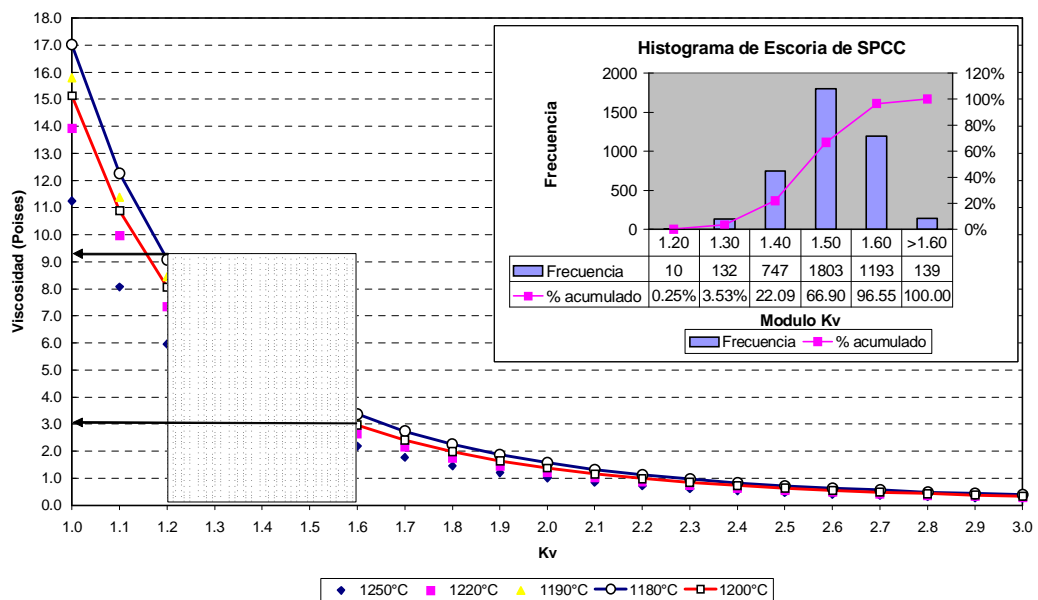
El índice Kv es sensible a cambios en la composición química de la escoria. Existe una relación simple del índice Kv con respecto a algunas temperaturas como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{a } 1250^{\circ}\text{C } \mu(\text{Poise}) &= 11,243 \text{ Kv}^{-3,481} \\ \text{a } 1220^{\circ}\text{C } \mu(\text{Poise}) &= 13,935 \text{ Kv}^{-3,5234} \\ \text{a } 1190^{\circ}\text{C } \mu(\text{Poise}) &= 15,797 \text{ Kv}^{-3,4322} \end{aligned} \quad (3-2)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (3-1) y (3-2) y a la ecuación de Arrhenius, la viscosidad puede ser calculada a diferentes temperaturas para cada valor del modulo Kv mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ln} \mu = \frac{E_f}{R} \left( \frac{1}{T} \right) + \text{Ln } A \quad (3-3)$$

Los datos de viscosidad obtenidos por este modelo presentan un desplazamiento aproximado de 0,5 poises con respecto a los datos experimentales.

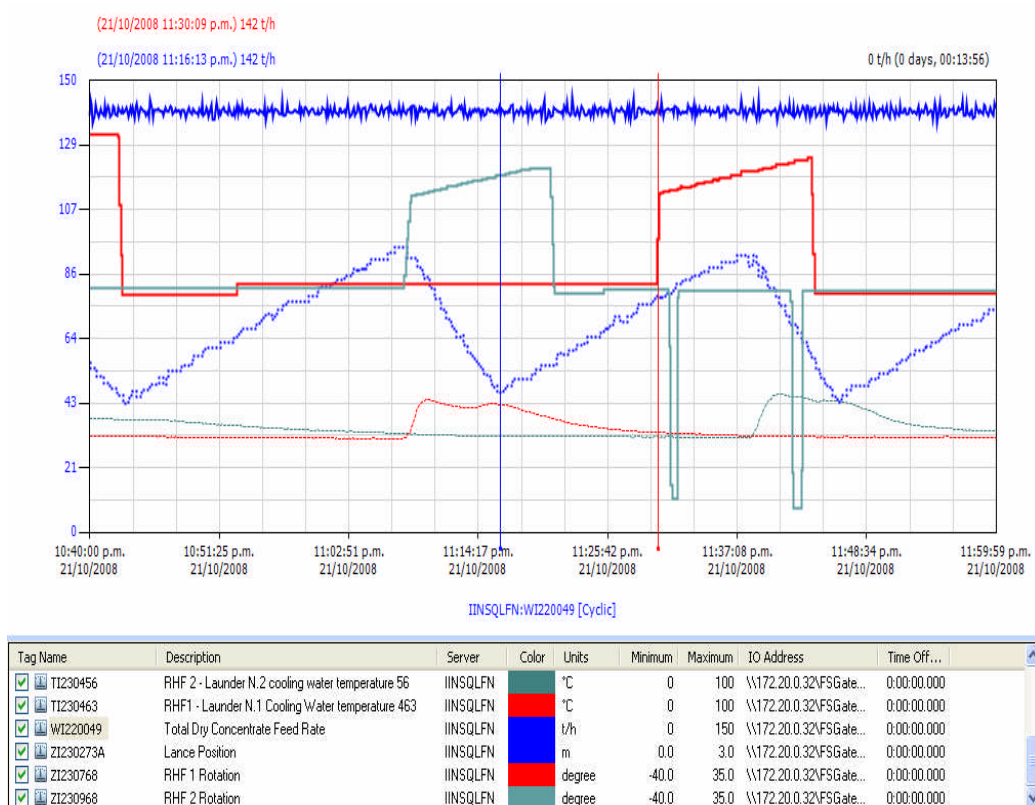


**Figura 4-6 Efecto de Modulo Kv en la Viscosidad de la escoria de SPCC**

En la figura 4-6 se ve un histograma del modulo de viscosidad Kv de las escorias de los Hornos de Separación, las cuales varían desde 1,20 hasta 1,60 siendo el valor de modulo Kv de mayor frecuencia de 1,5. También se muestra la curva de viscosidades para diferentes valores de Kv para temperaturas entre

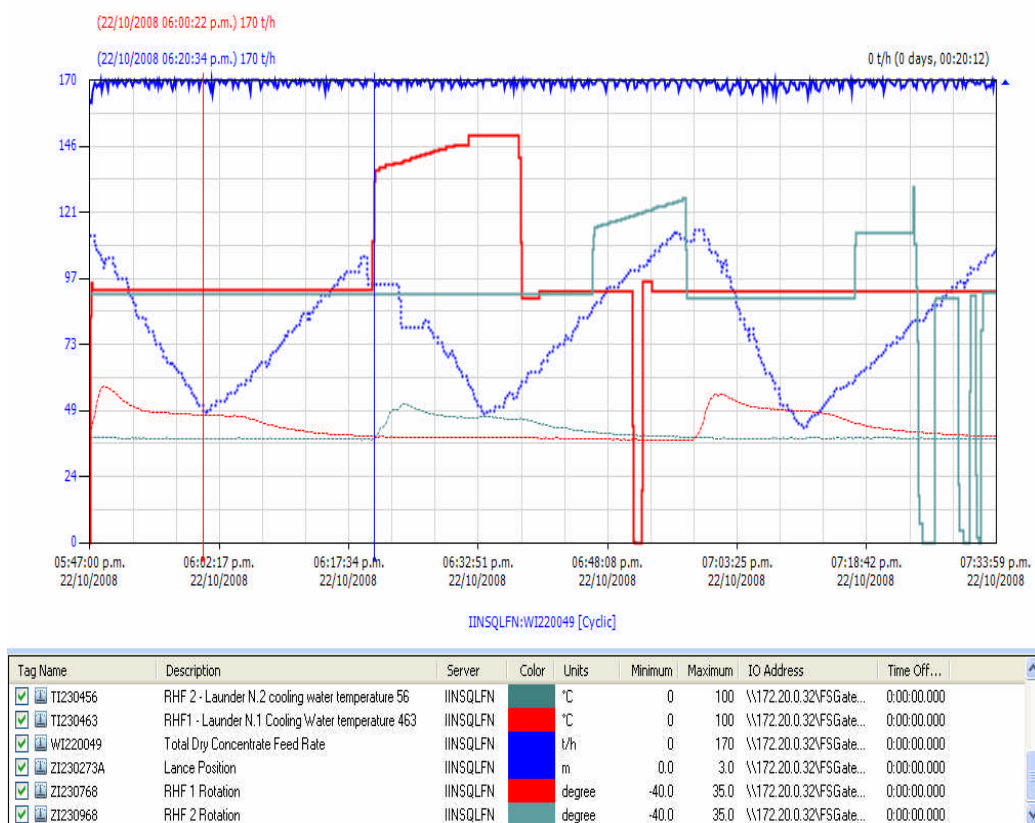
1 180 y 1 200°C. De acuerdo a las curvas determinadas las viscosidades estarían variando entre 3 y 9 Poises, sin embargo el promedio de las viscosidades estaría entre 4 y 5 Poises y los módulos Kv entre 1,4 y 1,5.

Los tiempos de sedimentación registrados en planta varían entre 15 y 20 minutos dependiendo de la velocidad de fusión a la cual se esta operando el Horno Isasmelt que fluctúa desde 120 hasta 165 TPH de concentrado. En la figura 4-7 y 4-8 se muestran las tendencias de operación del Horno Isasmelt de donde se calculan los tiempos de sedimentación para 140 y 170 tph de alimentación de concentrado, las cuales se encuentran entre 15 a 20 minutos.



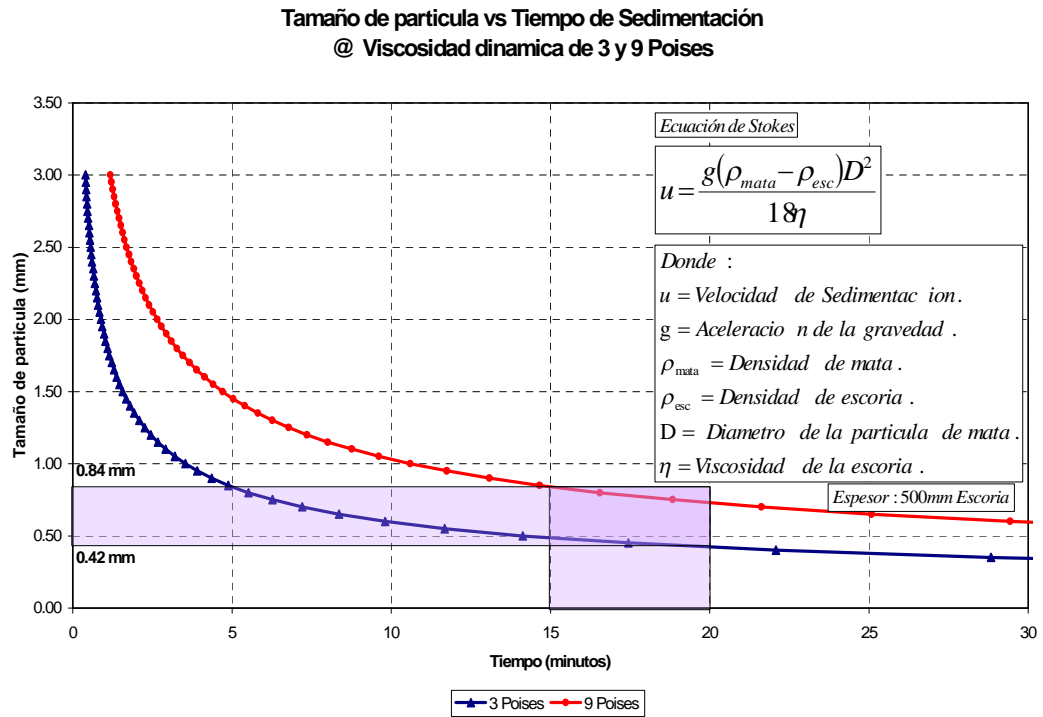
**Figura 4-7 Tendencia de operación para una fusión de 140 t/h de concentrado**





**Figura 4-8 Tendencia de operación para una fusión de 170 tph de concentrado**

En la figura 4-9 se muestra que para un tiempo de sedimentación de 20 minutos y una viscosidad de 3 poises, las partículas de mata menores a 0,42 mm de diámetro han sedimentado, sin embargo para una viscosidad de 9 poises y un tiempo de sedimentación de 15 minutos el diámetro de la partícula sedimentada se incrementa hasta a 0,84 mm.

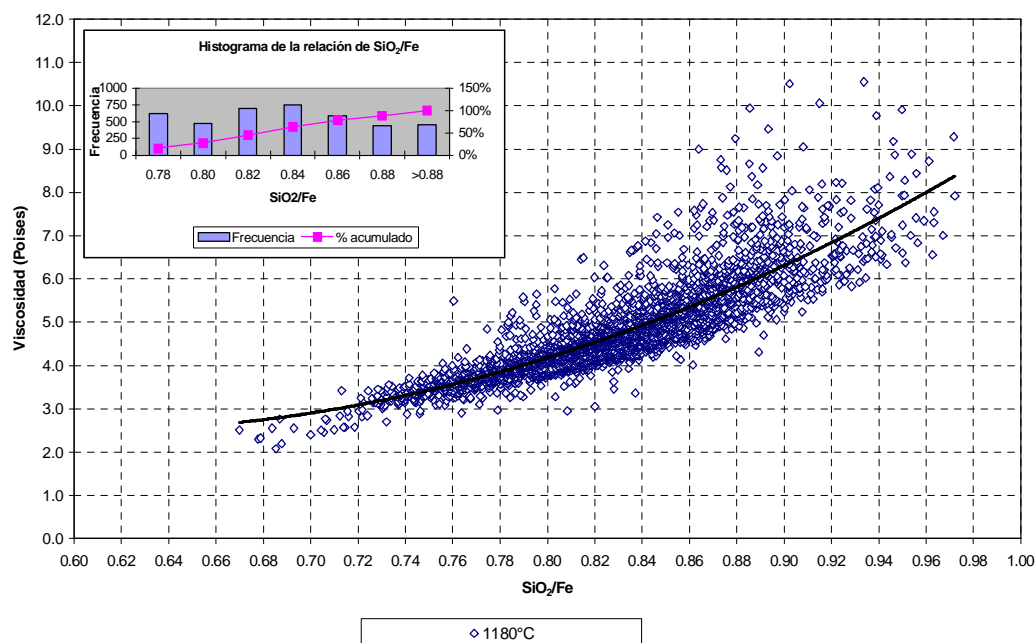


**Figura 4-9 Relación de tiempo de sedimentación y tamaño de partícula**

#### 4.5. Efecto de la composición química de la escoria en la viscosidad

En la Figura4-10 se observa que la viscosidad disminuye al disminuir la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  esto se cumple para el rango analizado, la tendencia muestra claramente el efecto de la  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  con respecto a la viscosidad, sin embargo de acuerdo a pruebas experimentales para relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  menores a 0,5, la viscosidad vuelve a incrementarse debido a un incremento en el contenido de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , esto no se nota debido a los rangos de operación.

También se muestra que la viscosidad varía entre 4 a 5 Poises para relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  que varían de 0,78 a 0,82.

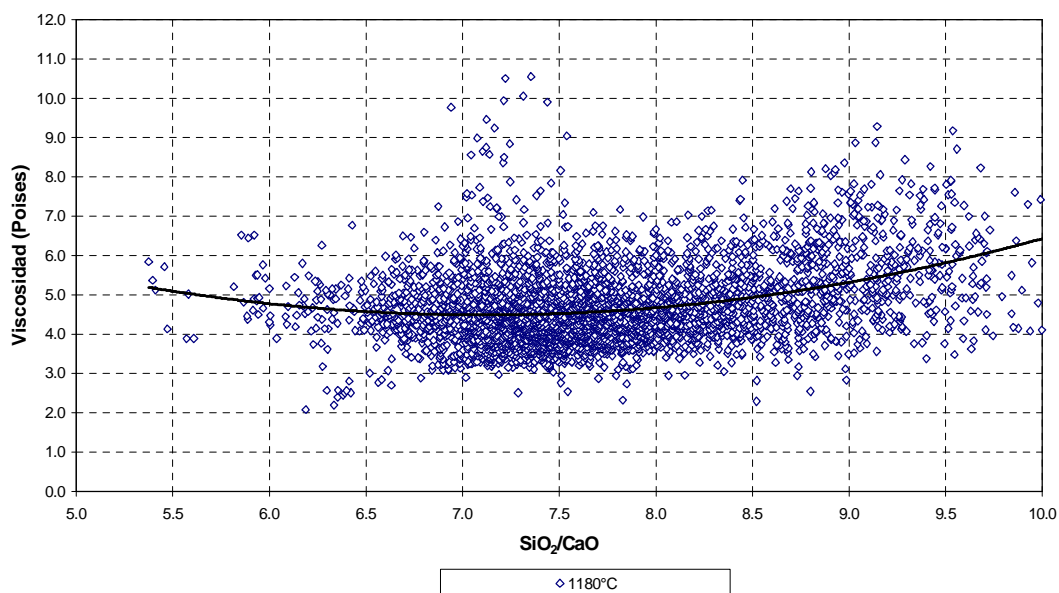


**Figura 4-10 Efecto de la Relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  en la viscosidad de escoria SPCC**

En la figura 4-11 se muestra que la viscosidad tiene una tendencia a incrementarse ligeramente para relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  menores a 7 y mayores a 8. También se puede ver que la viscosidad varía entre 4 a 5 Poises para relaciones  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  que están entre 7 y 8. Sin embargo las tendencias no son claras con respecto a la relación de  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  debido a la influencia de otros componentes que no se han mantenido fijos como el “FeO” y la  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Por otro lado estudios recientes<sup>[4]</sup> hacen mención del impacto del CaO en las escorias donde indica que para altas concentraciones de CaO en la escoria la interacción  $\text{CaO-SiO}_2$  es mucho más fuerte que la interacción  $\text{FeO-SiO}_2$ . El incremento de CaO consume algo de sílica en la escoria. Por lo tanto el CaO puede ser adicionado solo con el objetivo de disminuir el punto de fusión.

La fase Olivita puede ser representado con la siguiente formula  $[\text{Fe}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}]\{\text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+}\}_2\text{SiO}_4$ . La precipitación de este sólido frecuentemente esta asociado con un exceso de MgO en la escoria, pero pueden también existir altos niveles de CaO<sup>[4]</sup>.



**Figura 4-11 Efecto de la Relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  en la Viscosidad**

El espinel<sup>[4]</sup> es una solución sólida que puede ser representada por  $[\text{Fe}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Mg}^{2+}]\{\text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+}\}_2\text{O}_4$  la cual comúnmente esta relacionada con la precipitación de magnetita. Para el presente caso se considera a la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como impureza presente en los concentrados. Niveles por encima de 6 % $\text{Al}_2\text{O}_3$  en la escoria afectan fuertemente en el control de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y la viscosidad de la escoria, ver. (Véase figura 4-12).

Debido a que las pérdidas de cobre se deben principalmente a las pérdidas de cobre mecánicas las que pueden ser disminuidas encontrando la composición química de la escoria adecuada para regular la viscosidad a una temperatura de operación comprendida entre 1 180 - 1 200°C. Del análisis realizado hasta ahora realizado se deduce lo que se observa en la tabla 4-6.

**Tabla 4-6 Composición de escorias con viscosidades adecuadas**

Parámetros	Rango	Observación
$\text{SiO}_2/\text{Fe}$	0,78 – 0,82	Desde el punto de vista de viscosidad
$\text{SiO}_2/\text{CaO}$	7 - 8	
Viscosidad (Poise)	4 - 5	Entre 1 180 a 1200°C
Modulo Kv	1,4 – 1,5	Medición de viscosidad

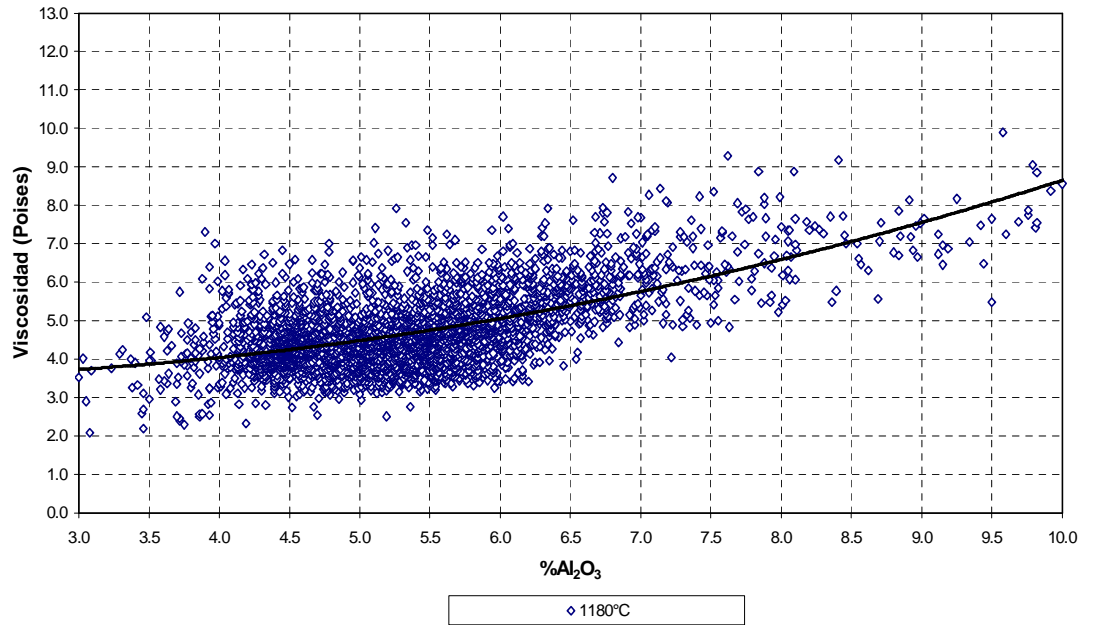


Figura 4-12 Efecto de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en la Viscosidad de escoria SPCC

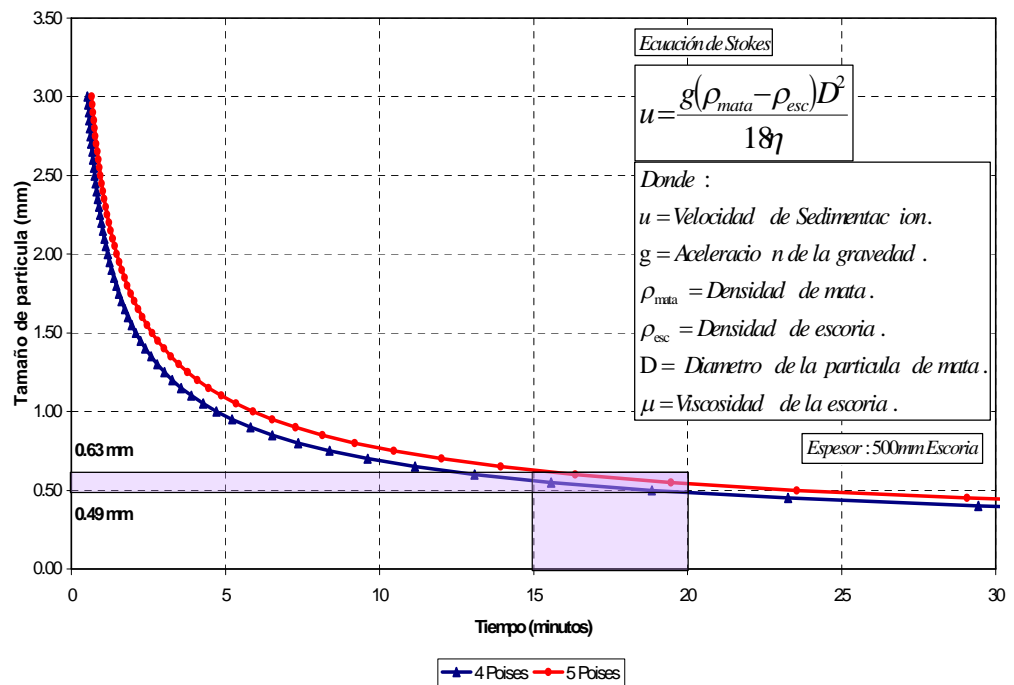


Figura 4-13 Relación de tamaño de partícula y tiempo de sedimentación

#### 4.6. Análisis estadístico de las escorias de los Hornos de Separación

En la figura 4-13 se observa que para un tiempo de sedimentación de 20 minutos y una viscosidad de 4 poises, las partículas de mata menores a 0,49 mm de diámetro han sedimentado, sin embargo para una viscosidad de 5 poises y un tiempo de sedimentación de 15 minutos el diámetro de la partícula sedimentada solo se incrementa hasta a 0,63 mm.

Las bases para el análisis estadístico esta detallado en el capitulo III donde se ha definido que:

- Se considera como muestras normales a escorias con contenidos de cobre entre 0,32 a 0,90 %Cu.
- Muestras de escorias con contenidos de cobre por encima de 0,90 %Cu se presentan por falta de tiempo de sedimentación o de temperaturas adecuadas para regular viscosidad a 5 Poises.

De acuerdo a los resultados mostrados en las Tablas 4-7, 4-8 y 4-9, respectivamente se puede afirmar que:

- Para escorias con contenidos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mayor a 8,5 % en todos los casos, rangos de Kv, y de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  el contenido de cobre está por encima de 1,19 % Cu.
- Para  $\text{Kv} < 1,4$  (escorias con viscosidad mayor a 5 poises a 1 180°C) representa el 22,07 % del total de muestras, donde el promedio de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  es de 0,88. Solo el 12,34 % del total de muestras tiene un contenido de cobre de 0,64 %Cu con una relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,88 y  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  igual a 8,23.
- Para Kv entre 1,4 y 1,5 (escorias con viscosidad entre 4-5 Poises a 1 180°C) representa el 44,9 % del total de muestras, donde el promedio de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  es de 0,83. El 20,48 % del total de muestras presenta un contenido de cobre de 0,62 %Cu con relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,84 y  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  de 7,79. El 9,94 % del total de muestras presenta un contenido de cobre de 0,63% con una relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,81 y de  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  igual a 7,82.
- Para  $\text{Kv} > 1,5$  (escorias con viscosidad menor a 4 Poises a 1 180°C) representa el 33,08 % del total de muestras, donde el promedio de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  es de 0,78. El 23,98% del total de muestras presenta un contenido de cobre de 0,61 %Cu con una relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,78 y

SiO<sub>2</sub>/CaO de 7.64. El 1,19 % del total de muestras presenta un contenido de cobre de 0,69 con relaciones SiO<sub>2</sub>/Fe de 0,83 y SiO<sub>2</sub>/CaO de 7,62.

**Tabla 4-7 Análisis Estadístico de Escorias de los Hornos de Separación para Modulo Kv < 1.4**

Rango Kv < 1,4 Muestras Distribución 888 22,07% Pérdidas de cobre 0,94 %Cu	Rango SiO <sub>2</sub> /Fe [0,78-0,82] Muestras Distribución 15 0,37% Pérdidas de Cobre 1,47% %Cu	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ≤ 8,5  11 0,27% 1,45 %Cu	<b>Cu ≤ 0,90</b>  <b>5</b> 0,12% <b>0,71</b> %Cu <b>0,81</b> SiO <sub>2</sub> /Fe <b>8,04</b> SiO <sub>2</sub> /CaO
			Cu > 0,90  6 0,15% 1,83 %Cu 0,80 SiO <sub>2</sub> /Fe 8,33 SiO <sub>2</sub> /CaO
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> > 8,5  4 0,10% 1,51 %Cu 0,80 SiO <sub>2</sub> /Fe 7,54 SiO <sub>2</sub> /CaO	
	Rango SiO <sub>2</sub> /Fe > 0,82 Muestras Distribución 873 21,69% Pérdidas de Cobre 0,93% %Cu	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ≤ 8,5  705 17,52% 0,85 %Cu	<b>Cu ≤ 0,90</b>  <b>484</b> 12,03% <b>0,64</b> %Cu <b>0,88</b> SiO <sub>2</sub> /Fe <b>8,23</b> SiO <sub>2</sub> /CaO
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> > 8,5  168 4,17% 1,28 %Cu 0,88 SiO <sub>2</sub> /Fe 7,88 SiO <sub>2</sub> /CaO		Cu > 0,90  221 5,49% 1,31 %Cu 0,89 SiO <sub>2</sub> /Fe 8,29 SiO <sub>2</sub> /CaO	

**Tabla 4-8 Análisis Estadístico de Escorias de los Hornos de Separación para Modulo Kv [1.4 – 1.5]**

<p>Rango Kv [1,4-1,5] Muestras Distribución 1 805 22,07% Pérdidas de cobre 0,84 %Cu</p>	<p>Rango SiO<sub>2</sub>/Fe [0,78-0,82] Muestras Distribución 538 13,37% Pérdidas de Cobre 0,8 %Cu</p>	<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ≤ 8,5</p> <p>506 12,57% 0,77 %Cu</p>	<p><b>Cu ≤ 0,90</b></p> <p><b>400</b> 9,94% <b>0,63</b> %Cu <b>0,81</b> SiO<sub>2</sub>/Fe <b>7,82</b> SiO<sub>2</sub>/CaO</p>
		<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> &gt; 8,5</p> <p>32 0,80% 1,35 %Cu 0,81 SiO<sub>2</sub>/Fe 7,50 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>	<p>Cu &gt; 0,90</p> <p>106 2,63% 1,35 %Cu 0,81 SiO<sub>2</sub>/Fe 7,80 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>
	<p>Rango SiO<sub>2</sub>/Fe &gt; 0,82 Muestras Distribución 1 267 31,49% Pérdidas de Cobre 0,86% %Cu</p>	<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ≤ 8,5</p> <p>1 117 27,76% 0,79 %Cu</p>	<p><b>Cu ≤ 0,90</b></p> <p><b>824</b> 20,48% <b>0,62</b> %Cu <b>0,84</b> SiO<sub>2</sub>/Fe <b>7,79</b> SiO<sub>2</sub>/CaO</p>
		<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> &gt; 8,5</p> <p>150 3,73% 1,36 %Cu 0,84 SiO<sub>2</sub>/Fe 7,24 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>	<p>Cu &gt; 0,90</p> <p>293 7,28% 1,29 %Cu 0,84 SiO<sub>2</sub>/Fe 7,24 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>



**Tabla 4-9 Análisis Estadístico de Escorias de los Hornos de Separación  
para Modulo Kv > 1.5**

<p>Rango Kv &gt;1.5 Muestras Distribución 1 331 33,08% Pérdidas de cobre 0,79 %Cu</p>	<p>Rango SiO<sub>2</sub>/Fe [0,78-0,82] Muestras Distribución 1 240 30,82% Pérdidas de Cobre 0,78 %Cu</p>	<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ≤ 8,5</p> <p>1 174 29,17% 0,76 %Cu</p>	<p><b>Cu ≤ 0,90</b></p> <p><b>965</b> 23,98% <b>0,61</b> %Cu <b>0,78</b> SiO<sub>2</sub>/Fe <b>7,64</b> SiO<sub>2</sub>/CaO</p>
		<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> &gt; 8,5</p> <p>66 1,64% 1,19 %Cu 0,78 SiO<sub>2</sub>/Fe 7,69 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>	<p>Cu &gt; 0,90</p> <p>209 5,19% 1,43 %Cu 0,78 SiO<sub>2</sub>/Fe 7,51 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>
	<p>Rango SiO<sub>2</sub>/Fe &gt; 0,82 Muestras Distribución 91 2,26% Pérdidas de Cobre 0,95% %Cu</p>	<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ≤ 8,5</p> <p>78 1,94% 0,89 %Cu</p>	<p><b>Cu ≤ 0,90</b></p> <p><b>48</b> 1,19% <b>0,69</b> %Cu <b>0,83</b> SiO<sub>2</sub>/Fe <b>7,62</b> SiO<sub>2</sub>/CaO</p>
		<p>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> &gt; 8,5</p> <p>13 0,32% 1,28 %Cu 0,83 SiO<sub>2</sub>/Fe 6,96 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>	<p>Cu &gt; 0,90</p> <p>30 0,75% 1,46 %Cu 0,83 SiO<sub>2</sub>/Fe 6,79 SiO<sub>2</sub>/CaO</p>

#### 4.7 Efecto de la relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ en las escorias de los Hornos de Separación

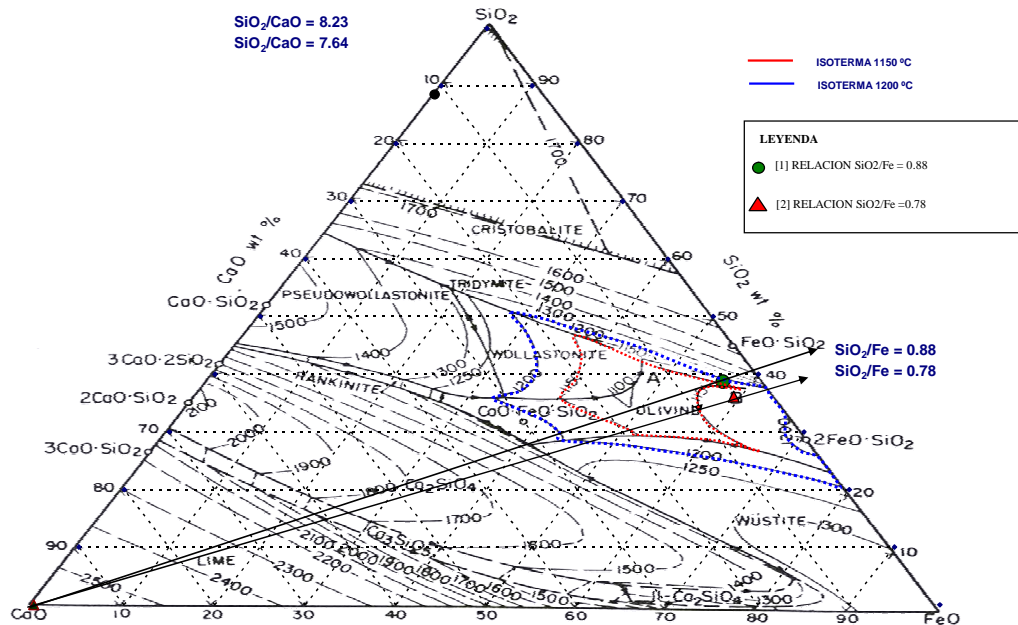


Figura 4-14 Efecto de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  en el sistema ternario  $\text{SiO}_2$ -“ $\text{FeO}$ ”- $\text{CaO}$

En la figura 4-14 se observa la ubicación de los dos grupos de escorias que se presentan en los Hornos de Separación ambos con contenidos de cobre menor a 0,70 %Cu. La escoria con relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,88 esta dentro de la zona de tridimita y se encuentra en la isoterma de 1 190°C, sin embargo la escoria con relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,78 esta próximo al inicio de la zona tridimita en la isoterma de 1 160°C.

##### 4.7.1 Efecto de la relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ en la viscosidad

En la Tabla 4-10 se muestra el efecto de la relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  en la viscosidad. Si disminuye la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  aumenta el modulo  $K_v$  y disminuye la viscosidad de la escoria.

**Tabla 4-10 Efecto de la relación SiO<sub>2</sub>/Fe en la viscosidad**

Escoria	SiO <sub>2</sub> /Fe	SiO <sub>2</sub> /CaO	Kv	Viscosidad (Poise) @ 1 180°C	Viscosidad (Poise) @ 1 200°C
Grupo 1	0,78	7,64	1,50	4,21	3,72
Grupo 2	0,88	8,23	1,39	5,48	4,84

**4.7.2 Efecto de la relación SiO<sub>2</sub>/Fe en la masa de escoria**

Otro efecto de la relación SiO<sub>2</sub>/Fe es en el peso de la escoria producida para una misma cantidad de concentrado fundido; es decir, a menor relación SiO<sub>2</sub>/Fe la producción de escoria será menor por menor requerimiento de fundente sílice. Las pérdidas de cobre son proporcionales a la cantidad de escoria producida por lo que a menor relación de SiO<sub>2</sub>/Fe las pérdidas de cobre serán menores. En las tablas 4-11 y 4-12 se puede ver que la reducción de la relación SiO<sub>2</sub>/Fe de 0,88 a 0,80 mostró una disminución en el peso de la escoria producida en 6,45 % en las escorias de los Hornos de Separación.

**Tabla 4-11 Consumo de Fundentes y peso de escoria retirada**

SiO <sub>2</sub> /Fe	SiO <sub>2</sub> /CaO	Conchuela tph	Silica tph	t. escoria t. conc.	Escoria	
					Ton.	Ollas *
0.88	5.83	4,880	13,888	0.66	52,585	1,115
0.84	6.14	4,495	13,558	0.64	51,482	1,091
0.83	6.49	4,117	12,371	0.63	50,372	1,068
0.80	7.58	3,207	11,553	0.62	49,196	1,043
Diferencia De 0.88 a 0.80		<b>1,673</b>	<b>2,334</b>	0.04	3,390	72
Porcentaje de reducción (%)		<b>34.3</b>	<b>16.8</b>	<b>6.4</b>	<b>6.4</b>	

(\*) Peso olla de escoria: 47.17 t.

**Tabla 4-12 Pérdidas de Cu en escorias de depósito**

Fecha	SiO <sub>2</sub> /Fe	SiO <sub>2</sub> /CaO	Escoria HS %Cu	Prod. Escoria Ton.	Cu a deposito Lbs.
01 Oct - 24 Oct	0.88	5.83	0.72	52,585	834,466
24 Oct - 03 Nov	0.84	6.14	0.74	51,482	839,650
07 Nov - 20 Nov	0.83	6.49	0.73	50,372	810,447
25 Nov - 16 Dec	0.80	7.58	0.72	49,196	780,678
Diferencia entre SiO <sub>2</sub> /Fe: 0.88 - 0.80 y SiO <sub>2</sub> /CaO: 5.8 a 7.5				3,390	53,788
Porcentaje de reducción (%)				<b>6.45</b>	

Finalmente de las Tablas 4-7, 4-8 y 4-9 considerando el efecto de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  se obtiene la Tabla 4-13 donde se muestra que de las escorias actuales solo el 55,7% se encontraría dentro de los rangos deseados.

**Tabla 4-13 Distribución de pérdidas de cobre en escorias actuales SPCC**

<b>Pérdidas de cobre en escorias de Horno de Separación</b>	<b>N° Muestras</b>	<b>% Distribución</b>	<b>%Cu</b>	<b><math>\text{SiO}_2/\text{Fe}</math></b>	<b><math>\text{SiO}_2/\text{CaO}</math></b>
Pérdidas Aceptables Relación de $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ [0.78-0.82]	2 242	55,7	0,62	0,81	7,73
Pérdidas por mayor volumen Relación $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ [ $>0.82$ ]	484	12,0	0,64	0,88	8,23
Pérdidas por alta Magnetita $\text{Fe}_3\text{O}_4 > 8.5\%$	433	10,8	1,30	0,84	7,57
Pérdidas por falta de sedimentación temperatura ó alto inventario	865	21,5	1,33	0,83	7,74

**Fuente: Muestras tomadas de la base de datos de laboratorio metalúrgico de Fundición en el periodo Enero-Junio 2008**

#### **4.8 Análisis de Causas Operativas que influyen en las pérdidas de cobre**

En este análisis se pretende identificar las causas operativas que nos llevan a la distribución de pérdidas mostradas en la Tabla 4-13 de donde, se pueden clasificar por el contenido de cobre, siendo las de mayor impacto las pérdidas por alto inventario y por alto contenido de magnetita.

Las pérdidas por mayor volumen de escoria a relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  mayores a 0,82 es 12 %, pueden controlarse desde el Horno Isasmelt.

Las pérdidas por falta de tiempo de sedimentación y por alto inventario de mata es 21,5 %, las cuales pueden controlarse mediante una buena comunicación y coordinación entre el Horno Isasmelt, Hornos de Separación y los Convertidores Peirce Smith.

Las pérdidas por alto contenido de magnetita es 10,8 %, que pueden controlarse desde el Horno Isasmelt y mediante la adición de arrabio en los Hornos de Separación.

#### 4.8.1 Control de Inventarios y determinación de ángulos de giro en los Hornos de Separación.

Para el control de inventarios se dispone de un modelo en el sistema instalado en el panel de control del horno, el cual calcula la cantidad de mata y de escoria en función de las medidas del baño tomadas a través de una barra de medición y considerando las referencias geométricas del horno predeterminadas anteriormente. Asimismo el modelo considera los parámetros de densidad de la mata, de la escoria, el nivel de acreción, etc. De esta forma el operador determina sus inventarios en base a las mediciones físicas que realiza después de cada colada que recibe del Horno Isasmelt, el modelo calcula las ollas de matas disponibles que pueden ser enviadas a los convertidores.

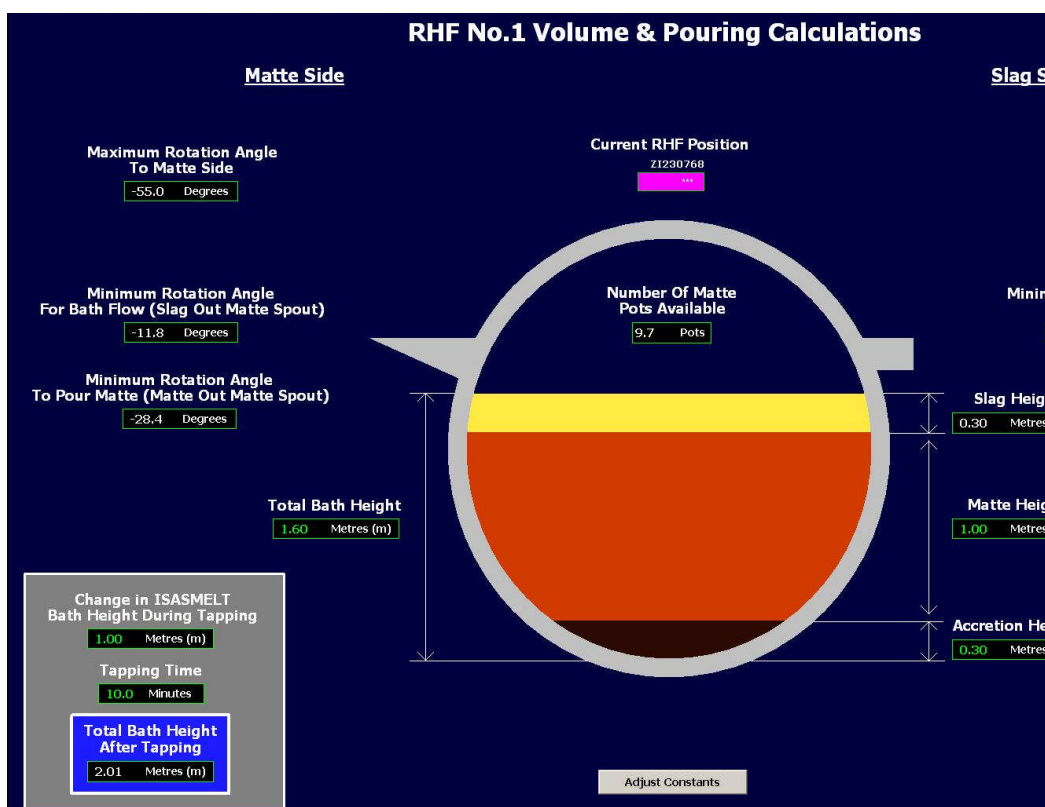


Figura 4-15 Cálculo de ollas de mata disponibles

El giro del horno durante el retiro de escoria tiene una relación directa con el nivel de baño total, por ello es importante determinar cuanto será el nivel total resultante después de retirar la escoria con el máximo ángulo de giro que es 25°.

De forma similar se calcula los ángulos de giro para el retiro de mata en función del nivel de mata considerando la altura de acreción acumulada en el piso.

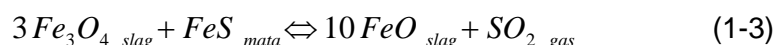
En la tabla 4-14 se muestra que para el máximo ángulo de giro físicamente posible de 25° el nivel de baño mínimo es de 1,50 m y considerando 0,3 m como el mínimo espesor de escoria, el nivel de mata es 1,20 m. De esto resulta que si se quiere evitar la presencia de mata que contamine la escoria durante el retiro de la misma, el nivel de mata recomendado debe estar entre 0,90 a 1,20 m. Si el nivel de mata se encuentra por encima, entonces el ángulo de giro es menor de acuerdo a la tabla 4-14, es decir si el nivel de mata se encuentra en 1,40 m se debe retirar escoria solo hasta 18°.

**Tabla 4-14 Angulo de escoriado en función de nivel de mata**

ANGULO DE GIRO LADO DE MATA	NIVEL "MATA+ACRECIÓN "	OLLAS MATA DISPONIBLES	MAXIMO ANGULO DE ESCORIADO	NIVEL "TOTAL+ACRECIÓN "
-27,2	1,40	7,3	18	1,71
-30,3	1,30	6,5	21	1,60
<b>-33,6</b>	<b>1,20</b>	<b>5,6</b>	<b>25</b>	<b>1,50</b>
<b>-35,2</b>	<b>1,15</b>	<b>5,3</b>		
<b>-36,9</b>	<b>1,10</b>	<b>4,8</b>	<b>ESPESOR DE ESCORIA</b> MINIMO 0,30 m MAXIMO 0,65 m OPTIMO 0,4 – 0,6 m	
<b>-40,3</b>	<b>1,00</b>	<b>4,0</b>		
-43,8	0,90	3,2		
-45,0	0,85	3,0		

#### 4.8.2 Control de $Fe_3O_4$ del Horno Isasmelt e influencia de la relación $SiO_2/Fe$

Como lo plantearan algunos investigadores como Korakas<sup>[15]</sup>, el comportamiento de la magnetita en la escoria de los procesos de fusión y conversión puede ser discutido en términos del equilibrio gobernado por la reacción mostrada, de la cual se calcula la actividad de la magnetita:



$$K = \frac{a_{FeO}^{10} p_{SO_2}}{a_{Fe_3O_4}^3 a_{FeS}} \quad (3-4)$$

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT * 2,303 \text{Log } K$$

En el Equilibrio :  $\Delta G = 0$

$$\text{Log } K = -\frac{\Delta G^0}{2,303 * RT} \quad K = 10^{-\Delta G^0 / 2.303RT}$$

$$\log a_{Fe_3O_4} = \frac{1}{3} \left( 10 \log a_{FeO} - \log a_{FeS} + \log p_{SO_2} + \frac{\Delta G^0}{2,303RT} \right) \quad (3-5)$$

De la relación (3-5) es importante conocer la actividad del FeS en la mata y la actividad del FeO en la escoria para evaluar el comportamiento de la magnetita.

#### 4.8.2.1 Actividad del FeS en las matas del Horno Isasmelt

Asano<sup>[8]</sup> obtuvo las actividades del FeS y del Cu<sub>2</sub>S a 1300°C relativas a la fracción molar de Cu<sub>2</sub>S en matas que contienen magnetita tal como es mostrado en la figura 4-16.

Posteriormente, D.R. Gaskell, J. Palacios y C. Somsiri<sup>[7]</sup> calcularon las variaciones de las actividades del FeS y del Cu<sub>2</sub>S en función al grado de mata a 1 200°C y las compararon con los valores hallados por W.A. Krivsky y R. Schumann Jr. a 1 350°C, encontrando que dichas actividades no son sensibles a las variaciones de temperatura. En la figura 4-16 se muestra que cuando el FeS y el Cu<sub>2</sub>S puros son mezclados y mantenidos en estado fundido, las actividades de cada componente son casi ideales; sin embargo, en las matas comerciales que contienen oxígeno (combinado principalmente con hierro) más otras impurezas elementales, la actividad del FeS llega a ser mas baja que en el sistema binario puro, mientras que la actividad del Cu<sub>2</sub>S permanece cercana al ideal.

A partir de las actividades de la Figura 4-16 se tabulan y se determinan a través de una regresión polinomial la actividad del FeS en función de la fracción molar del Cu<sub>2</sub>S resultando la siguiente ecuación:

$$a_{FeS} = 0,2761(X_{Cu_2S})^2 - 0,9298(X_{Cu_2S}) + 0,6557 \quad (3-6)$$

Donde:  $X_{Cu_2S}$ : Fracción molar de Cu<sub>2</sub>S en la mata

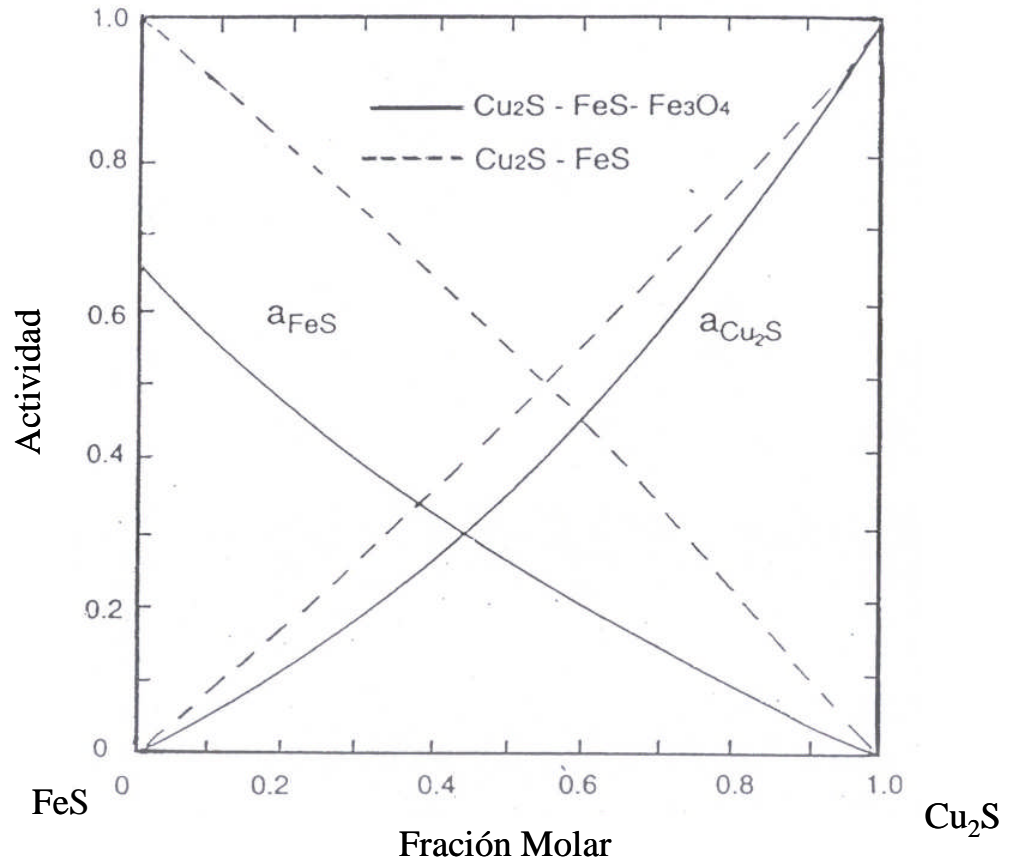
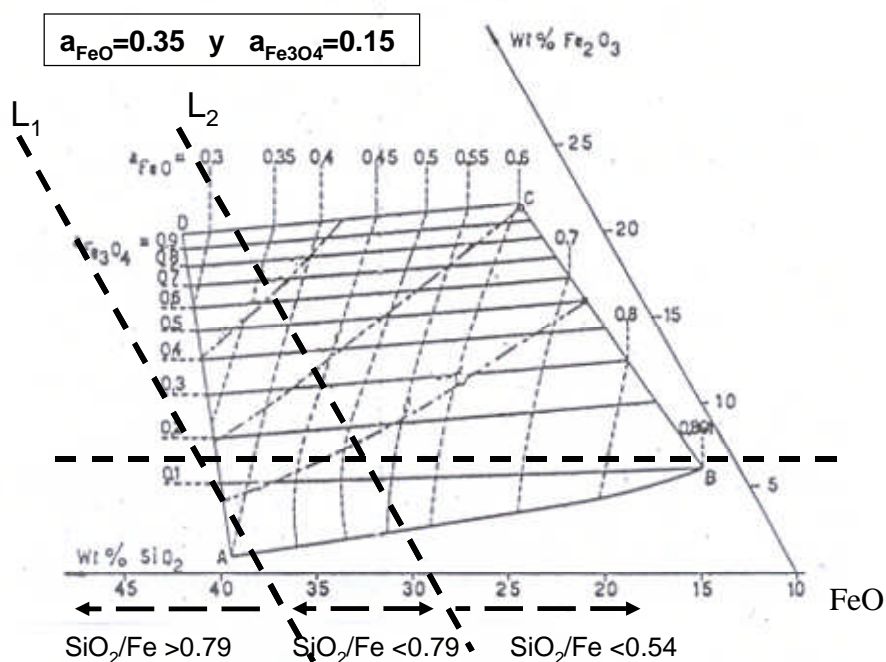


Figura 4-16 Actividades del FeS y Cu<sub>2</sub>S en la fase mata a 1 300°C<sup>[7]</sup>

#### 4.8.2.2 Actividad del FeO en las escorias del Horno Isasmelt

En la figura 4-17 se trata de mostrar que de la diagonal L<sub>1</sub> límite superior de la fayalita hacia el lado izquierdo se encuentra la zona de tridimita, es decir las escorias con relaciones de SiO<sub>2</sub>/Fe mayores a 0,79 y hacia el lado derecho las escorias con relaciones de SiO<sub>2</sub>/Fe menores a 0,79. L<sub>2</sub> es el punto mismo de la fayalita 2FeO.SiO<sub>2</sub>, es decir a una relación SiO<sub>2</sub>/Fe de 0,54.





**Figura 4-17 Actividad del FeO y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> para escorias de composición promedio del Horno Isasmelt a 1300°C.**

También es importante mencionar que en la Figura 4-17 se considera una temperatura de 1300°C a la cual no se llega durante la operación del Horno Isasmelt y la actividad de 0,15 es para una temperatura de 1300°C. Sin embargo, si se considera un diagrama similar para una temperatura de 1200°C el área ABCD es menor. Las áreas se observan en la figura 4-18, las cuales se incrementan con la temperatura.

Las escorias de los Hornos de Separación se encuentran en la parte superior al área 1 de la figura 4-18 donde se encontraban las escorias de los Reverberos considerando un mayor contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 5 a 10%.

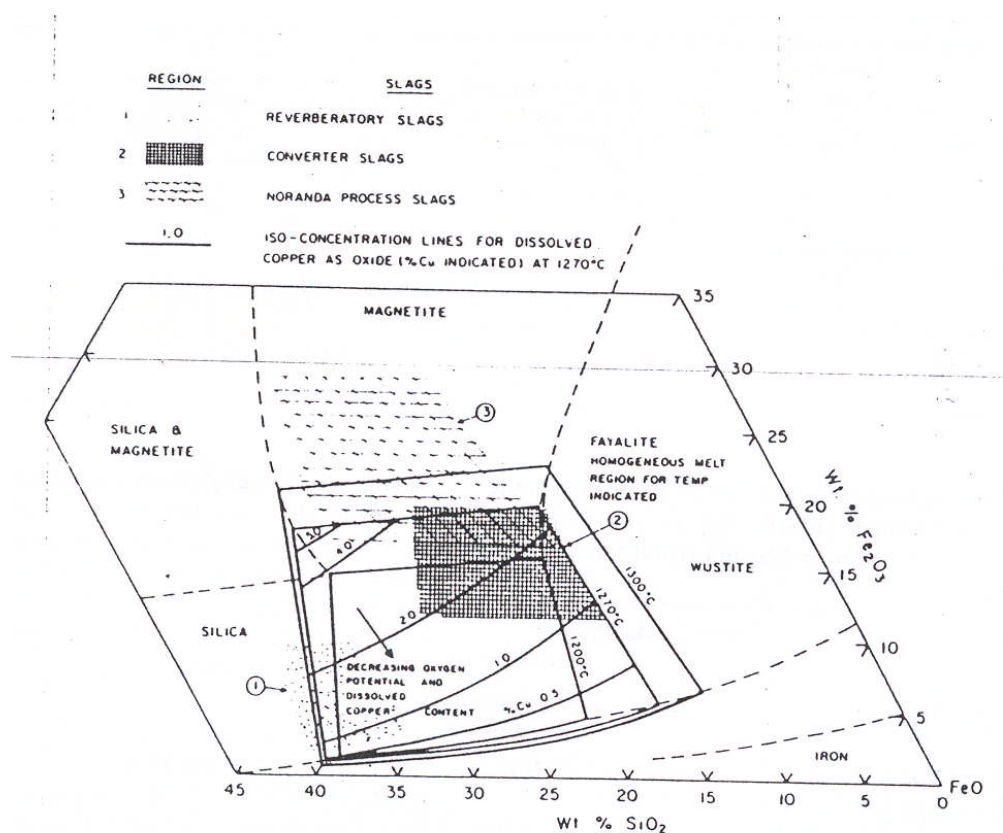


Figura 4-18 Región homogénea de fayalita a diferentes Temperaturas

#### 4.8.2.3 Actividad del $\text{Fe}_3\text{O}_4$ en las escorias del Horno Isasmelt

En tabla 4-13 se muestra los valores de la actividad en equilibrio y el contenido de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  estimado por Nagamori y Mackey para el sistema ternario  $\text{SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$  y las condiciones actuales del Horno Isasmelt.  $P_{\text{SO}_2}$  de 0,375 atm, actividad de FeO de 0,35 que le corresponde a una relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  de 0,79, actividad de FeS de 0,172 para un grado de mata de 62 %Cu y considerando una energía libre estándar  $\Delta G^\circ = 654\,720 - 381,95 T$ .

De la misma tabla 4-15 se observa que manteniendo la actividad  $a_{\text{FeO}}$  igual a 0,35 a una temperatura de 1 200°C la actividad y el contenido de la  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  disminuye.

**TABLA 4-15: Cuadro Resumen de Cálculo de Actividades de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

Grado de Mata (%)	a <sub>FeO</sub>	P <sub>SO2</sub> (atm)	a <sub>FeS</sub>	T (°C)	Log P <sub>O2</sub>	a <sub>Fe3O4</sub>	%Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> -FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0	0,35	0,375	1,180	1 180	-9.165	0,323	12,00
10	0,35	0,375	0,972	1 180	-9,109	0,345	12,20
20	0,35	0,375	0,781	1 180	-9,045	0,371	12,44
30	0,35	0,375	0,608	1 180	-8,973	0,403	12,73
40	0,35	0,375	0,452	1 180	-8,887	0,445	13,12
50	0,35	0,375	0,314	1 180	-8,782	0,502	13,65
58	0,35	0,375	0,216	1 180	-8,674	0,569	14,26
62	0,35	0,375	0,172	1 180	-8,607	0,614	14,67
75	0,35	0,375	0,046	1 180	-8,224	0,954	17,80
80	0,35	0,375	0,005	1 180	-7,599	1,961	27,04
0	0,35	0,375	1,180	1 200	-9,007	0,253	11,06
10	0,35	0,375	0,972	1 200	-8,951	0,270	11,30
20	0,35	0,375	0,781	1 200	-8,888	0,290	11,60
30	0,35	0,375	0,608	1 200	-8,815	0,315	11,96
40	0,35	0,375	0,452	1 200	-8,730	0,348	12,43
50	0,35	0,375	0,314	1 200	-8,624	0,393	13,07
58	0,35	0,375	0,216	1 200	-8,516	0,445	13,82
62	0,35	0,375	0,172	1 200	-8,449	0,481	14,34
75	0,35	0,375	0,046	1 200	-8,067	0,747	18,16
80	0,35	0,375	0,005	1 200	-7,441	1,534	29,48

En la tabla 4-16 se observa la influencia de la actividad del FeO en la actividad de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a temperaturas de 1 180 y 1 200 °C. También se muestra la

temperatura mínima para la cual la actividad de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  se vuelve 1 iniciando la saturación de la escoria con  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . De esto resulta que para una actividad de  $\text{FeO}$  de 0,35 no debemos operar por debajo de 1 141°C debido al inicio de saturación del contenido de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en la escoria.

**Tabla 4-16 Influencia de la actividad de  $\text{FeO}$  en la actividad de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$**

$a_{\text{FeO}}$	Temperatura (°C)	Log $P_{\text{O}_2}$	$a_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$	Temperatura (°C) @ ( $a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 1$ )
0,35	1 180	-8,564	0,614	1 141
0,35	1 200	-8,443	0,481	
0,40	1 180	-8,615	0,959	1 176
0,40	1 200	-8,404	0,750	

## **Capítulo V**

### **Conclusiones y Recomendaciones**

#### **5.1. Introducción**

En el Capítulo I se ha considerado una descripción de la operación del Horno Isasmelt y de los Hornos de Separación de mata y escoria. La información estadística sobre las escorias de los Hornos de Separación de Fundición de Ilo de la SPCC, ha demostrado que en la práctica los contenidos de cobre en la escoria tomados durante el proceso de escoriado directamente del canal están entre 0,33 % y 6,87 % con un promedio de 0,85 % y una desviación estándar muestral de 0,49 %. Este amplio rango del contenido de cobre en la escoria de los Hornos de Separación constituye una preocupación para la Fundición, ya que la totalidad de esta escoria es de descarte y se va acumulando en el depósito de escoria. Se ha propuesto estudiar la relación entre las variables del proceso y su efecto en el contenido de cobre en las escorias, y buscar los parámetros que permitan disminuir el contenido de cobre en las escorias.

En el Capítulo II han sido considerados los aportes teóricos y experimentales sobre el contenido de cobre en las escorias fayalíticas, dándose énfasis al sistema binario  $\text{FeO-SiO}_2$  y los trabajos realizados sobre los sistemas ternarios  $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-FeO-SiO}_2$ . Se ha realizado una revisión de los fundamentos termodinámicos sobre las pérdidas de cobre en las escorias, encontrándose que las pérdidas totales de cobre se deben a las pérdidas por solubilidad del  $\text{Cu}_2\text{S}$  y  $\text{Cu}_2\text{O}$  en la escoria que se mantienen en equilibrio termodinámico, adicionando una pérdida de cobre debido a un atrapamiento físico que se gobiernan por la ley de Stokes y es dependiente principalmente de la viscosidad y tiempo de sedimentación. Asimismo, la estimación de la viscosidad es bastante compleja ya que depende de la composición de la escoria y de la temperatura a la cual se encuentra.

En el Capítulo III han sido mencionados los equipos, instrumentos y herramientas que hicieron posible la colección de muestras e información que sustentan el presente trabajo de tesis. Se han presentado tablas con los análisis de las muestras de escoria de los Hornos de Separación estimando la viscosidad mediante el modelo Kv. Se ha calculado la composición ternaria de las escorias de los Hornos de Separación para los sistemas ternarios  $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , y

CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>. También se ha desarrollado un análisis estadístico del contenido de cobre en las escorias tomando como base la viscosidad estimada y el contenido de cobre promedio esperado.

En el Capítulo IV los resultados del trabajo demuestran que:

- La relación SiO<sub>2</sub>/Fe de las escorias de los Hornos de Separación del período analizado de Enero a Junio del 2008 es 0,83 comparado con las escorias de los reverberos que tuvieron una relación SiO<sub>2</sub>/Fe de 0,79. Estas escorias llevadas al sistema ternario CaO-“FeO”-SiO<sub>2</sub> demuestran que las escorias actuales están más pegadas a zona de la tridimita y tienen mayor temperatura de fusión.
- El modelo termodinámico desarrollado por Nagamori calculado para las condiciones del Horno Isasmelt se aproxima a los menores contenidos de cobre en las escorias obtenidas para escorias muestreadas con tiempos de sedimentación muy largos debidos a paradas inesperadas del Horno Isasmelt.
- El modulo Kv utilizado para estimar la viscosidad<sup>[3]</sup> presenta una desviación de 0,5 poises de acuerdo a lo mencionado en la información recolectada, sin embargo ha permitido estimar los diámetros de partícula de mata que se puede obtener y la alta influencia de la relación SiO<sub>2</sub>/Fe en la viscosidad y el contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- El análisis estadístico de las escorias de los Hornos de Separación ha permitido identificar las principales causas que ocasionan altas pérdidas de cobre en las escorias como son: Una relación de SiO<sub>2</sub>/Fe mayor a 0,82 debido a un mayor volumen de escoria que produce, contenidos de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> mayores a 8,5% que incrementan la viscosidad ocasionando atrapamiento físico y altos inventarios de mata que ocasionan arrastre físico de mata contaminando la escoria.
- Es importante minimizar las pérdidas de cobre por alto inventario para lo cual se debe conocer el máximo ángulo de giro durante el proceso de retiro de escoria en función del inventario de mata total que se tenga.
- El control de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> es favorable para temperaturas de 1 180°C hacia arriba, considerando una actividad de FeO de 0,40. Cuando la actividad de FeO es de 0,35 la temperatura mínima aplicada debe ser 1 141°C.

## 5.2. Conclusiones

- De acuerdo al sistema ternario CaO-"FeO"-SiO<sub>2</sub> las escorias actuales tendrían un punto de fusión de 1160°C.
- Para evitar la precipitación de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en el Horno Isasmelt, termodinámicamente este no debe operar con temperaturas por debajo de 1 180°C para evitar su precipitación.
- De acuerdo a la ley de Stokes las pérdidas de cobre atrapadas como partículas de mata son menores a menor viscosidad y a mayor tiempo de sedimentación. La estimación de la viscosidad a través del modulo de viscosidad de Toguri<sup>[3]</sup> ha permitido analizar el efecto de los diferentes componentes de la escoria y del efecto de la temperatura.
- Desde el punto de vista de mejorar la viscosidad y favorecer menores pérdidas de cobre en las escorias de los Hornos de Separación para las escorias analizadas, se tiene que:
  1. La relación SiO<sub>2</sub>/Fe se encuentra entre 0,78 a 0,82. La relación es directa a mayor relación SiO<sub>2</sub>/Fe mayor viscosidad.
  2. La relación SiO<sub>2</sub>/CaO se encuentra entre 7 a 8. Sin embargo, también las escorias de los Hornos Reverberos que tienen menor contenido de CaO comparada con las escorias de los Hornos de Separación, muestran un modulo de viscosidad Kv mayor, lo que indica que para una misma temperatura su viscosidad es menor respecto a las escorias de los Hornos de Separación.
- Las escorias con relación de SiO<sub>2</sub>/Fe entre 0,78-0,82 y SiO<sub>2</sub>/CaO entre 7 a 8 tienen una temperatura de formación de 1 160°C; sin embargo, el control de magnetita en la escoria del Horno Isasmelt estaría definiendo la temperatura del proceso y este no debe ser menor a 1180°C.
- La temperatura de la escoria en los Hornos de Separación debe estar entre 1 180 a 1 200°C, siendo más favorable 1 200°C, esto con la finalidad de mantener la viscosidad entre 2 a 5 poises que permita decantar a un menor tamaño de partícula de mata durante el tiempo de sedimentación.
- La operación con una relación de SiO<sub>2</sub>/Fe mayor a 0,82 necesita una temperatura mayor incluso a 1 200°C, en el caso de no llegar a estas temperaturas la sílice no es digerida. Desde el punto de vista del balance

térmico del Horno Isasmelt el exceso de fundentes como sílica y/o coquina no es conveniente ya que necesita un adicional de energía para mantener la temperatura del baño.

- Del análisis estadístico se determinó que para todos los rangos de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  con contenidos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mayor a 6,5 % siendo aún mas crítico un contenido mayor a 8,5 %. En la escoria de los Hornos de Separación las pérdidas de cobre se encuentran alrededor de 1,30 %Cu, para estos casos se hace imprescindible la adición de arrabio para reducir la magnetita a razón de 580 kg por cada colada.
- Las pérdidas de cobre también puede verse afectada debido a la operación con altos inventarios de mata, por lo que es importante conocer las relaciones entre el ángulo de giro máximo durante el retiro de escoria para evitar contaminar la escoria con mata y debe ser función de los niveles de mata.

### 5.3. Limitaciones

Las muestras de escoria de los Hornos de Separación, han sido tomadas durante la operación de rutina durante el retiro de escoria, asumiéndose un estado de equilibrio mata-escoria que no es rigurosamente exacto.

Los valores considerados de los análisis de las escorias tales como contenido de sílica, óxido de calcio, alúmina, etc han sido aquellos correspondientes a la operación de rutina de los Hornos de Separación proporcionados por el laboratorio de Fundición de SPCC.

Los diagramas ternarios presentados son netamente teóricos y no consideran impurezas. La ubicación de las escorias de los Hornos Reverberos y Hornos de Separación en estos diagramas ternarios podría verse ligeramente afectada por la  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sin embargo para propósitos de estudio, su exactitud es aceptable.

### 5.4. Recomendaciones

- Disminuir el diámetro de colada del Horno Isasmelt con el objetivo de alargar los tiempos de colada hasta 15 minutos, esto dará la posibilidad de incrementar los tiempos de sedimentación.



- La temperatura de fusión de las escorias de los Hornos de Separación de acuerdo a diagrama ternario es 1 160°C, sin embargo el control de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en el Horno Isasmelt requiere una temperatura no menor a 1 180°C. De esto se puede sugerir que:
  1. Es posible incrementar la relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  hasta conseguir una temperatura de fusión de 1 180°C. En otras Fundiciones con similar tecnología consideran relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  de 10, 20 y 30.
  2. En la medida que se mantenga la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  menor a 0,79, y considerando el sistema binario  $\text{FeO-SiO}_2$  se estaría en la zona de fatalita por lo que estas escorias no necesitan niveles altos de  $\text{CaO}$ .
  3. Considerando recientes estudios<sup>[4]</sup> donde mencionan que la interacción  $\text{CaO-SiO}_2$  incrementa el consumo de sílice en el sistema, es de esperar que a medida que se disminuya el contenido de  $\text{CaO}$  la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  también debe disminuir, esto se observa en las escorias de Hornos Reverberos que a pesar de que tienen un menor contenido de  $\text{CaO}$  presentan un mayor contenido de  $\text{FeO}$  por lo que tienen menor viscosidad.
  4. En el caso que la disminución de  $\text{CaO}$  llegue a afectar la viscosidad, esto se puede controlar incrementando la temperatura en el Horno de Separación.
  5. El modelo de Nagamori para el sistema sin  $\text{CaO}$  no muestra un incremento notable en las pérdidas de cobre solubles.
- Se ha observado que una de las impurezas que afectan el proceso es la Alúmina, incrementando la viscosidad y las pérdidas de cobre en la escoria y dificultando el control de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . De acuerdo a últimas investigaciones<sup>[4]</sup> este componente promueve la formación de espineles los cuales precipitan como magnetita dentro del Horno Isasmelt, esto hace que aumente el consumo de  $\text{SiO}_2$  haciendo que se incremente la relación de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$ . Sin embargo, en estos casos no se puede operar a 1 180°C, ya hemos visto que el incremento de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  requiere temperaturas de operación por encima de 1 200°C por lo que se sugiere hacer un estudio más detallado para buscar estrategias de operación para diferentes contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- El efecto del  $\text{CaO}$  no es uniforme y no debe ser generalizado<sup>[14]</sup>, el efecto depende de las condiciones de operación de cada Fundición considerando la

composición de los materiales y sobre todo del contenido de impurezas, incluso puede incrementar el riesgo de precipitación de magnetita. Es necesario un estudio más detallado del efecto del CaO para las condiciones con que opera el Horno Isasmelt.

- Se sugiere investigar el efecto de la calidad de sílica y la granulometría de la sílica en la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}$  en el control de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  del Horno Isasmelt.
- El cálculo de 580 Kg de arrabio por colada no considera la velocidad de reacción. Se recomienda investigar sobre el comportamiento cinético del arrabio adicionado a los Hornos de Separación.
- Se sugiere colocar quemadores para precalentar los canales de colada con la finalidad de disminuir que en el canal se enfríe el material formando acreciones y que durante su limpieza ingresan al Horno de Separación enfriando la superficie del baño promoviendo el crecimiento de las acreciones del piso del Horno y favoreciendo a una mayor pérdida de cobre en las escorias.

## Bibliografía

- (1) ALVEAR, G. Ilo Workshop Second Stage, September 2005.
- (2) ASANO, N. "Some problems in copper smelting", presented at copper smelting meeting, Min. Met. Inst. Japan, Kansai section, 1972 (Japanese)
- (3) BAZAN, V. "Estimación de la viscosidad de escorias fayalíticas utilizando el modelo del cálculo Kv y el método experimental del plano inclinado", Revista Metalúrgica de Madrid 42(2) Marzo-Abril 2006, pag 84-90.
- (4) COURSOLO, P., MACKEY, P.J., PREVOST, Y., ZAMALLOA, M. "Noranda Process Reactor at Xstrata Copper - Impact of Minor Slag Components (CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, ZnO) on the optimum %Fe/SiO<sub>2</sub> in slag and operating Temperature" The Carlos Díaz Symposium on Pyrometallurgy, Toronto Canada, 2007 (Book 2) pag 79-92.
- (5) FERNANDEZ, D. Informe de Entrenamiento en Mount Isa, 2006.
- (6) FLOYD, J.M. The Recovery of Copper from liquid Slags. TMS-AIME paper Selection program. Pag 13-27.
- (7) GASKELL, D. R.; PALACIOS, J. y SOMSIRI, C. "The Physical Chemistry of Copper Mattes" ELIOTT SYMPOSIUM 1990, pag. 151-162.
- (8) GOTO, M. "Metallurgical commentary: The Mitsubishi Continuous Process",; August, Tokyo, Japan, 1998, pag 11-29, 54,63-74.
- (9) GUO XIAN JIAN. Meeting Behavior of Silica Flux in the Copper Converter. EPD Congress 1996.
- (10) HAND BOOK OF STEEL, third edition 1983, pag 42. Japanes, Maruzen Tokyo.
- (11) IMRIS, I. Copper Losses in Copper Settling Slags. Yazawa International Symposium. Volumen I, pag. 359-373. 2003.
- (12) IMRIS, I. The Copper Losses in the Slags from the El Teniente Process. Canadian Metallurgical Quarterly. Volumen 39 N°3 Pag 281-289. Año 2000
- (13) INCRA Monograph III, The thermodynamic properties of copper-slag system, in INCRA series on the metallurgy of copper, edited by C. Diaz 1974, pag 4-6, 31,50, 79,89,93, 105.
- (14) KONGOLI, F. Thermophysicochemical properties of slags, mattes and Metal and their direct effects in sulphide smelting practices. TMS Annual Meeting & Exhibition, March, 2003.

- (15) KORAKAS, N. "Magnetite formation during copper matte converting", Trans. Inst. Min. Metall, 72, 1962-1963, pag. 35-53.
- (16) MACKEY, P.J., "The physical Chemistry of copper Smelting Slags – a Review", Paper presented at Internacional Symposium on Metallurgical Slags, Metallurgical Society of the CIM, Basic Sciences Section, Halifax, N.S. August 1980, pag 24-28.
- (17) MARUYAMA, T. The Copper Loss in Slag of flash Smelting Furnace in Tamano Smelter, Yazawa International Symposium Volumen II. Pag 337-347. Año 2003.
- (18) NAGAMORI, M. "Metal loss of Slag: Part I. Sulfidic and Oxidic Dissolution of Copper in fayalite Slag from low Grade Matte", Metallurgical Transactions Volume 5, March 1974. Pag 531-538.
- (19) NAGAMORI, M. y MACKEY, P.J. Thermodynamics of Cooper Matte Converting: Part I. Fundamentals of Noranda Process. Metallurgical Transactions B Volume 9B, June 1978. Pag 255-265.
- (20) SCHONEWILLE, R.H. A Quantitative Method for Silica Flux Evaluation. Metallurgical Transactions B Volumen 24B pag 63-73. February 1993.
- (21) SPCC ILO COPPER SMELTER MODERNIZATION PROJECT, Isasmelt and RHF Heat and Mass Balance, 2005.
- (22) SPCC ILO COPPER SMELTER MODERNIZATION PROJECT, General Plant Design Criteria, Año 2005.
- (23) SPCC ILO COPPER SMELTER MODERNIZATION PROJECT, Isasmelt and Process Description, Año 2005.
- (24) SPCC ILO COPPER SMELTER MODERNIZATION PROJECT, Isasmelt Control Logic Description, Año 2006.
- (25) YAZAWA, A., KAMEDA, M. Liquidus surface of system FeS-FeO-SiO<sub>2</sub>, Japanese, Año 1953.
- (26) ZHAO, B. The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Liquidus Temperatura of Fayalite. Metallurgical and Materials Transactions B. Volumen 30B, Pag 597-605. August 1999.