

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

Profesores Patrocinantes:

Dr. Roberto Parra

Dr. Eduardo Balladares

**DESARROLLO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL PARA ESTUDIO DE
ESPUMACIÓN DE ESCORIAS EN PROCESO DE FUSIÓN REDUCTORA Y
EVALUACIONES PRELIMINARES EN EL SISTEMA $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$**

NICOLÁS IGNACIO ALARCÓN VILCHES

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Diciembre 2023

Resumen

La presente Memoria de Título se enmarca en el proyecto “Proceso pirometalúrgico integrado de producción de Fe y materiales cementicios valorizando escorias de cobre usando hidrógeno verde para fundiciones sin residuos”. Se caracterizó el proceso de espumación de escorias de cobre con tres basicidades diferentes 0.085, 1.4 y 1.7. Estas últimas dos composiciones se lograron agregando CaO a la escoria base del estudio de basicidad 0.085.

Durante las pruebas experimentales, se empleó un horno de laboratorio vertical, calentado eléctricamente mediante resistencias de SiC hasta alcanzar una temperatura de 1250 °C. En un crisol de alúmina, se llevó a cabo la fusión de la escoria con diferentes basicidades previamente especificadas. Se realizaron inyecciones de nitrógeno con lanzas de alúmina para medir la altura de la espuma utilizando varas de acero 304. El propósito fundamental fue establecer la correlación entre la altura medida y la velocidad espacial del gas, analizando su comportamiento mediante la cuantificación del coeficiente de espumación con el modelo de Fruehan.

Los resultados determinaron que el proceso de espumación bajo las condiciones analizadas genera una espuma estable sin generar pérdidas de material fuera del crisol. Este comportamiento es relevante dado que favorecería procesos de reducción con hidrógeno verde, al poder aprovechar los beneficios de la espuma como expansión del área de reacción. La basicidad juega un rol muy importante ya que aumenta la viscosidad de la escoria, lo que determina si la espuma se mantiene estable, sin generar una fase costrosa que dificulte la espumación, o genera una espuma turbulenta.

Por otro lado, el horno que fue entregado en comodato por Codelcotech es óptimo para realizar pruebas de reducción de escorias con hidrógeno verde en cantidades superiores a 1 kg de muestra, teniendo cuidado con las rampas de calentamiento y enfriamiento, las que deben ser lentas para cuidar el revestimiento del horno y las resistencias térmicas.

Se espera que los resultados obtenidos en esta Memoria de Título sean de utilidad en las fases siguientes del proyecto de reducción de escorias de cobre realizado en la Planta Piloto de Metalúrgia Química Igor Wilkomirsky, ubicada en la Universidad de Concepción.

Abstract

This Thesis is part of the project "Integrated Pyrometallurgical Process for the Production of Fe and Cementitious Materials by Valorizing Copper Slags Using Green Hydrogen for a Zero Waste Smelting." The foaming process of copper slags was characterized with three different basicities: 0.085, 1.4, and 1.7. The latter two compositions were achieved by adding CaO to the base slag of the study.

Experimental tests were conducted in a vertically-oriented laboratory furnace, electrically heated by SiC resistors up to a temperature of 1250 °C. An alumina crucible was used to melt the slag with the three specified basicities. Different nitrogen flow rates were injected using alumina lances to measure the foam height with 304 steel rods. The objective was to establish the relation between the measured height and the gas superficial velocity to analyze its behavior by quantifying the foaming coefficient using the Fruehan model.

The results determined that under the analyzed conditions, the foaming process generates stable foam without causing material losses outside the crucible. This behavior is significant as it would favor reduction processes with green hydrogen, taking advantage of foam benefits such as expanding the reaction area. Basicity plays a crucial role since it increases the slag viscosity, determining whether the foam remains stable without generating a crusty phase that hinders foaming or generates turbulent foam.

On the other hand, the furnace provided on loan by Codelcotech is optimal for conducting reduction tests of copper slags with green hydrogen in quantities exceeding 1 kg of sample. Care must be taken with the heating and cooling ramps, which should be slow to protect the furnace lining and thermal resistors.

It is expected that the results obtained in this Thesis will be useful in the subsequent phases of the copper slag reduction project carried out at the Pilot Plant of Chemical Metallurgy Igor Wilkomirsky, located at the University of Concepcion.

Dedicado en especial a mis abuelos, Cecilia Báez y Héctor Vilches, como a todas las personas que me apoyaron y estuvieron conmigo.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis abuelos, Cecilia Báez y Hector Vilches, por la crianza que me dieron, inculcando una personalidad desde muy pequeño que con esfuerzo se puede conseguir todo lo que uno se proponga, y nunca darse por vencido. Todo mi esfuerzo en distintas áreas siempre ha sido con la finalidad de hacerlos sentir realizados y poder ayudarlos en lo que necesiten.

De igual manera a mi madre, Carolina Vilches por incentivar me a superarme y no cometer errores repetitivos e inculcarme el estudio desde muy pequeño.

A mi padre Fernando Alarcon por su ayuda y consejos tanto en la vida como en lo universitario. Asimismo, a Gustavo Marín, por todos los años de sacrificio que hizo por mí, lo cual también me ayudo a desarrollar una personalidad de compromiso con mi familia, un gran ejemplo por el sacrificio que realiza a diario por mi hermano y madre.

A mis primos y tíos, por meterme presión y contar siempre en que lo lograría.

A Camila Mora, Ramon Bandak, Hugo Rojas y Gonzalo Reyes, por el trabajo en conjunto realizado en este proyecto, por su gran disposición a ayudarme a aprender y aconsejarme en base a sus experiencias y colaborar a remediar mis errores.

A todos mis amigos y colegas de la planta piloto Metalurgia Química, por su gran apoyo durante este proceso. Nunca faltó la motivación ni los momentos de felicidad.

A Karen Faundez por acompañarme en la etapa final de mi carrera y entregarme el impulso final que necesitaba para generar un cambio en mi vida, lo cual influyó directamente en mi rendimiento.

Si hay alguien que me olvidó de nombrarlo, ellos saben quiénes son y siempre estaré agradecidos de ustedes. Este es el comienzo de un largo camino que está a punto de comenzar.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1. CONTEXTO GENERAL.....	1
2 OBJETIVOS 3	
2.1 <i>Objetivo general</i>	3
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
3 ANTECEDENTES GENERALES.....	4
3.1 <i>Pirometalurgia del cobre</i>	4
3.1.1 <i>Fusión de concentrados de cobre</i>	4
3.1.2 <i>Procesos de conversión</i>	6
3.2 LIMPIEZA DE ESCORIAS	7
3.2.1 <i>Generación de escorias de cobre</i>	9
3.2.2 <i>Hornos de limpieza de escorias: Horno de arco eléctrico</i>	10
3.2.3 <i>Horno Teniente de limpieza de escoria</i>	11
3.2.4 <i>Horno eléctrico de resistencias térmicas (HE)</i>	13
3.3 PROPUESTA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE ESCORIAS PARA UNA FUNDICIÓN SIN RESIDUOS	13
<i>Fenómenos de espumación</i>	15
<i>Velocidad superficial del gas</i>	16
<i>Tamaño de la burbuja</i>	17
<i>Modelo de Fruehan</i>	18
<i>Influencia de las propiedades de la escoria</i>	28
<i>Viscosidad</i>	29
<i>Basicidad</i>	29
4 METODOLOGÍA	32
4.1 VARIABLES Y PARÁMETROS PARA PRUEBAS DE ESPUMACIÓN	32
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	33
4.2.1 <i>Descripción de equipos e insumos</i>	35
4.2.2 <i>Preparación de materiales</i>	36
4.3 <i>Protocolo para el montaje y puesta en marcha de horno CODELCO TECH</i>	37
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	40
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52

6.1	CONCLUSIONES.....	52
6.2	RECOMENDACIONES	53
7	REFERENCIAS.....	54
8	ANEXOS 56	
	HOJA RESUMEN MEMORIA DE TÍTULO	58

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Composición general escorias fayalítica en fusión y conversión primaria de cobre.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2: Variables y resultados de estudios experimentales de escorias de cobre.</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3: Parámetros operacionales de pruebas de espumación de escorias de cobre con nitrógeno</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4: Composición de escoria de cobre Paipote según FRX.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5: Valores coeficiente de espumacion y basicidad para cada prueba</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7: Rangos de caudales y alturas para prueba de espumación de escoria de cobre.</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 8: Rangos de flujos y alturas para prueba de espumación de escoria con basicidad 1.4.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9: Rangos de caudales y alturas para prueba de espumación de escoria con basicidad 1.7.</i>	<i>49</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1: Proceso de fusión de concentrados de cobre (Adaptado de [1]).</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Proceso de conversión en pirometalurgia del cobre (Adaptado de [1]).</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3: Proceso de limpieza de escorias de cobre (Adaptado de [1]).</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4: Producción histórica de escorias de cobre a nivel mundial entre los años 1999-2019. (Adaptado de [14]).</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5: Horno eléctrico y sus partes (Adaptado de [2]).</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6: Mecanismo de reducción de HLE. (Adaptado de [15]).</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7: Diagrama de flujo de proceso de reducción de escorias de cobre con hidrógeno. (Elaboración Propia).</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8: Resumen de la relacion de la velocidad superficial del gas por fracción de huecos para sistema espumoso y no espumoso. (Adaptado de [11]).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9: Representación de la altura y espesor de la espuma. (Adaptado [9]).</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10: Relación entre el índice de formación de espuma y viscosidad efectiva. (Adaptado de [11]).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11: Influencia de la relación del porcentaje de CaO/SiO₂ en la viscosidad. (Adaptado de [11]).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 12: Diagrama ternario de escoria de cobre con escorias finales de cobre y escoria final de cobre con adición de</i>	

CaO.....	31
Figura 13:Montaje experimental para pruebas de espumación. (Elaboración propia)	34
Figura 14: Reparación y puesta en marcha de horno CODELCO TECH.....	39
Figura 15: Análisis DRX para escoria de cobre procedente de Paipote.....	41
Figura 16: Alturas experimentales de espumacion.....	42
Figura 17: Diagrama de espumación, elaboración propia.....	43
Figura 18: Altura de espumación H v/s velocidad superficial del gas	47
Figura 19: Altura de escoria de cobre (B=1.4) vs caudal.....	48
Figura 20: Altura de escoria de cobre (B=1.7) vs caudal.....	50
Figura 21: Formación de fase sobresaturada con pérdidas de material en las paredes del crisol.....	51

Nomenclatura

Notación

(g)	Sustancia gaseosa
V_{sg}	Velocidad superficial del gas
A	Área transversal del crisol
g	Aceleración de gravedad
Q_g	Caudal
H	Altura de la espuma
h_0	Altura inicial de la espuma
h	Altura máxima de la espuma
L	Espesor de la espuma
V^0	Volumen inicial
V	Volumen drenado
K	Constante de drenaje

Símbolos griegos

α	Fracción volumétrica del gas
τ	Tiempo de vida de la espuma
μ	Viscosidad
ρ	Densidad
σ	Tensión interfacial
Σ	Coefficiente de espumación

Abreviación

H ₂ V	Hidrógeno verde
HL	Horno Eléctrico
HLE	Horno eléctrico el teniente (Horno de Limpieza de Escoria)
MB	Metal Blanco
CPS	Convertidor Peirce-Smith
B2	Índice de basicidad secundario
EPP	Elementos de protección personal

1 Introducción

1. Contexto General

En Chile se generan alrededor de 4.5 millones de toneladas de escorias finales al año en fundiciones de cobre [1], que corresponden al residuo sólido que se genera durante el proceso pirometalúrgico de producción primaria de cobre en el procesamiento de concentrados sulfurados. Corresponde a la oxidación del concentrado de cobre a altas temperaturas en el esquema tradicional de fusión, conversión y refinación [1].

Las escorias de cobre contienen una mezcla de óxidos de hierro, cobre, aluminio, sílice y óxidos de calcio, entre otros. Actualmente, existen procesos de tratamiento para recuperar el cobre remanente en procesos de flotación o reducción a altas temperaturas en hornos eléctricos HE [2] [3], o basculantes como es el caso del proceso Teniente. Las escorias que pasan por estos procesos se denominan escorias finales y tienen menos de un 1 % de cobre. La escoria final se dispone y cataloga como un residuo no peligroso, sin embargo, es un pasivo ambiental que se acumula, y se estima que actualmente hay entre 40 y 50 millones de toneladas dispuestas en 15 botaderos que tienen un impacto no estudiado [4]. En el caso de procesos de tratamiento por flotación, también se producen pasivos asociados a los tranques de relaves que genera la planta de flotación.

En el contexto de la economía circular, para disminuir el impacto ambiental de las operaciones mineras, se han buscado opciones para darle un uso a las escorias de cobre [4]. Algunos de ellos son para usarlos como obras civiles asociadas con cemento, demostrando ser una alternativa respecto de los áridos convencionales. También se han utilizado como relleno, lastres, abrasivos, agregados, gránulos para techos, vidrio, tejas, entre otros [5] [6]. En el caso de su uso directo como constituyente de diferentes obras civiles han demostrado que mejoran propiedades mecánicas como resistencia y durabilidad al cemento [2].

Esta memoria se enmarca en un proyecto de I+D que tiene como objetivo proponer un proceso alternativo para el tratamiento de las escorias finales de cobre, buscando transformar este pasivo en dos productos comerciales de uso masivo: hierro metálico o una ferroaleación y un material cementicio o directamente cemento.

En efecto, el alto contenido de hierro de estas escorias de cobre (30.3 % y 36.4 % de Fe [8]) hace atractiva la separación de este elemento, donde se plantea que las escorias finales de cobre se pueden reducir con hidrógeno para separar el hierro de la sílice de manera de producir los dos productos

comerciales ya señalados [9]. Este trabajo propone estudiar el comportamiento de las escorias de cobre en procesos de reducción donde un fenómeno importante es la espumación de escorias a alta temperatura, observable en procesos pirometalúrgicos del cobre como convertidores y hornos reverbero. La espumación ocurre cuando se generan burbujas de gas en una escoria fundida que agita el baño provocando que la interfase escoria-gas aumente [10]. Como consecuencia se agita el fundido y mejoran los fenómenos de transporte asociados. De igual forma aumenta el área de contacto entre la escoria y el gas que favorece, en este caso, la reacción de reducción [11]. Para las escorias, su comportamiento depende de las propiedades del sistema: viscosidad, densidad y tensión interfacial, todas propiedades que dependen de la composición química de la escoria y la temperatura. De manera general la basicidad es una forma práctica para caracterizar las diferencias químicas de diferentes escorias.

La memoria de título tiene como objetivo aportar en el conocimiento del comportamiento de la espumación de escorias reales con cambio de basicidad, una ruta que permitiría entender y a futuro modelar la reducción del hierro y obtener un material cementicio. Los parámetros de espumación se evalúan inyectando nitrógeno a una escoria final fundida a 1250 °C cuantificando el índice de espumación (Σ) mediante la altura de la espuma (h) y el flujo de nitrógeno inyectado (Q_g). Se espera que los resultados de este estudio contribuyan al desarrollo de este proceso alternativo, usando hidrógeno verde como gas reductor, minimizará el impacto ambiental, valorizando las escorias que hoy terminan como pasivo ambiental. Validar el modelo de Fruehan para el proceso de espumación resulta ser relevante para el estudio cinético de los sistemas reactivos que definen al proceso. Este conocimiento permitirá cuantificar el área interfacial para las reacciones de reducción.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Instalar un sistema experimental que permita realizar un estudio exploratorio de la validación del modelo de Fruehan en tres sistemas a diferentes composiciones químicas.

2.2 Objetivos específicos

1. Implementar el montaje y puesta en operación horno de crisol con resistencias eléctricas de alta temperatura (1400 °C, Codelco-Tech).
2. Diseñar y validar un montaje experimental para el estudio de la espumación reactiva y no reactiva.
3. Evaluar la aplicación del modelo de espumación de Fruehan a 1250 °C para tres tipos de escorias a distintas basicidades (0.085, 1.4 y 1.7) agregando CaO.

3 Antecedentes Generales

3.1 Pirometalurgia del cobre

La producción de cobre a partir de minerales sulfurados a través de un proceso pirometalúrgico es la opción tradicional/convencional en la industria minera del cobre. Los procesos principales de este proceso son: secado, fusión, conversión, refinación a fuego y limpieza de escorias. También existen otras etapas que son relevantes para el proceso, tales como la captación de gases, producción de ácido sulfúrico, moldeo de cobre refinado y cuando es necesario, tostación de concentrados [1].

El proceso pirometalúrgico del cobre es por lo general, continuo, autógeno del punto de vista térmico, posee una gran desventaja que es la emisión de gases contaminantes y la generación de residuos sólidos denominados escorias.

3.1.1 Fusión de concentrados de cobre

La fusión de concentrados de cobre corresponde a la primera etapa del proceso pirometalúrgico del cobre y tiene como finalidad fundir el concentrado produciendo un producto con un contenido de cobre entre el 50 al 75% denominado eje o metal blanco. La temperatura de trabajo es por sobre 1200 °C y, mediante el uso de aire, el concentrado se oxida eliminando hierro como óxido y azufre como SO_{2(g)}. Los óxidos de hierro forman una fase denominada escoria la que, gracias al uso de fundentes, principalmente, SiO₂, disminuye su punto de fusión convirtiéndose en una fase líquida que es enviada a una etapa de limpieza para recuperar el cobre contenido. El SO₂ forma parte de los gases de proceso que son tratados para la producción de ácido sulfúrico. La ecuación (1) describe de forma esquemática las reacciones que ocurren en el proceso de fusión.



En la Figura 1 se muestra un diagrama específico del proceso.

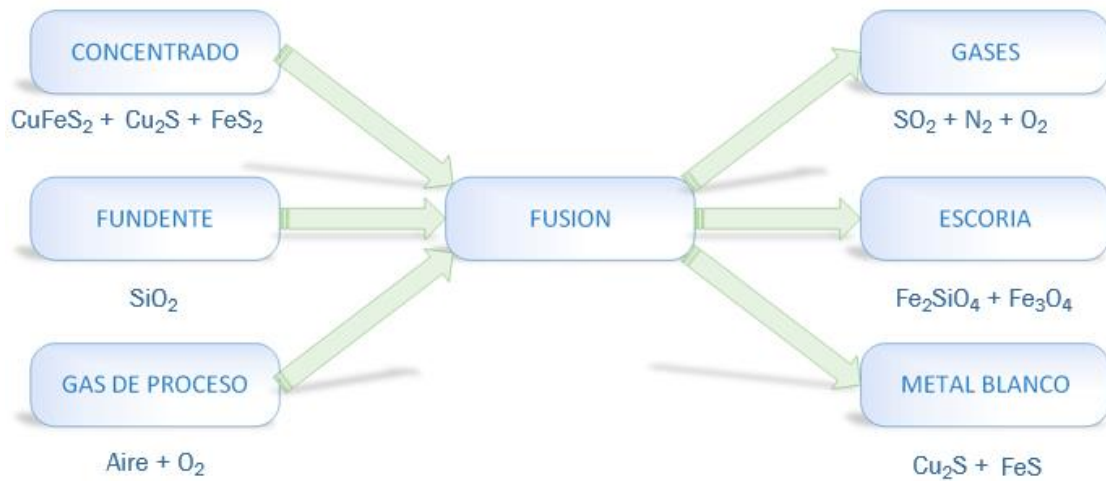


Figura 1: Proceso de fusión de concentrados de cobre (Adaptado de [1]).

Debido a las diferencias en las densidades se logra una separación física de la escoria oxidada y la mata sulfurada de cobre. La mata es más densa y se sitúa en la parte inferior mientras que la escoria al ser más ligera queda por encima de la mata. La eficiencia de recuperación depende principalmente de la temperatura y la composición ya que la presencia de magnetita afecta directamente la eficiencia del proceso, debido al aumento en la densidad de la escoria lo que conlleva a un aumento en las pérdidas de cobre por arrastre mecánico [12].

Dentro de las tecnologías convencionales utilizadas en esta etapa destacan las de fusión en baño y fusión flash, además de nuevas tecnologías como bottom blowing.

El proceso de fusión en baño aprovecha la energía producto de las reacciones de oxidación, fundiendo concentrados de cobre con el objetivo de obtener cobre de alta pureza. Ha sido ampliamente utilizado debido a su eficiencia, pero son importantes las consideraciones ambientales, ya que generan emisiones y residuos los cuales deben tener un manejo adecuado para disminuir la contaminación. Dentro de los reactores más utilizados destacan Noranda, Teniente e Isasmelt, entre otros [1].

El proceso de fusión flash se basa en la combustión de partículas de concentrado en suspensión en torres de reacción, ubicadas sobre la zona del baño[1]. Corresponde a un proceso de alto rendimiento metalúrgico, obteniendo cobre de alta calidad de manera rápida. Son comúnmente utilizados en fundiciones de cobre para concentrados de baja ley, por lo cual lo convierte en una tecnología valiosa

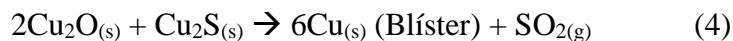
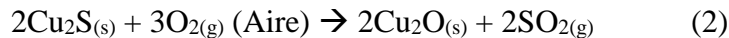
para la industria del cobre. Las principales tecnologías se dan en las versiones Outotec e INCO. Se han desarrollado nuevas tecnologías de fusión chinas como bottom blow smelter (BBS), la cual, a diferencia de los otros reactores, el aire del proceso se inyecta desde la parte inferior por una serie de lanzas de soplado. Destaca por generar un bajo contenido de magnetita en la escoria, por lo cual, tiene una alta eficiencia en la eliminación de impurezas y es bastante utilizado para producir cobre blíster a partir de concentrados de cobre de baja ley. Dentro de los problemas se encuentra un mayor contenido de cobre en la escoria (3 – 4 %) [1].

3.1.2 Procesos de conversión

El objetivo de los procesos de conversión es eliminar el azufre, hierro e impurezas de la mata de cobre, con el objetivo de obtener cobre blíster sin impurezas. Esta etapa se lleva a cabo principalmente en un convertidor, el cual es un reactor diseñado para oxidar controladamente los elementos no deseados del blíster. Dentro de los reactores más utilizados encontramos al Convertidor Peirce-Smith (CPS), el cual se basa en la rotación del horno cilíndrico y una boca central donde se descarga la escoria y el cobre blíster producido. Existen variaciones como el reactor Hoboken, el cual minimiza las emisiones fugitivas, pero se ve limitado en su capacidad de utilización de carga fría [13]. En el CPS, la conversión se realiza en dos etapas de soplado: soplado a escoria y soplado a cobre. Para la etapa de soplado a escoria se oxida el FeS y se obtiene una escoria constituida por Fe₂SiO₄-Fe₃O₄ y gases como el SO₂. El proceso continúa hasta obtener un 1 % en peso de hierro en la mata sulfurada [1].

Para el soplado de cobre se inyecta un gas oxidante que libera cobre contenido en el sulfuro de cobre Cu₂S, formando SO₂ y cobre blíster.

Las reacciones que representan a las distintas etapas son:



En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso de conversión.

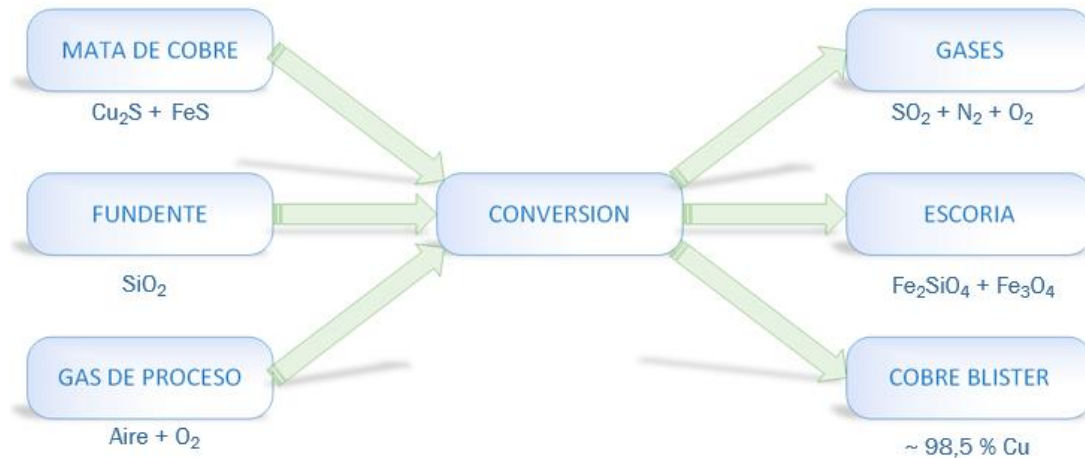


Figura 2: Proceso de conversión en pirometalurgia del cobre (Adaptado de [1]).

3.2 Limpieza de escorias

En este proceso se logra recuperar gran parte del contenido de cobre y hierro de las escorias provenientes de los procesos de fusión y conversión. Las escorias finales tienen como objetivo un contenido de cobre que no supere el 0.5 % en peso [1]. Escorias de fusión contienen cerca de un 2 % de cobre, y las escorias de CPS contienen entre un 3-8 % de cobre. El cobre queda retenido en las escorias principalmente por [6]:

- Cobre disuelto que reaccionó químicamente y se incorporó en la matriz de la escoria. También puede ocurrir la oxidación del cobre metálico a óxido de cobre (Cu_2O), principalmente cuando el cobre metálico presente en el baño entra en contacto con el aire u oxígeno enriquecido en el proceso.

$$2 \text{Cu} + \frac{1}{2} \text{O}_{2(\text{g})} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} \quad (5)$$
- Cobre atrapado mecánicamente, sin reacciones químicas.

Las pérdidas por arrastre mecánico se producen por fenómenos físicos que impiden una apropiada separación de la fase metálica (sulfuro o metal) de la fase escoria. Diferentes factores impiden una óptima separación de fases, por ejemplo, la inyección del concentrado en la escoria por un descontrol de los niveles, por la excesiva agitación del baño o por el ascenso de las burbujas que ocasionan

transporte de cobre a la escoria. [12].

En la Figura 3 se observa el detalle del proceso de limpieza de escorias.

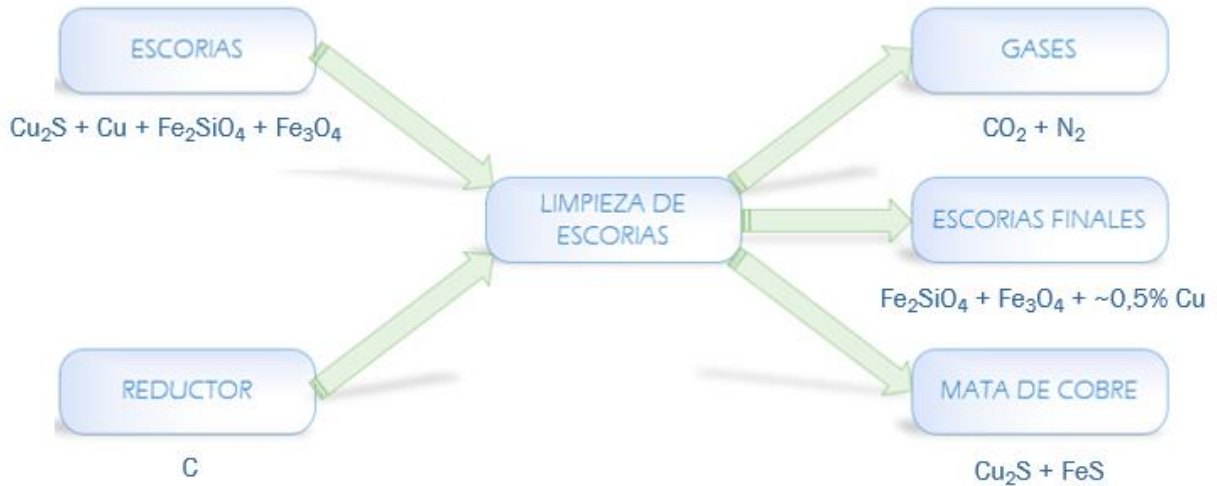


Figura 3: Proceso de limpieza de escorias de cobre (Adaptado de [1]).

Los hornos más utilizados para la limpieza de escorias son hornos eléctricos que, para reducir los óxidos se utiliza carbón, que reacciona con el oxígeno de la escoria, liberando el cobre y separándolo por la diferencia de densidad. Posterior al proceso de limpieza, se genera una mata de cobre o metal blanco que es devuelto al proceso de conversión, y una escoria final con un bajo porcentaje de cobre y un alto porcentaje de hierro.

La escoria oxidada con un bajo contenido de cobre denominada escoria final se descarta y son dispuestas en botaderos. Estas escorias son consideradas pasivos ambientales, debido a su bajo interés económico. No existen datos confiables de su composición o la cantidad exacta de material acumulado, pero están compuestos principalmente por Fe_2SiO_4 (fayalita) ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$).

Las escorias fayalíticas de fusión y conversión primaria, provenientes de un Convertidor Peirce-Smith y Convertidor Teniente, por lo general, tienen la siguiente composición:

Tabla 1: Composición general escorias fayalítica en fusión y conversión primaria de cobre

Contenido	Convertidor Peirce-Smith	Convertidor Teniente
Cu	6-10 %	8-12 %
Fe	27-45 %	48-52 %
Fe ₃ O ₄	15-18 %	8-22 %
SiO ₂	24-33 %	23-26 %

Se hace notar su gran contenido de Fe almacenado tanto como hierro metálico o como magnetita, además del porcentaje de Cu que es posible recuperar y disminuir a un valor menor al 1%.

3.2.1 Generación de escorias de cobre

En Chile existen 15 depósitos de escorias de cobre de Codelco, de los cuales seis se encuentran activos [7]. Debido a que la producción de cobre a nivel mundial ha ido en aumento en los últimos años, se han incrementado las escorias generadas. Este aumento progresivo ofrece una oportunidad en la recuperación de metales a nivel industrial, para dar valor a los materiales dispuestos en los botaderos. En la siguiente figura, se puede observar la gran cantidad de escorias producidas a nivel mundial, entre los años 1999-2019.

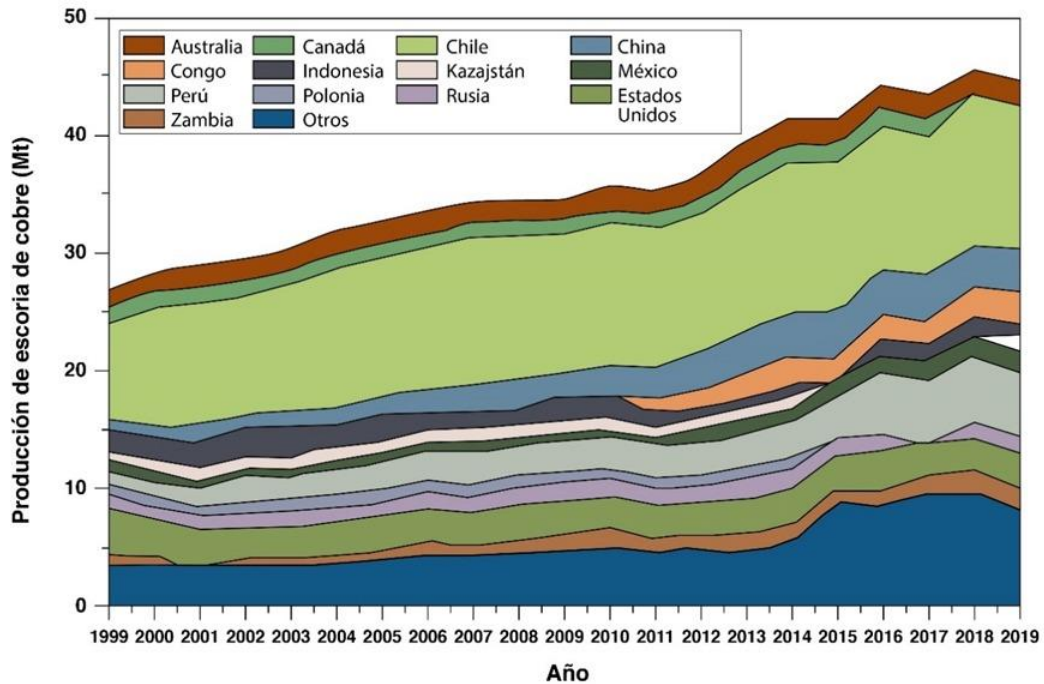


Figura 4: Producción histórica de escorias de cobre a nivel mundial entre los años 1999-2019. (Adaptado de [14]).

3.2.2 Hornos de limpieza de escorias: Horno de arco eléctrico

Los hornos de arco eléctrico funcionan empleando energía eléctrica para separar los componentes en la limpieza de escorias de cobre, o en siderurgia es bien utilizado para fundir la chatarra de acero. Se genera un arco eléctrico que produce calor entre la materia prima y los electrodos, por lo cual, la carga se funde y se separan dos fases, la escoria y el acero para el caso de siderurgia. La escoria flota en la parte superior del fundido debido a diferencias de densidades y el acero es recuperado mediante sangrado. Es muy usado para reducción directa y la huella de carbono no es tan grande. Este horno está compuesto por tres partes: solera, cuba y bóveda, las cuales están revestidas por material refractario, además que, por la parte externa se encuentra cubierta por acero que está refrigerado con agua. El conjunto se completa con una unidad hidráulica la cual activa el mecanismo de elevación de la bóveda, además de permitir el movimiento de los electrodos [3].

En la Figura 5 se presenta el horno eléctrico y sus partes.

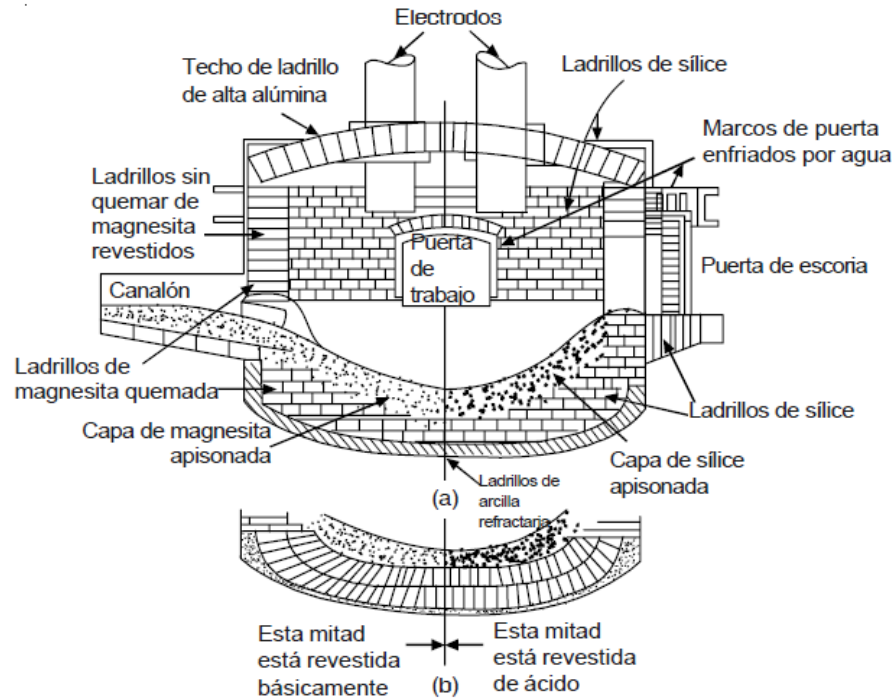


Figura 5: Horno eléctrico y sus partes (Adaptado de [2]).

3.2.3 Horno Teniente de limpieza de escoria

En pirometalurgia se utilizan dos equipos industriales de limpieza de escorias el Horno Teniente de Limpieza de Escoria (HLE) y el Horno Eléctrico (HE). En las fundiciones en Chile se utiliza mayoritariamente HLE, que es un horno de tipo basculante, discontinuo, circular y rotatorio. La escoria se agrega por la parte superior derecha (boca) y sale por el extremo inferior derecho (orificio de sangrado) [14], como se observa en la Figura 5, la temperatura del horno se mantiene con quemadores de aire/petróleo. Se agrega un reductor, que convencionalmente es carbón, aunque existen alternativas como petróleo o gas natural. El agente reductor se agrega con el aire por debajo del baño líquido de escoria mediante la inyección por toberas para lograr la reducción. Las principales funciones del gas reductor son:

- Disminuir la solubilidad del cobre atrapado químicamente en la escoria, por lo general Cu_2O .
- Reducir la magnetita (Fe_3O_4) logrando una mayor decantación de la fase mecánica debido a la disminución de la viscosidad.

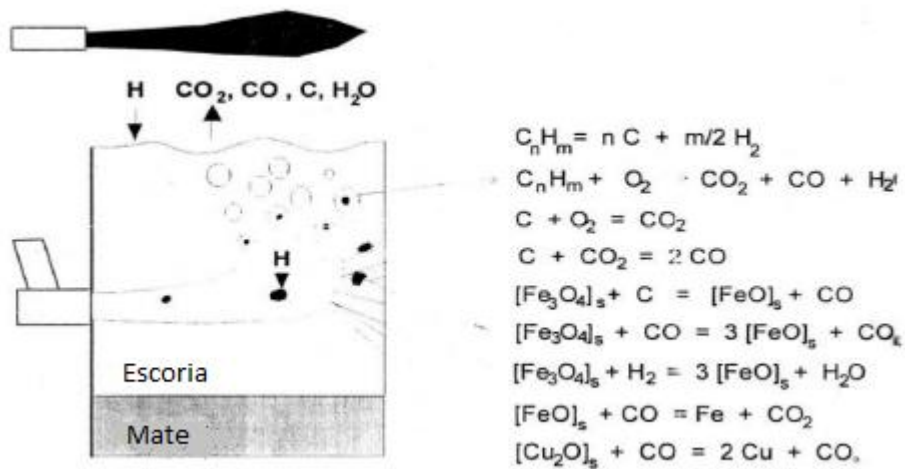


Figura 6: Mecanismo de reducción de HLE. (Adaptado de [15]).

Las reacciones de reducción de escoria con carbón son de dos tipos [14].

- Reducción directa:



- Reducción indirecta:



- Vía Hierro:



En la ecuación 10 se puede observar que hay presencia de hierro que se arrastra hacia la escoria. Esto se debe a la incapacidad de lograr una separación total entre las fases, lo que provoca que el hierro se transporte a la escoria en forma de óxidos.

3.2.4 Horno eléctrico de resistencias térmicas (HE)

En los hornos de resistencias eléctricas, el calor generado se produce por medio de la potencia suministrada a un elemento calefactor con una resistencia eléctrica definida, este elemento disipará la energía y la convertirá en energía térmica. Por lo general, se utilizan varillas de carburo silicio (SiC) como resistencias [15]. La energía eléctrica suministrada es proporcional a la energía térmica generada, por lo que la temperatura se puede ajustar modificando la potencia media que se suministra al horno. Este horno tiene la ventaja de tener un mayor control de la temperatura del metal, sin embargo, tiene una dinámica lenta, lo que significa que las partes más profundas del revestimiento del horno aún están en proceso de calentamiento, mientras que la región externa del horno puede estar cerca del estado estacionario.

Cuando la escoria interactúa con un gas para ser reducida se logra un aumento en el área de interfase reactiva gas/escoria, por lo que, es necesario cuantificar el efecto que produce la inyección del gas en una escoria conocido como fenómeno de espumación, que describe la dispersión de burbujas de gas en el volumen de la fase fundida.

3.3 Propuesta integral de tratamiento de escorias para una fundición sin residuos

El proyecto busca hierro reducido de calidad equivalente a la del DRI y un material equivalente a un Clinker que posteriormente es tratado para obtener cemento “Portland”, utilizando escorias de cobre obtenidas directamente de las fundiciones. Las escorias serán procesadas en un horno eléctrico, logrando reducir la totalidad de los óxidos de hierro presentes en la escoria y lograr un material equivalente a DRI con un alto grado de metalización, y una escorificación de la sílice presente para generar un material cementicio, entregándoles un valor comercial a estos productos escoriales y disminuyendo la huella de carbono al utilizar hidrógeno como gas reductor, el cual en primera instancia se espera que sea un hidrógeno gris que a futuro espera ser reemplazado por hidrógeno verde.

Los productos derivados de estos procesos tienen diversos usos y beneficios, uno de ellos es la obtención de hierro, el cual puede ser comercializado directamente a siderurgias como chatarra para procesos de producción de aceros, o más bien comercializarlo como hierro reducido. Para el caso del cemento, este entrega una gran cantidad de beneficios al medio ambiente, ya que la

obtención del cemento convencional genera una gran cantidad de gases contaminantes, tales como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno, entre otros. Además, una gran cantidad de metales pesados son liberados al ambiente en la operación a través de chimeneas (antimonio, selenio, bario, cromo hexavalente, etc), logrando obtener ganancias de un material que por lo general es desechado.

En la siguiente figura se puede apreciar un diagrama de flujo con la idea principal del proyecto, donde se aprecian las corrientes de entrada al horno eléctrico, que en este caso serían $H_{2(g)}$ como gas reductor, $N_{2(g)}$ para mantener una atmósfera neutra dentro del crisol, fundentes y la material principal que es la escoria de cobre, permitiendo la obtención de hierro reducido de alto grado (~98%) y una escoria básica la cual es dirigida a procesos posteriores de enfriamiento y molienda, a partir de los cuales se produciría cemento Portland con la adición de retardantes y aditivos. El proceso propuesto se adapta para el tratamiento de escorias desde botaderos, pero es especialmente atractivo cuando se toman las escorias fundidas directamente en la operación de una fundición de concentrados.

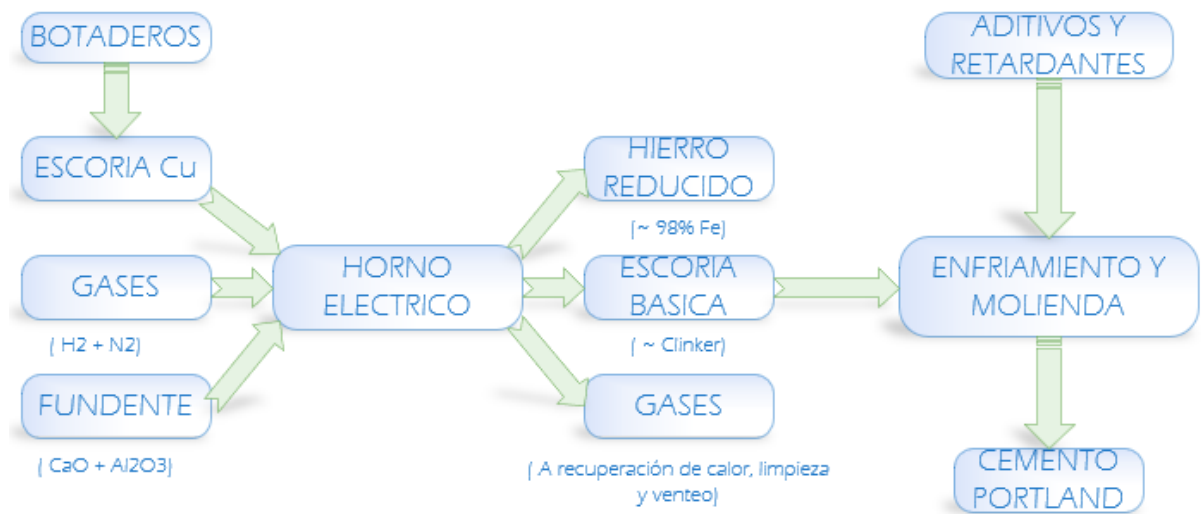


Figura 7: Diagrama de flujo de proceso de reducción de escorias de cobre con hidrógeno. (Elaboración Propia).

3.4 Antecedentes del fenómeno de espumación

La capacidad de reducir escorias finales de cobre para obtener hierro o materiales ferrosos depende de la actividad de este elemento en la mezcla, por lo que se han evaluado estrategias para aumentar su disposición a reaccionar. Como resultado, se ha determinado que al añadir CaO hasta una basicidad de 1.4 favorece la actividad del hierro en la escoria, y su consecuente reducción [16]. Así, el enfoque de esta memoria es evaluar el comportamiento de la escoria con nitrógeno para definir rangos óptimos de espumación de la escoria que servirán como parámetros a utilizar de hidrógeno diluido en nitrógeno.

Resulta relevante destacar que la investigación en este ámbito es limitada debido a la falta de experimentos que involucren diversas composiciones de escorias, así como la utilización de diferentes gases reductores en el proceso.

Fenómenos de espumación

La espumación es la capacidad que tiene un líquido para retener gas mediante la formación de burbujas que se mantienen por un periodo de tiempo con algún grado de estabilidad física. El fenómeno se produce cuando un gas atraviesa un volumen de líquido, este se dispersa y dependiendo de las características del fluido se forma la espuma. Fruehan describe la espumación con el coeficiente de espumación (Σ) [15]. Este coeficiente permite establecer una relación de proporcionalidad entre el aumento de la altura del baño y la velocidad superficial del gas que atraviesa el volumen del líquido. Este parámetro puede relacionarse, para su estimación, con variables fisicoquímicas de la escoria mediante una relación empírica. Ogawa [17] propuso un modelo fenomenológico de la espumación que considera tres zonas:

- 1) Zona de formación de burbujas.
- 2) Acumulación y distribución de las burbujas en el volumen de la escoria.
- 3) Coalescencia y ruptura de las burbujas de la superficie.

Además, inducir la formación de una escoria espumosa otorga ciertas ventajas como:

- Mayor eficiencia energética.
- Disminución de la incorporación de nitrógeno por parte del baño.
- Disminución de la contaminación acústica [11].

Velocidad superficial del gas

Existen diferencias en el comportamiento de la espuma generada por una alta y baja velocidad del gas. Se definen dos tipos de escorias:

- Escoria espumosa: Una espuma con gran cantidad de burbujas de paredes delgadas, lo que proporciona mayor estabilidad. Se utiliza una baja velocidad superficial del gas para conseguir una espuma que tarda mucho más en colapsar.
- Escoria expandida: Se obtiene una escoria con una capa uniforme y mixta, con una fracción de huecos que varía según la velocidad superficial del gas, tiene una apariencia turbulenta con una baja estabilidad. Se utiliza una alta velocidad superficial del gas, y al disminuir la velocidad de gas la altura de la escoria disminuye considerablemente.

Una gran cantidad de burbujas sumado a una buena estabilidad otorga una espuma más homogénea. Al aumentar la velocidad superficial del gas, la altura de la escoria disminuye drásticamente, lo que ocurre porque se consume la escoria que aún no ha espumado, lo que induce una espuma menos estable. Una disminución de la altura de la espuma a alta velocidad superficial del gas está asociada con el aumento de burbujas creadas en el difusor del gas [11]. La Figura 12 muestra esta relación:

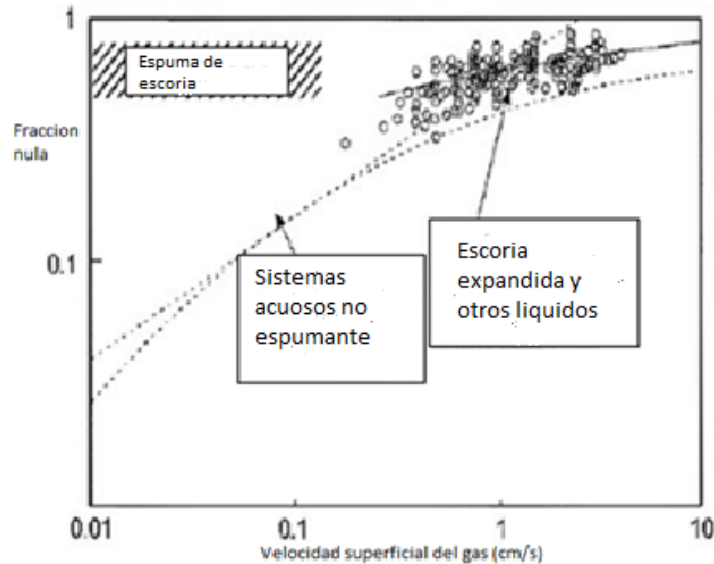


Figura 8: Resumen de la relación de la velocidad superficial del gas por fracción de huecos para sistema espumoso y no espumoso. (Adaptado de [11]).

Tamaño de la burbuja

Burbujas finas generan una espuma más uniforme, ya que se generan celdas esféricas que son más estables, en cambio, burbujas grandes generan celdas poliédricas, que tienen una menor estabilidad. Estas características están influenciadas por factores como los elementos tensoactivos y la velocidad superficial del gas. El índice espumoso es inversamente proporcional al diámetro de la burbuja. Elementos como el azufre generan burbujas más grandes y una espuma menos estable, debido a que aumentan el ángulo de contacto [11]. Dado que en el presente trabajo se utiliza escorias finales, el contenido de azufre es bajo, por lo cual, no es relevante en este caso.

El tamaño de burbujas generadas en la interfase metal/escoria depende de la actividad del elemento tensoactivo en el baño. La relación de las fuerzas de empuje y la tensión interfacial, permite determinar el tamaño de la burbuja, dependiendo del ángulo de contacto entre ambos factores. Con una alta velocidad superficial del gas se logra obtener burbujas más grandes, y con ello la formación de una espuma menos estable.

Existe un desacuerdo entre autores sobre la reacción que produce burbujas más finas, ya que implica una mejor formación de espuma, por lo cual, es evidente la necesidad de más estudios para lograr comprender mejor la creación de las burbujas [11].

Modelo de Fruehan

De acuerdo con Fruehan [15], se puede definir un coeficiente de formación de espuma (Σ) con base en una modificación de la definición del coeficiente de formación de espuma utilizado para la descripción de espumas acuosas. Se puede definir como la generación de un espesor de espuma (L), provocado por el paso de un flujo de gas (Q_g), en un volumen inicial de espuma.

1.- Relación para la velocidad superficial del gas:

$$V_g^s = \frac{Q_g}{A} \quad (11)$$

Se conoce el área de sección transversal del crisol A [cm²], y el caudal de gas que se aplica en el sistema Q_g [cm³/s].

Luego, se establece la fracción volumétrica del gas (α), con la relación entre h y L que se definen a continuación:

- h: La altura máxima que alcanza la espuma.
- L: Espesor de espuma.

$$\alpha = \frac{h}{L} \quad (12)$$

En la figura 9 se representa el estado inicial de la escoria a un caudal $Q_g=0$, donde se representa la altura inicial de la escoria h_0 . Luego se inyecta un caudal $Q_g \neq 0$, se produce la espumación de la escoria, y se forma un espesor de espuma L .

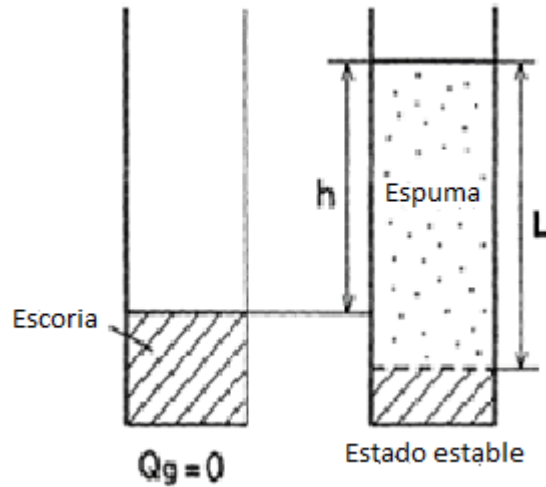


Figura 9: Representación de la altura y espesor de la espuma. (Adaptado [9]).

Al momento de la formación del espesor de espuma cambia la velocidad del gas a través de la escoria, por efecto de la retención de gas en las burbujas. Este aumento está definido por la ecuación (13):

$$V_g = \frac{1}{\alpha} V_g^s \quad (13)$$

Donde V_g es la velocidad del gas en la espuma.

Al obtener estos parámetros y sus variaciones es posible definir el índice de formación de espuma como la variación del espesor de espuma de acuerdo con la velocidad del gas. Se define por la ecuación (14).

$$\Sigma = \frac{L}{V_g} = \frac{dL}{dV_g} \quad (14)$$

También es posible definir el índice con base en la altura y la velocidad superficial del gas como:

$$\Sigma = \frac{h}{V_g^s} = \frac{dh}{dV_g^s} \quad (15)$$

Estas consideraciones son válidas si α es constante en todo el volumen de la espuma.

La vida útil de la espuma se define como el tiempo donde el nivel de escoria alcanza el nivel inicial desde que no hay flujo de gas. Considerando que la formación de espuma es proporcional al flujo de gas y la probabilidad de ruptura es proporcional a la altura, la vida útil se define como:

$$\frac{dh}{dt} = k_1 Q_g - k_2 h \quad (16)$$

En $t=0$, el flujo $Q_g=0$ y se integra entre $h=h_0$ ($t=0$) y $h=h$ ($t=t$).

Así la función del descenso de la espuma se define como la ecuación (17):

$$-\ln\left(\frac{h}{h_0}\right) = k_2 t \quad (17)$$

Una de las consideraciones principales es que se debe definir un drenaje del primer orden, logrando asociar el descenso de la espuma con el drenaje del líquido:

$$\frac{dV}{dt} = K(V^0 - V) \quad (18)$$

Donde V^0 = Volumen inicial; V = Volumen drenado; K = Constante de drenaje.

Integrando entre 0 y V^0 para $t=0$ y $t=t$, se obtiene lo siguiente:

$$Kt = -\ln\left(V^0 - \frac{V}{V^0}\right) \quad (19)$$

Para α constante, se obtiene:

$$Kt = -\ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (20)$$

Luego para $k_2=K$, se define la vida útil de la espuma τ , como se observa en ecuación (17).

$$\tau = \frac{1}{V^0} \int_0^{V^0} t dV \quad (21)$$

Así la vida útil es función del volumen, $\tau=f(V)$.

$$\tau = -\frac{1}{KV^0} \int_0^{V^0} \ln\left(1 - \frac{V}{V^0}\right) dV \quad (22)$$

De la ecuación (20) e integrando se logra obtener:

$$\tau = -\frac{1}{K} \int_0^1 \ln(\alpha) d\alpha = \frac{1}{K} \quad (23)$$

A partir de las suposiciones realizadas, donde α debe ser constante en todo el volumen de la espuma y definir un drenaje de primer orden, se define una relación entre τ y Σ , logrando describir la evolución de la altura de la espuma mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dh}{dt} = \alpha \frac{dL}{dt} = \frac{\alpha d(V_{espuma})}{A dt} = \frac{Q_g}{A} \quad (24)$$

A partir de la ecuación (24) y la ecuación (16), se logra definir:

$$K_1 = \frac{1}{A} \quad (25)$$

A partir de esta ecuación se reescribe la ecuación y se obtiene:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} Q_g - Kh \quad (26)$$

- Donde K: Constante de drenaje de primer orden.

Cuando el sistema alcanza el estado estacionario, se tiene que:

$$\frac{dh}{dt} = 0 \rightarrow \frac{Q_g}{A} = Kh = \frac{h}{\tau} \quad (27)$$

$$\rightarrow \tau = \frac{h}{V_g^s} = \Sigma \quad (28)$$

Donde la vida útil de la espuma es igual al coeficiente de formación de espuma [15].

Mediante análisis dimensional algunas propiedades de la escoria, tales como:

$$\Sigma = f(\rho, \mu, \sigma)$$

- μ : Viscosidad ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
- σ : Tensión interfacial (kg s^{-2})
- ρ : Densidad (kg m^{-3})

En la Tabla 2 se describen algunas investigaciones que han buscado cuantificar la formación de espuma, necesario para la realización de esta memoria de título, junto a las variables que se analizaron y los resultados a los que los investigadores llegaron.

Tabla 2: Variables y resultados de estudios experimentales de escorias de cobre.

Referencia	Nombre del estudio	VARIABLES analizadas	Resultados más importantes
K. Ito and R. J. Fruehan : [20].	Study on the foaming of CaO-SiO ₂ -FeO Slags: Part I.	<p>Índice de formación de espuma de una escoria CaO-SiO₂-FeO con una ecuación empírica mediante análisis dimensional.</p> <p>Efecto de las partículas de segunda fase sobre la formación de espuma de la escoria.</p> <p>La formación de espuma en BOF, EAF y procesos de fundición en baño, estimando Σ para varias condiciones de operación y composiciones de escoria.</p>	<p>Se obtuvo una ecuación empírica mediante análisis dimensional para predecir el índice de formación de espuma para escorias CaO-SiO₂-FeO:</p> $\Sigma = 5.7 * 10^2 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\gamma\rho}} \right)$ <p>La altura de formación de espuma sería proporcional a la tasa de evolución del gas.</p> <p>La formación de espuma disminuye al aumentar el contenido de FeO y la basicidad.</p> <p>Se espera una gran</p>

			<p>formación de espuma en procesos de fundición por baño, en estos procesos la formación de espuma disminuirá al aumentar la prereducción debido a una menor cantidad de gas generado. En EAF, se logra una espuma más estable con menos escorias básicas con bajo contenido de FeO.</p>
<p>Y. Zhang and R. J. Fruehan: [18].</p>	<p>Effect of the bubble size and chemical reactions on slag foaming.</p>	<p>Efecto del azufre en el metal líquido sobre el tamaño de las burbujas.</p> <p>Espumación generada por la reacción interfacial escoria/metal.</p> <p>Espumación generada por burbujeo de gas argón.</p>	<p>Las espumas con burbujas muy finas tienen celdas de burbujas esféricas y son muy estables. Las espumas con burbujas grandes tienen células de burbujas poliédricas y son menos estables. El índice de espuma es inversamente proporcional al diámetro medio de las burbujas.</p> <p>El tamaño de las burbujas en las</p>

			<p>espumas generadas por la reacción interfacial escoria/metal depende de la actividad del azufre en el metal líquido.</p> <p>Se observó que el índice de espuma aumenta con la viscosidad, disminuye con la densidad y el diámetro de las burbujas, y es relativamente independiente de la tensión superficial.</p>
<p>R. A. M. De Almeida, D. Vieira, W. V. Bielefeldt, and A. C. F. Vilela: [11].</p>	<p>Slag foaming fundamentals- A critical assessment.</p>	<p>Propiedades de la escoria: Viscosidad, contenido de FeO, saturación de MgO, velocidad de gas superficial y tamaño de la burbuja.</p>	<p>Para inducir una espuma con el mayor rendimiento posible se debe considerar:</p> <p>Una baja velocidad superficial del gas evita que la escoria se expanda.</p> <p>Una saturación de la escoria (%CaO y %MgO), induce una alta viscosidad.</p> <p>Una buena cantidad de carbono y oxígeno para que se puedan dar</p>

			<p>reacción que generan CO, produciendo una gran cantidad de burbujas.</p> <p>Encontrar un contenido óptimo de FeO en la escoria.</p>
<p>R. K. Paramguru, R. K. Galgali, and H. S. Ray: [5].</p>	<p>Influence of slag and foam characteristics on reduction of FeO.</p>	<p>Propiedades de la escoria: viscosidad, tensión superficial y densidad.</p> <p>Constante de velocidad, k, y el índice de formación de espuma.</p> <p>Comportamiento espumante en la tasa de reducción de FeO por carbón sólido.</p>	<p>El gas CO generado en el proceso y la agitación del baño por el gas dan como resultado la transferencia de masa por convección.</p> <p>El gas CO genera espuma, lo que afecta significativamente la velocidad de reacción.</p> <p>El índice de formación de espuma, como la constante de velocidad, se pueden expresar y correlacionar en términos de la viscosidad, tensión superficial y densidad, utilizando un análisis adimensional.</p>

			La reducción de FeO en escoria fundida por carbón sólido se controla mediante el transporte de FeO en la fase de escoria.
K. Ito and R. J. Fruehan : [15].	Study on the foaming of CaO-SiO ₂ -FeO slags: Part II.	<p>Basicidad.</p> <p>Contenido de FeO.</p> <p>Tensión superficial.</p> <p>Viscosidad.</p> <p>Inyección de carbono y oxígeno.</p> <p>Composición química de la escoria.</p>	<p>Saturación de escoria (%CaO y %MgO) para una alta viscosidad.</p> <p>Contenido óptimo de FeO en la escoria</p> <p>Baja velocidad superficial del gas, evitando la formación de una escoria expandida.</p> <p>Buena cantidad de oxígeno y carbono para que logren ocurrir las reacciones que generan CO, produciendo una buena cantidad de burbujas.</p>
R. A. M. De Almeida, D. Vieira, W. V. Bielefeldt, and A. C. F. Vilela : [19].	Slag modeling of metallurgical slag foaming induced by chemical reaction.	Efecto de la cantidad de gas generado en la formación de espuma de escoria.	La fracción de volumen máximo de gas aumentó y la espuma de celdas esféricas evolucionó

		<p>Efecto de la viscosidad de la escoria en la formación de espuma de escoria.</p> <p>Efecto de la tensión superficial de la escoria en la formación de espuma de escoria.</p>	<p>gradualmente a la espuma de celdas poliédricas con una cantidad creciente de gas generado.</p> <p>A medida que aumenta la viscosidad, la velocidad de formación de espuma disminuye y la fracción volumétrica del gas aumenta y luego disminuía marginalmente.</p> <p>A medida que disminuye la tensión superficial, la fracción de volumen máximo de gas aumenta y la tasa de descomposición de la espuma se ralentiza significativamente.</p> <p>El incremento en la fracción de volumen máximo de gas que surge de la disminución de la tensión superficial se redujo con el aumento del gas generado.</p>
--	--	--	--

Los estudios llevados a cabo profundizan en el análisis de las propiedades intrínsecas de la escoria, incluyendo su composición química, viscosidad, tensión superficial, nivel de basicidad y contenido de FeO, entre otros. Estos aspectos se examinan en relación con su impacto en el proceso de espumación de la escoria. Asimismo, se determinan factores cruciales como el coeficiente de espumación (Σ) y el índice de vida media (τ), los cuales desempeñan un papel esencial en esta dinámica. Cabe destacar que la mayoría de estos estudios se realizan en condiciones de atmósfera reductora, y se varía el tipo de gas empleado para el proceso de burbujeo. Otros aspectos no estandarizados en estos estudios son el tamaño de las burbujas, que se ajustó con el diámetro interno de la varilla de soplado y el tipo de gas utilizado, y el tamaño del crisol, que determina el área transversal (expresada en cm^2), ejercen una influencia directa en los efectos de pared, donde el comportamiento de la escoria varía por la tensión superficial que tiene con el material sólido.

Influencia de las propiedades de la escoria

Entre las propiedades de la escoria que más influencia tendrán en la formación de una escoria espumosa están las siguientes:

- Viscosidad
- Basicidad

La producción de una escoria espumosa es un proceso dinámico bastante complejo de controlar, es limitado por las propiedades nombradas anteriormente, además de otras como la tensión superficial. Se han propuesto varios modelos matemáticos para lograr cuantificar el principal factor que induce la formación de una escoria espumosa.

Viscosidad

La viscosidad es la propiedad que define la capacidad del flujo para formar espuma. Los modelos son directamente proporcionales a la viscosidad e inversamente proporcionales a la densidad y tensión superficial [11]

Un aumento en la viscosidad proporciona un aumento del índice de formación de espuma, alcanzando un máximo donde se encuentra la escoria óptima. Sin embargo, un excesivo aumento de la viscosidad forma una escoria costrosa, lo cual está relacionado a la precipitación de una fase sólida y la presencia de partículas sólidas son perjudiciales para el proceso debido a que el ascenso de las burbujas se ve afectado. Una escoria muy viscosa tendrá un alto valor de índice espumoso, lo que puede dar paso a errores. En la Figura 9 se pueden relacionar estos parámetros:

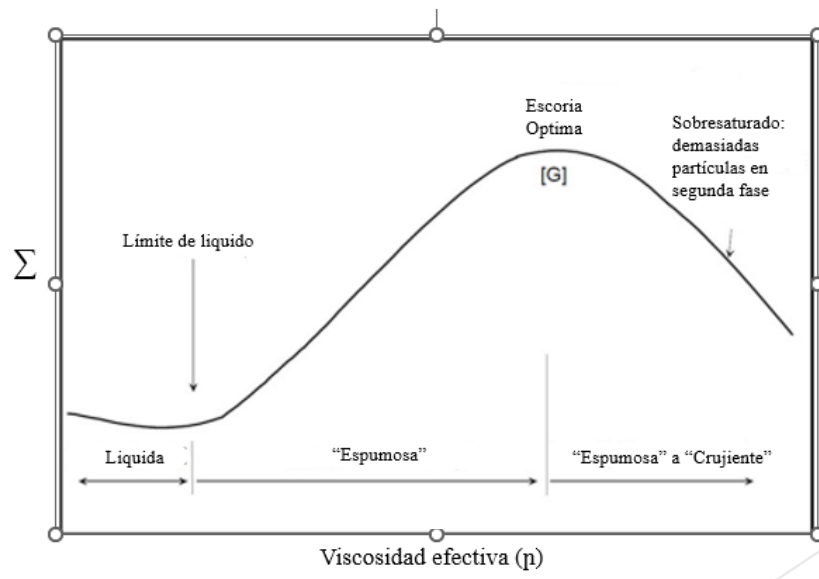


Figura 10: Relación entre el índice de formación de espuma y viscosidad efectiva. (Adaptado de [11]).

Basicidad

La basicidad de una escoria está directamente relacionada con la composición química de la escoria, ya sea una escoria básica o ácida.

- Escoria ácida: La disminución del contenido de CaO provoca una disminución de la viscosidad, lo cual implica una disminución del índice de formación de espuma.

- Escoria básica: Al aumentar el contenido de CaO, se induce un aumento de la viscosidad, lo cual provoca la precipitación de la fase sólida en la escoria fundida.

$$\text{Escoria básica: } \Sigma = \frac{115(\mu^{1.2})}{\rho\gamma_b^{0.2}Db^{0.9}} \quad (29)$$

$$\text{Escoria ácida } \Sigma = 10.3 * \frac{10^4(\gamma^{1.2})}{\mu^{0.4} \cdot \rho^{11.4} \cdot Db^{2.3}} \quad (30)$$

Las ecuaciones anteriores determinan el coeficiente de espumación para una escoria básica y una escoria ácida, de acuerdo con la literatura.

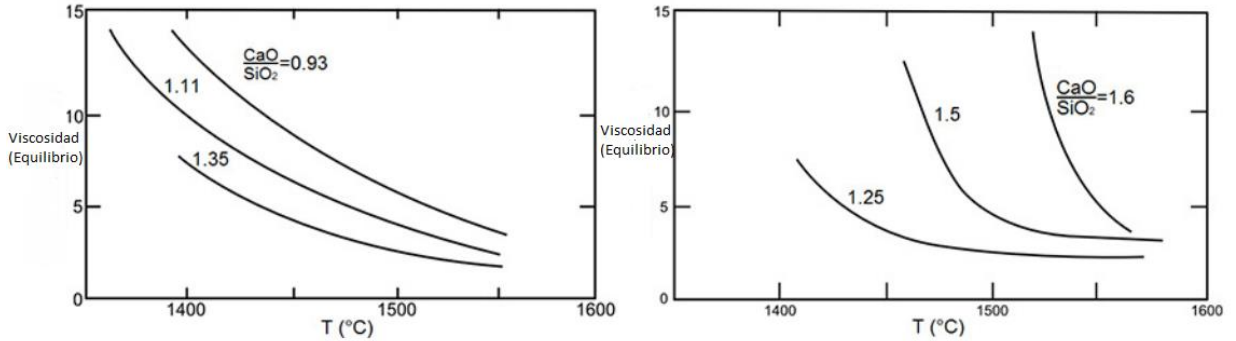


Figura 11: Influencia de la relación del porcentaje de CaO/SiO₂ en la viscosidad. (Adaptado de [11]).

Para lograr designar un tipo de escoria como básica o ácida, se utiliza el índice de basicidad (B3). Debido que una escoria de cobre por lo general está compuesta por SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, FeO, entre otros, se puede utilizar el índice de basicidad como:

$$B3 = \left(\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \right) \quad (31)$$

Y el índice de basicidad secundario, cuando las concentraciones de MgO y Al₂O₃ sean insignificantes:

$$B2 = \left(\frac{CaO}{SiO_2} \right) \quad (32)$$

Se puede catalogar a una escoria como ácida cuando el B2 < 1.5 [21].

Para un aumento de CaO en el sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}$ el sistema cambia sus características, variando el punto de fusión y la actividad del FeO. En este trabajo se utilizarán escorias con aproximadamente 45 % de FeO en la escoria.

Existe una dependencia de la composición química de la escoria debido a la diferencia de la basicidad. La actividad del FeO aumenta con el contenido de CaO, de acuerdo con lo calculado termodinámicamente, y a una basicidad igual a 1.4 se maximiza la actividad del FeO [16].

En la Figura 12 se observa un diagrama ternario con dos puntos, el punto superior indica la composición de la escoria, y el punto inferior indica la composición de la escoria con la adición de CaO.

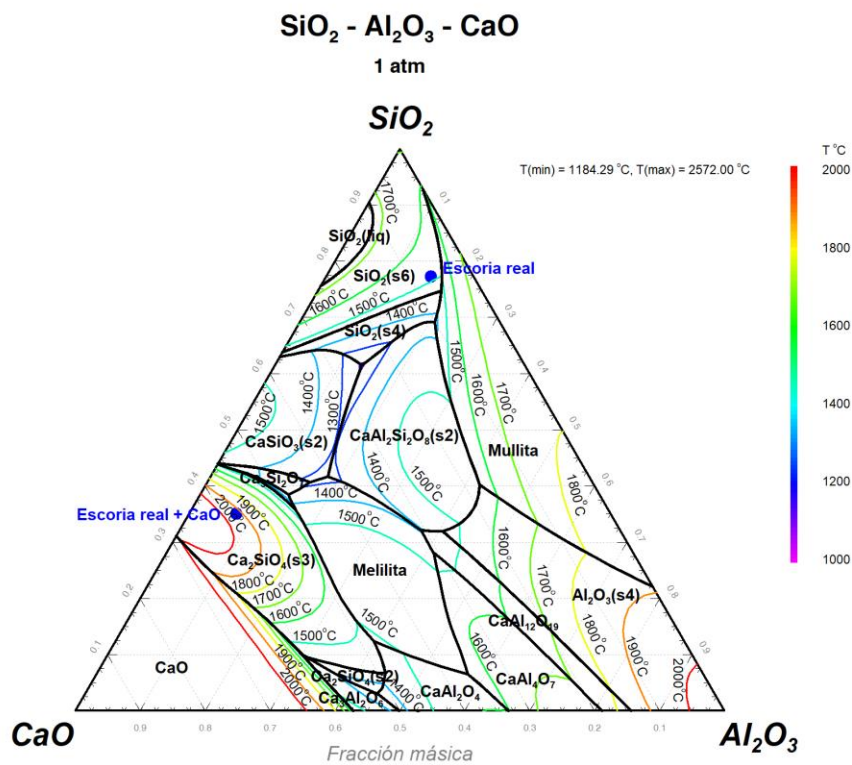


Figura 12: Diagrama ternario de escoria de cobre con escorias finales de cobre y escoria final de cobre con adición de CaO.

4 Metodología

Para obtener un modelo que caracterice el proceso de espumación en atmósfera neutra de escorias de cobre se llevó a cabo un montaje experimental de un horno de resistencias térmicas, equipo en el que se llevarán a cabo pruebas de espumación con escorias finales de cobre variando su basicidad. Se definen las variables y parámetros a determinar para lograr la caracterización del modelo, descripción de las experiencias, montaje de laboratorio, equipos, metodología empleada y la preparación de las muestras a espumar.

4.1 Variables y parámetros para pruebas de espumación

Dentro de los criterios que se establecieron para cuantificar la eficiencia de una experiencia, se encuentran en general las variables más importantes para el proceso, las cuales están relacionadas directamente con la formación de la espuma. Las cuales corresponden a las siguientes:

1. Altura de la espuma.
2. Caudal del gas.
3. Composición de las escorias de cobre.
4. Basicidad (está determinada por el anterior)

Con estas variables se determina el coeficiente de espumación de las escorias de cobre sin adición y con adición de CaO.

Tabla 3: Parámetros operacionales de pruebas de espumación de escorias de cobre con nitrógeno

Parámetro	Valor
Masa de escoria final de cobre (g)	100
Temperatura (°C)	1250
Flujo de gas (lpm)	0 – 3
Tipo de atmósfera	Neutra
Basicidad	Real 0.085, 1.4 y 1.7.
Dimensiones crisol (cm)	Diámetro interno: 3.5; Altura: 9.5

4.2 Descripción del sistema experimental

La instrumentación y los equipos utilizados para la realización de las pruebas experimentales se describen a continuación.

Equipos:

- Horno eléctrico de resistencias Limberg.
 - Ocho resistencias eléctricas de carburo-silicio.
 - Controlador de temperaturas NUVIA 900.
 - Termocupla tipo K.

Instrumentación:

- Flujómetros masicos.
- Manómetros.
- Rotámetros.
- Computador.
- Mezclador de gases.
- Tubos de alúmina para inyección de gases.

Se llevó a cabo un montaje experimental del horno vertical para realizar pruebas de espumación. El objetivo principal era medir la altura de la espuma en función de la variación del flujo de nitrógeno inyectado en el sistema, denotado como Q_g . Este parámetro fue ajustado en un rango comprendido entre 0 y 3 litros por minuto (lpm), con el fin de determinar el coeficiente de espumación (Σ). El protocolo detallado para el encendido del horno se encuentra adjunto en el Anexo 1. Este protocolo proporciona las pautas y procedimientos específicos seguidos durante las pruebas para garantizar la replicabilidad y la precisión de los resultados obtenidos.

En la Figura 13 se observa un esquema del montaje experimental realizado para las pruebas de espumación de escorias en el horno vertical:

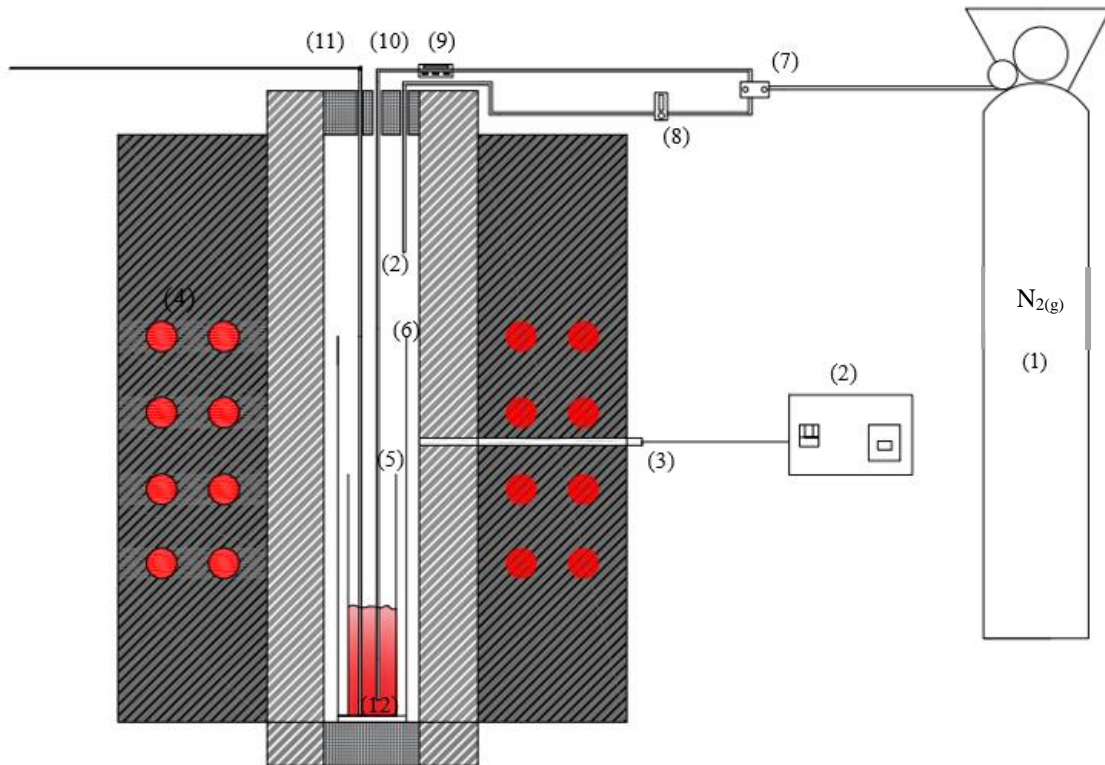


Figura 13:Montaje experimental para pruebas de espumación. (Elaboración propia)

(1): Bombona de N_2 (g) para soplado no reactivo en la escoria.

(2): Controlador (3): Termocupla tipo K.

(4): Resistencias de carburo silicio (5): Crisol de trabajo (6): Crisol de sacrificio.

(7): Manifold de $N_2(g)$ (8): Rotámetro (9): Flujómetro másico. (10): Tubo de alúmina para inyección de $N_2(g)$ (11): Varilla de acero para medir altura de espumación. (12): Escoria de cobre fundida.

4.2.1 Descripción de equipos e insumos

El horno que se utilizó en las pruebas de espumación corresponde a un equipo Lindberg que emplea 8 resistencias de carburo silicio. Contempla la instalación de un controlador NUVIA 900. El seguimiento de las tasas de velocidad de temperatura se realizó con dos termocuplas tipo K, una conectada al controlador, la cual se ubica por la parte lateral del horno (cerca de las resistencias térmicas), la otra, inserta desde la tapa superior para medir la temperatura interna del horno.

El flujo de nitrógeno para la espumación se mide a través de un flujómetro másico KOFLOC 8500, en cambio para la atmósfera neutra se utiliza un rotámetro de aire Veto de 0 a 40 lpm.

El horno contempla la adecuación de la estructura para asegurar la seguridad en los experimentos detallados, esto implica la fabricación de tapas para las bocas del horno, las que están fabricadas de acero inoxidable con las aberturas pertinentes para la entrada de gases, tanto de $N_{2(g)}$ para espumar y para la atmósfera neutra, orificio para varillas de acero que tienen como función medir la altura de la espuma y orificio para la salida de gases. La función de estas tapas es principalmente formar un sistema hermético dentro del horno, para que las pérdidas de energía sean mínimas.

Insumos:

- Crisol de sacrificio.
- Crisoles de trabajo.
- Escorias de cobre potrerillos.
- Termocupla tipo K.
- Alúmina fina en sacos.
- Bombonas de nitrógeno.
- Cal viva (CaO).
- Tapas de alúmina para crisoles.
- Tapa de alúmina para horno.
- Kaowool.
- Varillas de acero inoxidable 304 de 2 mm diámetro.
- Tijeras para crisoles.
- Trajes térmicos.

- EPP: Guantes aluminizados, zapatos de seguridad, mascara de gases, antiparras.

4.2.2 Preparación de materiales

El diseño experimental considera la espumación de escorias finales de cobre variando basicidad, así la escoria debe mezclarse y lograr una correcta homogenización con la cal viva (necesario para variar basicidad) cuando esté fundida a la temperatura definida. El procedimiento para la correcta homogenización es el siguiente:

1.- Moler la escoria en un chancador de mandíbula, logrando reducir su tamaño a aproximadamente 2 cm.

2.- La escoria reducida en tamaño tiene una segunda etapa de molienda en el chancador de rodillo, hasta obtener un tamaño aproximado de 2 mm.

3.- El sobretamaño de la escoria pasa a una tercera molienda en el chancador de cono, y el fino es tratado en el harnero con una malla 50# (300 μ m).

4.- El sobretamaño del harnero es guardado y el fino pasa a una etapa de roleo y cuarteo.

5.- Una vez roleado y cuarteado, se separan en muestras de aproximadamente 100 g.

6.- Se selecciona una muestra y se retiran 33 g de escoria, los cuales son reemplazados por 31 g de cal viva (CaO), logrando así cambiar su basicidad a 1.4. Lo mismo para basicidad 1.7. Se homogenizó la mezcla y se guardó en bolsas ziploc para reducir la absorción de la humedad, con esto las muestras se encuentran en perfecto estado para realizar pruebas de espumación en el horno vertical.

4.3 Protocolo para el montaje y puesta en marcha de horno CODELCO TECH

El procedimiento original se debía realizar en el horno Codelco-tech, sin embargo, debido a problemas en el sistema eléctrico de las resistencias, solo se trabajó la preparación de fayalita sintética. A continuación, se detalla el procedimiento de montaje y puesta en marcha que se realizó durante esta memoria:

Montaje del Horno:

1. Preparación de la Estructura:

- Montar una plataforma de acero anclada al piso con pernos de anclaje para proporcionar estabilidad.

- La plataforma consta de cuatro pilares de soporte, una escalera y barandas superiores.

- Utilizar dos pilares adicionales para anclar el horno y asegurar rigidez y estabilidad.

2. Mesa Elevadora y Preparación:

- La mesa elevadora soporta la parte inferior del horno y permite su apertura y cierre.

- Verificar la operatividad de la bomba hidráulica y el nivel adecuado de aceite hidráulico.

3. Montaje del Horno:

- Usar un sistema de elevación (como un Yale) debido al peso del horno.

- Ubicarlo sobre los pilares y asegurarse de apretar los pernos con tuercas para garantizar una conexión segura.

Reparación del Horno:

4. Remoción de ladrillos sueltos:

- Retirar ladrillos refractarios sueltos.

- Igualar la superficie del horno y el manto del horno.

5. Estucado con alúmina:

- Aplicar un estucado de alúmina en todo el horno para reducir la pérdida de energía y mejorar la hermeticidad.

Preparación de artefactos:

6. Fabricación de Instrumentos:

- Crear instrumentos como el crisol de sacrificio, tapas para la boca del horno y soporte para la tapa sobre el crisol.
- Diseñar tapas de alúmina para crisoles utilizados en pruebas de reducción.

7. Etapa de Curado:

- Someter los artefactos y el horno a una etapa de curado.
- Extraer la humedad presente en la alúmina siguiendo la curva de calentamiento especificada por el fabricante de alúmina.

Curado del Horno y Artefactos:

8. Calentamiento y Control:

- Conectar resistencias de carburo-silicio en serie.
- Utilizar el controlador para establecer la temperatura deseada para el calentamiento.
- Medir la temperatura en el interior del crisol y en la zona de las resistencias con termocuplas.

9. Hermeticidad:

- Asegurarse de que el horno esté completamente cerrado y hermético cubriendo los espacios con Kaowool grueso.

10. Uso del Horno:

- Una vez curado el horno y los artefactos, y después de verificar que todos los instrumentos estén en buenas condiciones, se puede utilizar el horno para la producción de fayalita sintética y las pruebas de espumación y reducción de escorias con hidrógeno.

En las siguientes imágenes se puede apreciar la reparación y puesta en marcha del horno CODELCO TECH:



Figura 14: Reparación y puesta en marcha de horno CODELCO TECH

Una vez reparado el horno y curado, se procedió a realizar las pruebas de preparación de fayalita para las distintas pruebas asociadas al proyecto. El horno solo logró alcanzar 1400 °C, y en el posterior enfriamiento progresivo las resistencias se trizaron, perdiendo su funcionalidad, lo que implicó dejar de realizar pruebas a la espera de un set de resistencias que permitieran proceder con las pruebas de reducción con hidrógeno.

5 Resultados y discusiones

Se realizaron tres pruebas experimentales de espumación de escorias de cobre con el objetivo de cuantificar el coeficiente de espumación. Se midió la altura de la espuma de escoria al incrementar el caudal de nitrógeno, considerando escorias de cobre con una basicidad de 0.085, 1.4 y 1.7, a estas últimas dos muestras se les ajustó la basicidad con CaO.

Para todas las muestras se utilizó de base escoria de cobre de Paipote, cuya composición definida por FRX está en la Tabla 4:

Tabla 4: Composición de escoria de cobre Paipote según FRX

Compuesto	%Masa	Error
Fe	31,472	0,070
SiO ₂	21,846	0,361
Cu	11,531	0,057
Al ₂ O ₃	4,333	0,323
S	1,624	0,027
Ca	1,325	0,018
Zn	1,131	0,016
MgO	1,042	0,637
K ₂ O	0,442	0,014
Ti	0,179	0,005
Cl	0,070	0,018
Mn	0,055	0,006
Ce	0,049	0,034
Co	0,048	0,012
P	0,043	0,016
Ba	0,041	0,014
Ni	0,034	0,006
Pb	0,027	0,004
Cr	0,022	0,008
Mo	0,017	0,002
Sn	0,012	0,005
As	0,011	0,004
Total	75,352	

En la Figura 15, se presenta un gráfico de análisis de difracción de rayos X (DRX) que corresponde a un análisis semicuantitativo de la muestra, la interpretación de este análisis permite determinar la composición mineralógica de la muestra:

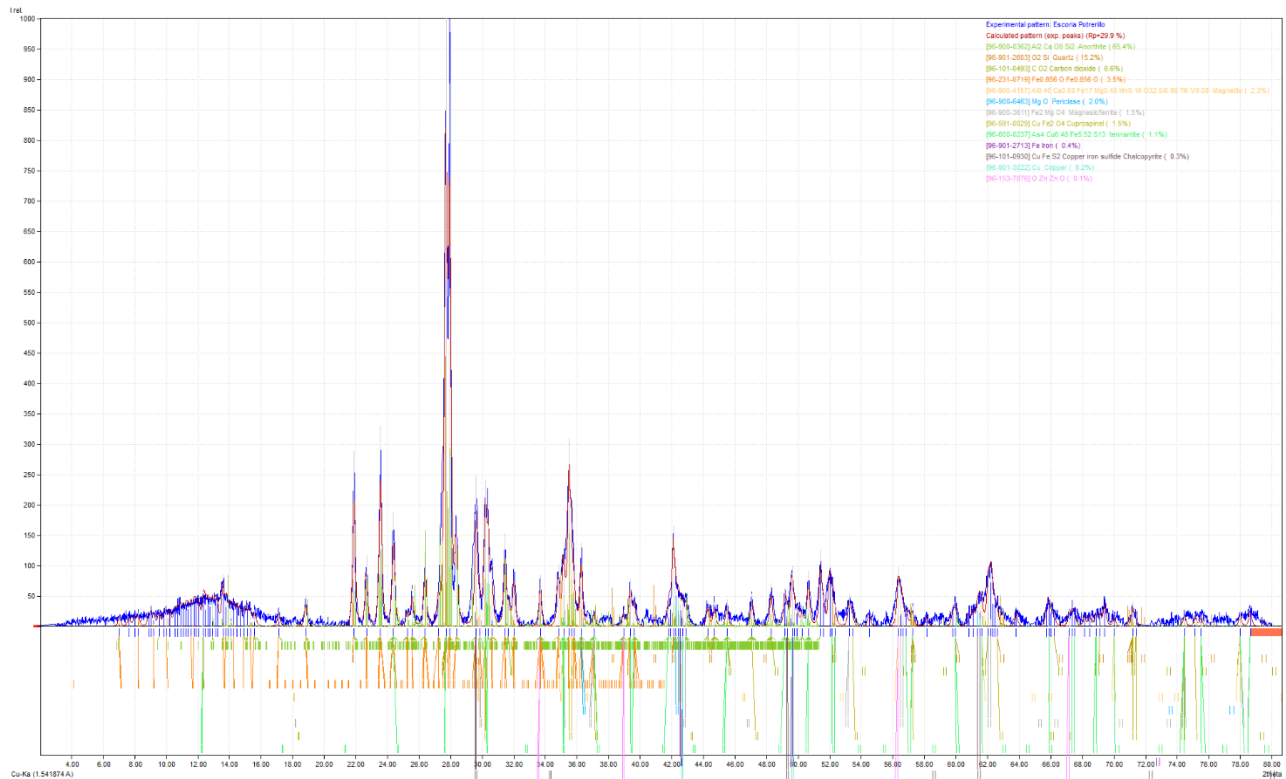


Figura 15: Análisis DRX para escoria de cobre procedente de Paipote.

De acuerdo con lo obtenido en los análisis FRX y DRX, el cobre se encuentra presente como cuprospinel, calcopirita y tennantita, por su parte, el hierro como wustita, magnetita y hierro metálico.

Debido a que con este método no es posible identificar la fase líquida y la espuma, se realizó una aproximación al modelo. En la operación se realizó la medición de la altura, H , y la altura inicial, h_0 , de la escoria fundida con una varilla de acero inoxidable 304, como se observa en la Figura 16:

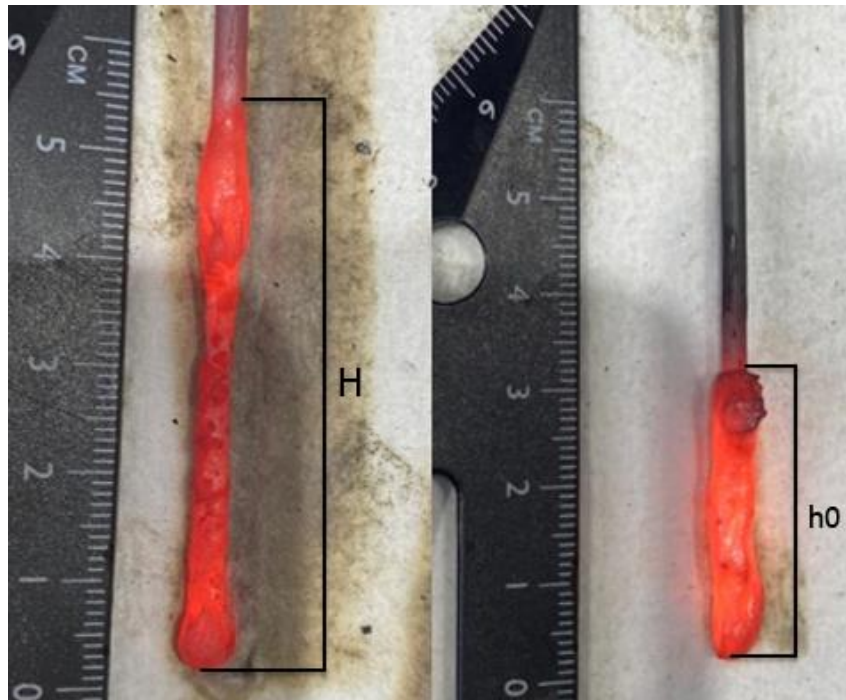


Figura 16: Alturas experimentales de espumacion.

Las pruebas de espumación se realizan a $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, al alcanzar esta temperatura se comienza a calentar la varilla de acero antes de introducirla por la parte superior del horno en la escoria fundida para medir la altura inicial h_0 . Una vez caliente la varilla (color rojo vivo), y sin la inyección de un caudal de nitrógeno para la espumación, se mide la altura inicial de la escoria h_0 . Luego, se procede a inyectar distintos caudales de nitrógeno con la finalidad de medir la altura H . Al obtener las alturas totales en el rango de caudales aplicados, se procesan los datos para determinar el coeficiente de espumación. Esta metodología se repite para las tres experiencias.

Para poder determinar el coeficiente de espumación, se calcula en primera instancia la velocidad superficial del gas (cm/s):

$$V_g^s = \left(\frac{Q_g}{A} \right) \quad (11)$$

- Q_g : Caudal de nitrógeno inyectado (cm^3/s).
- A : Área transversal del crisol (cm^2).

Luego, para obtener una aproximación de la fase de la espuma de la escoria se realiza una diferencia entre la altura H y la altura inicial h_0 .

$$h = H - h_0 \quad (33)$$

En la Figura 17, se representa cada una de estas mediciones:

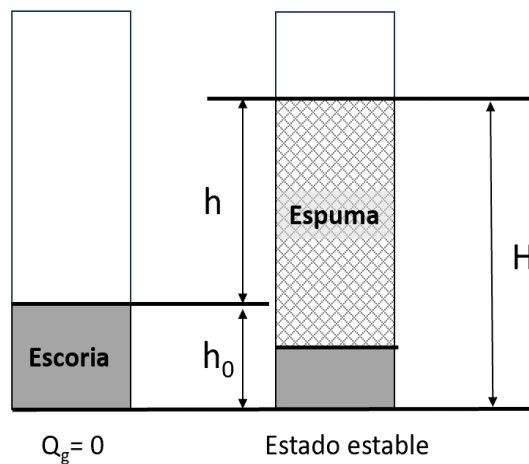


Figura 17: Diagrama de espumación, elaboración propia.

Por definición el coeficiente de espumación se puede determinar cómo la pendiente de la recta al graficar la altura h vs velocidad superficial del gas, de acuerdo con la ecuación (15).

En la Figura 18 muestra los puntos obtenidos de la altura h para cada velocidad superficial del gas aplicada, se determina la ecuación de la recta para cada experiencia realizada:

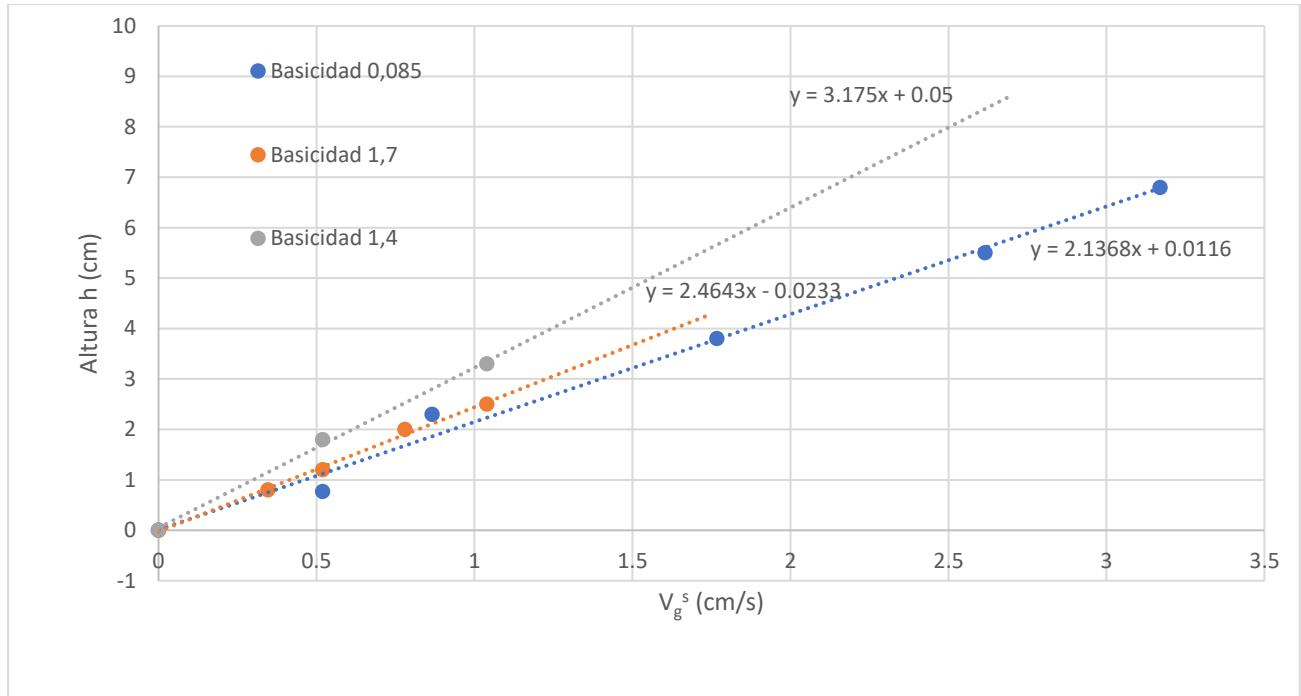


Figura 18: Altura h vs velocidad superficial del gas

Obtenida la ecuación de la recta, la pendiente para cada experiencia corresponde al coeficiente de espumación. El factor b de la recta es despreciable por sus valores. Se observa que a bajas velocidades superficiales del gas, hasta 3.2 cm/s para la basicidad 0.085 y hasta 1.1 cm/s, el modelo de Fruehan es válido.

En la tabla 5 se tabulan los coeficientes de espumación para cada experiencia realizada:

Tabla 5: Valores coeficiente de espumacion y basicidad para cada prueba

Experiencia n°	Basicidad	Σ
1	0.085	2.13
2	1.4	2.46
3	1.7	3.17

Se observa que la escoria de cobre de basicidad 0.085 experimenta mayores alturas de espuma que las escorias con basicidad modificada, ya que al aumentar la basicidad la escoria se observa más viscosa. El aumento en la cantidad de CaO tiene efecto en el aumento de la viscosidad [19]. Las experiencias con escorias de basicidad modificada presentan dificultades para espumar debido al cambio en sus propiedades, lo que impacta en el aumento del índice de espumación.

5.1 Análisis de resultados por prueba

Prueba de espumación de escoria de basicidad 0.085:

Para esta prueba se varió el caudal de nitrógeno entre 0 y 2 lpm, la altura de la escoria antes de la inyección del flujo de nitrógeno fue de 1.7 cm, y la altura máxima al espumar, H, fue de 8.5 cm.

La Tabla 7 resume los resultados, indicando los flujos inyectados de nitrógeno Q en cm³/s, la velocidad superficial del gas, V_g en cm/s, la altura H en cm y la altura h en cm de la espumación de la escoria.

Tabla 6: Rangos de caudales y alturas para prueba de espumación de escoria de cobre.

Q (cm ³ /s)	V _g ^s (cm/s)	H (cm)	h (cm)
0.00	0	1.70	0
5.00	0.52	2.47	0.77
8.33	0.87	4.00	2.30
17.00	1.77	5.50	3.80
25.17	2.62	7.20	5.50
30.50	3.17	8.50	6.80

El aumento de la altura de la espuma es directamente proporcional al incremento del flujo de nitrógeno al espumar. La escoria se mantuvo estable en bajos flujos inyectados. En flujos mayores presentaba un comportamiento turbulento, lo que ocasionaba pérdidas de material, además, la escoria asciende por las paredes del crisol, lo que implica una pérdida de material. Se observó que la altura de la espuma puede superar la altura del crisol dependiendo del flujo de nitrógeno, suministrado, es por esto, que para una futura prueba de reducción con hidrogeno, se debe tener precaución con el

caudal inyectado para no generar una espumación excesiva que implicaría pérdidas de material, sumado a la generación una escoria expandida turbulenta.

Los rangos óptimos del flujo inyectado para la espumación, para este tamaño de crisol, se encuentran entre 1-2 lpm. La Figura 19 ilustra las pérdidas de material en la experiencia de espumación para la escoria de basicidad 0.085, a caudales altos.



Figura 19: Crisol con pérdidas de material en las paredes a caudales altos de espumación.

En la Figura 20 se muestran los resultados experimentales sobre las medidas del aumento de la altura H en función de la velocidad superficial del gas aplicado.

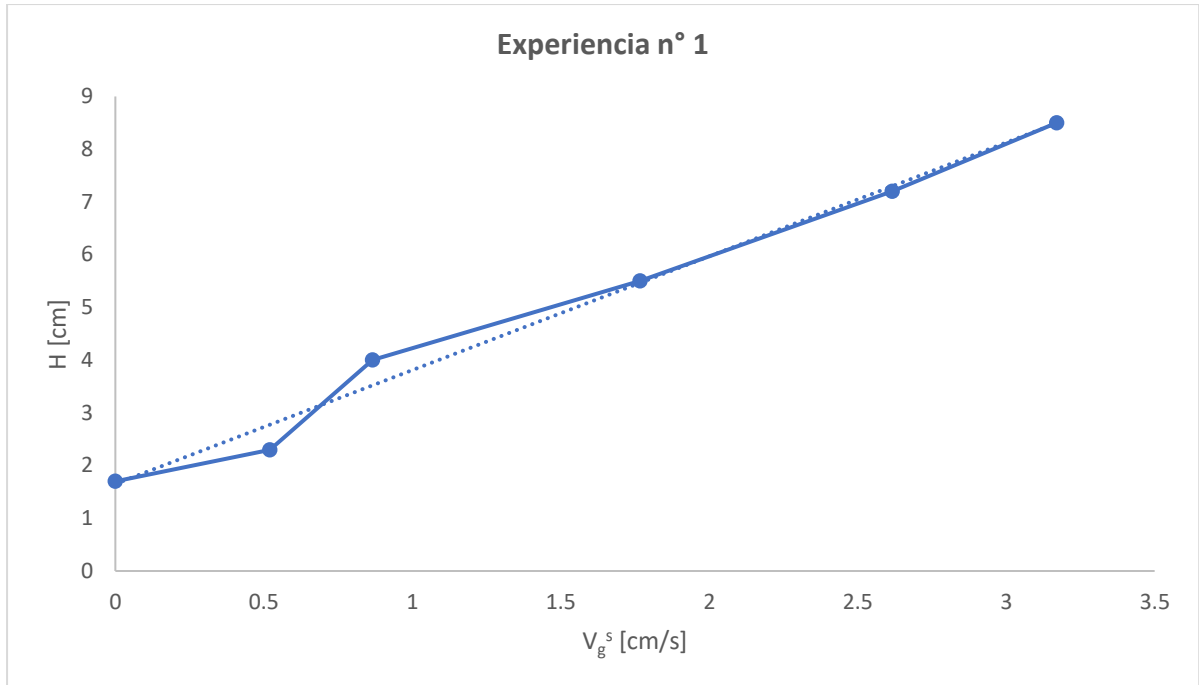


Figura 18: Altura de espumación H v/s velocidad superficial del gas

Se observa que a medida que se aumenta la velocidad superficial del nitrógeno inyectado al sistema, la altura H de la escoria aumenta progresivamente, hasta alcanzar una altura máxima que no puede ser superada, ya que esto provocaría el escape de la escoria del crisol.

Prueba de espumación escoria con basicidad 1.4:

Para esta prueba se varió el flujo de nitrógeno entre 0 y 1.55 lpm, la altura de la escoria antes de la inyección del flujo de nitrógeno fue de 1.9 cm, y la altura máxima al espumar, H , fue de 8.5 cm.

La Tabla 8 resume los resultados, indicando los flujos inyectados de nitrógeno Q en cm^3/s , la velocidad superficial del gas, V_{sg} en cm/s , la altura H en cm y la altura h en cm de la espumación de la escoria.

Tabla 7: Rangos de flujos y alturas para prueba de espumación de escoria con basicidad 1.4

Q [cm ³ /s]	V _g ^s [cm/s]	H [cm]	h [cm]
0.00	0	3	0
3.33	0.35	3.80	0.80
5.00	0.52	4.20	1.20
7.50	0.70	5.00	2.00
10.00	1.00	5.50	2.50
13.33	1.30	5.40	2.40
16.67	1.70	5.30	2.30

Se observa un incremento lineal y proporcional de la altura de la escoria H con respecto al flujo inyectado Q, hasta un caudal de inyección Q = 10 cm³/s, donde la altura de la escoria empieza a disminuir pese al aumento del flujo inyectado, esto indica que a caudales mayores la escoria deja de tener un comportamiento que se pueda modelar por Fruehan.

En Figura 20 se muestran los resultados experimentales sobre las medidas del aumento de la altura H, en función de la velocidad superficial del gas inyectado.

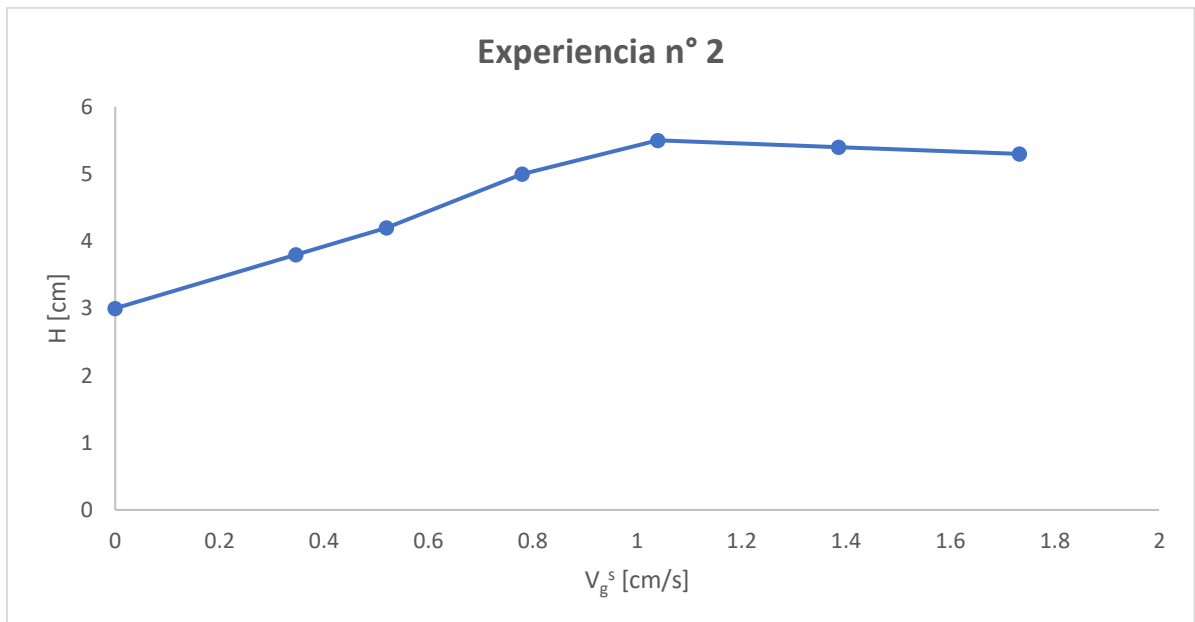


Figura 19: Altura de escoria de cobre (B=1.4) vs caudal.

Al analizar la figura, se puede observar que al aumentar el % de CaO en la escoria, se observa un aumento de la viscosidad.

Prueba de espumación de escoria con basicidad 1.7

Para esta prueba se varió el flujo de nitrógeno entre 0 y 1 lpm, la altura de la escoria antes de la inyección del flujo de nitrógeno fue de 3 cm, y la altura máxima al espumar, H, fue de 5.5 cm.

La Tabla 9 resume los resultados, indicando los flujos inyectados de nitrógeno Q en cm³/s, la velocidad superficial del gas, V_{sg} en cm/s, la altura H en cm y la altura h en cm de la espumación de la escoria.

Tabla 8: Rangos de caudales y alturas para prueba de espumación de escoria con basicidad 1.7.

Q (cm ³ /s)	V _g ^s (cm/s)	H (cm)	h (cm)
0.00	0	1.90	0
4.67	0.52	3.70	1.80
10.00	1.04	5.20	3.30
14.17	1.47	4.50	2.60
17.17	1.78	4.20	2.30
25.83	2.68	4.00	2.10

En este caso, el aumento en la espuma de la escoria es lineal y proporcional, pero en un cierto punto la escoria no logra subir la altura de espuma pese a aumentar el flujo de nitrógeno. Posteriormente, al aumentar el flujo, la altura de la escoria empieza a disminuir, esto puede deberse a la saturación por formación de fases sólidas entre SiO₂ y el CaO, las cuales precipitan en la fase líquida [22].

En la Figura 21 se muestran los resultados experimentales sobre las medidas del aumento de la altura H en función de la velocidad superficial del gas.

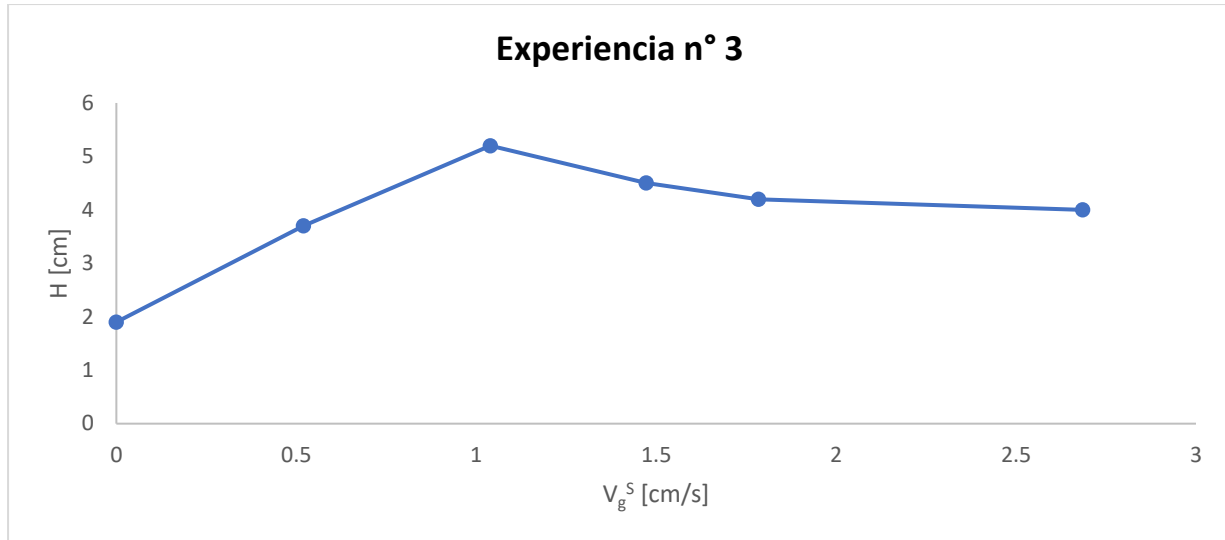


Figura 20: Altura de escoria de cobre (B=1.7) vs caudal.

Se observa que, a pesar de tener más basicidad en esta prueba, el índice de espumación es menor, esto ocurre porque la variación de la altura H, va disminuyendo a medida que aumenta el flujo de nitrógeno inyectado.

Al comienzo de la experiencia, la escoria tiene un comportamiento lineal donde se observó una escoria sin saturar, luego se alcanza un punto donde se observó la generación de una fase sobresaturada, la cual disminuye el área de contacto entre la escoria líquida y el gas, además de generar pérdidas en las paredes del crisol, como se observa en la Figura 22.

De acuerdo con la literatura [19], una escoria con basicidad > 1.5 se considera una escoria básica, debido al aumento en el contenido de CaO, esto implica un aumento de la viscosidad, lo que provoca la precipitación de una fase sólida en la escoria fundida, lo cual induce a una menor espumación, alcanzando alturas menores.



Figura 21: Formación de fase sobresaturada con pérdidas de material en las paredes del crisol

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

De acuerdo con las experiencias realizadas y a los análisis realizados tanto en forma general como particular, se puede concluir lo siguiente:

- El horno Codelco tech es óptimo para realizar pruebas de reducción de escorias de cobre utilizando hidrogeno diluido en nitrógeno, debido a que logra alcanzar altas temperaturas (sobre 1400 °C), pero se deben realizar tasas de velocidad de calentamiento y enfriamiento lentas para no dañar el revestimiento interno del horno ni tampoco las resistencias de carburo silicio.
- Se construyó un sistema experimental que validó el modelo de Fruehan para distintas composiciones químicas de escorias de cobre a bajas velocidades superficiales del gas inyectado, hasta 3.2 cm/s para $b=0.085$ y 1.1 cm/s para $b=1.4$ y 1.7.
- El proceso de espumación de las escorias de cobre sigue el modelo de Fruehan, debido a que se cumple la relacion de la altura de la espuma con la velocidad superficial del gas.
- Por lo general, el proceso de espumación de la escoria es lineal hasta alcanzar un punto donde existe un cambio en el régimen de la escoria. Desde ese punto, se dedujo la precipitación de una fase sobresaturada de silicatos de calcio, la cual es perjudicial para el proceso, ya que disminuye la superficie de contacto entre la escoria y el gas, lo que conlleva, a la generación de perdidas por la salida del material del crisol o porque se adhiere material a las paredes del crisol.
- La basicidad, que está determinada por el % CaO en la escoria, aumenta la viscosidad de la escoria, de acuerdo con lo observado en las experiencias, lo que implica un cambio en el coeficiente de espumación. Al tener una escoria más viscosa, el valor del índice espumoso será mayor formando partículas sólidas que dificultan el ascenso de las burbujas, por lo que, aunque se aumente el caudal del gas, la altura de la espumación no aumenta.
- Dentro de los aspectos experimentales, se observó que escorias con baja basicidad presentan un comportamiento más turbulento de la espuma y generan mayores pérdidas de material haciendo más dificultoso el proceso de espumación, por lo que al realizar

pruebas de reducción se debe establecer en qué rangos, la espuma no se vuelve turbulenta y escapa del crisol, estas escorias deben utilizar caudales de inyección de gas menores que escorias con alta basicidad. La temperatura dentro del crisol de trabajo tiene gran importancia ya que es esencial que la escoria se encuentre líquida.

6.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones para la realización de pruebas tanto de espumación como de reducción más eficientes:

- Buscar un método más eficiente para medir la altura de la espuma y determinar el valor de α , para obtener resultados más certeros del coeficiente de espumación Σ .
- Realizar pruebas en un horno de crisol de mayores dimensiones, y evaluar el comportamiento de la espuma en mayores escalas.
- Determinar la influencia de la temperatura en la espumación de la escoria, y su relación con la viscosidad, para evaluar su efecto en el coeficiente de espumación.
- Adaptar el equipo para lograr medir el tiempo de vida de la espuma τ .
- Utilizar termocuplas tipo R, debido que las termocuplas tipo K presentan fallas sobre los 1270 °C.
- Realizar pruebas con escorias de diversas composiciones y definir el efecto en el coeficiente de espumación.
- Utilizar resistencias fabricadas de un material que soporte mejor los cambios de temperatura, como las de Si_2Mo , con las características eléctricas y físicas necesarias para el proceso.

7 Referencias

- [1] E. C., J. T. en fundiciones de Cobre. C. 2015 Castillo, “Tecnologías en fundiciones de cobre,” 2015. Accessed: Jan. 16, 2023.
- [2] Ghosh, Ahindra, Chatterjee, and Amit, “IRONMAKING AND STEELMAKING.” 1998
- [3] V. Soto, “HORNOS ELÉCTRICOS DE LAS ACERÍAS ACTIVIDADES CUBIERTAS SEGÚN NOMENCLATURA.” 2015
- [4] V. Ramírez and J. Cantallopts, Identificación de oportunidades mediante la implementación de la Economía Circular en minería secundaria del cobre. 2021.
- [5] R. K. Paramguru, R. K. Galgali, and H. S. Ray, “Influence of Slag and Foam Characteristics on Reduction of FeO-Containing Slags by Solid Carbon,” 1997.
- [6] P. H. Gonzalo Felipe Gálvez and J. Eduardo Egaña Ramos, “Prospección y Caracterización de las Escorias de Cobre del Depósito Fundición Ventanas. Estudio de Factibilidad para su empleo en Hormigones,” 2015.
- [7] C. Sanhueza Véliz, “Identificación de oportunidades mediante la implementación de la Economía Circular en minería secundaria del cobre,” 2014.
- [8] V. Soto, “2018 Minerals Yearbook, Chile [Advance Release], in Minerals Yearbook,” 2022.
- [9] R. Parra, “DOCUMENTOS MEMORIA DE TITULO, UNIVERSIDAD DE CONCEPCION FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL METALURGICA” 2022.
- [10] T. C. Phiri, P. Singh, and A. N. Nikoloski, “The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part I,” *Minerals Engineering*, vol. 180. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2022. doi: 10.1016/j.mineng.2022.107474.
- [11] R. A. M. De Almeida, D. Vieira, W. V. Bielefeldt, and A. C. F. Vilela, “Slag foaming fundamentals -A critical assessment,” *Materials Research*, vol. 20, no. 2, pp. 474–480, Mar. 2017, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0059.
- [12] J. C. Yannopoulos, “Control of copper losses in reverberatory slags — a literature review..,” in *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1971, 1971, pp. 291–307.
- [13] Fuentes N. “Documentos memoria de título, universidad de chile facultad de ciencias físicas y matemáticas de ingeniera de minas” 2018.
- [14] Fuentes N, “Fuentes_N_Analisis_de_los_cuellos_de_botella”. 2018
- [15] K. Ito and R. J. Fruehan, “Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part I. Foaming

Parameters and Experimental Results.” 1997

- [16] R Bandak, “Proyecto de tesis Ramón Bandak” 2022
- [17] Y. OGAWA Didier HUIN, H. Gaye, and N. Tokumitsu, “Physica I Model of Slag Foaming,” 1993.
- [18] Y. Zhang and R. J. Fruehan, “Effect of the Bubble Size and Chemical Reactions on Slag Foaming.” 1999
- [19] R. A. M. De Almeida, D. Vieira, W. V. Bielefeldt, and A. C. F. Vilela, “Slag foaming fundamentals -A critical assessment,” *Materials Research*, vol. 20, no. 2, pp. 474–480, Mar. 2017, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0059.
- [20] K. Ito and R. J. Fruehan, “Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags" Part II. Dimensional Analysis and Foaming in Iron and Steelmaking Processes.” 1997
- [21] V Soto, “Capítulo V: parametros analizados, Tesis 3-26” 2015.
- [22] R. Parra, ” Étude expérimentale de la fusion réductrice du Cu₂O dans le système Cu₂O-FeOx-SiO₂” 1998.

8 Anexos

(1)

Procedimiento Experimental para Pruebas de Espumación de Escorias de Cobre en Horno Vertical

1. Preparación y Montaje:

- Coloca el material de prueba en el crisol de trabajo.
- Inserta el crisol de trabajo en el crisol de sacrificio.
- Introduce el conjunto de crisoles por la parte inferior del horno.

2. Cierre y Preparación del Horno:

- Cierra la parte inferior del horno con su respectiva tapa de acero inoxidable.
- Conecta el sistema de refrigeración de la tapa inferior.

3. Tapa Superior y Atmosfera Controlada:

- Coloca la tapa superior de acero inoxidable con las aberturas establecidas.
- Conecta el sistema de refrigeración para esta tapa.
- Inserta un tubo de alúmina por las aberturas superiores para administrar nitrógeno y crear una atmósfera neutra en el horno.

4. Calentamiento y Programación:

- Enciende el horno y programa una rampa de calentamiento de 6 horas hasta alcanzar 1250 °C.

5. Inyección de Nitrógeno y Mediciones:

- Al llegar a 1250 °C en el interior del horno, abre las aberturas superiores de la tapa.
- Introduce un tubo de alúmina en el crisol de trabajo para inyectar nitrógeno y espumar la escoria.
- Introduce una varilla de acero inoxidable por otra abertura para medir la altura de la escoria.
- Mide la altura inicial de la escoria sin inyectar nitrógeno (h_0).

6. Espumación y Mediciones de Altura:

- Inyecta nitrógeno y realiza mediciones de altura a los rangos de caudales establecidos.
- Registra las mediciones de altura en función del flujo de nitrógeno.

7. Finalización y Retiro del Crisol:

- Al concluir las mediciones en los diferentes caudales de nitrógeno, retira los tubos de alúmina.
- Retira la tapa superior de acero inoxidable.

- Saca el crisol de trabajo del horno usando tenazas y colócalo en un crisol de sacrificio designado.

8. Apagado y Monitoreo:

- Apaga los equipos y monitorea el horno hasta que la temperatura descienda por debajo de los 500 °C.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: DESARROLLO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL PARA ESTUDIO DE ESPUMACIÓN DE ESCORIAS EN PROCESO DE FUSIÓN REDUCTORA Y EVALUACIONES PRELIMINARES EN EL SISTEMA CaO-SiO₂-FeO-Al₂O₃

Nombre Memorista: Nicolás Ignacio Alarcón Vilches

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)	
Concepto			
Calificación			
Fecha	14.12.2023	Prof. Roberto Parra	Prof. Eduardo Balladares
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Ingeniero Supervisor: Camila Mora	
		Institución: Universidad de Concepción	

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Victor Parra	
--------------------	--

Resumen

Se desarrollaron montajes experimentales de hornos de resistencias eléctricas para el estudio de escorias en proceso de fusión reductora, logrando analizar el comportamiento de tres tipos de escorias a diferentes composiciones químicas, validando el modelo de Fruehan, a bajas velocidades superficiales. Se realizaron pruebas de espumación en atmosfera neutra, con la inyección de nitrógeno gaseoso a diferentes caudales, logrando medir la altura total de la espuma para cuantificar el coeficiente de espumación. Se concluyó que al aumentar la basicidad de las escorias aumenta el coeficiente de espumación, ya que el ascenso de las burbujas se ve dificultado debido a la retención, por lo cual, escorias con basicidad menor deben utilizar velocidades superficiales más bajas para evitar la formación de una escoria turbulenta, y así evitar pérdidas de material. Además, el horno de resistencias eléctricas CODELCO TECH, fue completamente remodelado y puesto en marcha para realizar pruebas futuras de reducción de escorias con hidrogeno diluido, se deben utilizar tasas de velocidad de calentamiento y enfriamiento lentas para evitar fracturas en las resistencias de carburo silicio y en el material refractario del horno. Esta tesis contribuyó al desarrollo de un proyecto que buscar reducir escorias de cobre para producir hierro metálico y un material cementicio, logrando disminuir la huella de carbono.