

EFFECTO DEL ENFRIAMIENTO DE ESCORIAS EN LA RECUPERACIÓN DE COBRE POR FLOTACIÓN

SEBASTIÁN FERNÁNDEZ ESPINOZA

**Informe de Memoria de Título
para optar al Título de**

Ingeniero Civil Metalúrgico

Junio 2025

Resumen

Se estudió la factibilidad técnica y económica de implementar el enfriamiento de escorias de cobre provenientes de etapas de conversión, sustituyéndolo por enfriamiento en tazas, tanto en su variante natural como combinada. Para ello, se caracterizó la escoria mediante análisis químico y mineralógico, pruebas de dureza y ensayos de flotación. En estos ensayos, se acondicionó la celda durante cinco minutos y se operó durante doce minutos a 6 L/min de aire y 30 % de sólidos, aplicando dosis de planta, media y baja relación de colectores para evaluar la recuperación de metal valioso, así como la ley y la recuperación en peso.

Posteriormente, se desarrolló un modelo en MATLAB basado en la geometría de la taza y en las propiedades de la escoria (ρ , c_p , k). En la primera fase, se simuló el enfriamiento natural por aire y radiación en las aristas, y en la segunda, el enfriamiento forzado con agua en la superficie. Mediante análisis FEA y una animación GIF, se determinó que el tiempo óptimo de enfriamiento fue de 58 horas (seis horas a temperatura ambiente y 52 horas con agua), con caudales de 3,79 L/min para un llenado del 40 % y de 4,31 L/min para un llenado del 66,9 %, procesando 2 880 t de escoria por día y requiriendo 78 tazas por ciclo. El modelo también validó un coeficiente de transferencia de calor natural $K = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y demostró que la taza de mayor volumen (700 ft³ en Caletones frente a 495 ft³ en Altonorte) removía más calor en los niveles de llenado simulados.

Finalmente, la evaluación económica arrojó un VAN de 27 169 833 USD, una TIR del 22 % y un período de recuperación de cuatro años, considerando la inversión en 110 tazas, un costo de mantenimiento anual del 10 % y proyecciones del precio del cobre en USD para ajustar la rentabilidad del proyecto. Este análisis integral permite visualizar con mayor claridad la viabilidad y el impacto potencial de la implementación del nuevo sistema de enfriamiento en la operación.

Abstract

The technical and economic feasibility of implementing the cooling of copper slags from conversion stages was studied, replacing the current method with cooling in pots, both in its natural and combined variants. For this purpose, the slag was characterized through chemical and mineralogical analysis, hardness tests, and flotation assays. In these tests, the cell was conditioned for five minutes and operated for twelve minutes at 6 L/min of air and 30% solids, applying plant, medium, and low collector ratios to evaluate the recovery of valuable metal, as well as grade and weight recovery.

Subsequently, a MATLAB model was developed based on the geometry of the pot and the properties of the slag (ρ , c_p , k). In the first phase, natural cooling by air and radiation at the edges was simulated, and in the second phase, forced cooling with water on the surface. Through FEA analysis and a GIF animation, it was determined that the optimal cooling time was 58 hours (six hours at ambient temperature and 52 hours with water), with flow rates of 3.79 L/min for 40% filling and 4.31 L/min for 66.9% filling, processing 2,880 t of slag per day and requiring 78 pots per cycle. The model also validated a natural heat transfer coefficient $K = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ and demonstrated that the larger pot (700 ft³ in Caletones versus 495 ft³ in Altonorte) removed more heat at the simulated filling levels.

Finally, the economic evaluation yielded an NPV of USD 27,169,833, an IRR of 22%, and a payback period of four years, considering the investment in 110 pots, an annual maintenance cost of 10%, and copper price projections in USD to adjust the project's profitability. This comprehensive analysis provides a clearer view of the feasibility and potential impact of implementing the new cooling system in the operation.

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Presentación del tema	1
1.2	Objetivos.....	2
2.	Antecedentes.....	3
2.1	División El Teniente	3
2.2	Descripción de la Fundición Caletones	3
2.3	Tratamiento de escorias	5
2.4	Pérdidas de cobre en escorias	5
2.5	Enfriamiento de escorias	7
2.6	Tipo de enfriamiento y escoria producida.....	13
2.7	Interacciones térmicas en tazas.....	16
2.8	Simulación de enfriamiento en tazas de escoria	17
2.9	Composición de las escorias de cobre.....	19
2.10	Test de Bond.....	20
2.11	Fundamentos de la flotación de escorias.....	21
2.12	Variables de control en la flotación de escorias	21
2.13	Modelo de transferencia de calor.....	25
2.14	Simulación MATLAB	34
3.	Metodología.....	38
3.1	Caracterización de escorias	38
3.2	Test de Bond.....	38
3.3	Flotación de escorias.....	39
4.	Resultados y discusiones	44
4.1	Caracterización química de escorias CT	44
4.2	Resultados test de Bond.....	47
4.3	Resultados de flotación escorias.....	53

4.4	Resultados simulación enfriamiento	65
4.5	Evaluación económica.....	77
4.6	Evaluación de alternativas.....	77
5.	Conclusiones.....	79
6.	Bibliografía	82
	Anexos	84
	Anexo 1. Test de Bond.....	84
	Anexo 2. Diagrama de Heisler	86
	Anexo 3. Simulación MATLAB	87
	Anexo 4. Balance de calor	88
	Anexo 5. Evaluación económica	92

Índice de Tablas

Tabla 1. Tiempos en ciclo de enfriamiento en canchas DET Caletones [7].	9
Tabla 2. Caudales de enfriamiento utilizados en canchas de enfriamiento DET Caletones [7].	9
Tabla 3. Identificación de lotes de escorias en las pruebas de enfriamiento en tazas [8].	12
Tabla 4. Propiedades típicas de las escorias de fundición de cobre [15].	19
Tabla 5. Composición referencial de escorias producidas por fundiciones de cobre en Asia [10].	19
Tabla 6. Resultados de pruebas de molienda y flotación de escorias obtenidas a nivel de laboratorio e industrial de acuerdo con las propiedades granulométricas del material [11].	22
Tabla 7. Resultados del estudio de molienda y flotación de escorias a nivel de laboratorio en función de la cama en el proceso de enfriamiento [11].	22
Tabla 8. Condiciones de ensayo en reactivos utilizados en flotación de escorias bajo enfriamiento natural y combinado.	41
Tabla 9. Composición química referencial de escorias del CT [23].	44
Tabla 10. Composición química de muestras de escoria procesadas bajo enfriamiento natural.	44
Tabla 11. Análisis químico de muestra de escoria tratada bajo enfriamiento natural. .	45
Tabla 12. Análisis químico de muestra de escoria tratada mediante enfriamiento combinado natural y forzado con agua.	45
Tabla 13. Resultados de los parámetros para el cálculo del work index de la escoria enfriada naturalmente.	49
Tabla 14. Resultados de los parámetros para el cálculo del work index de la escoria obtenida mediante enfriamiento combinado natural y forzado.	52
Tabla 15. Condiciones de simulación del ciclo de enfriamiento para Alternativa 1 y temperaturas alcanzadas al finalizar la simulación en 30 h.	69
Tabla 16. Alternativa 2 de ciclo de enfriamiento y temperaturas alcanzadas al finalizar la simulación en 58 h.	70
Tabla 17. Tiempos para el procesamiento de escorias para Alternativa 2 basado en un ciclo de enfriamiento en tazas.	71
Tabla 18. Alternativa 1: Parámetros de simulación y balance de energía en la taza....	73
Tabla 19. Alternativa 2: Parámetros de simulación y balance de energía en la taza....	74

Tabla 20. Análisis granulométrico de alimentación al test de Bond para escoria bajo enfriamiento natural.....	84
Tabla 21. Análisis granulométrico de producto al test de Bond para escoria bajo enfriamiento natural.....	84
Tabla 22. Cálculo de parámetros para test de Bond para escoria bajo enfriamiento natural.....	85
Tabla 23. Análisis granulométrico de alimentación al test de Bond para escoria bajo enfriamiento combinado.....	85
Tabla 24. Análisis granulométrico de producto tras test de Bond para escoria bajo enfriamiento combinado.....	86
Tabla 25. Cálculo de parámetros para test de Bond para escoria bajo enfriamiento combinado.....	86
Tabla 26. Parámetros para la geometría de la taza.....	88
Tabla 27. Vectores de altura en función con llenado de taza.....	88
Tabla 28. Vector de Semiejes mayor y menor en función de llenado de taza.....	88
Tabla 29. Relación nivel de llenado de taza y tonelaje de escoria.....	88
Tabla 30. Relación entre velocidad del agua y coeficiente transferencia de calor convectivo en convección forzada.....	88
Tabla 31. Proyecciones en el cambio del dólar respecto con el peso chileno según antecedentes económicos [26].....	92
Tabla 32. Proyecciones en el precio del cobre en c/lb según parámetros de planificación [26].....	92
Tabla 33. Proyecciones del costo de refinación en c/lb según parámetros de planificación [26].....	92
Tabla 34. Flujo de caja al año diez en la evaluación económica de la implementación del enfriamiento en tazas.....	94

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de procesos de la Fundición Caletones [1].....	4
Figura 2. Sistema de regadío continuo en el parque de enfriamiento en tazas [12].	10
Figura 3. Relación entre el grado de molienda y tipo de enfriamiento con el contenido de cobre en los relaves de flotación de escorias de fundición [11].	11
Figura 4. Contenido de cobre en los relaves de flotación de escorias bajo distintos tipos de enfriamiento (Índice de confianza: 95% para la media) [8].	13
Figura 5. Análisis esquemático del grado de liberación de partículas sulfuradas [8].	15
Figura 6. Relación entre la recuperación de cobre y la ley del concentrado generado por la flotación de escorias en términos del tamaño de partícula [5].	15
Figura 7. Distribución de valores de temperatura en la sección longitudinal y superficie de la taza obtenidas por la simulación de enfriamiento con aire y agua [5].	18
Figura 8. Geometría cilíndrica simplificada de una taza de escoria fundida.	26
Figura 9. Diagrama de Heisler para estimar valores de temperatura en términos del número de Fourier y Biot para un cilindro infinito [23].	29
Figura 10. Diagrama de Heisler para determinar la temperatura en el centro de una taza cilíndrica de escoria en función del número de Nusselt (NU) y Fourier (X) [5].	30
Figura 11. Diagrama de Heisler para determinar la temperatura en la superficie de una taza cilíndrica de escoria en función del número de Nusselt (NU) y Fourier (X) [5].	31
Figura 12. Imagen de un bloque de escoria parcialmente solidificado en taza [24].	32
Figura 13. Representación simplificada de la geometría de la taza de escoria mediante un cono truncado invertido.	35
Figura 14. Programación de flujos de calor en simulación MATLAB.	36
Figura 15. Representación de los flujos de calor a través de las superficies o aristas de la taza según la fase. Izquierda: Fase 1: enfriamiento natural con efecto de la radiación en toda la taza y Derecha: Fase 2: enfriamiento forzado con agua y enfriamiento natural con radiación a través de la superficie de la taza.	37
Figura 16. Metodología para obtención de resultados en simulación MATLAB.	42
Figura 17. Metodología para realizar la evaluación económica del enfriamiento en tazas.	43
Figura 18. Difractograma de la muestra de escoria de cobre procesada mediante enfriamiento natural. Fases mayoritarias: + Fayalita, Fe_2SiO_4 , * Magnetita, Fe_3O_4 . Fase minoritaria: • Calcosina, Cu_2S	46
Figura 19. Difractograma de la muestra de escoria procesada mediante enfriamiento combinado natural y forzado con agua.	47

Figura 20. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis de alimentación F80 de escoria bajo enfriamiento natural.	48
Figura 21. Distribución de Rosin-Rammler para análisis de alimentación F80 de la muestra de escoria con enfriamiento natural.	48
Figura 22. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis de producto P80 de escoria bajo enfriamiento natural.	49
Figura 23. Distribución de Rosin-Rammler para análisis del producto P80 de la muestra de escoria con enfriamiento natural.	50
Figura 24. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis de alimentación F80 de escoria bajo enfriamiento combinado. .	51
Figura 25. Distribución de Rosin-Rammler para análisis de la alimentación F80 de la muestra de escoria con enfriamiento combinado.	51
Figura 26. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis del producto P80 de escoria bajo enfriamiento combinado.	52
Figura 27. Distribución de Rosin-Rammler para análisis del producto P80 de la muestra de escoria con enfriamiento combinado.	53
Figura 28. Comparación de las curvas granulométricas de muestras de escoria enfriada naturalmente tomadas a 1 h, 1.5 h y 2 h de un ensayo de molienda.	54
Figura 29. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria enfriadas naturalmente, 70 % – 325 #.	55
Figura 30. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria enfriadas naturalmente, 80 % – 325 #.	56
Figura 31. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento natural, 70 % – 325 #.	57
Figura 32. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento natural, 80 % – 325 #.	57
Figura 33. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento natural. 70 % – 325 #.	58
Figura 34. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento natural. 80 % – 325 #.	59

Figura 35. Comparación de las curvas granulométricas de muestras de escoria con enfriamiento combinado tomadas a 1 h, 1.5 h y 2 h de un ensayo de molienda.	60
Figura 36. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria con enfriamiento combinado, 70 % – 325 #.	61
Figura 37. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria con enfriamiento combinado 80 % – 325 #.	61
Figura 38. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento natural, 70 % – 325 #.	62
Figura 39. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento combinado, 80 % – 325 #.	63
Figura 40. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento combinado. 70 % – 325 #.	64
Figura 41. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento combinado. 80 % – 325 #.	64
Figura 42. Representación gráfica del etiquetado de aristas para la taza de 700 ft ³ en función del nivel de llenado de la escoria en taza, color rojo: nivel de llenado máximo de 66.9 %, colores en negro: llenado de 50, 60 y 65 %, color gris: nivel mínimo 40 %.....	66
Figura 43. Evolución de los perfiles de temperatura en el centro y superficie de la escoria en taza con 40 % de llenado.	68
Figura 44. Campo de temperaturas de la escoria en taza con 40 % de llenado al término de la simulación.	68
Figura 45. Evolución de la temperatura en el centro y superficie de la escoria en taza con 66.9 % de llenado.....	69
Figura 46. Campo de temperaturas de la escoria en taza con 66.9 % de llenado al término de la simulación.....	70
Figura 47. Evolución de la temperatura en el centro y superficie de la escoria en tazas con 80.7 % de llenado al término de la simulación.	72
Figura 48. Campo de temperaturas de la escoria en taza con 80.7 % de llenado al término de la simulación.	73
Figura 49. Comparación del efecto de la remoción de calor del agua, aire y radiación en función del nivel de escoria en la taza, desde un 40% hasta un 66.9% de llenado.....	75

Figura 50. Comparación del efecto de la remoción de calor del aire y radiación en función del nivel de escoria en la taza, desde un 40% hasta un 66.9% de llenado.	76
Figura 51. Relación lineal entre el nivel de llenado de taza con área superficial expuesta de transferencia de calor.	76
Figura 52. Perfil de temperatura en el centro y superficie luego de un día aplicando enfriamiento natural.....	87
Figura 53. Diagrama de balance de masa comparativo en la PTE: enfriamiento actual en canchas y enfriamiento en tazas.	93

Nomenclatura

Símbolos del alfabeto latino

Símbolo	Significado	Unidades de medida
$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$	Derivada parcial de segundo orden de la temperatura en términos de distancia radial	adimensional
$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$	Derivada parcial de segundo orden de la temperatura en términos de la altura	adimensional
A_1	Función del número de Biot	adimensional
$A_{\text{placa, plana}}$	Área superficial de la escoria por correlación de placa plana	m ²
Bi	Número de Biot	adimensional
$c_{p(\text{agua})}$	Capacidad calorífica del agua	J/kg·K
c_p	Capacidad calorífica de la escoria	J/kg·K
$\frac{dT}{dt}$	Cambio de la temperatura en el tiempo	°C
F_{80}	Distribución de mineral 80 % pasante de alimentación	µm
Fo	Número de Fourier	adimensional
Gbp	Número de gramos netos bajo una cierta malla por revolución	g/rev
h_{agua}	Coeficiente de transferencia de calor del agua	W/m ² ·K
H_{cilindro}	Coeficiente de transferencia de calor en convección natural para geometría cilíndrica	W/m ² ·K
h_{fg}	Entalpía de vaporización del agua	J/kg
H_{placa}	Coeficiente de transferencia de calor en convección natural para geometría de placa plana	W/m ² ·K
$H_{\text{ponderado}}$	Coeficiente de transferencia de calor en convección natural ponderado para la taza	W/m ² ·K
$H(i)$	Coeficiente de transferencia de calor convectivo	W/m ² ·K
k	Conductividad térmica	W/m·K
\dot{m}_{agua}	Flujo másico del agua	kg/s
m_{agua}	Masa del agua de enfriamiento	kg
m_{esc}	Masa de escoria en la taza	kg
Nu	Número de Nusselt	adimensional
P_{80}	Distribución de mineral 80 % pasante de producto	µm
Pr	Número de Prandtl	adimensional
Q_{aire1}	Calor removido por el aire en la superficie de la escoria	J
Q_{aire2}	Calor removido por el aire en la superficie externa de la taza o pared	J
$Q_{\text{cal,agua}}$	Calor removido para elevar la temperatura del agua	J

Q_{rad}	Calor removido por efecto de la radiación en la superficie y paredes de la taza	J
$Q_{rem,agua}$	Calor removido por el agua	J
$Q_{rem,esc}$	Calor total a remover de la escoria	J
$Q_{vap,agua}$	Calor requerido para vaporizar el agua	J
r	Longitud a través de la que fluye la transferencia de calor	m
r	Radio del cilindro	m
Ra_D	Número de Rayleigh	adimensional
Re_D	Número de Reynolds	adimensional
r^*	Número de revoluciones necesarias para obtener carga circulante de 350 %	rev
T_0	Temperatura en el centro/superficie del cilindro	°C
T_∞	Temperatura del fluido externo	°C
T_{aire}	Temperatura del aire de enfriamiento	°C
T_c	Temperatura en el centro del fluido	°C
T_i	Temperatura del fluido de interés	°C
T_o	Temperatura del aire	°C
T_p	Temperatura inicial de la escoria	°C
$T_{superficie}$	Temperatura de la escoria en la superficie al tiempo inicial	°C
t	Tiempo característico	s
$t_{enf, forzado}$	Tiempo de enfriamiento forzado	s
$Y_c(i)$	Lectura eje ordenadas del diagrama	adimensional
W	Masa total de mineral cargado al molino	g
W_i	Work index del mineral	kWh/t

Símbolos del alfabeto griego

Símbolo	Significado	Unidades de medida
α	Difusividad térmica	m ² /s
ΔT_{agua}	Diferencia de temperatura del agua	°C
$\Delta T_{escoria}$	Diferencia de temperaturas de la temperatura desde el inicio hasta el final del proceso de enfriamiento	K
$\Delta T_{logarítmica}$	Temperatura media logarítmica	°C
$\varepsilon_{percolación}$	Eficiencia de percolación del agua	%
$\theta_{0,cyl}$	Lectura en el eje vertical del diagrama	adimensional
λ	Coefficiente de conductividad térmica	W/m·K
λ_1	Función del número de Biot	adimensional
ρ	Densidad de la escoria	kg/m ³
τ	Número de Fourier	adimensional
$\Psi_F(p_1)$	Porcentaje menor que malla de separación p_1 en alimentación fresca del molino	%

1. Introducción

1.1 Presentación del tema

La vía pirometalúrgica comprende múltiples etapas para el procesamiento de concentrados sulfurados de cobre. Para una fundición tradicional, los procesos que destacan son la fusión, conversión y refinación para convertir un concentrado de cobre en cobre refinado anódicamente. Dentro de este proceso, se generan escorias con alto contenido de cobre, principalmente en las etapas de fusión y conversión, debido a la presencia del alto grado en la mata de este metal valioso. En este contexto, se han estudiado diversas formas para recuperar eficientemente el cobre contenido en las escorias.

Este trabajo está directamente relacionado con procesos de enfriamiento y flotación de escorias, que ha sido ampliamente estudiado y tiene el objetivo de disminuir el contenido de cobre en los relaves de flotación de escorias.

La intención del presente trabajo es realizar una propuesta mediante la evaluación económica para la implementación del enfriamiento en tazas, continuando con el estudio identificado en la literatura y comprobando mediante una metodología experimental los resultados del contenido de cobre en las escorias según el tipo de enfriamiento utilizado, para finalmente definir y proponer un diseño en pruebas de enfriamiento industriales para la Fundición Caletones.

El negocio de una fundición de cobre consiste, a grandes rasgos, en el margen entre las utilidades y los costos. Las utilidades que tiene una fundición se basan en la venta de subproductos comerciales como el ácido sulfúrico, además del cobre refinado anódicamente, que es el producto principal. Actualmente, las fundiciones chilenas enfrentan mayores desafíos ambientales y productivos, entre los cuales destaca la pérdida de metales valiosos en la escoria, que simplemente se descartaba en la antigüedad sin mayores acciones para recuperarlos.

Ahora bien, se conoce que tal práctica resulta inadecuada pues las escorias de fundición, a pesar de ser considerados como pasivos ambientales, contienen metales valiosos confinados por los procesos de fusión-conversión, siendo el principal elemento de valor, el cobre.

En el campo de la metalurgia extractiva se han estudiado a fondo formas y métodos para extraer la mayor cantidad de metales valiosos posible y así mitigar las pérdidas, que es

otra fuente de generación de utilidades. Hasta el momento, la vía que parece ser la más provechosa de implementar es mediante la molienda de la escoria y posterior flotación. En la actualidad, el método más popular para enfriar las escorias generadas en las fundiciones de cobre es el uso de ollas o tazas. Este método es utilizado para recuperar el cobre contenido en la escoria asociado a factores como el arrastre mecánico o disolución, tanto para la etapa de fusión como de conversión.

El método conocido como enfriamiento en canchas, consiste en el enfriamiento natural con el medio que rodea a la escoria, seguido por el enfriamiento forzado con agua, y que en conjunto forman un ciclo de enfriamiento global hasta la solidificación. En ambas etapas se recupera el cobre contenido en la escoria, pero se diferencian en los parámetros operacionales y por ende tienden a generar relaves finales con diferentes contenidos de cobre durante la flotación de escorias.

1.2 Objetivos

Objetivo general

- Evaluar técnica y económicamente la implementación del enfriamiento de escoria en tazas para aumentar la recuperación de cobre en la Fundición Caletones.

Objetivos específicos

- Analizar los tipos de tratamientos de escoria, comparando el enfriamiento en tazas y en canchas para reducir el contenido de cobre en relaves de flotación.
- Realizar pruebas de laboratorio, incluyendo test de Bond y análisis químico y mineralógico para caracterizar las escorias de la Fundición Caletones.
- Evaluar el efecto del enfriamiento en la recuperación de cobre a partir de las pruebas de flotación de escorias.
- Simular con un modelo de transferencia de calor para la geometría de la taza usando MATLAB.
- Revisar alternativas de enfriamiento en otras fundiciones y evaluar factibilidad económica de implementar el enfriamiento en tazas.

2. Antecedentes

2.1 División El Teniente

La División El Teniente, operada por CODELCO, es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del mundo. Se encuentra en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, y está situada a una distancia aproximada de 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua, en la cordillera de los Andes, a una altitud de 2,200 m.s.n.m. Esta mina, comenzó sus operaciones en 1905 y cuenta con más de 4,500 km de galerías subterráneas. Sus yacimientos son: Diablo Regimiento Fase IV, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pipa Norte, Sur Andes Pipa, Pilar Norte y Teniente 4 Sur, además de una operación en superficie conocida como Rajo Sur [1].

Las instalaciones industriales de este complejo consisten en la mina, la planta concentradora de Colón y la Fundición Caletones. En 2021, El Teniente produjo 459,817 toneladas métricas de cobre fino, además de 8,214 toneladas métricas finas de molibdeno y 114,323 kilos de plata, entre otros subproductos [1]. La producción de cobre se comercializa a través de ánodos generados en la Fundición de Caletones.

2.2 Descripción de la Fundición Caletones

En la Figura 1 se muestra el proceso actual de Caletones, que comienza con la recepción de concentrados en seis tolvas de capacidad de 500 t cada una, las que se denominan tolvas 3000. Este concentrado es producto final de la Gerencia de Planta (GPTA) en Colón, que trata el mineral de cobre proveniente de la mina subterránea mediante un circuito que comprende operaciones de reducción de tamaño y clasificación, flotación, espesamiento y filtración, con el objetivo de producir un concentrado de cobre con una ley aproximada de 24 %. El concentrado se alimenta por correas a las Plantas de Secado por Lecho Fluidizado (PSLF) que disminuyen la humedad de un 8-10 % a un 0.2 %. Los secadores emplean gas natural como combustible y el principio de fluidización [1].

Luego, el concentrado es transportado neumáticamente desde las PSLF a las tolvas de almacenamiento de 500 t de la fundición, para almacenarlo en tolvas de 300 t de los Convertidores Teniente (CT) de la Unidad de Fusión y Conversión (FUCO) [1]. En la Unidad de Preparación y Carga (PRECA), se dispone de carga fría almacenada, cuarzo, concentrado Teniente para asegurar *stock* en caso de contingencias, además de almacenar concentrado para la Planta de Tratamiento de Escorias (PTE). Los materiales

se trasladan hacia los Convertidores Teniente mediante un sistema de correas localizado debajo del edificio.

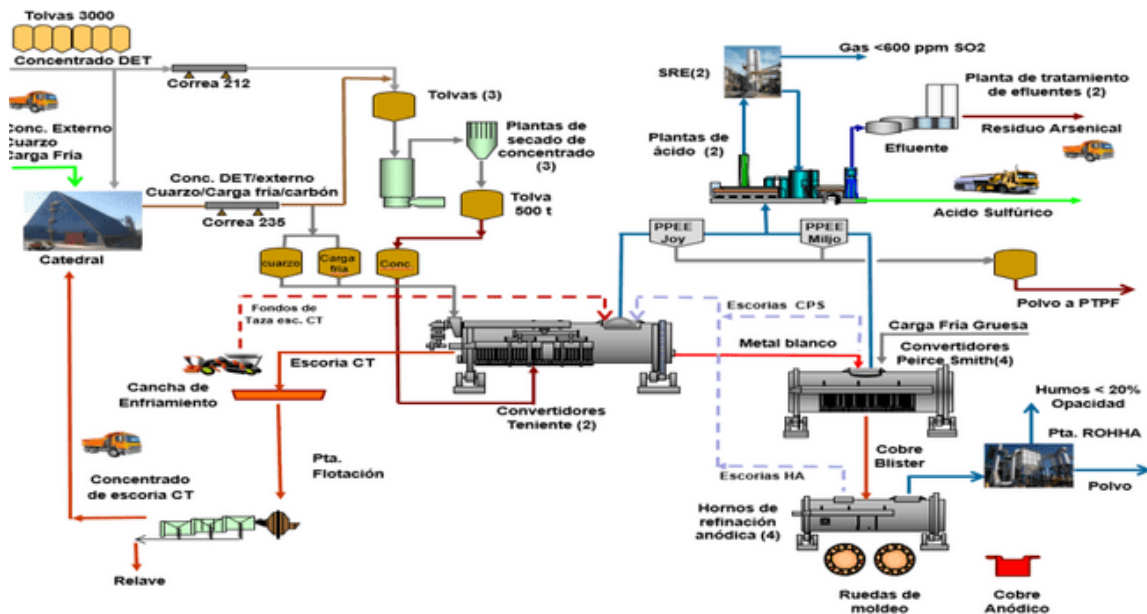


Figura 1. Diagrama de procesos de la Fundición Caletones [1]

En la unidad FUCO, se desarrollan los procesos de fusión y conversión de concentrados en los Convertidores Teniente (CT) produciendo metal blanco, y de conversión a cobre blíster en los Convertidores Peirce Smith (CPS). En esta unidad se produce cobre blíster con ley de 99 – 99.3 %, una escoria de CT con una ley de cobre entre 5 – 8.5 %, y los gases de proceso SO_2 con una concentración entre 24 – 26 %. El cobre blíster es refinado anódicamente en los Hornos Ánódicos (HA) de la Unidad de Refinación y Moldeo (REMO). Esta unidad se divide en dos sectores de ambos extremos de la nave de Fundición, lado Sewell y lado Rancagua, donde el cobre anódico es moldeado en la rueda RM-28 y la rueda doble R-TWIN, con 28 y 16 moldes, respectivamente. En conjunto, la unidad posee dos plantas de agua y dos plantas de filtrado de gases, una en cada extremo de la nave [1].

La escoria del CT es enviada a las canchas de enfriamiento para recuperar el cobre en la PTE, dejando un relave final de cobre de aproximadamente 0.6 % [1]. Los gases, son enviados por ductos a las etapas de Manejo de Gases (MAGA) y Limpieza de Gases (LIGA), donde son tratados en las Plantas de Tratamiento de Gases (PLG) para producir ácido sulfúrico con 98 % de pureza. El efluente ácido generado en este proceso es

tratado por la Planta de Tratamiento de Efluentes (ETP), generando un residuo sólido que es almacenado en maxisacos y manejado por una empresa externa.

2.3 Tratamiento de escorias

En la actualidad, las escorias se consideran pasivos ambientales, aunque para las fundiciones de cobre estas poseen un alto valor económico. Por ello, se han estudiado y aplicado varios métodos o vías de tratamiento, las cuales pueden enfocarse en la recuperación de uno o más metales de interés económico según el tratamiento aplicado. Los principales métodos en exploración son la flotación y lixiviación de escorias, con el propósito central de recuperar los metales de las escorias de una fundición de cobre [2]. En cuanto al tratamiento previo para mejorar la flotación o la lixiviación de los metales, se aplica la tostación para convertir los metales a una forma en la que puedan ser extraídos. El contenido de las escorias finales de los hornos eléctricos de limpieza es entre 0.5 – 0.6 % de cobre [3]. En cambio, este contenido de cobre puede disminuir a 0.4 % utilizando innovaciones para mejorar la operación de limpieza de escoria como las siguientes: implementando una geometría rectangular en el horno en vez de circular, haciendo que la operación sea continua, cambiando la alimentación al horno por corriente DC en vez de AC, entre otras. Incluso, se sugiere emplear carburo de calcio CaC_2 en vez de coque, lo que reduciría los requerimientos de energía y mejoraría la cinética de reducción y escorificación [4].

El mejor tratamiento para recuperar las escorias con un contenido de cobre entre 6 – 8 % es mediante la flotación de escorias, que aumenta la ley del concentrado hasta valores cercanos a 40 % [5]. La flotación de escorias sólidas es una operación indispensable dada la imposibilidad de recuperar la fase rica en cobre antes de la reducción de tamaño. Este método de procesamiento puede ser promovido por dos tipos de enfriamiento y solidificación de escoria: en canchas o en tazas.

2.4 Pérdidas de cobre en escorias

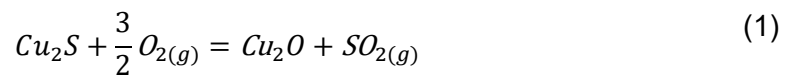
La cantidad de cobre disuelto o atrapado mecánicamente depende de la composición química de la escoria y la temperatura de operación. Por ejemplo, para una escoria con mayor temperatura la sedimentación de las gotas de mata ocurre con mayor velocidad.

El primer tipo de pérdida de cobre es química y ocurre porque el metal se disuelve químicamente en la escoria. Tanto en los hornos de fusión en baño como en la conversión, al tener una mayor ley en el eje, se produce una mayor pérdida de cobre [6]. Es por eso que las pérdidas en un horno de fusión flash son menores, al producirse matas con menor ley de cobre. Esto se ejemplifica con la operación de un horno flash con un 63 % de ley, y el reactor Noranda que trabaja con metal blanco con un contenido superior de cobre, entre 73 – 80 %.

Un comportamiento similar se presenta durante la operación del Convertidor Teniente, por ende, deberían esperarse pérdidas mayores de cobre en las escorias. En cuanto a la pérdida química, también se infiere que la actividad del Cu_2S es alta y se genera mayores cantidades de Cu_2O .

Reacción de $Cu_2S - Cu_2O$

La pérdida de cobre en la escoria, que se explica por la formación de óxido de cobre, se puede analizar por el equilibrio termodinámico expresado mediante las actividades y presiones parciales involucradas en la reacción (1):



La constante de equilibrio se puede expresar en términos de las actividades del Cu_2S y del Cu_2O , así como de las presiones parciales del SO_2 y del O_2 como sigue (2):

$$K(T) = \frac{a_{Cu_2O} \cdot p_{SO_2}}{a_{Cu_2S} \cdot p_{O_2}^{3/2}} \quad (2)$$

Esta ecuación puede ser expresada en términos de la actividad del óxido de cobre formado, resultando (3):

$$a_{Cu_2O} = \frac{K(T) \cdot a_{Cu_2S} \cdot p_{O_2}^{3/2}}{p_{SO_2}} \quad (3)$$

Al interpretar esta expresión sobre cómo la actividad del Cu_2S puede afectar a las pérdidas de cobre, surge el análisis de que, si se aumenta la actividad del sulfuro de cobre, entonces aumenta también la actividad del Cu_2O en la escoria, y por ende también aumenta su fracción molar. Lo anterior, pudiera causar la generación de una mayor cantidad de Cu_2O que sería transferida a la escoria [6].

En cuanto a las pérdidas mecánicas, estas se denominan pérdidas de cobre por arrastre mecánico, y se genera por el aumento de la viscosidad del medio, que evita la separación por las diferencias de densidad de las fases fundidas que se forman en los reactores. Básicamente consiste en que el cobre que no puede incorporarse a la fase masiva de metal fundido o metal blanco permanece en la escoria al no vencer las fuerzas de oposición que impiden su transferencia a la fase de cobre.

Para prevenir este tipo de pérdidas, se debe favorecer la separación entre las fases, específicamente, el cobre debe transferencia hacia la zona inferior del horno. Otro fenómeno que puede ocurrir es la flotación de las partículas de cobre sulfurado, al encontrarse con burbujas de SO_2 o CO_2 [3]. En concreto, las zonas frías son las que presentan mayor pérdida mecánica de cobre.

2.5 Enfriamiento de escorias

Los métodos de enfriamiento de escorias tienen la finalidad de crear condiciones para recuperar el cobre contenido en estas. El cobre recuperado se encuentra en la forma de sulfuros en las escorias generadas durante los procesos de fusión-conversión al ser estas las más comunes y presentan un contenido entre 6 – 8 % de Cu [6]. Los procesos de enfriamiento tienen el objetivo de promover el crecimiento de las gotas sulfuradas de cobre para aumentar el grado de liberación de las partículas durante la molienda y procesarlas posteriormente por flotación.

En la actualidad, el enfriamiento en canchas es el tradicional, y se basa en verter el contenido de las escorias en espacios grandes o canchas para luego ser enfriadas con agua mediante el uso de aspersores [1,5,7]. El segundo método es el enfriamiento en tazas que promueve la separación de la fase rica en cobre formada en el fondo de la taza [8].

Enfriamiento en canchas

En la actualidad, la escoria fundida proveniente de los CT en Caletones es descargada en tazas de 635 pies cúbicos, con un valor nominal de 700 pies cúbicos. Luego, es transportada en Camiones para el Transporte de Escorias (CATE) hacia el área de las canchas de enfriamiento, compuestas por tres pozos o canchas, en donde, el 80 % del

volumen de una taza es descargado, procedimiento conocido como volteo de taza. Luego, el 20 % restante, se descarga en una celda especial dispuesta para esto. Cada vaciado de escoria CT en la cancha, formará una capa aproximada de 10 cm, con altura de escoria de 1.20 m como máximo al término de día [1].

Se ha estudiado el estado de las canchas de enfriamiento y problemas asociados a la operación relacionados con el transporte y volteo de las escorias, el efecto del área de las canchas y el sistema de enfriamiento [7]. Entre los desafíos identificados destaca la falta de un sistema de prevención para la infiltración de agua y que comúnmente ocasiona daños en los taludes de las canchas. También se enfatiza en la necesidad de mejoras respecto de la automatización del sistema de riego, conocido también como enfriamiento forzado, pues hasta el momento se activa de forma manual.

En cuanto al transporte de escorias, según el procedimiento aplicado por DET, se establecen dos zonas para verter la escoria. La primera, llamada zona de descarga, se vierte prácticamente todo el contenido de la olla, dejando como remanente un octavo que se denomina el aprovechado. Este material presenta comúnmente un alto contenido de metal blanco, y se vierte en otra zona para evitar daños en los taludes y tuberías de agua. Como este material se procesa con el primer vaciado de la taza en la PTE, termina generando afecciones posteriores, entre las cuales se puede mencionar la necesidad de moler este material duro y corrosivo, que daña tanto los molinos como las tazas. Tal efecto se ha observado durante visitas a terreno realizadas en Potrerillos [7]. Para solucionar estos problemas, se sugirió generar menor cantidad de metal blanco en las escorias, o bien retornarlo al CT como carga fría.

Proceso de enfriamiento en canchas

Para el enfriamiento de escorias en DET Caletones, con la ingeniería conceptual desarrollada por el grupo Jacobs, se definió un proceso de enfriamiento en canchas [9]. El proceso parte con la generación de una escoria líquida, que es propia del proceso de fusión-conversión en el CT. El proyecto contempla el uso de las canchas 1 y 2, con 10 celdas disponibles, que se llenan de forma secuencial con una superficie de 2,277 m² y una altura de cama de 0.5 m, además de dos celdas para emergencias o contingencias y una cancha nueva proyectada. Se estima que, la temperatura de la escoria bajaría de

800 °C a 400 °C. De acuerdo con la información, el ciclo de enfriamiento dura 35.98 horas, lo que equivale a ocupar 17 celdas de enfriamiento o un día de operación. Para esto, se requieren 101 viajes con 102 volteos o descargas de escoria en la cancha, y para cada viaje se requieren 21 minutos en promedio, con un manejo de 1,350 kt/año. Volviendo al ciclo, empieza con el volteo de la escoria líquida, durando 2.09 horas en total, luego siguen 32 horas de enfriamiento, distribuyéndose en 8 horas de enfriamiento natural y 24 horas de enfriamiento forzado [9]. Al terminar este ciclo, parte el pisoneo y cosecha de escoria con una duración de 1.89 horas. Los caudales y tiempos de enfriamiento se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Tiempos en ciclo de enfriamiento en canchas DET Caletones [7].

Etapa	Volteo de escoria líquida	Enfriamiento natural	Enfriamiento forzado	Pisoneo y cosecha de escoria fría
Tiempo, h	2.09	8.00	24.00	1.89

Tabla 2. Caudales de enfriamiento utilizados en canchas de enfriamiento DET Caletones [7].

Cancha	Celdas	Escoria depositada, ton	Requerimiento de agua, L/s	Requerimiento de agua, m ³ /ciclo
1	5	2138	24.5	2212
2	5	1960	24.5	2028
Nueva proyectada	9	2034	24.4	2105
Total	19	6132	73.4	6345

Enfriamiento en tazas

El enfriamiento de escorias con alto contenido de cobre, como son las de fusión – conversión es un método popular utilizado en la industria y que ha presentado muy buenos resultados en la disminución de los relaves en la flotación de escorias. Asimismo, el concentrado de flotación de escorias se retorna a los convertidores, fundiendo el cobre y optimizando el proceso.

Las mejoras observadas en el tratamiento de escorias enfriadas se relacionan con la coalescencia o agrupamiento de partículas de cobre, que se encuentran altamente dispersas en la escoria [10,11]. Esto inicia con la formación de una escoria granulada por enfriamiento natural con el ambiente, para luego formar una escoria granallada

mediante enfriamiento con agua que se rocía en forma de regadío. Un sistema de regadío implementado por CODELCO en la Fundición Potrerillos, División Salvador, se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Sistema de regadío continuo en el parque de enfriamiento en tazas [12].

El contenido de cobre en los relaves de flotación de escorias ha sido estudiado para distintos tipos de enfriamiento. Específicamente, se han trazado resultados respecto al grado de molienda de la escoria, tomando como referencia el porcentaje de partículas con tamaño menor que $42\ \mu\text{m}$ (material pasante a la malla 325#) [10, 13]. En la Figura 3, se muestra la relación del tamaño de partícula y el tipo de enfriamiento de escorias (en canchas y en tazas) con el contenido de cobre en las colas de flotación. Se observa que el menor contenido de cobre lo presentan los relaves de flotación de escorias enfriadas en tazas [13].

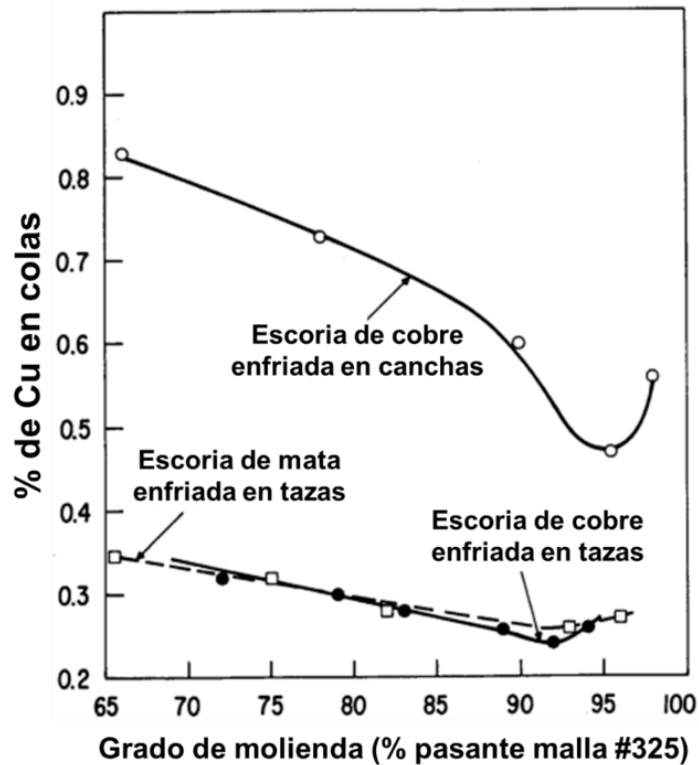


Figura 3. Relación entre el grado de molienda y tipo de enfriamiento con el contenido de cobre en los relaves de flotación de escorias de fundición [11].

Pruebas de enfriamiento en tazas

Previo a las pruebas a escala industrial en Altonorte, se realizaron ensayos de enfriamiento en tazas con un caudal de agua de 40 L/min y remolienda de la escoria como se muestra en la Figura 4. Para esto, las muestras fueron separadas en lotes 1 a 5, cada uno obtenido bajo distintas condiciones de enfriamiento.



Figura 4. Enfriamiento de escorias en Altonorte. (a) Pruebas de enfriamiento preliminares en Altonorte. (b) Resultado por lotes de enfriamiento de escoria en tazas [8].

En la Tabla 3, se describen las condiciones de enfriamiento para cada uno de los cinco lotes o muestras de enfriamiento en taza generados durante las pruebas preliminares en Altonorte. En la tabla, se precisa el tipo enfriamiento como sigue: enfriamiento natural por EN y enfriamiento forzado por EF, y asignándoles un código. Esto último para identificar los resultados en la recuperación de cobre por flotación [8].

Tabla 3. Identificación de lotes de escorias en las pruebas de enfriamiento en tazas [8].

Lote	Enfriamiento	Código
1	2 h EN y 30 h EF	2N30F38
2	Enfriamiento natural	12N0F0
3	40 h EF	0N40F40
4	2 h EN y 38 h EF	2N38F40
5	Parcela	Actual

Pruebas industriales de enfriamiento en tazas

En las pruebas industriales de flotación de escorias enfriadas en tazas y molidas a dos tamaños de partícula, 75 y 100 μm , se registró un aumento en la recuperación de cobre respecto de la tecnología previa de enfriamiento. En particular, se seleccionó el material del lote 3 con base en criterios de diseño del parque de ollas y exigencias menores de flotación de partículas. Con el objetivo de evaluar distintos tipos de enfriamiento de escorias, se aplicó el test ANOVA a los datos de alimentación en 2021 (Figura 4), donde se registró una reducción significativa en la ley de Cu en los relaves de flotación de escorias (de 0.70 % a 0.52 %) [8]. Producto de esto, Altonorte reporta un aumento en la

recuperación metalúrgica de la fundición hasta 98.2 % comparado con 97.8 % sin utilizar el método de enfriamiento en tazas. Estos antecedentes reflejan el impacto positivo del enfriamiento en la optimización de la recuperación de planta.

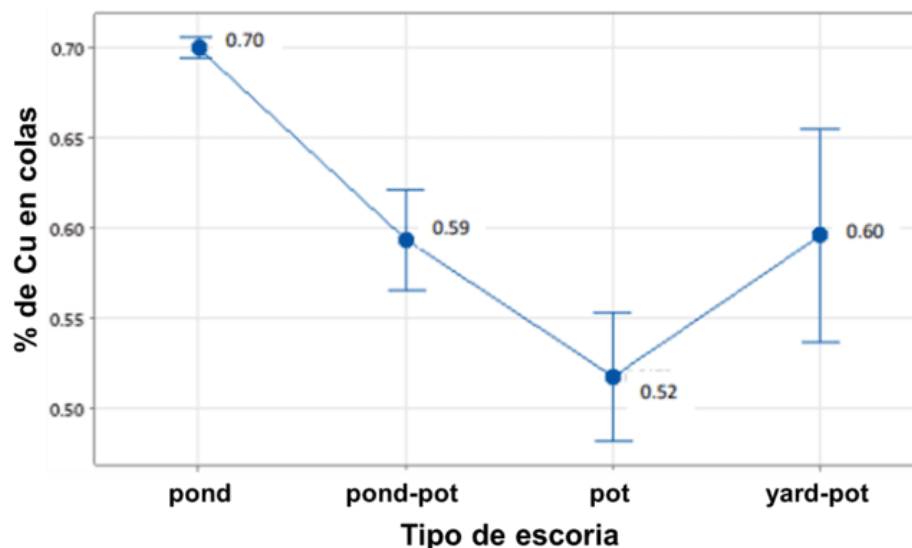


Figura 4. Contenido de cobre en los relaves de flotación de escorias bajo distintos tipos de enfriamiento (Índice de confianza: 95% para la media) [8].

2.6 Tipo de enfriamiento y escoria producida

Enfriamiento rápido

El enfriamiento rápido de escorias por agua generalmente causa que se formen estructuras amorfas que dificultan la recuperación económica de los metales valiosos contenidas en ellas [2,14]. Además, causa que el *work index* de la escoria de cobre, aumente de la misma forma que lo hace el costo energético de procesamiento asociado a operaciones como el chancado y molienda [15]. Se estima que el *work index* para una escoria de cobre enfriada con agua supera los 18 kWh/t. Si bien es cierto, no se ha definido como enfriamiento rápido el que se lleva a una tasa de 16 K/min, generó en los ensayos un D_{80} de partículas inferiores a 10 micras [2], lo que dificulta su recuperación [11,13], lo que causaría que el contenido de cobre en los relaves aumente y disminuya, por lo tanto, la recuperación de cobre y otros metales valiosos debido a la presencia de ultrafinos [14]. Además, considerando la recuperación de otros metales, las escorias tratadas bajo una tasa de enfriamiento de 3 K/min, generan elementos traza como Zn, Mg y Ca. A esta tasa de enfriamiento, se promueve el crecimiento cristalino y formación

de magnetita, fase mayoritaria en una escoria de cobre [16], y que tiende a generar materiales con granulometrías D_{80} de tamaño mayor a 50 micras.

Enfriamiento lento

El enfriamiento lento promueve el crecimiento de cristales de magnetita y fayalita en la escoria [2]. Luego, es posible tratar este tipo de escorias por flotación o lixiviación. El estudio desarrollado por Tsunazawa y colaboradores consideró a la magnetita como la especie mineralógica de interés y se estudió su comportamiento según el tipo de enfriamiento utilizado. Mediante DRX, los autores determinaron que la formación de magnetita aumentó a tasas de enfriamiento menores. Este comportamiento es el esperado para escorias compuestas mayoritariamente por fayalita y magnetita [16].

Respecto del tamaño de partícula, el enfriamiento de escorias a tasas de 3 K/min, generan partículas de 50 μm , y en el intervalo de 1 a 3 K/min, se alcanzan los mejores resultados respecto del crecimiento de la fase cristalina. A una tasa baja de 1 K/min, se generan cristales grandes de tamaño aproximado de 120 micrones [2] que se asocian a recuperaciones muy bajas, cercanas a 60 % cuando se aplica un proceso de flotación [5].

Ahora bien, respecto del efecto que tiene la tasa de enfriamiento sobre la formación de las partículas de mata de cobre, se ha determinado que a 0.5 °C/min considerada como lenta, la fracción de las gotas de mata y que alcanzaron tamaños menores que 5 μm es del 55 %. En cambio, para condiciones de enfriamiento rápido, esta fracción aumentó a 72 % mientras que dentro de las partículas de 15 μm , la fracción fue de 90 % [16].

El tamaño de los granos de sulfuro, tienen relación con el grado de liberación de las partículas, y por lo tanto, es una variable muy importante en la concentración por flotación [8]. Los granos de sulfuro de mayor tamaño aumentan el grado de liberación de la partícula como se representa esquemáticamente en la Figura 5.

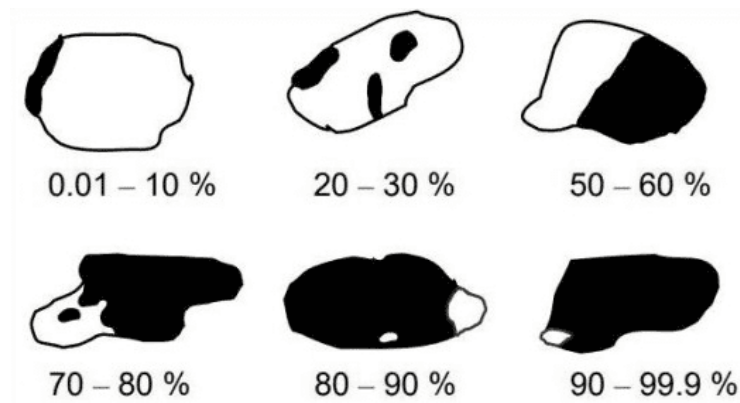


Figura 5. Análisis esquemático del grado de liberación de partículas sulfuradas [8].

De acuerdo con la Figura 6, existe una dependencia inversa entre el tamaño de partícula y la recuperación de la flotación de escorias, logrando la mayor recuperación de cobre en el concentrado para tamaños de partícula de 29 μm . Sin embargo, la reducción de las escorias hasta estos tamaños puede incrementar costos por molienda del mineral. Por otro lado, los tamaños de partícula muy grandes para la flotación de escorias, superiores a 42 micras ocasionan valores menores de recuperación de Cu. No obstante, valores altos de recuperación, generan concentrados de baja ley sobre todo cuando se procesan materiales con partículas gruesas o se pretenden alcanzar valores de recuperación superiores al 90 %. Para el caso de Caletones, la ley de concentrado es cercana a 40 % e incluso superior [17].

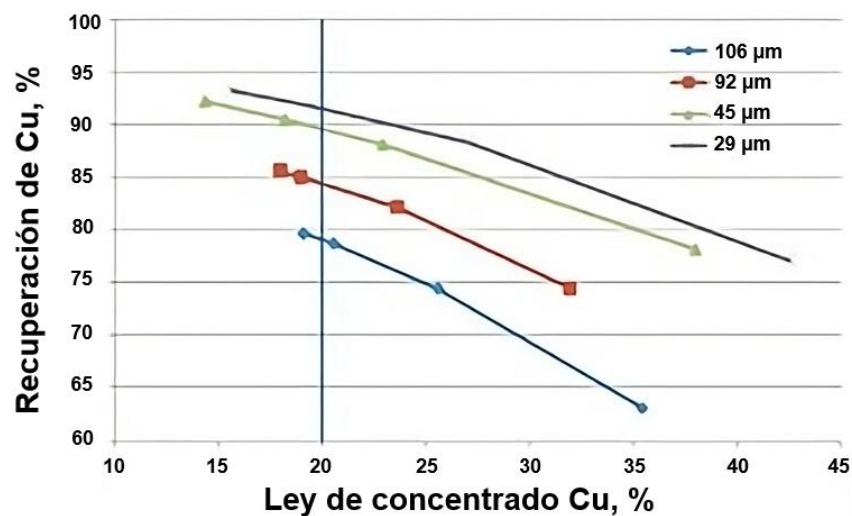


Figura 6. Relación entre la recuperación de cobre y la ley del concentrado generado por la flotación de escorias en términos del tamaño de partícula [5].

2.7 Interacciones térmicas en tazas

Las ollas o tazas que transportan la escoria, están expuestas a interacciones térmicas importantes asociadas a las altas temperaturas. Estas interacciones pueden afectar tanto a la calidad de la escoria como a la durabilidad de la taza. La escoria en las tazas alcanza temperaturas de 1200 °C, según el procedimiento de manejo de este material en las canchas de enfriamiento en Caletones [7]. Luego de cumplir su ciclo de enfriamiento y alcanzar temperaturas inferiores que 70 °C, es retirada mediante un camión oruga que tritura y acopia el material para su posterior procesamiento en la PTE.

Uno de los efectos estudiados en las tazas causados por las interacciones térmicas son los llamados telas de araña o microfracturas [18]. Por los gradientes de temperatura importantes se produce el choque térmico en la olla, provocado por fuerzas de expansión o contracción de las paredes de la taza asociadas a ciclos rápidos de enfriamiento o calentamiento. En este contexto, se ha estudiado el efecto de añadir una emulsión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ teniendo resultados positivos en el control de las temperaturas al interior de la taza. Este reactivo es agregado al momento de la limpieza superficial de las tazas [18].

Mecanismo de transferencia de calor tazas

Los mecanismos de transferencia de calor durante el enfriamiento en tazas son por conducción, convección y radiación entre el sistema fundido y el recipiente con los alrededores [5]. Para el modelamiento de situaciones relacionadas con el transporte de energía se requiere conocer el valor de los coeficientes asociados a cada uno de los mecanismos de transferencia de calor, y entonces, representar lo más fielmente posible el enfriamiento de la taza.

Como inicio, se debe establecer un modelo matemático para la transferencia de calor empleando coordenadas cilíndricas para representar correctamente la dirección de transporte de las propiedades [5]. Además, con base en la geometría de la taza, el análisis debe considerar la variación de la superficie de la sección transversal en la dirección axial de la taza. Como en cualquier ejercicio de simulación de procesos, se requiere la definición de suposiciones y limitaciones de los modelos matemáticos. Para el caso específico de la modelación del transporte de calor en las tazas, los términos en

la dirección angular se anulan considerando que el sistema presenta simetría geométrica y térmica, y dichos términos deben ser omitidos del modelo de transferencia de calor.

Para resolver el modelo matemático para situaciones en estado no estacionario, tridimensionales y de alta complejidad, se requieren recursos computacionales importantes. Se ha identificado que para este tipo de simulaciones se emplean *softwares* comerciales que incluyen en su librería las ecuaciones de transporte en aplicaciones ingenieriles y métodos para resolverlas, como es el caso de COMSOL Multiphysics. Otro programa computacional que comparte características y capacidades similares es Ansys, con su paquete Fluent. En el campo de la programación, también existen alternativas competitivas para simular fenómenos físicos de manera simplificada y con mayor rapidez, lo que implica menores requerimientos computacionales. Tal es el caso del *software* MATLAB que, a pesar de no haber sido implementado para estudiar el proceso de enfriamiento en tazas, incluye librerías que pueden resultar útiles para la representación física y estudio del problema, pues se conoce que sus aplicaciones en el campo de la ingeniería son muy versátiles.

2.8 Simulación de enfriamiento en tazas de escoria

En la literatura especializada, no se localizaron estudios sobre simulación de procesos de enfriamiento y solidificación de escorias de cobre empleando Ansys *Fluent*, y que es la herramienta computacional de mayor uso para representar el comportamiento de diversos fluidos mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Este programa computacional se caracteriza por ser muy versátil y robusto, aunque presenta desventajas asociadas a la alta demanda de recursos computacionales y tiempo para efectuar las simulaciones, lo que puede ser una gran limitante al momento de evaluar rápidamente distintos escenarios en la simulación.

Para el caso concreto que se aborda en el presente estudio, Fluent incluye en su librería un paquete llamado *Solidification Model*. El módulo permite obtener entre sus resultados, contornos de la fracción de líquido del sistema fluido simulado.

La ecuación de transferencia de calor para el sistema fundido se presenta en la ecuación (4):

$$\rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (4)$$

En la ecuación anterior, ρ , es la densidad másica de la escoria, C_p , es el calor específico másico de la escoria, α la difusividad térmica de la escoria, T , es la temperatura, t , es el tiempo, y r y z representan la dirección radial y axial en el sistema.

Se han realizado simulaciones similares empleando el *software* de COMSOL Multiphysics, la primera de ellas consistió en la simulación del enfriamiento de escorias de Cu en tazas solo con el ambiente por 24 horas, y la segunda, basada en el enfriamiento por agua con una duración de 48 horas, y que representa la situación de efectuar una etapa de enfriamiento forzado [5]. De la simulación se ha obtenido una distribución de temperaturas en la sección longitudinal de la taza y superficie que se detalla en la Figura 7. Tomando como referencia la escala de las tonalidades azules como de baja temperatura que evoluciona hacia las tonalidades rojas como de zonas de alta temperatura, bajo condiciones de enfriamiento natural, los bordes de la taza se enfrían primero y las zonas de mayor temperatura se localizan al centro de la escoria fundida, es decir, las partes más alejadas de los bordes que son las superficies para la disipación de energía. En contraste, para el caso de enfriamiento forzado con el agua, destaca el desplazamiento de las zonas de mayor temperatura desde del centro hacia la parte inferior de la taza.

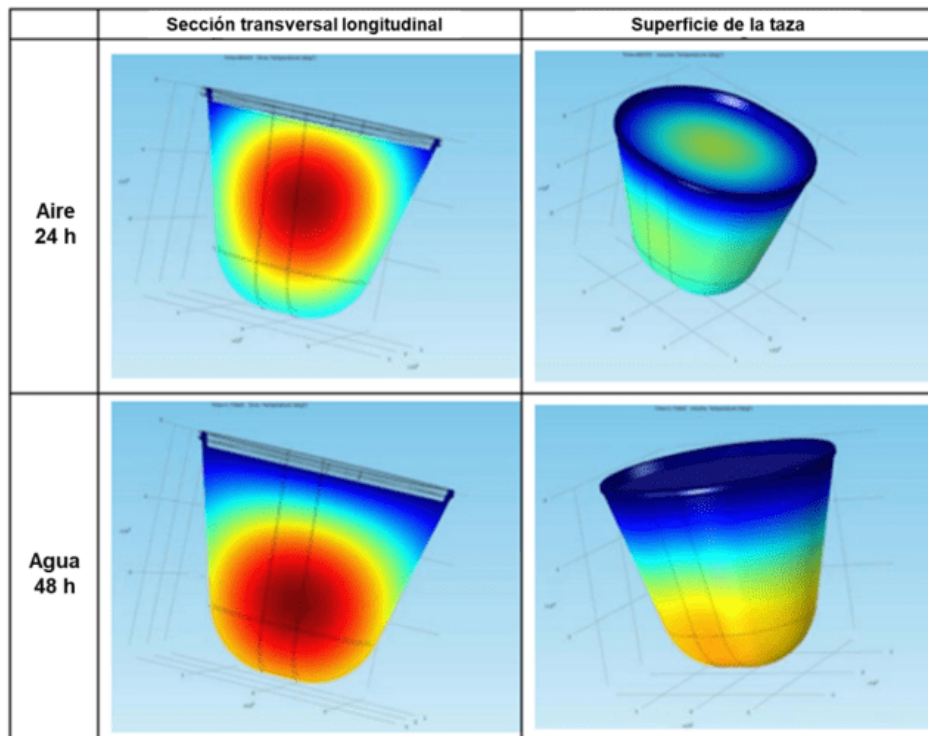


Figura 7. Distribución de valores de temperatura en la sección longitudinal y superficie de la taza obtenidas por la simulación de enfriamiento con aire y agua [5].

2.9 Composición de las escorias de cobre

Las escorias de cobre se generan como subproductos de los procesos pirometalúrgicos al tratar las menas sulfuradas de cobre y contienen una variedad de elementos en su composición. Como especies mineralógicas mayoritarias en las escorias se incluyen la fayalita, Fe_2SiO_4 , magnetita, Fe_3O_4 , sílice, SiO_2 , alúmina, Al_2O_3 , óxido de calcio, CaO y otras especies menores como molibdeno, arsénico, antimonio y bismuto.

Las propiedades típicas de una escoria de fundición de cobre se resumen en la Tabla 4 [15]. En términos cuantitativos, se estima que, por cada tonelada de cobre producido, se generan alrededor de 2.2 toneladas de escoria [19].

Tabla 4. Propiedades típicas de las escorias de fundición de cobre [15].

Propiedad	Valor o cualidad
Apariencia	Negra, vítrea, vesicular cuando es granallada
Gravedad específica	2.8 - 3.8
Conductividad	500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Dureza	6 a 7 (escala de Mohs)
Humedad	<5 %

En cuanto a la clasificación de las escorias de cobre de acuerdo con su composición sería: escoria calcio-ferrítica ($\text{FeO} - \text{CaO}$), escoria fayalítica ($\text{FeO} - \text{SiO}_2$) y escoria olivina ($\text{FeO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$). La presencia de calcio en las escorias de cobre tiene un efecto importante sobre su comportamiento reológico, pues entre más alto sea el contenido de Ca en la escoria su viscosidad disminuye y fluye con mayor facilidad [2]. Lo anterior, facilita la sedimentación de las gotas de mata y reduce las pérdidas de Cu por arrastre mecánico.

La composición típica de las escorias generadas por las fundiciones japonesas de Hitachi y Naoshima y por la finlandesa de Harjavalta se muestra en la Tabla 5. Tomando en cuenta que el contenido de sílice en todos los casos mostrados en esta tabla es inferior a 25 %, estas escorias facilitarían la operación de reducción de tamaño por molienda [10].

Tabla 5. Composición referencial de escorias producidas por fundiciones de cobre en Asia [10].

Especie, %-peso	Hitachi	Naoshima	Harjavalta
Cu	4.00	3.00	4.00
SiO_2	20.0	19.1	23.0
Fe	46.0	49.4	38.5

2.10 Test de Bond

El test de Bond es un ensayo que permite determinar la dureza de un material, además que es posible relacionarlo directamente con el consumo eléctrico (índice de trabajo) medido para una operación de molienda expresado en kWh/t.

El método de medición se encuentra completamente estandarizado para todos los minerales de interés y a través de un circuito cerrado que utiliza una malla p_1 de corte. El test, es realizado en un molino de laboratorio llamado *molino de Bond* con dimensiones de 12 pulgadas tanto de diámetro como de largo. Una de las características principales del molino es que no requiere agua pues la molienda se efectúa en seco. Para la operación, se ocupa una carga de bolas de acero, como material moledor, y que en conjunto tienen un peso de 20.125 kg, equivalente a 285 bolas de acero al interior del molino de diferentes tamaños.

El principio de la prueba comienza con una operación a 100 revoluciones de forma estándar. Para definir el siguiente ciclo de revoluciones, se calcula para obtener una carga circulante objetivo de 350 %, que una vez alcanzada, se da por concluida la prueba. Otra forma de definir la culminación de la prueba consiste en la obtención de una masa constante en el bajotamaño. Dependiendo del mineral y el grado de liberación deseado, se pueden usar distintos tamices, por ejemplo, las mallas 100#, 140#, 170#, 200# y 325#, para el P80 deseado. La expresión para estimar el índice de moliendabilidad, medido en g/rev, es (5):

$$G_{bp} = \frac{(\Psi(p_1) - \Psi_F(p_1))W}{100r^*} \quad (5)$$

Donde $\Psi_F(p_1)$ y $\Psi(p_1)$ es el porcentaje del material que presenta un tamaño menor que la malla de separación, p_1 , en la alimentación fresca y en el material producido por el molino; W es la masa total del mineral cargado al molino; r^*

En tanto, el *work index* del mineral, expresado en kWh/t, antes de aplicar los factores de corrección, se determina de la siguiente manera (6):

$$W_i = \frac{44.5 \cdot 1.1023}{p_1^{0.23} \cdot G_{bp}^{0.82}} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (6)$$

En la cual, W_i , es el *work index* del mineral, G_{bp} , es la moliendabilidad del mineral en g/rev, P_{80} y F_{80} es el tamaño que pasa el 80% del mineral en el producto y la alimentación, respectivamente, ambos expresados en μm .

2.11 Fundamentos de la flotación de escorias

Interacción partícula burbuja

Para la flotación de minerales de cobre, existen interacciones entre las partículas y las burbujas inyectadas a la celda de flotación. Este fenómeno permite a las partículas liberadas con cobre que se concentren dada la hidrofobicidad inducida por la acción de los colectores. En particular, la probabilidad en flotación está dada en términos de las probabilidades de adhesión y generación de un par estable [20]. En cuanto a la adhesión, la mayor probabilidad está para partículas hidrofóbicas, aunque, también poseen una probabilidad de desadhesión, que es propia de las partículas hidrofóbicas.

Las interacciones presentes son efectuadas en la zona de colección de la celda de flotación, y también influye en el tiempo de residencia para la cinética. Con base a esto, entre mayor es el tiempo de residencia para las partículas, la ley del metal de interés será cada vez menor, pues aumenta la probabilidad de coleccionar partículas compuestas de minerales considerados como ganga por arrastre mecánico del concentrado [21]. De acuerdo con la teoría e información experimental, esta variable tiene relación directa con el pH del medio.

2.12 Variables de control en la flotación de escorias

Granulometría de la alimentación

La granulometría de la alimentación es una de las variables que mayor efecto tienen sobre la recuperación metalúrgica. Según las características de la mena, existirá un tamaño de partícula óptimo asociado al grado de liberación del mineral para la flotación. Normalmente, las partículas gruesas no flotan, pues existe una alta probabilidad de desadhesión cuando logran interactuar con las burbujas.

En el caso específico de la flotación de escorias, el efecto del tamaño de partícula ha sido estudiado ampliamente en la literatura, siendo descrito como un factor preponderante para el proceso. Su influencia se explica por su estrecha relación con la liberación de los minerales que son de interés económico. Se ha demostrado

experimentalmente que, al efectuar la molienda del material hasta lograr un 90 % pasante a 325 mallas, se obtienen relaves con bajo contenido de cobre [10,13].

En la Tabla 6 y Tabla 7 se presentan información granulométrica obtenida en un estudio anterior sobre molienda y flotación de escorias [10].

Tabla 6. Resultados de pruebas de molienda y flotación de escorias obtenidas a nivel de laboratorio e industrial de acuerdo con las propiedades granulométricas del material [11].

Prueba	Grado de molienda (% pasante a malla #325)	Ley de Cu en escoria alimentada, %-peso	Ley de Cu en concentrado, %-peso	Ley de Cu en relave, %-peso	Recuperación, %
Prueba a nivel de laboratorio	93.8	13.8	62.2	0.53	97.3
Prueba de molienda a nivel industrial (1430 t) en molino de bolas	91.1	11.4	51.5	0.50	96.5
Prueba de molienda a nivel industrial (365 t) y molienda autógena	90.0	11.7	52.1	0.53	96.3

La información mostrada en la Tabla 7 se obtuvo de un estudio a nivel de laboratorio para investigar el efecto de la altura de la cama de escoria sobre el rendimiento de flotación. El efecto de las características de la cama de escoria durante el proceso de enfriamiento es posible estudiarlo pues determina el grado de molienda del material que se alimenta a la celda de flotación. El rendimiento de esta operación se define en función de ley de Cu en el concentrado y el relave.

Tabla 7. Resultados del estudio de molienda y flotación de escorias a nivel de laboratorio en función de la cama en el proceso de enfriamiento [11].

Altura de cama de escoria, pulgadas	Grado de molienda (pasante de malla #325), %	Ley de Cu en concentrado, %	Ley de Cu en relave, %
0 - 2	90.0	30.5	0.73
2 - 4	78.0	38.8	0.42

4 – 6	80.0	39.2	0.31
6 – 8	80.0	41.7	0.43
8 – 10	84.0	32.6	0.66
10 – 12	85.0	27.8	1.40
Promedio	83.0	35.1	0.66

pH

Es una variable de control muy relevante en la flotación. Tiene un efecto importante sobre la recuperación y la selectividad del proceso, al influir en el rendimiento de los reactivos de flotación utilizados.

Por ejemplo, para la flotación de sulfuros de cobre en un circuito con etapas Rougher-Cleaner-Scavenger (RCS), el pH influye en la recuperación de especies valiosas y ganga. En general, para lograr altos valores de recuperación de especies, el proceso de flotación se conduce bajo condiciones de pH de 8.5 a 10.5. En cambio, para circuitos de limpieza, la recuperación puede bajar a 60 o 70 %, cuando se opera a valor es de pH de 10.5 a 11.5. De acuerdo con la bibliografía, para el proceso de flotación de escorias, se considera un pH de 8.3 como natural, por lo que, en el presente trabajo, no se realizarán ajustes en el pH para las pruebas de flotación.

Reactivos para flotación de escorias

Los reactivos utilizados en flotación son principalmente colectores y espumantes. Son utilizados para la flotación de escorias, reactivos colectores como el E-703 y el E-930 y como espumante, el reactivo Hostafлот H-70. Estos productos se utilizaron en el presente trabajo para evaluar el comportamiento de la escoria de cobre enfriada bajo tres configuraciones: enfriamiento natural, enfriamiento natural y forzado y enfriamiento en taza. Estos reactivos fueron seleccionados con base en la revisión bibliográfica realizada para este efecto [15,17], además del espumante H-70 [21].

Se ha reportado en la literatura, que el uso de reactivos como el xantato de sodio isopropílico y el Z-200 promueve la flotabilidad de los minerales de cobre [10].

En 2023, Prochteca y Proquimin realizaron diversas pruebas de flotación de escorias [17] para la PTE de Caletones y determinaron que 250 g/t de colector E-703, en conjunto

con 60 g/t de E-930 y 30 g/t de espumante, resultaron ser las mejores condiciones para el proceso. Esta información es muy importante para el presente trabajo, pues los tres reactivos serán considerados en la evaluación económica de la implementación del proyecto basado en el enfriamiento en tazas de las escorias de fundición.

Flujo de aire en la celda

El flujo de aire en la celda de flotación es una variable importante a considerar, ya que afecta a la estabilidad de la espuma, y, en consecuencia, a la recuperación del concentrado. La alimentación de altos flujos de aire en la celda crean burbujas grandes por el fenómeno de coalescencia, complicando su ascenso por la zona de espuma. Lo anterior provoca, además, que las especies no valiosas se concentren pues se arrastrarán mecánicamente partículas hidrofílicas [22].

Es necesario definir previamente mediante pruebas experimentales, el flujo de aire adecuado, pues si se opera bajo una condición inadecuada puede afectar negativamente a la recuperación. El valor adecuado de recuperación en peso según las pruebas realizadas en 2023, no debe exceder el 30 % de la masa alimentada a las celdas de flotación [17]. Con el cumplimiento del criterio anterior, es posible controlar y estabilizar las curvas cinéticas de flotación y las leyes de concentrado son similares a lo reportado en planta alcanzando valores superiores al 40 % en cobre. El tiempo de residencia de las partículas en las celdas de flotación también disminuye puesto que se concentra a mayor velocidad lo que es impulsado por el arrastre mecánico ocasionado por una espuma inestable.

Lo anterior puede explicarse en términos del *hold-up* que es un término que define la fracción volumétrica en la zona de colección. Considerando una operación de flotación inestable, esto causa que la fracción volumétrica aumente por coalescencia de burbujas que evolucionan en otras de mayor tamaño lo que subraya la imperiosa necesidad de operar bajo un estricto control del flujo de aire para disminuir la viscosidad y promover una flotación controlada que conduce a mejores resultados.

Agitación de la celda

Este parámetro operacional tiene un efecto directo sobre la distribución de las partículas pues determina las condiciones hidrodinámicas de la celda de flotación. Al inicio de la flotación, se requiere remover la primera capa de colchón metalizado, por lo que la agitación de la celda influye fuertemente en el acondicionamiento de la misma. De esta forma, la agitación será mayor en la etapa de acondicionamiento pero luego se estabiliza durante la flotación, aunque influye fuertemente al iniciar la alimentación del flujo de aire al sistema.

Analizando la agitación para la flotación, luego del acondicionamiento de reactivos, un valor alto de este parámetro inestabiliza el proceso afectando a la ley del concentrado, disminuyendo el tiempo de residencia que a su vez causa que aumente la recuperación global de material por el mayor arrastre mecánico.

2.13 Modelo de transferencia de calor

Geometría de la taza

Para efectos de modelación, la taza de escoria corresponde a un cuerpo complejo de tres dimensiones. Para la geometría específica de la taza, no existen soluciones analíticas para abordar el problema del enfriamiento de la escoria, aunque sí se cuenta con aproximaciones que se efectúan mediante métodos numéricos de resolución de las ecuaciones gobernantes de los fenómenos de transferencia de calor.

Es una práctica común que para formular el modelo matemático que represente adecuadamente los fenómenos involucrados en el sistema, se deba simplificar la geometría, a partir de lo cual, se obtengan soluciones aproximadas del problema. La Figura 8, muestra la geometría cilíndrica simplificada de la taza de escoria con la cual se pueden obtener soluciones semianalíticas por la aplicación del Diagrama de Heisler. El uso de este diagrama permite estimar la temperatura en la superficie y el centro del cilindro con base en parámetros adimensionales de transferencia de calor. Este procedimiento resulta válido tanto para condiciones de convección natural como forzada.

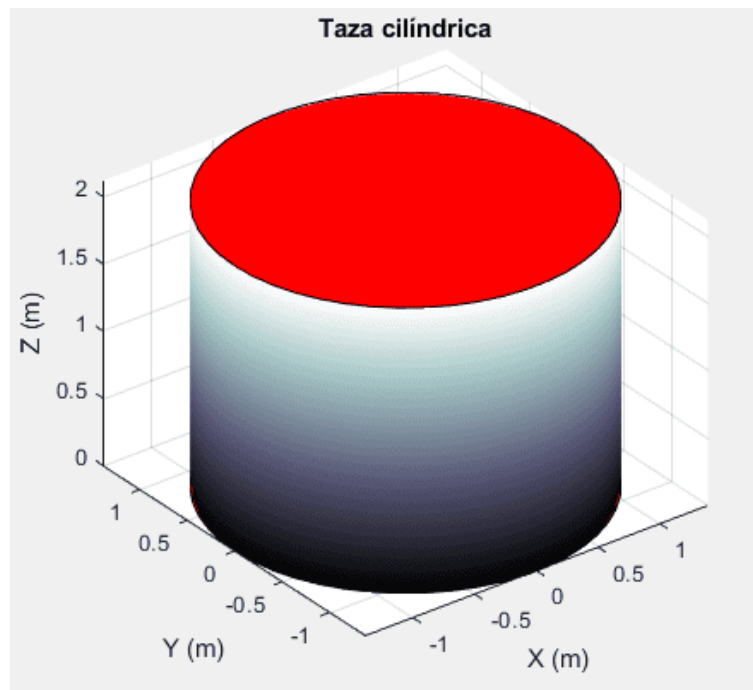


Figura 8. Geometría cilíndrica simplificada de una taza de escoria fundida.

El análisis de la transferencia de calor en estado transiente en las distintas geometrías generalmente requiere de la resolución de ecuaciones diferenciales parciales e implícitas complejas mediante métodos numéricos basados en series infinitas, lo que resulta sumamente complicado de abordar. En este sentido, en la literatura se han propuesto soluciones numéricas y gráficas basadas en dimensiones características y números adimensionales de las distintas geometrías que pueden adquirir los sistemas en análisis [23]. Por ejemplo, para la transferencia de calor que ocurre en sistemas que pueden ser representados por placas planas, las soluciones se caracterizan por su longitud o la dimensión L , mientras que, para sistemas cilíndricos y esféricos, se describen en términos de su dimensión radial, r .

Números adimensionales en transferencia de calor

Los números adimensionales son ampliamente usados para caracterizar sistemas y resolver distintos problemas de transferencia de calor. También pueden ser utilizados en régimen transitorio en sistemas que involucren fenómenos de convección forzada y natural. A continuación, se definen los números adimensionales de mayor uso para el análisis de transferencia de calor.

- Número de Fourier: representa la relación entre la conducción y el almacenamiento de energía calorífica (7). Su valor puede relacionarse con la

rapidez con la que el calor se propaga a través de un material respecto de su habilidad para almacenar la energía.

$$Fo = \alpha \cdot \frac{t}{r^2} \quad (7)$$

en esta ecuación, Fo es el número adimensional de Fourier; α es la difusividad térmica (m^2/s); t es un intervalo de tiempo característico y r es la dimensión característica para la transferencia de calor (m).

- Número de Nusselt: establece la relación de la transferencia de calor por convección respecto de la conducción. Su valor puede asociarse con la efectividad de la convección durante el proceso de transporte de energía en forma de calor en comparación con la conducción (8).

$$Nu = \frac{H(i) \cdot r}{k} \quad (8)$$

Nu es el número adimensional de Nusselt; $H(i)$ es el coeficiente convectivo global de transferencia de calor ($W/m^2 K$); k es la conductividad térmica ($W/m K$) y r es la dimensión característica para la transferencia de calor (m).

- Número de Biot: relaciona la resistencia interna del sistema para la conducción de calor y la resistencia a la convección en la superficie (9). Un valor pequeño de Bi permite asumir que las resistencias internas a la propagación molecular de la energía son bajas y, por lo tanto, que la distribución de temperatura es uniforme dentro del sólido, lo que permitiría simplificar significativamente el modelo matemático para la transferencia de calor.

$$Bi = \frac{1}{\left(\frac{k}{H(i) \cdot r}\right)} \quad (9)$$

Bi es el número adimensional de Biot, $H(i)$ representa el coeficiente convectivo de calor ($W/m^2 K$), k es la conductividad térmica ($W/m K$) y r es el radio del cilindro.

Aproximación a un término

El método de aproximación a un término se basa en la lectura del parámetro θ que representa una temperatura adimensional en un diagrama, según el tipo de geometría.

Las constantes A_1 y λ_1 son funciones exclusivas del número adimensional de Biot. Con los valores de estos parámetros, es posible definir las relaciones simplificadas para la temperatura en el centro de un sistema cilíndrico, de placa plana o esférica (10) [23]:

$$\theta_{0,cil} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) \quad (10)$$

En la cual, $\theta_{0,cil}$ es la temperatura adimensional en el centro del cilindro y su valor se adquiere directamente del diagrama; T_0 es la temperatura en el centro del cilindro y que se requiere evaluar ($^{\circ}\text{C}$); T_i es la temperatura inicial del sistema ($^{\circ}\text{C}$); T_∞ es la temperatura ambiente impuesta en la interfase ($^{\circ}\text{C}$); A_1, λ_1 son parámetros adimensionales que dependen del número de Biot y τ es el número adimensional de Fourier.

Diagramas de Heisler para sistemas cilíndricos

Los diagramas de Heisler son herramientas gráficas que permiten determinar valores de temperatura en sólidos con geometrías de placas planas, cilindros y esfera, en un régimen de transferencia de calor transiente.

En la Figura 9 se muestra el diagrama de Heisler para un cilindro infinito, válido tanto para regímenes de convección descrito en términos del número de Nusselt o Biot, según corresponda. Este diagrama relaciona, en el eje horizontal, el número de Fourier con un valor de temperatura adimensional en el eje vertical, para distintos valores del número de Biot o Nusselt.

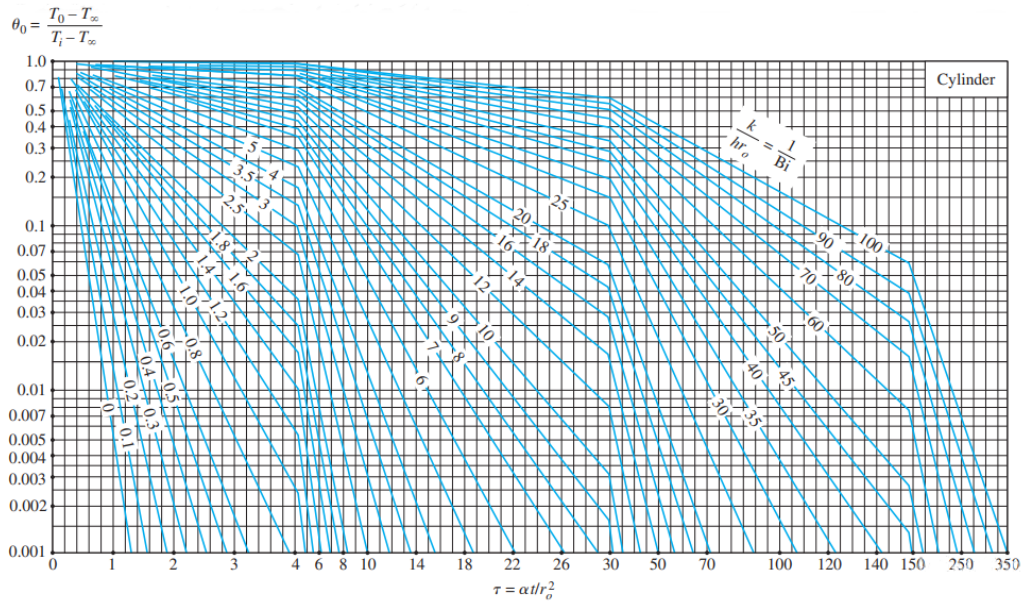


Figura 9. Diagrama de Heisler para estimar valores de temperatura en términos del número de Fourier y Biot para un cilindro infinito [23].

Para obtener el valor de temperatura en el centro del cilindro para un instante determinado se parte del inverso del número de Biot que a su vez es función de la conductividad térmica del fluido, del coeficiente de transferencia de calor convectivo y de la longitud característica. El valor de este número adimensional debe ubicarse en las líneas dibujadas en el diagrama, y hacerlo coincidir con los valores del número de Fourier que se define en términos de la difusividad térmica, el intervalo de tiempo y la longitud característica del cuerpo cilíndrico.

Aplicación del diagrama de Heisler para el enfriamiento de escorias en tazas

Para el diagrama de Heisler de la Figura 10, los valores marcados en el eje vertical a la temperatura adimensional en el centro del sistema cilíndrico conduciendo a lo siguiente (11):

$$T_c = Y_c(i) \cdot (T_p - T_o) + T_o \quad (11)$$

T_c es la temperatura en el centro de la escoria fundida (°C), $Y_c(i)$ es el número adimensional obtenido de la lectura del eje de ordenadas del diagrama, T_p es la temperatura inicial de la escoria (°C) y T_o es la temperatura del ambiente (°C).

- Para estimar la temperatura en el centro de la escoria bajo un proceso de enfriamiento natural en taza de 24 horas y considerando la geometría cilíndrica

de Heisler, se deben definir valores característicos, que en este caso, corresponderían al punto A del diagrama [5]:

- $X(Fo) = 0.23, Nu = 7$
- $Y(Tc) = 0.55, Tc = 710 \text{ } ^\circ\text{C}$

Asumiendo que, al término de la etapa de enfriamiento natural efectuada con aire, debe complementarse con otra de enfriamiento forzado con agua por 48 horas, la escoria contenida en la taza llegaría a un valor de temperatura en el centro de $140 \text{ } ^\circ\text{C}$, lo que corresponde al punto B de la Figura 11 [5]:

- $X(Fo) = 0.46, Nu = 16$
- $Yc = 0.17, Tc = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$

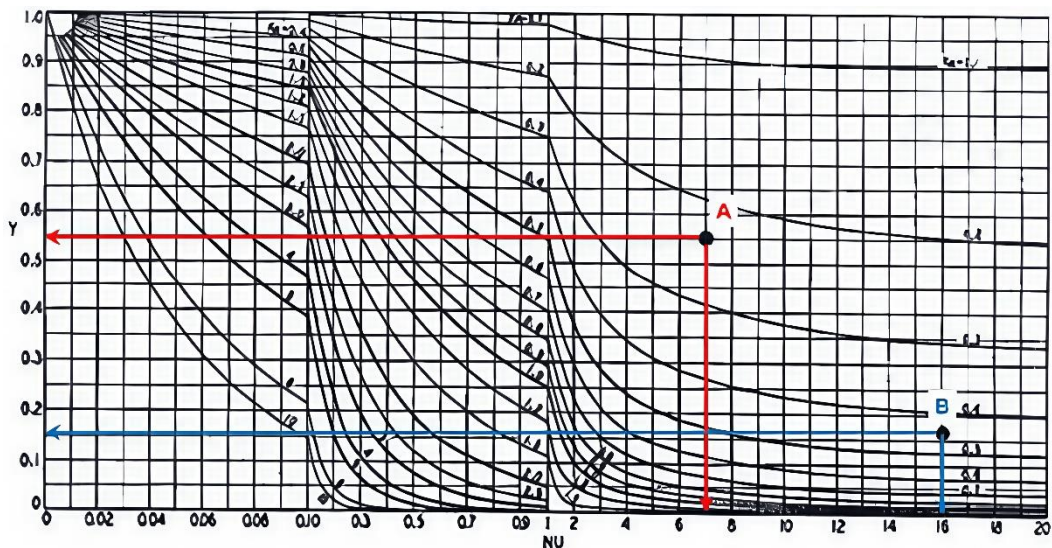


Figura 10. Diagrama de Heisler para determinar la temperatura en el centro de una taza cilíndrica de escoria en función del número de Nusselt (NU) y Fourier (X) [5].

Por otro lado, la expresión (12) permite estimar la temperatura de la superficie del fluido utilizando la versión apropiada del diagrama de Heisler que se muestra en la Figura 11. En este diagrama, se relaciona la temperatura adimensional $Y_s(j)$ es el número adimensional obtenido de la lectura del eje de ordenadas del diagrama y la temperatura del aire T_o , con el número de Nusselt (NU) y el número de Fourier (X).

$$T_s = Y_s(j) \cdot (T_p - T_o) + T_o \quad (12)$$

Como ejemplo de uso de este diagrama, se puede considerar el enfriamiento natural en taza por 24 horas, Figura 11 y con base en los valores de Nusselt (NU) y Fourier (X) (Punto

A), se puede estimar la temperatura en la superficie de la taza, que para el caso de referencia, corresponde a 150 °C [5]:

- $X(Fo) = 0.23$, $Nu = 7$
- $Y_s = 0.1$, $T_s = 150$ °C

Si se considera que después de lo anterior, sigue un proceso de enfriamiento forzado con agua de 48 horas, este método estima que la temperatura será prácticamente la misma que la del agua de enfriamiento (Punto B) [5]:

- $X(Fo) = 0.46$, $Nu = 16$
- $Y_s = 0.02$, $T_s = 34$ °C

Es importante considerar que los diagramas mostrados en las Figuras 10 y 11 son exclusivos para sistemas de geometría cilíndrica, aunque existen otros aplicables para placas planas y sistemas de geometría esférica pero el procedimiento sería equivalente. El uso de estos diagramas se basa en la suposición de que la escoria presenta en todo momento la geometría del recipiente y conserva sus propiedades de fluido.

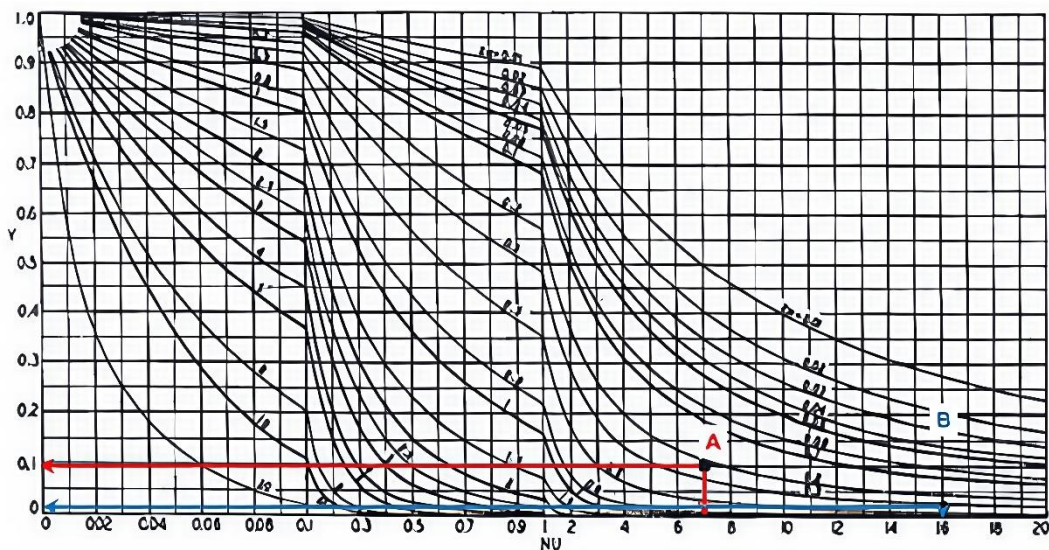


Figura 11. Diagrama de Heisler para determinar la temperatura en la superficie de una taza cilíndrica de escoria en función del número de Nusselt (NU) y Fourier (X) [5].

Independientemente de la capacidad de los diagramas de Heisler para predecir exactamente las temperaturas puntuales de la escoria, deben corresponder a las estimaciones que pudieran obtenerse mediante otros métodos, por ejemplo, mediante *softwares* basados en CFD. Sin embargo, los valores menores de temperatura para la superficie obtenidos mediante el diagrama puede explicarse por el efecto combinado de

la convección natural y forzada, asociado al contacto directo con el fluido de enfriamiento.

De acuerdo con los resultados anteriores, en la superficie de la taza se establecen condiciones favorables para la disipación de la energía hacia el ambiente por el contacto directo que tiene la taza con el fluido. Así, ninguna pared puede considerarse como que se encuentra completamente aislada, por ende, las paredes de la taza son una fuente de disipación de calor por convección natural. Esto se verifica también puesto que ocurre un proceso de solidificación de la escoria llamado *slag skull* en las zonas aledañas a la taza, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Imagen de un bloque de escoria parcialmente solidificado en taza [24].

Para el diseño y definición de un ciclo de enfriamiento industrial de la escoria en tazas, se debe tomar en cuenta que al término del ciclo de enfriamiento forzado con agua, existirían gradientes de temperatura entre el centro y la superficie de la taza, sobre todo si se considera que las mediciones de temperatura con cualquier instrumento óptico y de contacto se efectúa justamente en la superficie. Las diferencias de temperatura disminuirán con el transcurso del tiempo, es decir, el centro y la superficie de la escoria llegarán al equilibrio térmico cuanto más extenso sea el ciclo global de enfriamiento.

Por último, de acuerdo con los resultados previos obtenidos mediante simulación computacional (Figura 7), el centro térmico efectivo se desplaza hacia las zonas más alejadas a la superficie, específicamente, hacia el fondo de la taza, siendo esta zona la de mayor temperatura.

Balance de energía en la taza

El balance de calor en la taza proporciona información sobre la cantidad de energía que debe removerse de la escoria en la taza cilíndrica. El calor a remover dependerá de la

masa de escoria, su capacidad calorífica y la diferencia de temperatura de la escoria, desde su condición inicial hasta el momento de la cosecha, que es de 100 °C.

La ecuación que representa el calor sensible total a remover desde la escoria es (13):

$$Q_{rem,esc} = m_{esc} \cdot \hat{C}_{p,esc} \cdot \Delta T_{esc} \quad (13)$$

$Q_{rem,esc}$ es el calor total a remover desde la escoria (J); m_{esc} es la masa de escoria en la taza (kg), $\hat{C}_{p,esc}$ es el calor específico másico de la escoria fundida (J/kg K) y $\Delta T_{escoria}$ es la diferencia de temperaturas de la temperatura desde el inicio hasta el final del proceso de enfriamiento (K).

El calor que se remueve desde la escoria ocurre por dos mecanismos por convección natural y convección forzada. El primero ocurre por el contacto directo del aire con la superficie de la escoria y de la taza, que de manera general puede ser descrita como de forma cilíndrica. Resulta indispensable que en los balances de calor asociados a los procesos de enfriamiento de escorias fundidas se incluya la disipación de energía a través de las paredes de la taza, independientemente de su contribución en la remoción de calor pues al hacerlo se logran representar de mejor manera los fenómenos físicos involucrados durante el proceso global.

Es importante señalar que la distinción del tipo de convección, natural o forzada, en el balance de calor se efectúa de acuerdo con el valor del coeficiente convectivo de calor, a partir de lo cual es posible acelerar o retardar el proceso de enfriamiento de la escoria.

Por otro lado, la aspersion o riego de agua sobre la superficie de la escoria impulsaría el enfriamiento por convección forzada de mayor eficiencia respecto de la convección natural. Los valores para el coeficiente de calor bajo condiciones de convección forzada son mayores que bajo enfriamiento natural con aire. En el balance de energía deben incluirse cuatro términos para la extracción de calor desde la escoria: 1) calor removido por convección forzada con agua, $Q_{rem,agua}$, 2) calor removido por convección natural en la superficie de la escoria, Q_{aire1} , 3) la remoción de calor por convección natural a través de la superficie de las paredes de la taza, Q_{aire2} , y 4) la remoción de calor por radiación desde la superficie de la escoria y las paredes de la taza, Q_{rad} . La expresión del balance de calor sería entonces (14):

$$Q_{rem,esc} = Q_{rem,agua} + Q_{aire1} + Q_{aire2} + Q_{rad} \quad (14)$$

En la cual $Q_{rem,esc}$ corresponde al calor total removido desde la escoria, $Q_{rem,agua}$, es el calor removido mediante la aspersion de agua sobre la superficie de la escoria asociado a

la convección forzada, Q_{aire1} es el calor extraído desde la superficie de la escoria mediante convección natural, Q_{aire2} es la disipación de calor a través de la superficie de la taza y Q_{rad} es el calor irradiado desde la superficie de la escoria y la taza.

El calor removido por el agua incluye dos términos, de calentamiento y vaporización de agua (15):

$$Q_{rem,agua} = Q_{cal,agua} + Q_{vap,agua} \quad (15)$$

Siendo $Q_{cal,agua}$ la energía removida asociada al calentamiento del agua (calor sensible) y $Q_{vap,agua}$ el calor removido que se emplea para la evaporación del agua (calor latente).

Cabe destacar que la superficie de la escoria, estaría en contacto con ambos fluidos de enfriamiento, es decir, con aire y agua, aumentando el flujo de energía calorífica, y, por lo tanto, promoviendo el enfriamiento de la escoria. Respecto del calor que remueve el aire desde la superficie de la taza, su contribución resulta mucho menor, lo que se representa a través de un coeficiente de transferencia de calor menor respecto del enfriamiento con agua o aire en la superficie de la escoria.

2.14 Simulación MATLAB

Paquetes simulación MATLAB

MATLAB es la plataforma de mayor uso para la programación y cálculo numérico, especialmente útil para analizar datos, desarrollar algoritmos y elaborar modelos matemáticos para el estudio y análisis de procesos metalúrgicos. La plataforma en su biblioteca posee el paquete llamado *Heat Transfer*, que fue utilizado para simular el enfriamiento de una escoria en taza a diferentes niveles de llenado. El paquete es bastante versátil pues cuenta con comandos *Thermal Model setup* que permite crear el modelo mediante la sintaxis *createpde*, además de especificar los valores de las propiedades del fluido, como densidad, calor específico, conductividad térmica, con el comando de *thermalProperties*.

La especificación de las propiedades permiten simular el comportamiento térmico de fluidos específicos. La resolución de las ecuaciones diferenciales considerando la geometría del sistema físico requiere ajustarse a la sintaxis de los comandos *thermalBC* y *thermalIC*. La primera, requiere de la especificación de las condiciones de borde a partir de un valor calculado por el programa o fijado mediante el coeficiente convectivo de calor. Respecto de

la estrategia de cálculo empleada por el programa, se requiere de una aproximación inicial para su resolución, por lo que, el comando *thermallC* se refiere a la especificación de la temperatura inicial del fluido con lo cual se evalúa la evolución del flujo de calor en el tiempo con base en la geometría.

Geometría de la taza

En este trabajo, la representación de la geometría de la taza u olla de escoria, se efectuó empleando un cono truncado invertido, por su similitud con la geometría del sistema real. Como se especifica en la Figura 13, el cuerpo geométrico cuenta con dimensiones que se describen con un valor de radio en la base mayor, otro del radio en la base menor, su altura y apotema o generatriz. Esta simplificación de la geometría de la taza se seleccionó estratégicamente para representar con mayor facilidad sus dimensiones en el programa MATLAB. Con esto, es posible simular procesos de enfriamiento de escorias bajo distintas condiciones del nivel de llenado para estudiar el efecto del tonelaje sobre el rendimiento en la transferencia de calor, específicamente sobre los coeficientes de transferencia de calor, tipo de régimen de enfriamiento, entre otros aspectos.

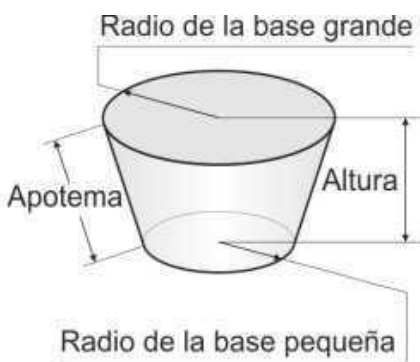


Figura 13. Representación simplificada de la geometría de la taza de escoria mediante un cono truncado invertido.

Flujos de calor

La Figura 14 muestra la programación de los flujos de calor, que se efectuó dividiendo el proceso de enfriamiento en dos etapas, la primera, considerando la remoción de calor por enfriamiento natural y la segunda por enfriamiento forzado. Sin embargo, es importante además considerar la remoción por radiación, además de la convección natural a través de las paredes del recipiente. En este contexto, se programó el efecto combinado de la convección natural y radiación incorporando la totalidad de los mecanismos de transferencia de calor involucrados en el proceso de enfriamiento.

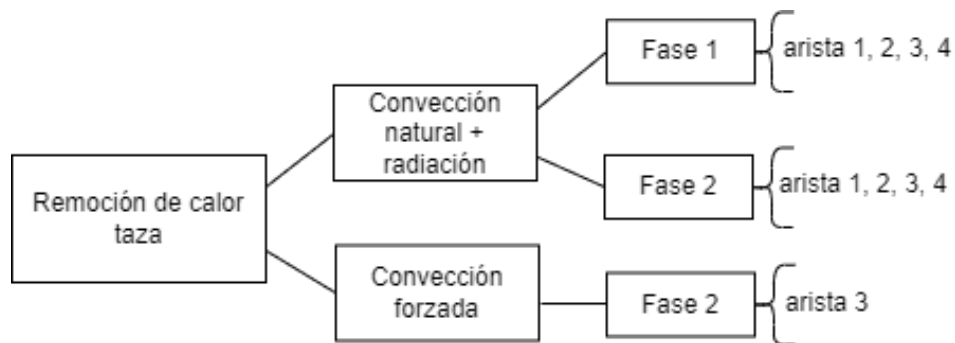


Figura 14. Programación de flujos de calor en simulación MATLAB.

La disipación de calor por radiación a través de las paredes de la taza favorece el enfriamiento de la escoria en la taza reduciendo el tiempo para la finalización del ciclo. Considerando que la primera etapa del enfriamiento de la escoria se realizará únicamente por convección natural, gran parte de la remoción de calor global debería efectuarse por convección forzada en la segunda etapa. Así se requiere incorporar la disipación de calor por radiación en la Fase 1 completa de enfriamiento a través de toda la superficie de la taza incluyendo la superficie expuesta de la escoria, mientras que en la Fase 2 solo a través de las paredes de la taza lo que estaría más apegado a la realidad. Para este efecto, se asumió un factor de emisión de cuerpo negro igual que 0.8 [23].

La Figura 15 muestra la distribución espacial de los flujos de calor según el régimen de enfriamiento. La Fase 1, está representada en la parte izquierda de la imagen, mientras que, la Fase 2 en la derecha. Las líneas segmentadas del diagrama representan el flujo de calor programado. La superficie o arista E3 es la que tiene contacto directo con el agua de enfriamiento, y representa la superficie de la escoria. El resto de las superficies o aristas en ambas fases representan flujos de calor combinados, es decir, por convección natural y radiación, tanto en las paredes como en la superficie de la escoria en la taza, en caso de la Fase 1, y solo por las paredes en la Fase 2.

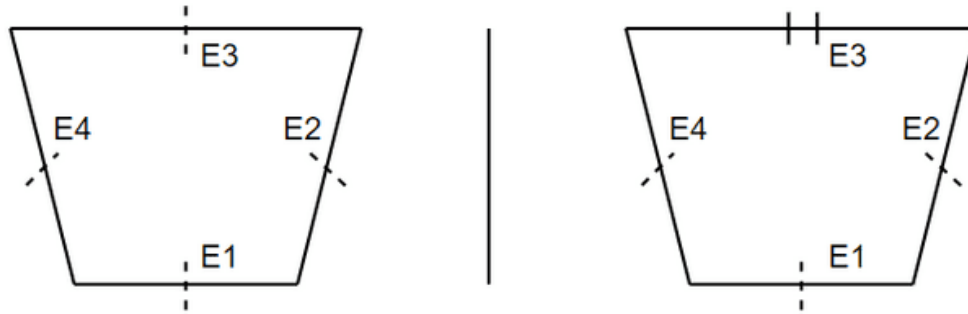


Figura 15. Representación de los flujos de calor a través de las superficies o aristas de la taza según la fase. Izquierda: Fase 1: enfriamiento natural con efecto de la radiación en toda la taza y Derecha: Fase 2: enfriamiento forzado con agua y enfriamiento natural con radiación a través de la superficie de la taza.

3. Metodología

3.1 Caracterización de escorias

Para caracterizar las escorias de cobre según el tipo de enfriamiento, se colectaron y separaron las muestras en dos lotes de aproximadamente 16 kg, los cuales se fraccionaron para realizar análisis químicos, análisis de fases (DRX), Test de Bond y flotación de escorias. Debido a que se requerían muestras representativas, se aplicó el método del roleo y cuarteo, lo que organizó las fracciones para ser caracterizadas química y físicamente.

Para el análisis químico, se apartaron 2.5 kg de muestra de escoria y se enviaron al Laboratorio de Colón (DET), especificándose los elementos a analizar mediante solicitudes especiales FU (Cu, Fe, S, Mo, As, Bi, Pb, SiO₂). Una vez disponibles los resultados, se clasificaron según el tipo de enfriamiento y se organizaron en tablas.

En cuanto al análisis por DRX, se prepararon 100 g de mineral, que se pulverizaron durante aproximadamente 30 segundos para obtener muestras con tamaño inferior a malla 100 # (150 µm) en el Laboratorio de toma de muestras del DIMET, en la Universidad de Concepción. Posteriormente, se enviaron las muestras para su análisis por difractograma y se almacenaron los resultados.

3.2 Test de Bond

Test de Bond enfriamiento natural

El caso base del presente estudio corresponde a una muestra de escoria enfriada naturalmente durante seis días en la plataforma trébol. Al ser enfriada exclusivamente por convección natural con aire, se genera una escoria de menor dureza. Por ende, el valor del *work index* para esta muestra resultaría inferior comparado con las escorias que se enfrían bajo convección forzada con agua.

Para el desarrollo del test se empleó la malla 100# para la separación de las fracciones de sobretamaño y bajotamaño y de esta forma lograr la carga circulante objetivo del 250 %. Las pruebas se realizaron utilizando un molino convencional de Bond con la misma carga de bolas y a un máximo de nueve ciclos, aunque el test pudo extenderse en caso de ser necesario.

Para calcular los valores del F_{80} y P_{80} de las muestras de alimentación y del producto, se realizó el análisis granulométrico correspondiente. Para el producto, se usaron las mallas inferiores a partir de la de referencia.

Preparación de la muestra

Para el test de Bond, el material se homogenizó mediante la técnica de roleo y cuarteo hasta obtener muestras de escoria que fueron almacenadas y etiquetadas en bolsas con 700 g cada una. Con este método, es posible generar un material más homogéneo y aumentar la representatividad de la carga circulante, entendiendo que esto se refiere a la reposición por finos del ciclo anterior además de las pérdidas normales de este tipo de ensayos. Para reforzar lo anterior, el mineral de reposición se seleccionó aleatoriamente desde estas bolsas para completar los 700 cm³ de la probeta de ensayo, equivalente a un peso inicial de 1.598 kg para la alimentación del molino de Bond.

Test de Bond para la escoria con enfriamiento combinado

Preparación de la muestra

Se realizó el mismo procedimiento para el test de dureza para el mineral con enfriamiento combinado por convección natural y forzada para contar con bolsas de 700 g. En cuanto al mineral ingresado en la probeta de ensayo, y para el mismo volumen de referencia de 700 cm³, la masa fue de 1.517 kg, es decir, se empleó una menor cantidad de este material para las pruebas.

3.3 Flotación de escorias

Diseño de pruebas de flotación

Para las pruebas de flotación de escorias, se emplearon dos muestras de escoria del Convertidor Teniente, enfriada a distintos tiempos y métodos. La primera muestra, enfriada naturalmente, la segunda, con un proceso de enfriamiento que combinó ciclos de enfriamiento natural y forzado en canchas. Se apartan 10.5 kg aproximadamente de mineral para realizar pruebas de flotación para cada tipo de muestra.

Granulometría de la muestra

Antes de realizar las pruebas de flotación, es necesario realizar cinéticas de molienda para los minerales de escorias en el Laboratorio de Flotación del DIMET. Preparar 2.5 kg de escoria por método de roleo y cuarteo, y organizar en cinco muestras de 500 g cada una, listas para molienda. Utilizando el Molino tipo Marcy con una carga de bolas por defecto, realizar tamizaje inicial del primer punto de la cinética de molienda, luego, moler consecutivamente cuatro muestras con separación de 30 minutos, hasta completar las 2 horas. Al terminar, llevar las muestras a granulometría en húmedo mediante Láser, también conocido como Multisizer. Esto permite obtener la distribución de tamaño de las partículas para la malla 325 #. Además, es posible encontrar la solución de la curva aplicando línea de tendencia y determinando el tiempo de molienda tal que las partículas sean un 70 % y 80 % bajo 42 μm .

Es importante destacar que, para el presente estudio, no se evaluaron materiales con granulometrías del 90 % bajo la malla 325# pues incrementaría los costos del proceso reflejándose directamente en la evaluación económica. Además, con los equipos disponibles en laboratorio, el tiempo de molienda se extendería hasta 90 minutos, lo que resulta impráctico en este nivel.

Condiciones experimentales para las pruebas de flotación

En las pruebas de flotación, se evaluaron tres condiciones experimentales en términos de la recuperación de Cu, la primera, para evaluar el estado actual de la planta, y con base en los resultados, proponer dos condiciones adicionales. Estos nuevos escenarios, involucrarían valores de las variables que pudieran estar por debajo o sobre la condición de planta dependiendo de los objetivos de estudio. En resumen, las condiciones experimentales para las pruebas de flotación son: condición de planta, relación media y baja de reactivos.

Pruebas de reproducibilidad

- Condiciones para muestras de escoria bajo enfriamiento natural:

Número de pruebas:

- 1 prueba por condición y granulometría. 5 pruebas en total (sin repetición).

Condiciones para muestra de escoria bajo enfriamiento combinado natural y forzado:

Número de pruebas:

- 2 pruebas por condición y granulometría (en duplicado). 6 pruebas distintas con duplicado.

El objetivo de este conjunto de pruebas es la determinación de la reproducibilidad del proceso de flotación basada en la desviación estándar de los resultados.

Condiciones operacionales

Para realizar las pruebas de flotación, se empleó una celda de aireación forzada EDEMET, según los distintos tipos de enfriamiento, bajo un pH natural de 8.3 a un flujo de aire de 6 L/min en la celda y con 30 % de sólidos en peso. El tiempo de la cinética de flotación es hasta los 12 minutos, con un acondicionamiento de cinco minutos. La Tabla 8 detalla las condiciones de colectores ensayadas en las escorias tratadas por flotación. Además, el espumante Hostaflot H-70 fue utilizado para todas las pruebas con la dosificación de 30 g/t.

Tabla 8. Condiciones de ensayo en reactivos utilizados en flotación de escorias bajo enfriamiento natural y combinado.

Condición reactivos	E-703, g/t	E-930, g/t
Planta	250	60
Relación media	275	85
Relación baja	300	110

3.4 Simulación MATLAB

Para realizar la simulación y según los antecedentes, fue implementado un código en MATLAB con el objetivo de revisar alternativas de ciclos según el nivel de llenado y el tamaño de la taza. El método se aplica según detalla la Figura 16. Las variables de entrada son agrupadas en tres grupos; según las propiedades de la escoria de cobre, los coeficientes de transferencia de calor bajo enfriamiento natural o forzado, y los tiempos de enfriamiento natural y forzado. Luego, es necesario elegir el nivel de llenado deseado, los que fueron desde 40 % hasta 66.9 % para la geometría de Caletones, y de 80.7 % para la geometría de Altonorte. Los últimos niveles de llenado corresponden al mismo tonelaje de escoria en taza.

Con base a esto, es posible realizar la comparativa del efecto del tamaño de taza según la geometría a elegir, en una gráfica del campo de temperaturas para ambos casos. Para elegir la alternativa 1 y alternativa 2 del ciclo de enfriamiento, es necesario graficar los resultados del 40 % y 66.9 % de llenado. Además, para comprobar los mecanismos de

remoción según las fases, es posible estudiar el efecto en la taza de Caletones para la alternativa escogida, y realizando la gráfica comparativa para los mecanismos de remoción de calor en la escoria por parte del agua, aire y radiación, en porcentaje.

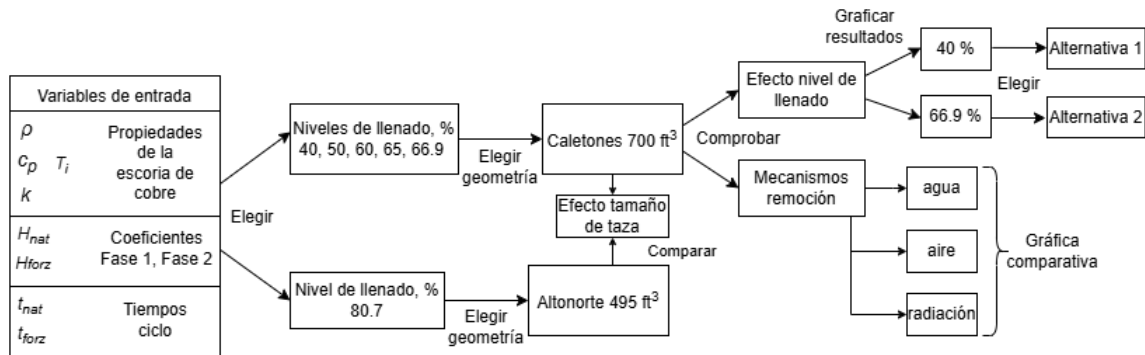


Figura 16. Metodología para obtención de resultados en simulación MATLAB.

3.5 Evaluación económica

Para evaluar económicamente el proyecto de enfriamiento en tazas, se consideró una inversión inicial de 110 tazas, a un costo unitario de 15,000 USD, con un mantenimiento anual equivalente al 10 % del total. Se incorporaron también las obras de terreno, cuyo volumen y área totales fueron de 35,510 m³ y 5,824 m², respectivamente, considerando excavaciones masivas, relleno y pavimentación, conforme a las especificaciones de la ingeniería conceptual para el mejoramiento de las canchas de enfriamiento de escoria, según la alternativa de enfriamiento en taza [25]. Para el capital de trabajo, se tomaron los costos actuales de la PTE, calculados en base a los primeros tres meses. Además, se integraron antecedentes económicos para determinar los costos del proyecto en relación el costo del agua [26] y el gasto operacional del camión CATE, considerando el combustible, materiales y dotación de personal. Se centró el análisis en la diferencia en la recuperación adicional de cobre, simplificando el modelo económico al no incorporar los costos energéticos. En cuanto a los ingresos, la venta de ánodos se ajustó aplicando una deducción metalúrgica del 0,2 % sobre la ley del cobre, y se descontaron 4,5 c/lb según la Bolsa de Metales de Londres, además, el descuento por refinación o RC, considerando el nivel superior [26]. También se consideró la dependencia del precio del cobre respecto al dólar, proyectando un escenario de bajo precio para el metal en contexto de fortalecimiento del dólar [26]. En la Figura 17 se detalla el método empleado para evaluar el proyecto. Con esto, se obtuvo el VAN y la TIR del proyecto. Además, en el Anexo 5 se detallan los antecedentes comerciales en cambio de dólar, precio de cobre y costo de refinación.

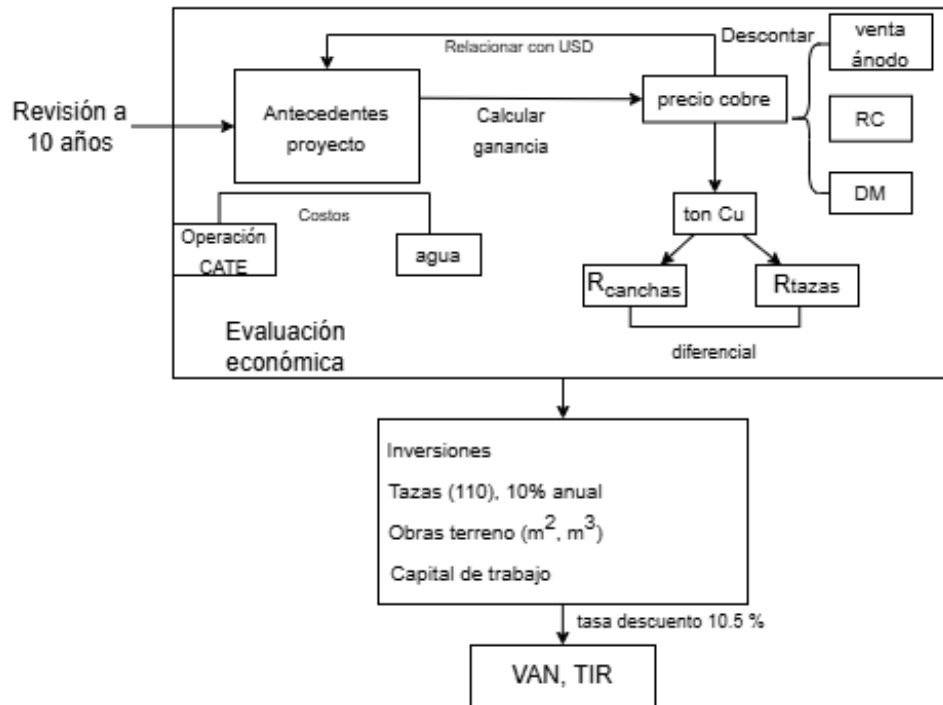


Figura 17. Metodología para realizar la evaluación económica del enfriamiento en tazas.

4. Resultados y discusiones

4.1 Caracterización química de escorias CT

Respecto de las actividades de caracterización de escorias generadas por el proceso de fusión-conversión en el CT y, de manera más específica, para Caletones, se ha reportado información diversa sobre su composición química y mineralógica en trabajos académicos. A modo de ejemplo, en la Tabla 9, se presentan valores sobre la composición de una escoria de este tipo. Destaca que de acuerdo con el análisis químico que se presenta, la escoria posee un contenido de SiO₂ inferior al 25 % en lo que la vuelve apta para la molienda [10].

Tabla 9. Composición química referencial de escorias del CT [23].

Especie química	Contenido, %-peso
CuNS	7.50
CuT	13.8
FeT	36.7
Fe ₃ O ₄	19.4
Mo	0.18
S	4.30
CaO	0.95
Al ₂ O ₃	3.90
SiO ₂	23.7
As	770 mg/L
Bi	20 mg/L
Ni	75 mg/L
Pb	280 mg/L
Sb	310 mg/L

Composición química de muestras de escoria tratadas por enfriamiento natural

Para el presente trabajo de investigación, se tuvo la oportunidad de coleccionar muestras de escorias CT de Caletones tratadas bajo distintas condiciones de enfriamiento. La primera de ellas corresponde a una escoria CT enfriada naturalmente por un periodo de 6 días. La muestra coleccionada durante la cosecha fue caracterizada en términos de su composición química y los resultados se muestran en la Tabla 10 lo que servirá como información de referencia para las pruebas de flotación de escorias de cobre.

Tabla 10. Composición química de muestras de escoria procesadas bajo enfriamiento natural.

Composición, %-peso					
Muestra	Cu	Fe ₃ O ₄	Fe	S	As, ppm
05-jun-2024	7.80	30.2	46.9	2.50	1037

Se efectuó el análisis químico de una muestra de escoria adicional de la plataforma trébol enfriada naturalmente y corresponde al caso base. La información mostrada en la Tabla 11 incluye el contenido de diversos elementos, entre los más importantes, los óxidos de la escoria de cobre que representan una medida de comparación con respecto a lo revisado en la bibliografía. En el caso particular de esta muestra, el contenido de sílice es ligeramente mayor que la recomendada para la molienda de escoria, lo que podría afectar su dureza [10].

Tabla 11. Análisis químico de muestra de escoria tratada bajo enfriamiento natural.

Muestra	Composición, %-peso								
	Cu	Fe	S	Mo	As	Sb	Bi	Pb	SiO ₂
M1 Escoria E.N.	6.80	45.3	1.70	0.12	0.13	0.05	0.01	0.04	27.7

Por otro lado, en la Tabla 12 se presenta el análisis químico de una muestra de escoria con enfriamiento combinado normal que consistió en un periodo de enfriamiento natural seguido por un periodo de enfriamiento con agua. Esta muestra fue adquirida desde la plataforma buzón PTE.

Tabla 12. Análisis químico de muestra de escoria tratada mediante enfriamiento combinado natural y forzado con agua.

Muestra	Composición, %-peso								
	Cu	Fe	S	Mo	As	Bi	Pb	SiO ₂	
M1 Escoria EN y EF con Agua	13.2	42.1	4.31	0.086	0.100	9 ppm	302 ppm	22.9	

La información mostrada en la Tabla 11 y Tabla 12 sugieren que ambas escorias son de alta ley de Cu, sin embargo, las muestras, en ambos casos, pudieran no ser del todo representativas, por lo que para las pruebas de flotación de escorias será necesario reducir los lotes y almacenarlos en bolsas de 0.5 kg de mineral y caracterizarlos previo a las pruebas, definiendo ahora sí la ley de alimentación, siendo este dato empleado para efectuar los cálculos de recuperación de cobre en cada una de las pruebas de flotación de escorias.

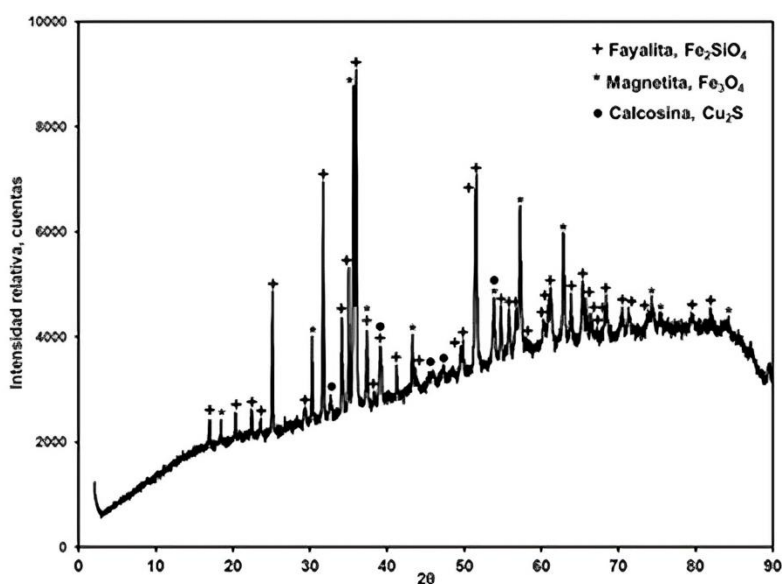
Análisis mineralógico por DRX de muestras de escorias enfriadas naturalmente

En los análisis semicuantitativos por difracción de rayos X (DRX) realizados a escorias a escorias de cobre, se reportan valores referenciales de 31.7 % de SiO₂, para escorias

compuestas por ferrosilicatos. En estas escorias, se reportan, además, valores del 37.9 % de hierro total y 12 % de Fe_3O_4 . y una concentración de cobre total de 1.2 % [16]. Con esta composición, las fases mineralógicas principales son la fayalita (Fe_2SiO_4) y magnetita (Fe_3O_4) [2].

Se realizaron análisis de este tipo a las muestras de escoria del CT utilizadas en el presente estudio, y se identificaron con muy limitada precisión fases sulfuradas y oxidadas de cobre. Esto no debe ser interpretado como que las muestras no contengan estas especies de cobre o que el análisis carezca de confianza, sino que su concentración puede ser menor que 5 % siendo este el valor límite para la detección de especies mineralógicas mediante este tipo de análisis.

En la Figura 18, se muestra el difractograma de la muestra de escoria enfriada naturalmente pudiendo identificar dos fases mayoritarias, que son la fayalita y la magnetita, y como fase probable minoritaria, calcosina, lo que coincide con lo reportado en la literatura.



*Figura 18. Difractograma de la muestra de escoria de cobre procesada mediante enfriamiento natural. Fases mayoritarias: + Fayalita, Fe_2SiO_4 , * Magnetita, Fe_3O_4 . Fase minoritaria: ● Calcosina, Cu_2S .*

Análisis mineralógico por DRX de muestras de escorias enfriadas en un ciclo combinado natural y forzado con agua

De la misma manera, se realizó un análisis por DRX para una segunda muestra de escoria procesada por un programa combinado de enfriamiento natural y forzado. El

difractograma se presenta en la Figura 19, y se identifican las mismas fases mineralógicas correspondientes a fayalita y magnetita. A diferencia de la primera muestra, y con base en un análisis semicuantitativo automatizado realizado por el *software* de identificación de fases mineralógicas por DRX Match!, se determinó una menor cantidad de fayalita en el material, y el correspondiente aumento de magnetita en la muestra de escoria generada mediante este tipo de enfriamiento. Nuevamente, se identificó una fase sulfurada de Cu minoritaria que puede corresponder a Cu_2S .

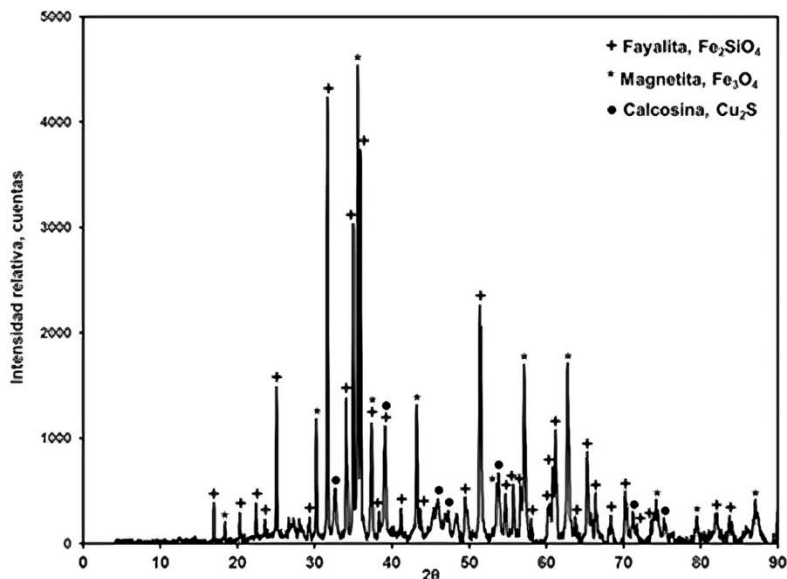


Figura 19. Difractograma de la muestra de escoria procesada mediante enfriamiento combinado natural y forzado con agua.

4.2 Resultados test de Bond

Escorias bajo enfriamiento por convección natural

La escoria obtenida mediante enfriamiento natural exhibió el menor valor del *work index* entre las muestras ensayadas y es igual a 18.54 kWh/t. Este valor se obtuvo aplicando los factores de corrección posterior al cálculo tradicional del *work index* expresado en kWh/t. La omisión de la aplicación de los factores de corrección, conduciría a obtener un valor de este indicador de 16.23 kWh/ton. En los ciclos 8 y 9 del test, las revoluciones calculadas fueron muy similares diferenciándose solo por una revolución, lo que conllevaría a obtener la misma masa de material pasante de la malla 100# entre estos ciclos. Esto permitió finalizar el test y, por lo tanto, se obtiene el valor de dureza de la escoria para el caso base. Las Figuras 20 a 23 muestran los resultados de F_{80} y P_{80} del

material pasante acumulado obtenidos durante el test de Bond para escorias enfriadas naturalmente.

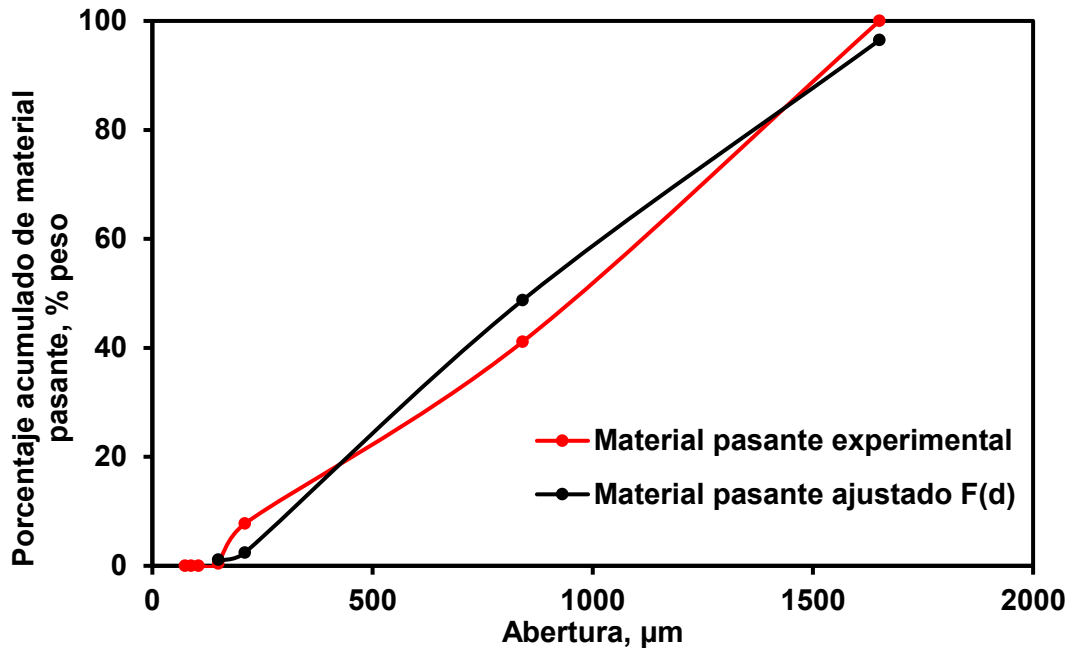


Figura 20. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis de alimentación F_{80} de escoria bajo enfriamiento natural.

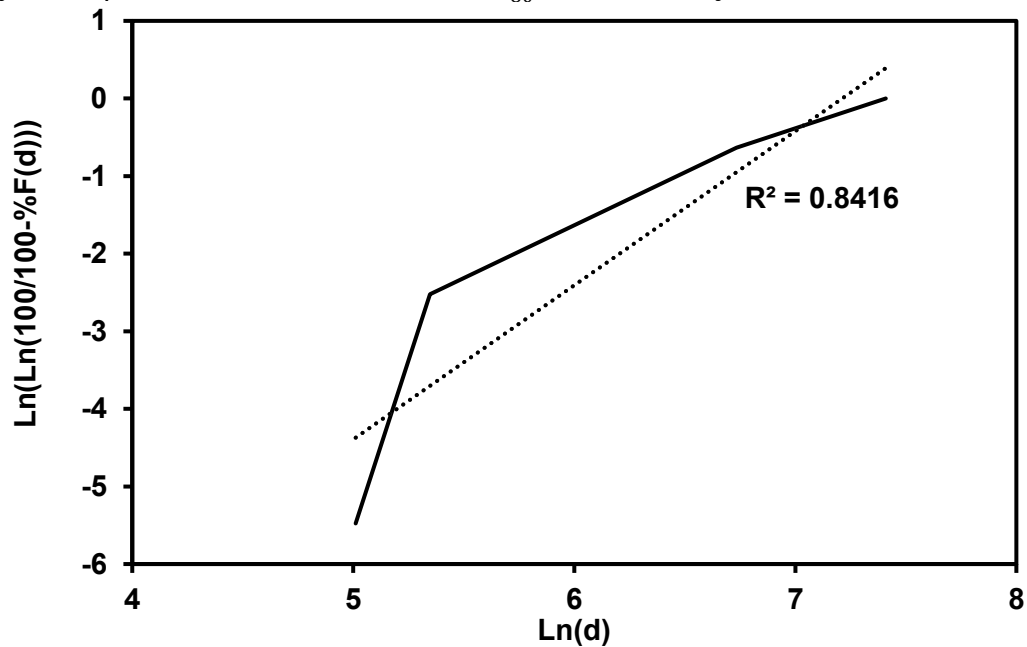


Figura 21. Distribución de Rosin-Rammler para análisis de alimentación F_{80} de la muestra de escoria con enfriamiento natural.

Con base en la información mostrada en la Tabla 13, el P_{80} del material es de 93 μm , y el valor del F_{80} es de 1215 μm . Ambos valores fueron obtenidos por el ajuste matemático de la curva de Rosin Rammler [28]. El análisis granulométrico completo de la alimentación y el producto, así como de las muestras tomadas durante los ciclos del test de Bond pueden ser consultadas en el Anexo 1.

Tabla 13. Resultados de los parámetros para el cálculo del work index de la escoria enfriada naturalmente.

Parámetro	Valor
F80, μm	1215
P80, μm	93
P, #	150
Gbp promedio, g/rev	1.34
Wi, kWh/ton	14.73
Bwi kWh/t	16.23

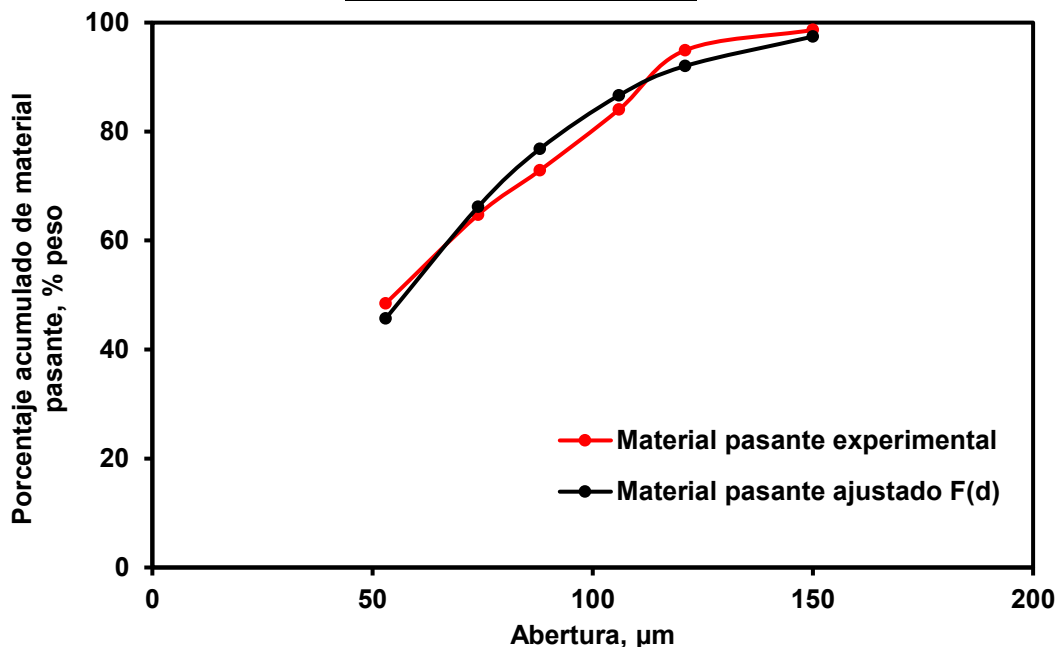


Figura 22. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis de producto P_{80} de escoria bajo enfriamiento natural.

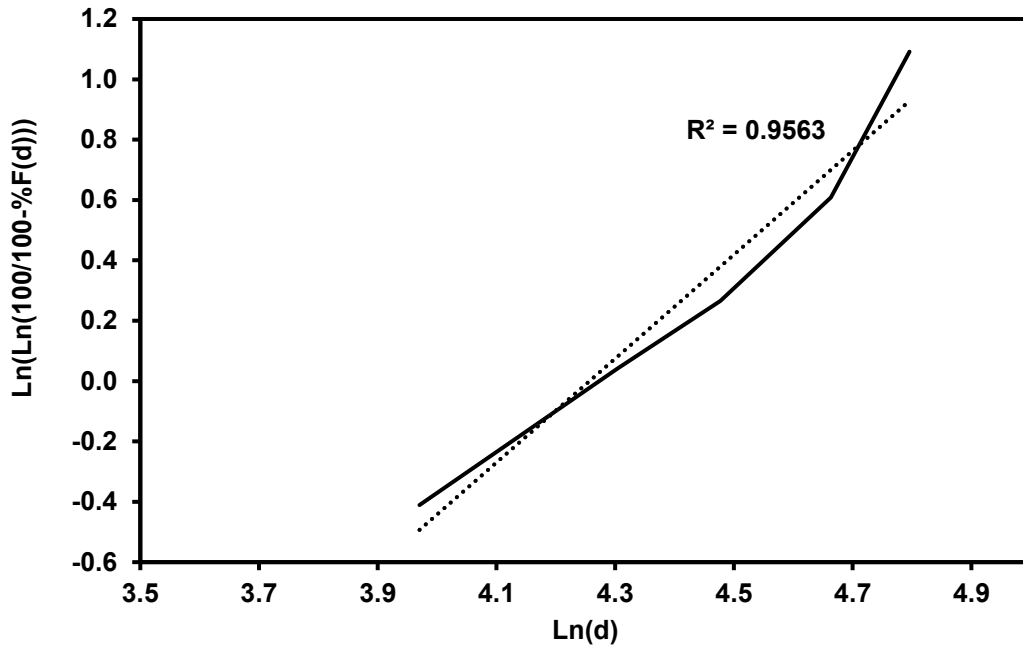


Figura 23. Distribución de Rosin-Rammler para análisis del producto P_{80} de la muestra de escoria con enfriamiento natural.

Resultados del test de Bond para muestras de escoria con enfriamiento combinado

Las Figuras 24 y 25 muestran los resultados del análisis granulométrico realizado al mineral de escoria bajo enfriamiento combinado alimentado al molino de Bond. El valor de dureza obtenido al finalizar el test fue de 27.21 kWh/t, siendo mayor que la escoria enfriada naturalmente. Además, el método de ajuste mediante Rosin Rammler se aplicó para encontrar el tamaño de partícula por el cual el 80 % de la muestra de alimentación pasa, en tanto, para la Figura 25 el método aplica la función de logaritmo natural en ambos ejes para crear una distribución de tamaño de partícula, que es ajustada linealmente.

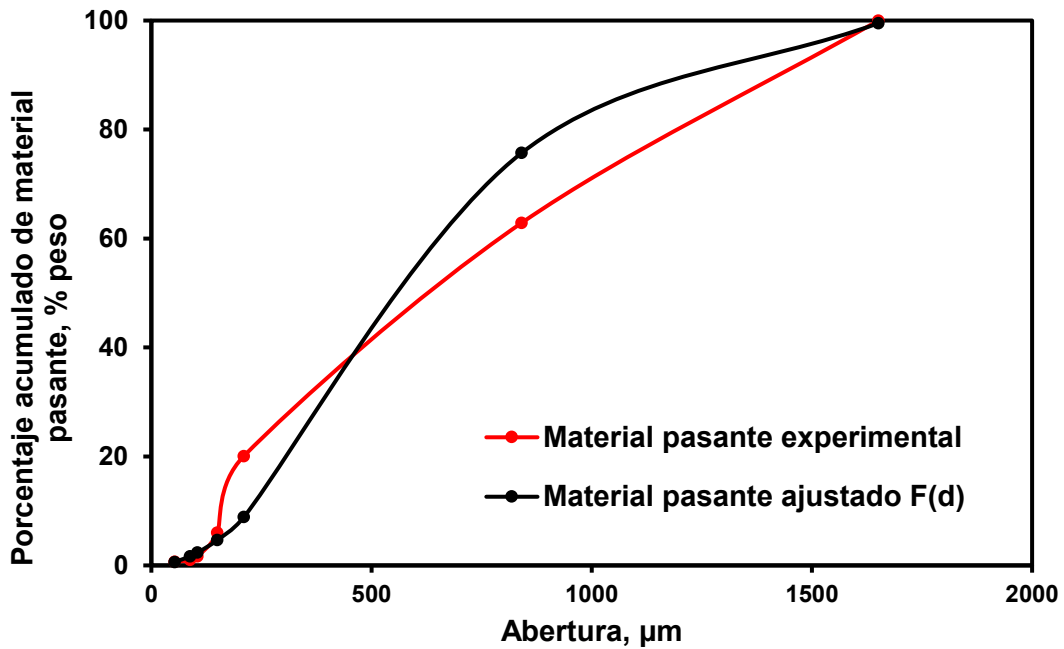


Figura 24. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis de alimentación F_{80} de escoria bajo enfriamiento combinado.

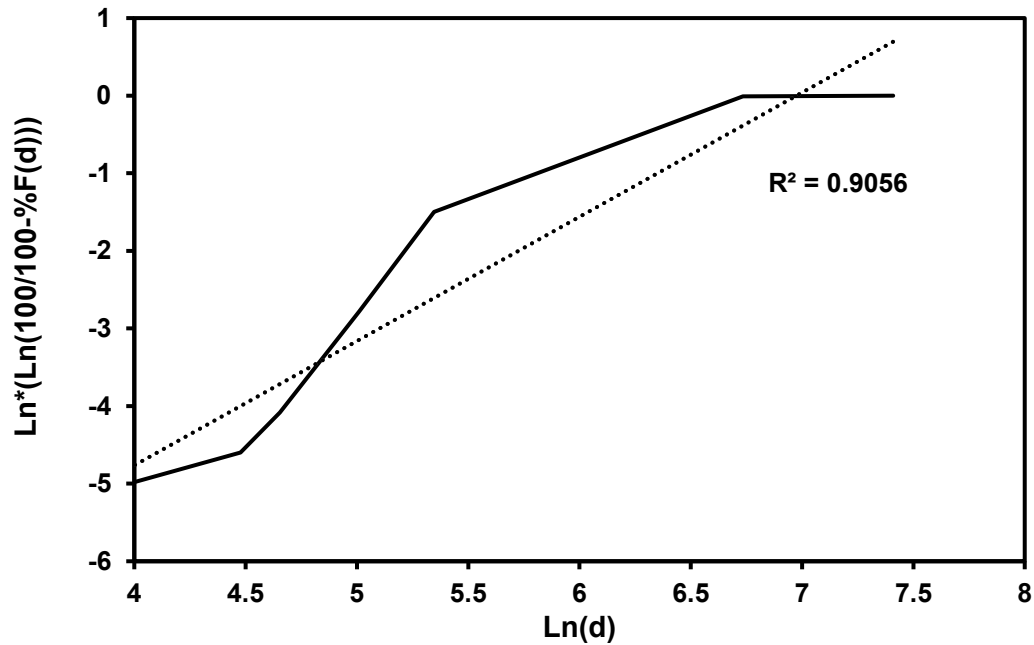


Figura 25. Distribución de Rosin-Rammler para análisis de la alimentación F_{80} de la muestra de escoria con enfriamiento combinado.

Los datos de la Tabla 14 muestran al P_{80} obtenido en esta prueba, que fue de 149 μm , mientras que el valor del F_{80} para la alimentación fue de 898 micras. Ambos valores fueron determinados por el ajuste de la curva experimental aplicando el método de Rosin

Rammler. Finalmente, se muestran los resultados de las curvas de ajuste en las Figuras 26 y 27 al terminar la molienda de Bond, según un análisis granulométrico del producto obtenido.

Tabla 14. Resultados de los parámetros para el cálculo del work index de la escoria obtenida mediante enfriamiento combinado natural y forzado.

Parámetro	Valor
F80, μm	898
P80, μm	149
P, #	150
Gbp promedio, g/rev	1.37
Wi, kWh/ton	24.68
Bwi, kWh/t	27.21

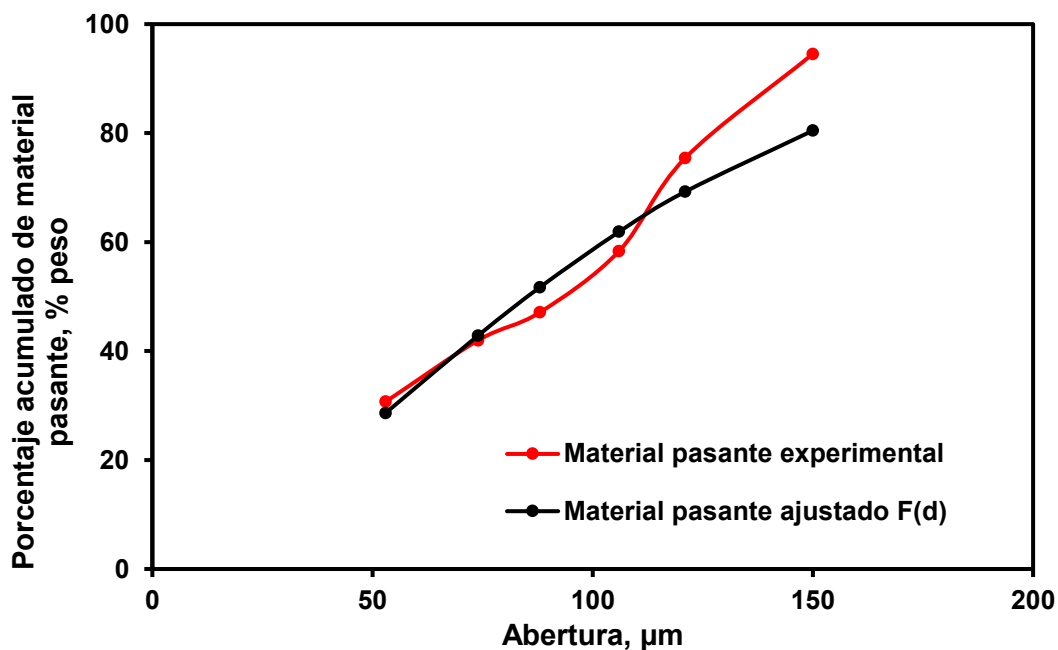


Figura 26. Resultados del test de Bond en términos del material pasante experimental y ajustado para análisis del producto P_{80} de escoria bajo enfriamiento combinado.

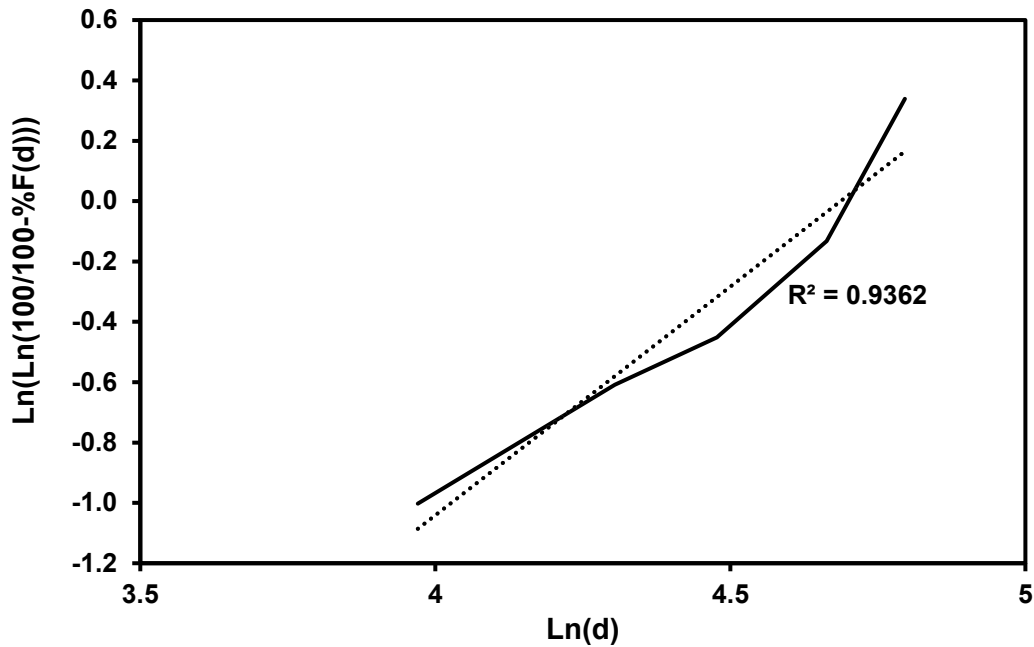


Figura 27. Distribución de Rosin-Rammler para análisis del producto P_{80} de la muestra de escoria con enfriamiento combinado.

4.3 Resultados de flotación escorias

Muestra de escoria con enfriamiento natural

Las pruebas de flotación con el primer mineral de escoria enfriada naturalmente, (ley de Cu promedio 4.9 %), se realizaron bajo tres condiciones distintas, para evaluar su efecto sobre la ley de cobre, evolución de la recuperación de Cu y recuperación en peso global.

La Figura 28 muestra la comparación de las curvas granulométricas de muestras colectadas a tres distintos tiempos de molienda de la escoria enfriada naturalmente. Específicamente, las tres muestras fueron colectadas cada 30 minutos desde 1 hora de iniciado el ensayo de molienda. Las curvas granulométricas resultan consistentes pues tienden a generar partículas de menor tamaño al extender la duración del ensayo.

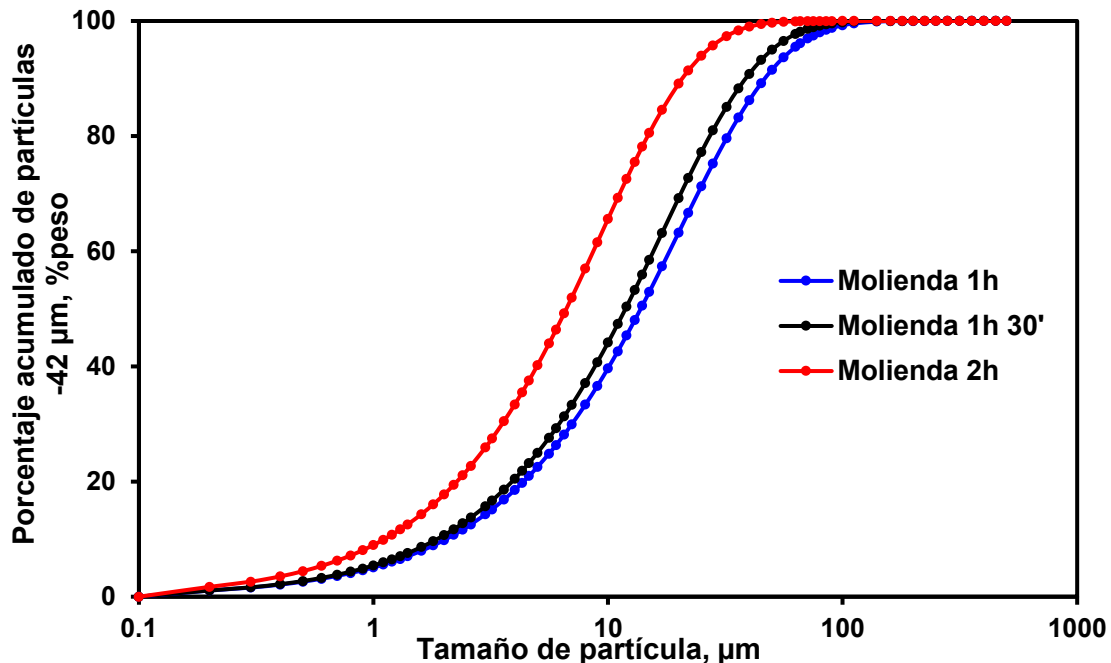


Figura 28. Comparación de las curvas granulométricas de muestras de escoria enfriada naturalmente tomadas a 1 h, 1.5 h y 2 h de un ensayo de molienda.

Pruebas de flotación

Los resultados de las pruebas de flotación efectuadas con la escoria de cobre enfriada naturalmente, se analizarán mediante tres tipos de gráficas: la primera, sobre la evolución de la recuperación de cobre, es decir, la curva cinética de flotación. En la segunda y tercera gráfica, se analiza la recuperación en peso de material respecto de la recuperación de cobre, la relación que existe entre la ley de cobre en el concentrado y la recuperación de cobre. Estos resultados se muestran en las Figuras 29 a 34, y debe observarse que los ensayos se realizaron con muestras de escorias con 70 % y 80 % de partículas menores que 42 µm generadas durante las pruebas de molienda descritas en la sección anterior. Esto pues de acuerdo con información sobre la cinética de molienda de escorias que se dispone, resulta conveniente moler hasta estos valores pues no incrementarán significativamente por las características de los minerales y con ello se espera reducir los costes energéticos.

La Figura 29 y Figura 30, muestran la relación entre la recuperación de Cu en términos porcentuales en función del tiempo de flotación para las tres condiciones operacionales probadas y ambas muestras de escorias enfriadas naturalmente. En concordancia con lo

esperado, a mayores tiempos de flotación, la recuperación de Cu aumentó alcanzando valores superiores al 70% en todos los casos. En contraste, se obtuvieron menores valores de recuperación de Cu con las muestras de mayor granulometría, es decir, con las muestras con mayor porcentaje de partículas menores que 42 μm obtenidas durante las pruebas de molienda. No se observa un efecto significativo de la relación másica entre los tipos de colectores utilizados en las pruebas, aunque, la condición experimental más similar a la empleada en planta condujo a valores de recuperación de Cu ligeramente mayores, alcanzando un 78.21 % de recuperación de Cu.

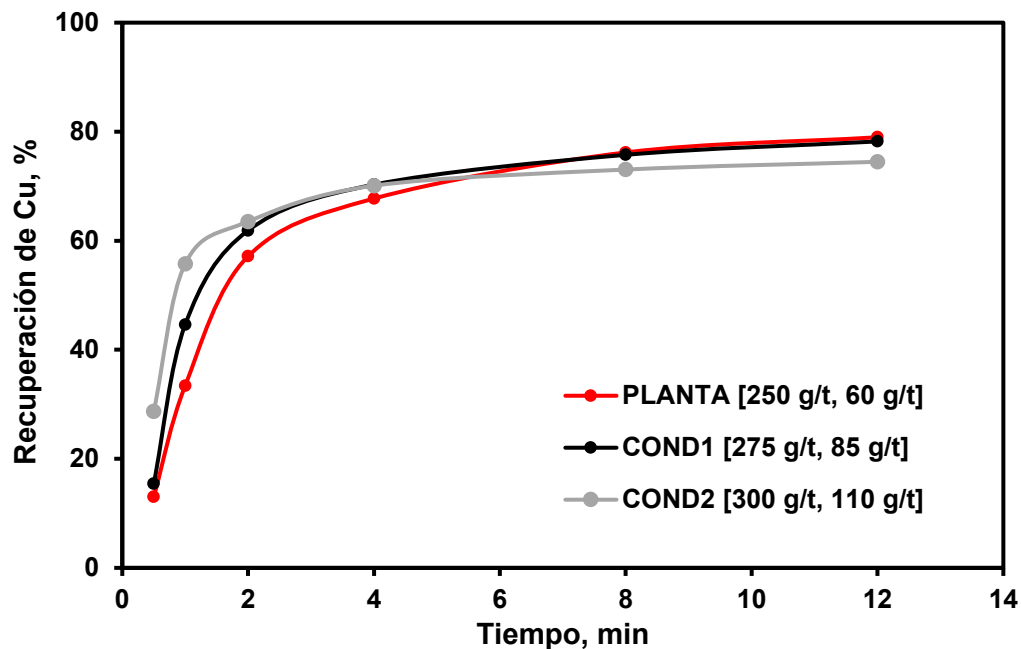


Figura 29. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria enfriadas naturalmente, 70 % – 325 #.

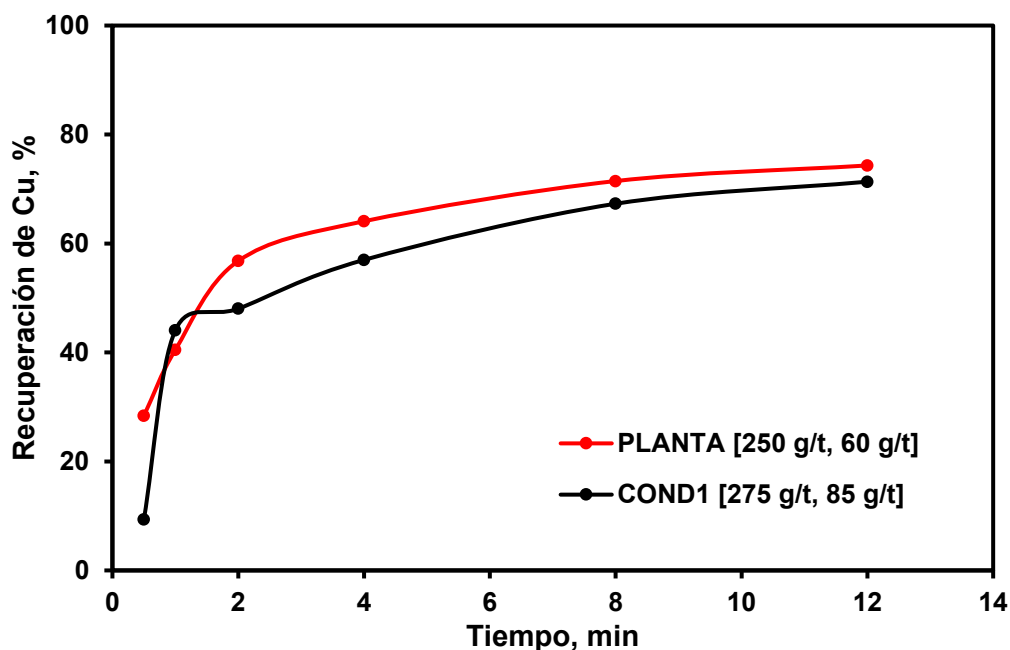


Figura 30. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria enfriadas naturalmente, 80 % – 325 #.

La Figura 31 y Figura 32, muestran los resultados de recuperación de Cu en términos porcentuales, en función de la recuperación en peso bajo las tres condiciones evaluadas para el proceso de flotación para muestras enfriadas naturalmente. El efecto observado en la flotación concuerda con el comportamiento esperado al obtenerse una mayor recuperación de Cu al recuperar una mayor cantidad de mineral. En contraste, el material ensayado con la granulometría lograda bajo el menor tiempo de molienda, es decir, con el material con el 70 % pasante las 42 μm logró los mayores valores de recuperación bajo todas las condiciones probadas. De acuerdo con los fundamentos teóricos del proceso de flotación y para generar una zona de espuma controlada y estable, las recuperaciones en peso para las tres condiciones probadas resultaron similares, indicando que la zona está controlada y el tiempo de residencia es mayor. Bajo las condiciones empleadas típicamente en planta, la recuperación en Cu alcanzó el valor de 78.28 %, logrando recuperar en peso el 18.21 % de la muestra alimentada, esto es positivo puesto que indica que la espuma está estabilizada.

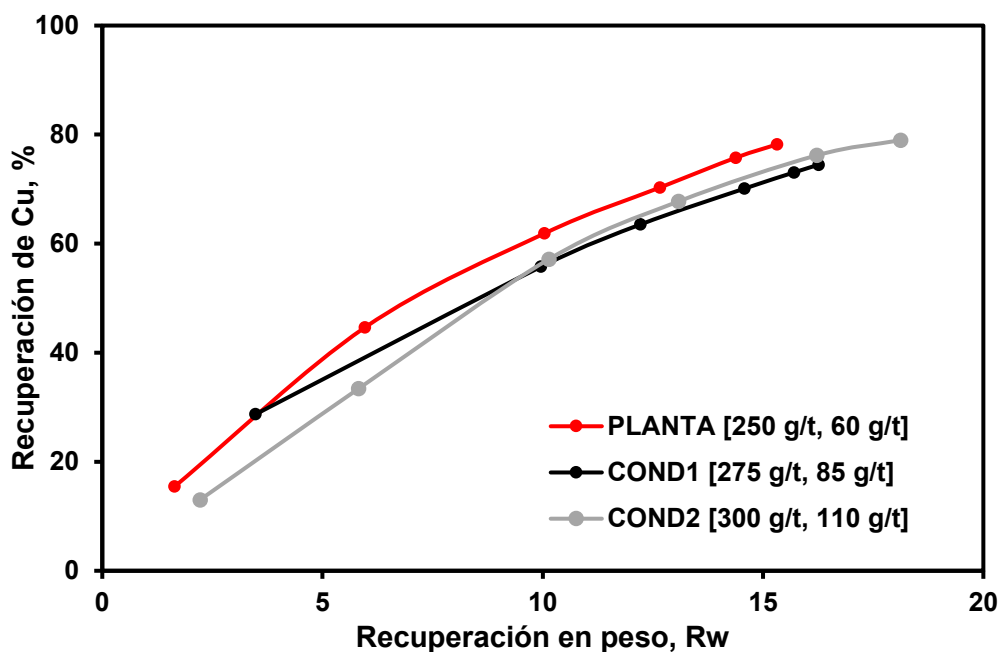


Figura 31. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento natural, 70 % – 325 #.

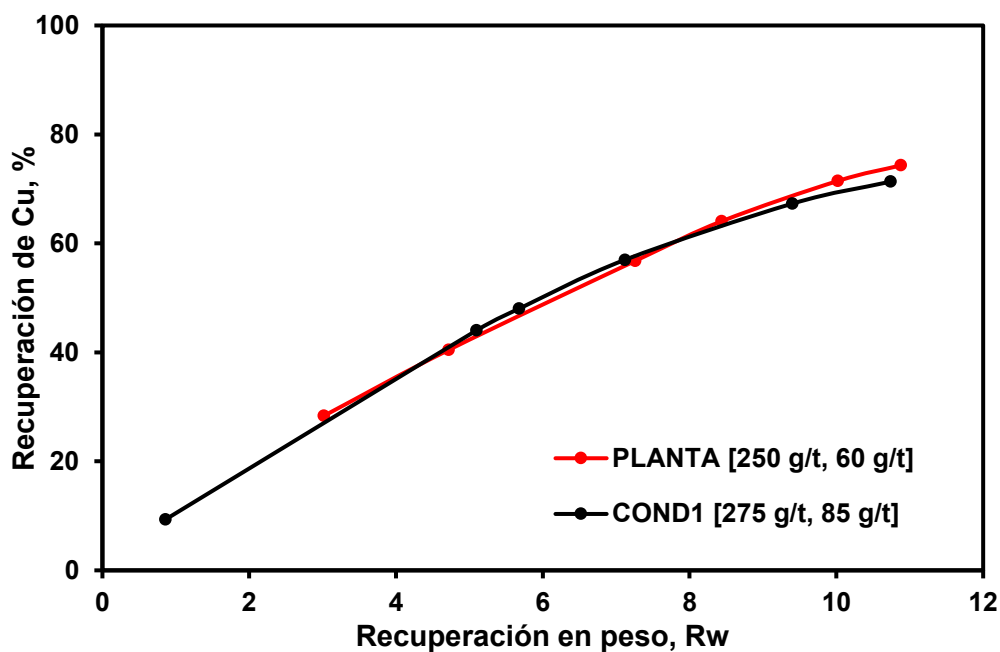


Figura 32. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento natural, 80 % – 325 #.

La Figura 33 y Figura 34, muestran la relación observada entre la recuperación porcentual de Cu respecto de la ley de Cu en los concentrados para las tres condiciones evaluadas en las pruebas de flotación. Siguiendo el comportamiento esperado, se observa una relación

inversa entre ambos indicadores, para ambas granulometrías estudiadas, con una ley de Cu en el caso del concentrado con mayor grado de liberación. Un efecto en particular es encontrado en la condición de planta para la menor granulometría, de 70 % bajo 42 μm , lo que significa que se recupera mayor Cu sin afectar la calidad del concentrado. Para la gráfica de mayor granulometría, la relación media entre los reactivos colectores evaluados alcanzó un valor de ley de concentrado del 53.2 %.

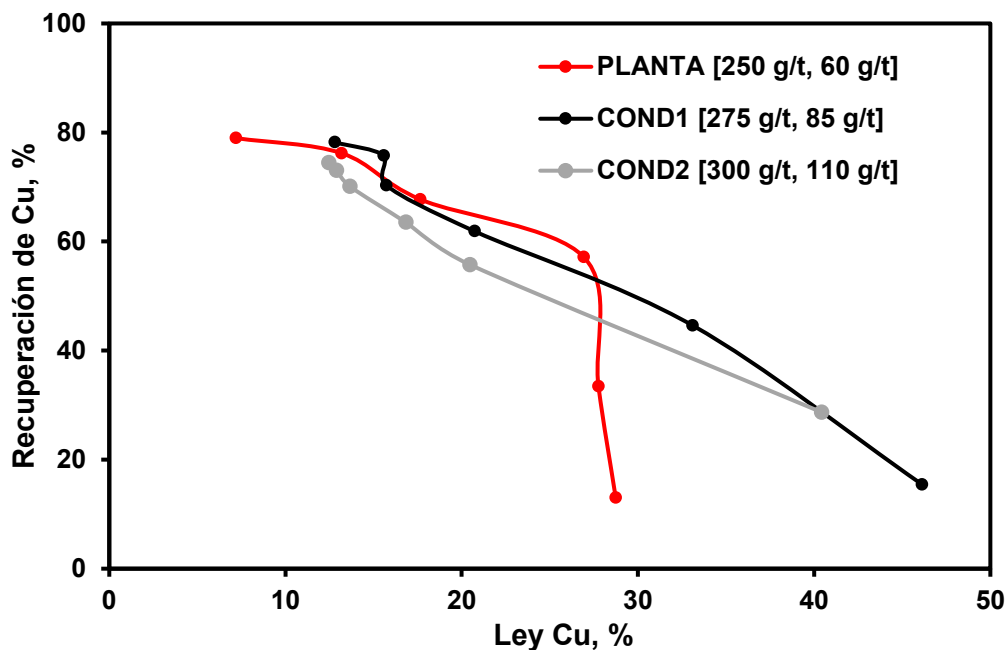


Figura 33. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento natural. 70 % – 325 #.

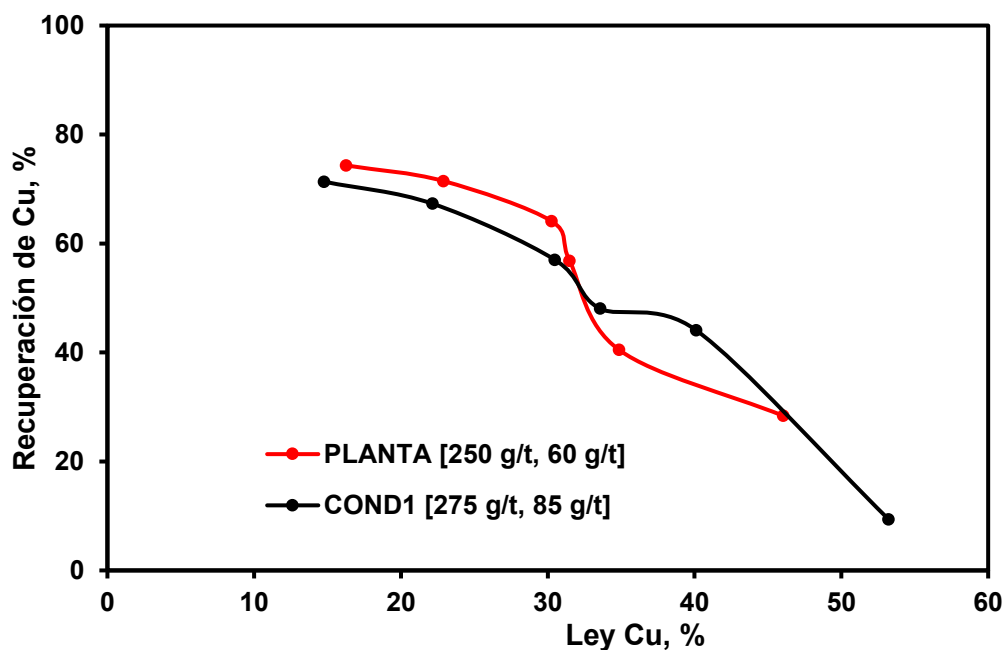


Figura 34. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento natural. 80 % – 325 #.

Muestra de escoria con enfriamiento combinado

Las pruebas de flotación con el segundo tipo de escoria obtenida bajo enfriamiento combinado, (ley de Cu promedio 10.6 %), se realizaron bajo tres condiciones distintas, para evaluar su efecto sobre la ley de cobre, evolución de la recuperación de Cu y recuperación en peso global.

La Figura 35 muestra la comparación de las curvas granulométricas de muestras colectadas a tres distintos tiempos de molienda de la escoria bajo enfriamiento combinado. Además, fueron colectadas cada 30 minutos desde 1 hora de iniciado el ensayo de molienda. En comparación con el enfriamiento natural, para la muestra de 1 hora obtiene una distribución propia de una mayor dureza para el enfriamiento combinado. Las curvas granulométricas restantes son consistentes al generar partículas de menor tamaño mientras dura el ensayo.

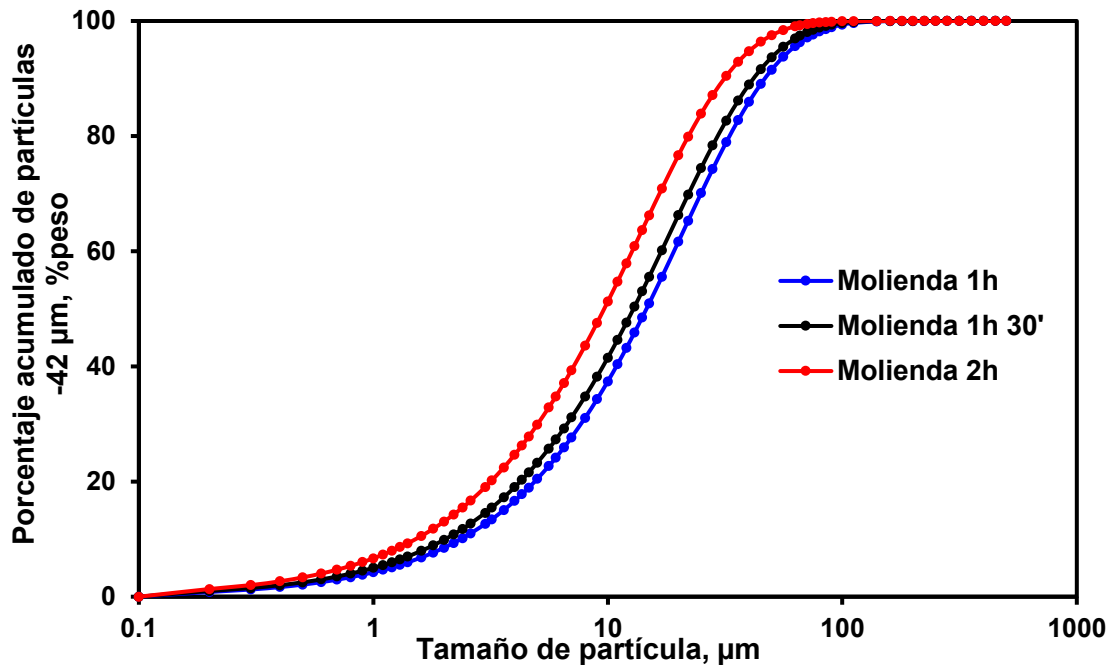


Figura 35. Comparación de las curvas granulométricas de muestras de escoria con enfriamiento combinado tomadas a 1 h, 1.5 h y 2 h de un ensayo de molienda.

Puntos de flotación

La Figura 36 y Figura 37, muestran la relación entre la recuperación porcentual de Cu con el tiempo de flotación de escorias habiéndose aplicado enfriamiento combinado. Las tres condiciones operacionales fueron aplicadas variando la granulometría de la alimentación al proceso de flotación. El comportamiento observado es la tendencia al aumento de la recuperación de Cu a medida que transcurre el proceso. Con respecto a las diferencias en la recuperación del material granulometría menor puede explicarse por temas operacionales durante la flotación, específicamente por deficiencias en el paletado inicial más eficiente o al menor grado de liberación de las partículas. En particular, para la primera curva se alcanzó mayor recuperación con la relación menor entre reactivos, siendo de 78.2 %, en contraste, para la segunda granulometría la condición semejante a planta fue la que la mayor recuperación porcentual de 93.2 %.

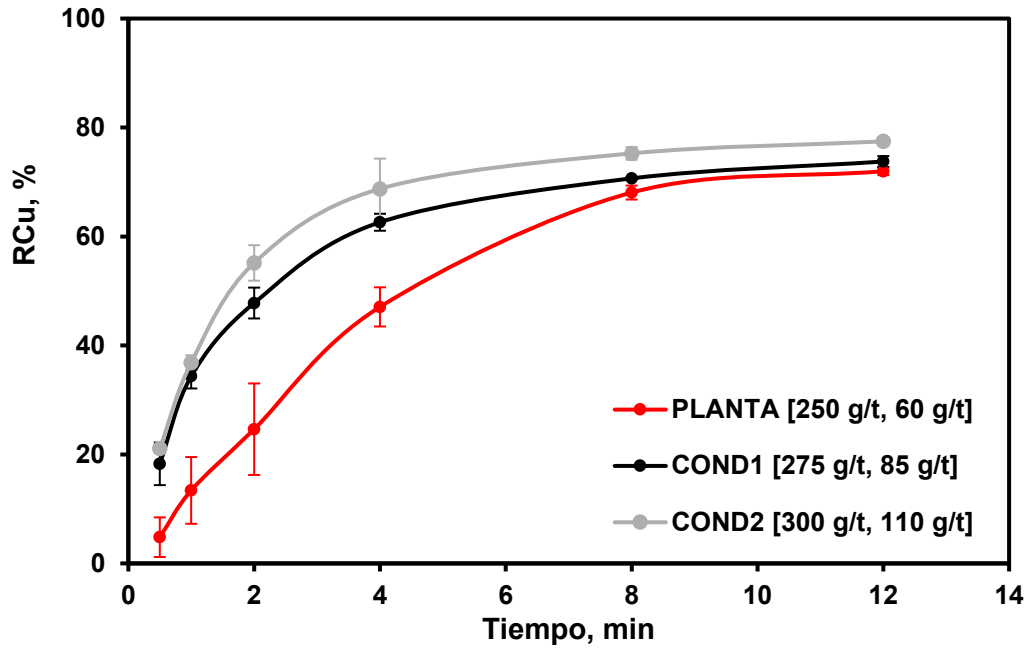


Figura 36. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria con enfriamiento combinado, 70 % – 325 #.

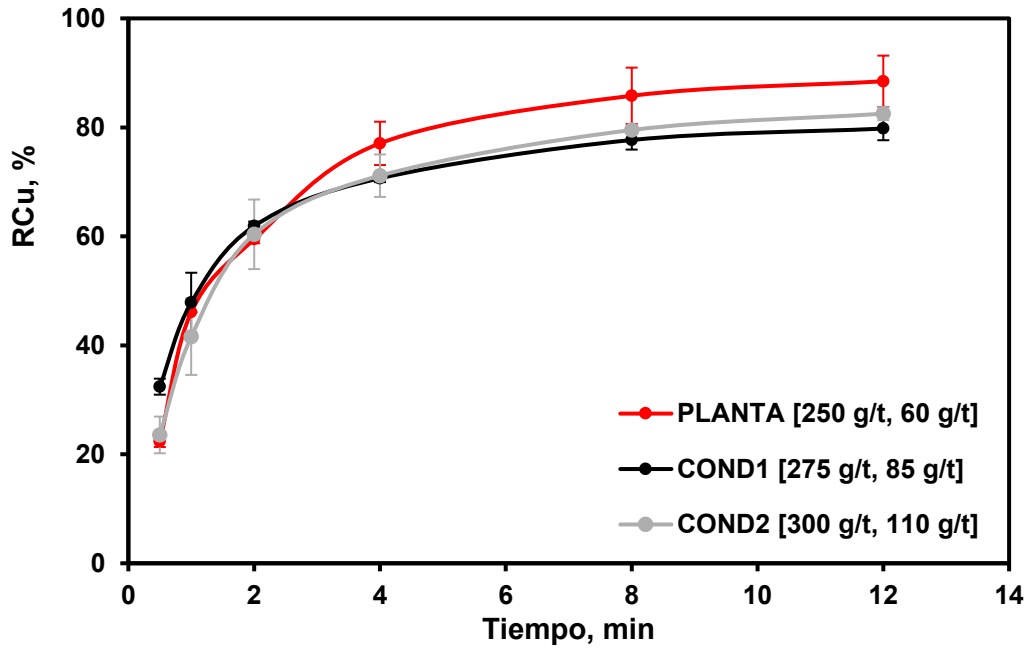


Figura 37. Resultados de las pruebas cinéticas de flotación de muestras de escoria con enfriamiento combinado 80 % – 325 #.

La Figura 38 y Figura 39, muestran la relación entre la recuperación de Cu en términos porcentuales, y la recuperación en peso global para el proceso de flotación, empleando la escoria con enfriamiento combinado bajo tres condiciones distintas de relación de

reactivos y variando la granulometría. El efecto esperado fue el aumento en la recuperación porcentual a medida que transcurre el proceso lo que se verifica al obtener mayor cantidad de mineral. La condición con menor relación entre reactivos permitió la mayor recuperación, sin embargo, todas las curvas tuvieron comportamiento similar en todas las condiciones, indicando una recuperación en peso controlada. El efecto del tamaño de partícula de 80 % bajo 42 μm combinado con la condición de planta para este tipo de enfriamiento es el que presenta los mayores valores de recuperación en comparación con las curvas del resto de las condiciones evaluadas.

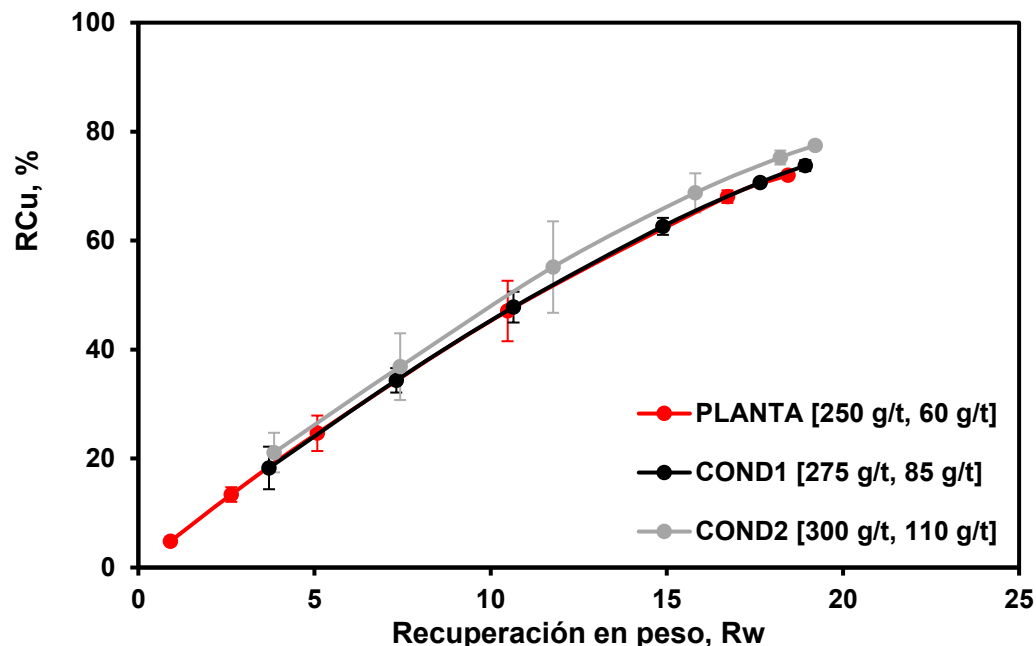


Figura 38. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento natural, 70 % – 325 #.

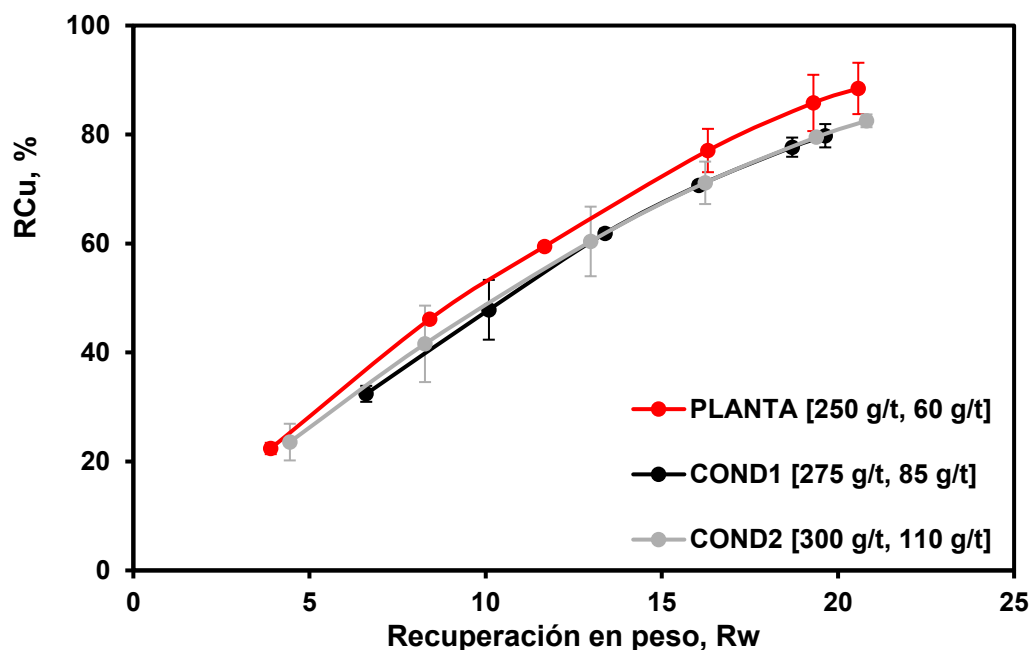


Figura 39. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la recuperación en peso y recuperación de Cu con muestras obtenidas por enfriamiento combinado, 80 % – 325 #.

Finalmente, la Figura 40 y Figura 41, muestran la relación porcentual entre el Cu recuperado en la flotación de escorias, bajo tres condiciones distintas de acuerdo con la relación entre reactivos. En general, para este tipo de muestra de enfriamiento combinado al tener una mayor ley de alimentación se espera obtener un concentrado con mayor ley de Cu en los primeros minutos, para ambas granulometrías evaluadas. Además, el mayor valor registrado en las pruebas fue para la curva de 80 % bajo 42 μm con ley de 60.93 % de Cu. Al procesar escorias obtenidas bajo enfriamiento combinado que se caracterizan por presentar valores mayores de ley de Cu en la entrada a flotación, se espera que se obtengan concentrados con leyes más altas de cobre respecto de cuando se utilizan escorias obtenidas bajo enfriamiento natural. A pesar de esto, aunque, la condición de planta para un mayor grado de liberación registra recuperaciones altas

independientemente del tipo de escoria procesada puede deberse a contenidos de cobre atípicos en el tipo de escorias enfriadas naturalmente.

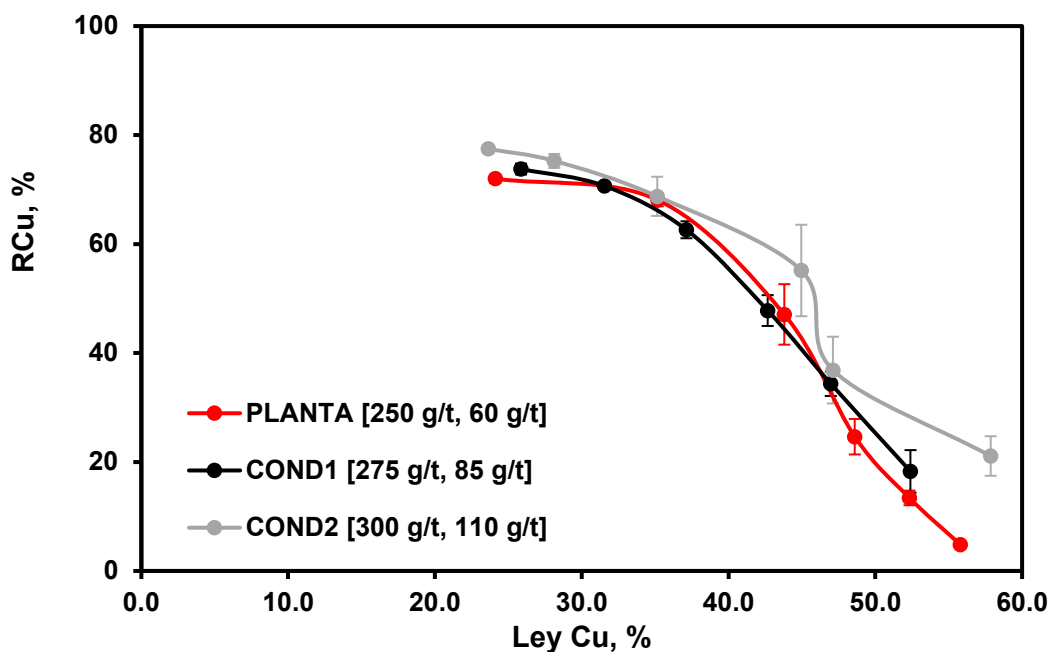


Figura 40. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento combinado. 70 % – 325 #.

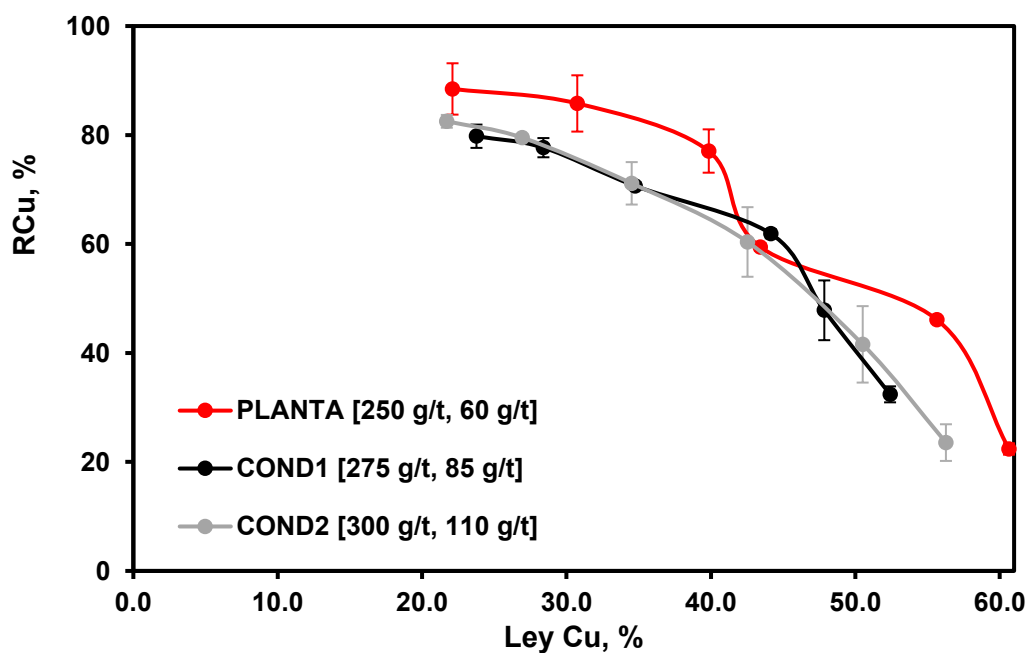


Figura 41. Resultados de las pruebas de flotación en términos de la ley de cobre del concentrado y recuperación de Cu para muestras de escoria con enfriamiento combinado. 80 % – 325 #.

4.4 Resultados simulación enfriamiento

Simulación MATLAB

En relación con la simulación del comportamiento térmico de la escoria, con MATLAB fue representada geoméricamente la taza de 700 ft³ (19,8 m³) con el objetivo de estudiar el enfriamiento a distintos niveles de llenado, programando los regímenes que controlan el problema y definiendo las propiedades de la escoria en la taza. Como resultado, se obtuvo el perfil de temperaturas, especialmente, con la determinación de temperaturas de la superficie y centro, y la evolución de la temperatura de escoria. Se analizarán los resultados con distintos niveles de llenado de taza, asimismo el efecto del área de transferencia de calor en la superficie y, con esto se efectuará la comparación entre la taza de 700 ft³ y 495 ft³ (14 m³). Se realizó además una comparativa en el Anexo 2 con base al Diagrama de Heisler para el enfriamiento de escorias. Para revisar los vectores utilizados en la simulación térmica, ver Anexo 3.

Etiquetado de aristas

Con respecto a la geometría de la taza se realizó el etiquetado de aristas, que se muestra según el tipo de llenado de la Figura 42 de manera sobrepuesta. Cabe destacar que, fueron representados los niveles de llenado utilizados en el estudio y omitiendo niveles de llenado poco prácticos con bajo tonelaje. Las aristas son afectadas por el régimen de transferencia de calor programado, ya sea por convección natural, forzada o radiación, por ende, ninguna cara se consideró como completamente aislada.

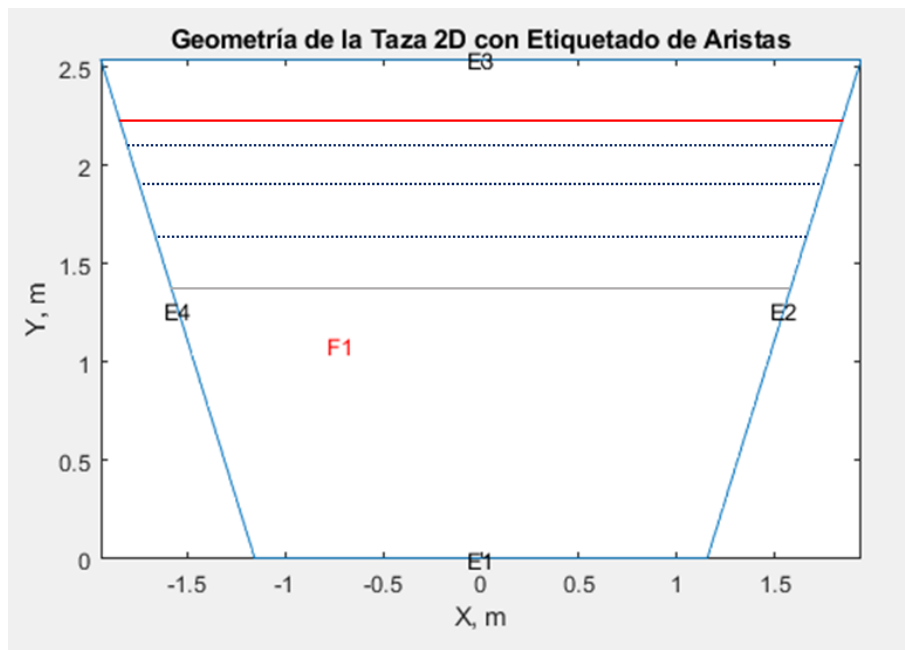


Figura 42. Representación gráfica del etiquetado de aristas para la taza de 700 ft³ en función del nivel de llenado de la escoria en taza, color rojo: nivel de llenado máximo de 66.9 %, colores en negro: llenado de 50, 60 y 65 %, color gris: nivel mínimo 40 %.

Consideraciones:

- La arista E1 corresponde al fondo de la taza y que para efectos de este trabajo se nombró arista inferior.
- La arista E2 corresponde a la zona lateral derecha de la taza (por simplicidad, la geometría de la taza fue representada como un trapecio) y que para este trabajo se llamó la arista lateral derecha.
- La arista E3 corresponde a la superficie de la escoria y que para el presente trabajo se nombra como arista superior.
- La arista E4 corresponde a la zona o superficie lateral izquierda de la taza (por simplicidad, la geometría de la taza fue representada como un trapecio) y que para este trabajo se le asignó el nombre de arista lateral izquierda.
- F1, en el presente trabajo, delimita la cara generada por el corte bidimensional de la taza.

Para calcular la evolución de la temperatura en la superficie y centro se hicieron las siguientes consideraciones:

- El centro geométrico se localiza en función de la altura o del nivel de llenado de la taza. Se encuentra ubicado en la coordenada (0, h/2), por ende, el valor de h cambia con el nivel de llenado.

- La temperatura de la superficie corresponde a la temperatura de la coordenada (0, h). Se ubicó geoméricamente al centro de la figura y pertenece a la arista E3.

Consideraciones de régimen:

- Enfriamiento natural:
 - En el enfriamiento natural, se asumió un flujo de calor desde todas las aristas E1, E2, E3 y E4, siendo que el aire influye en todas las paredes de la taza, y directamente en la superficie E3. Para este régimen se consideró un efecto combinado de radiación y convección natural.
- Enfriamiento forzado:
 - Para el enfriamiento forzado, se asumió un flujo de calor exclusivo sobre la arista superior E3, por ende, hay una influencia directa del agua de enfriamiento sobre esta superficie, por lo que deben registrarse diferencias significativas en la temperatura con respecto a las otras aristas. Asimismo, se consideró un flujo por radiación en la misma superficie.

Alternativa 1: Ciclo de enfriamiento

La primera alternativa corresponde a un nivel de llenado del 40 %, que equivale a 17.06 t de escoria y un volumen en taza de 4.63 m³. Los perfiles de temperatura en todos los casos que se discutirán, en grados centígrados, son para el centro y la superficie de la escoria en la taza. Estos perfiles se calcularon en función de coeficientes de transferencia de calor, para régimen natural y forzado, además del nivel de llenado de la

taza. La Figura 43 muestra la evolución de la temperatura en ambas posiciones de la escoria.

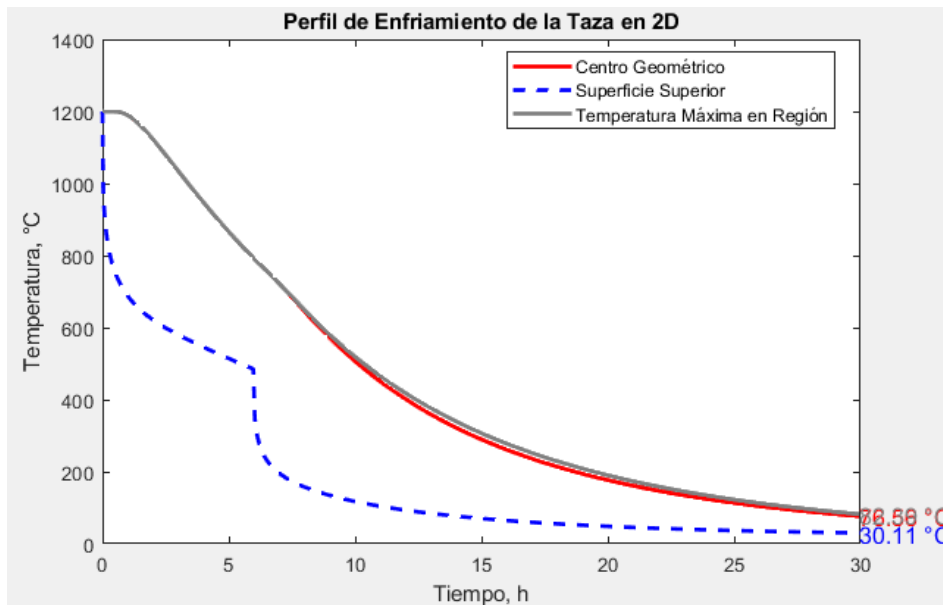


Figura 43. Evolución de los perfiles de temperatura en el centro y superficie de la escoria en taza con 40 % de llenado.

Además, se programó una función adicional para determinar la temperatura máxima de la escoria en la taza, en una posición distinta del centro geométrico. Esto último con el objetivo de localizar esa temperatura a cada instante y compararla con la temperatura del centro geométrico para observar la forma en que se desplaza hacia el fondo de la taza, tal como se muestra en la Figura 44.

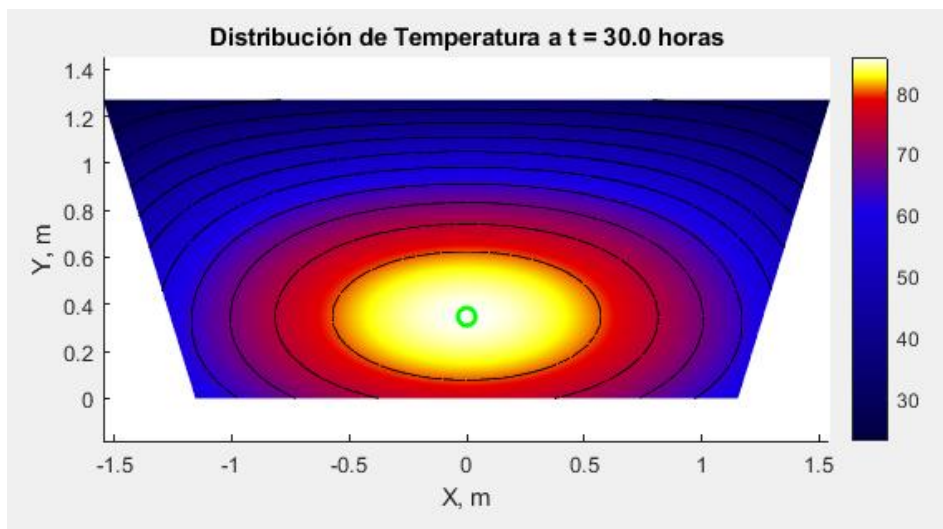


Figura 44. Campo de temperaturas de la escoria en taza con 40 % de llenado al término de la simulación.

Con base en los resultados de las simulaciones, el ciclo de enfriamiento finalizó a las 30 horas, lo que resulta consistente con el balance de energía. El ciclo de enfriamiento incluyó 6 horas de enfriamiento con aire (enfriamiento natural) y 24 horas de enfriamiento con agua (enfriamiento forzado). La Tabla 15 muestra valores de parámetros relevantes al término del ciclo de enfriamiento para estas condiciones de simulación.

Tabla 15. Condiciones de simulación del ciclo de enfriamiento para Alternativa 1 y temperaturas alcanzadas al finalizar la simulación en 30 h.

Ciclo, h	Enfriamiento natural, h	Enfriamiento forzado, h	Temperatura del centro, °C	Temperatura de la superficie
30	6	24	76.5	30.1

Alternativa 2: Ciclo de enfriamiento

La segunda alternativa corresponde a un nivel de llenado de 66.9 % con 36.91 t y un volumen de escoria en taza de 10 m³. La evolución de los perfiles de temperatura mostrados en la Figura 45 corresponde para el centro y la superficie de la escoria en taza. Los cálculos consideran valores apropiados de coeficientes de transferencia de calor, para régimen natural y forzado, además del nivel de llenado de la taza.

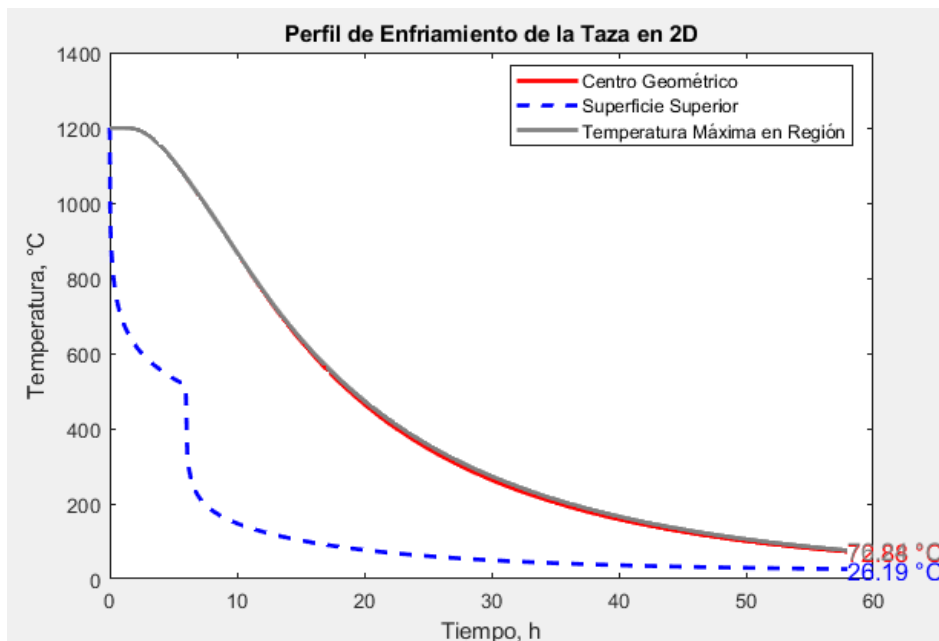


Figura 45. Evolución de la temperatura en el centro y superficie de la escoria en taza con 66.9 % de llenado.

La Figura 46 muestra el campo de temperaturas de la escoria en la taza calculado al término de la simulación y que corresponde a 58 horas del ciclo de enfriamiento. En este

momento, la temperatura máxima de la escoria en la taza cumple con el criterio de operación en planta y que corresponde a una temperatura inferior que 75 °C, indicando que el ciclo ha terminado, cumpliéndose que la totalidad de escoria en taza se ha enfriado por el proceso.

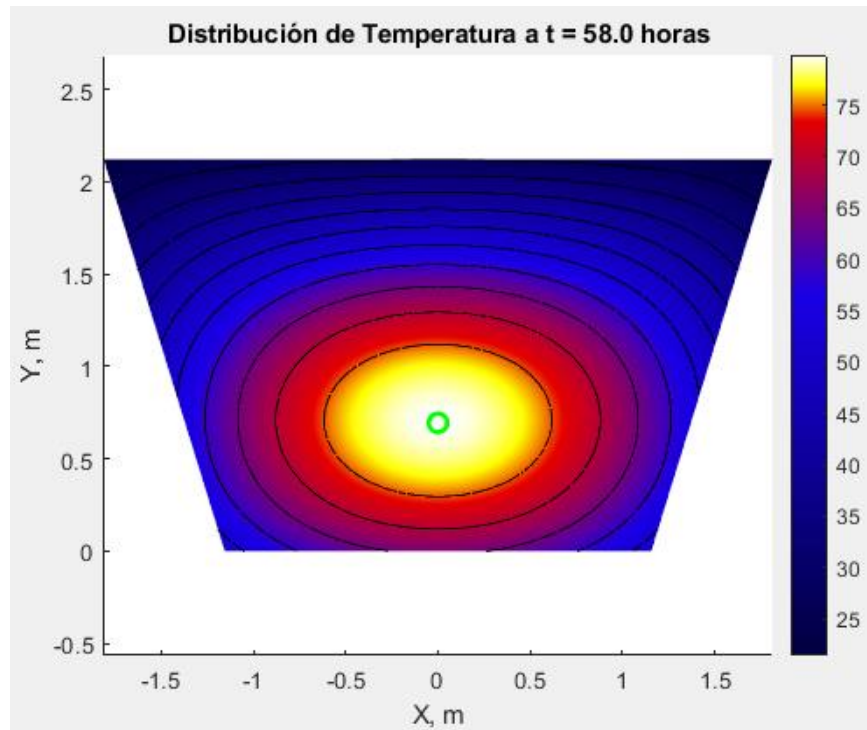


Figura 46. Campo de temperaturas de la escoria en taza con 66.9 % de llenado al término de la simulación.

Con base en el criterio anterior, se determinó que el ciclo de enfriamiento finalizó a las 58 horas, a partir de los resultados obtenidos de la simulación numérica, lo que resulta consistente con el balance de energía. En consecuencia, el ciclo de enfriamiento contempló 6 horas de enfriamiento natural con aire ambiental y 52 horas de enfriamiento forzado con agua. En la Tabla 16 se muestran los datos térmicos más relevantes al término del ciclo de enfriamiento involucrados en la simulación para la segunda alternativa. Para un ciclo de enfriamiento de esta naturaleza y que se base en el uso de la menor cantidad de tazas posible, se requerirían al menos 78 tazas, a un tonelaje de 2,880 t de escoria en un día de operación.

Tabla 16. Alternativa 2 de ciclo de enfriamiento y temperaturas alcanzadas al finalizar la simulación en 58 h.

Ciclo, h	Enfriamiento natural, h	Enfriamiento forzado, h	Temperatura del centro, °C	Temperatura en la superficie, °C
58	6	52	74.5	26.2

Finalmente, la Tabla 17 muestra el tiempo requerido para el ciclo de enfriamiento, incluyendo el tiempo de enfriamiento natural, forzado, para la cosecha utilizando como referencia para el caso de enfriamiento en canchas y transporte de la escoria en taza en el camión CATE. A partir de este dato, se calcula el tiempo total requerido para el proceso de tratamiento de la escoria.

Tabla 17. Tiempos para el procesamiento de escorias para Alternativa 2 basado en un ciclo de enfriamiento en tazas.

Proceso	Tiempo, h
Enfriamiento natural	6
Enfriamiento forzado	52
Cosecha	8
Transporte CATE	22.75
Total ciclo tazas	88.75

Efecto del tamaño de taza

En la simulación, también se estudió el efecto del tamaño de la taza en el enfriamiento de la escoria. Así pues, se consideraron dos tamaños, el primero, para la taza actual empleada en la Fundición Caletones, con volumen de 700 ft³ y la segunda, con volumen de 495 ft³ utilizada por la Fundición Altonorte. Tienen métodos de procesamiento de escorias distintos, siendo en canchas y en tazas, esperándose un contenido diferente de cobre en los relaves de flotación de escorias. En particular, en esta parte del trabajo, se estudió el efecto del área de transferencia de calor de acuerdo con estas dos dimensiones de las tazas. Las simulaciones con ambos tipos de tazas se realizaron empleando los mismos parámetros térmicos en la escoria de cobre, el mismo tonelaje y volumen en taza, y a pesar de ello, se determinó que la taza de Caletones tiene mayor eficiencia en el ciclo de enfriamiento. Este tipo de taza presenta una mayor área superficial disponible para transferencia de calor, considerando que, para este tipo de proceso de enfriamiento, este aspecto resulta esencial y crítico. Los resultados del comportamiento térmico calculados durante la simulación para este tipo de taza se muestran en las Figuras 45 y 46, lo que será comparado con lo obtenido con las tazas de Altonorte que se mostrarán, a continuación, en las Figuras 47 y 48.

La taza usada por la Fundición Caletones presenta un nivel de llenado de 66.9 %, mientras que, la taza de Altonorte se llena hasta 80.7 %. Debido al efecto del área de transferencia de calor, ambas llegan al término del ciclo con la temperatura deseada en la escoria por el enfriamiento aplicado. Sin embargo, el efecto de la superficie disponible

de transferencia de calor optimiza el ciclo de enfriamiento, con una diferencia de 20.9°C al término del ciclo para esta simulación.

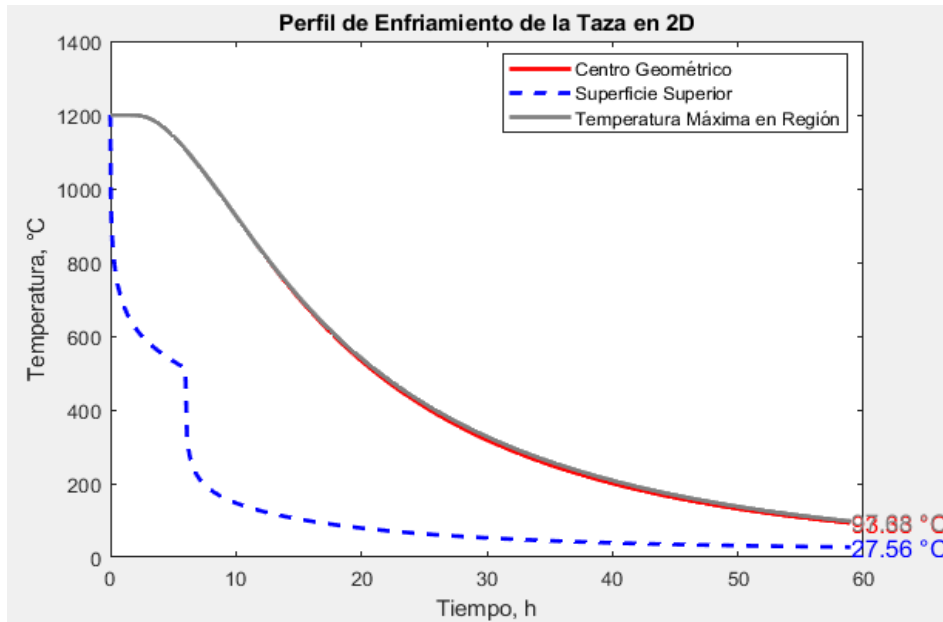


Figura 47. Evolución de la temperatura en el centro y superficie de la escoria en tazas con 80.7 % de llenado al término de la simulación.

La Figura 47 muestra la evolución de la temperatura a medida que transcurre el enfriamiento, para el nivel de llenado de 80.7 % en volumen de escoria en taza, y finalizando con un ciclo de 58 horas. El comportamiento térmico es similar en la superficie, en comparación con la taza utilizada en Caletones, mientras que, presenta diferencias en los valores de temperatura del centro de la taza. Adicionalmente, en la Figura 48, se muestra el campo de temperaturas para la simulación realizada con este tipo de taza.

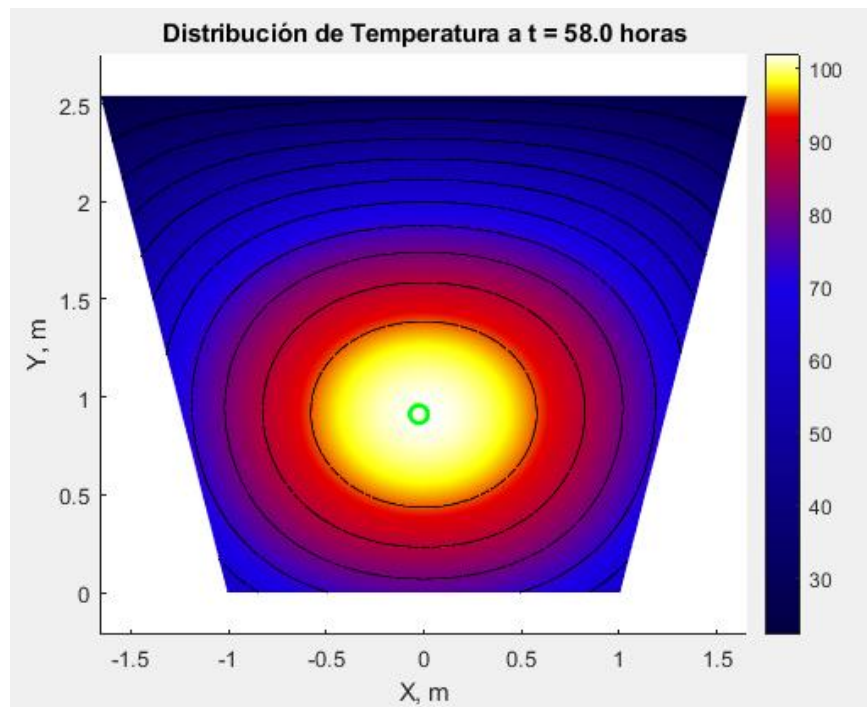


Figura 48. Campo de temperaturas de la escoria en taza con 80.7 % de llenado al término de la simulación.

La Tabla 18 muestra los parámetros resultantes de la simulación y balance de energía para un nivel de llenado de 40 %, siendo la primera alternativa. El valor de coeficiente de transferencia de calor en convección natural fue obtenido según las correlaciones (16) y (17) para el balance de calor, y para la simulación utilizando el ajuste (18). Esto último, se detalla en el Anexo 4.

Tabla 18. Alternativa 1: Parámetros de simulación y balance de energía en la taza.

Tiempo ciclo, h	Agua, L/min	Temperatura final, °C	Tonelaje, t	Nivel de llenado, %	H natural, W/m ² K	H forzado, W/m ² K	Tonelaje de Fusión, t	Número de Tazas
58	3.79	76.5	17.06	40%	15	228.7	2880	169

La Tabla 19 muestra los valores de los parámetros térmicos resultantes de la simulación y del balance de energía para un nivel de llenado de 66.9 %, cumpliendo el requerimiento de utilizar el menor número de tazas para el ciclo de enfriamiento. De hecho, el valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo se ajustó en 15 W/m² · K, cumpliendo con el balance de energía.

Tabla 19. Alternativa 2: Parámetros de simulación y balance de energía en la taza.

Tiempo ciclo, h	Agua, L/min	Temperatura final, °C	Tonelaje, t	Nivel de llenado, %	H natural, W/m ² K	H forzado, W/m ² K	Tonelaje de Fusión, t	Número de Tazas
58	4.26	74.5	36.91	66.9%	15	228.7	2880	78

Área de transferencia de calor

El concepto de área de transferencia de calor toma relevancia en el balance de energía y es representada por la superficie de la taza, puesto que, según el tipo de régimen, tiene efecto en la remoción del calor de la escoria contenida en la taza. Por ello, con MATLAB se cuantificó la disipación de calor para la superficie de la taza, comparando el efecto de los distintos mecanismos de remoción de calor.

En cuanto a los tres mecanismos de remoción de calor, el relacionado con el caudal de agua de enfriamiento en la superficie es el que mayor cantidad de calor disipó al ambiente, en concordancia con lo esperado. Por consiguiente, este comportamiento tiende a manifestarse con el incremento del nivel de llenado de escoria en la taza, correspondiente a la Fase 2 de enfriamiento. La Figura 49 muestra la remoción porcentual de calor en la superficie de la escoria en taza para estos tres mecanismos, de hecho, mayoritariamente es removida por el agua, seguido por el enfriamiento con aire siendo superior al efecto de la radiación. En la Figura 50 se muestra la comparativa entre ambos. Finalmente, la Figura 51 muestra la relación lineal entre el nivel de llenado para la escoria en taza y el área expuesta de la superficie, en metros cuadrados.

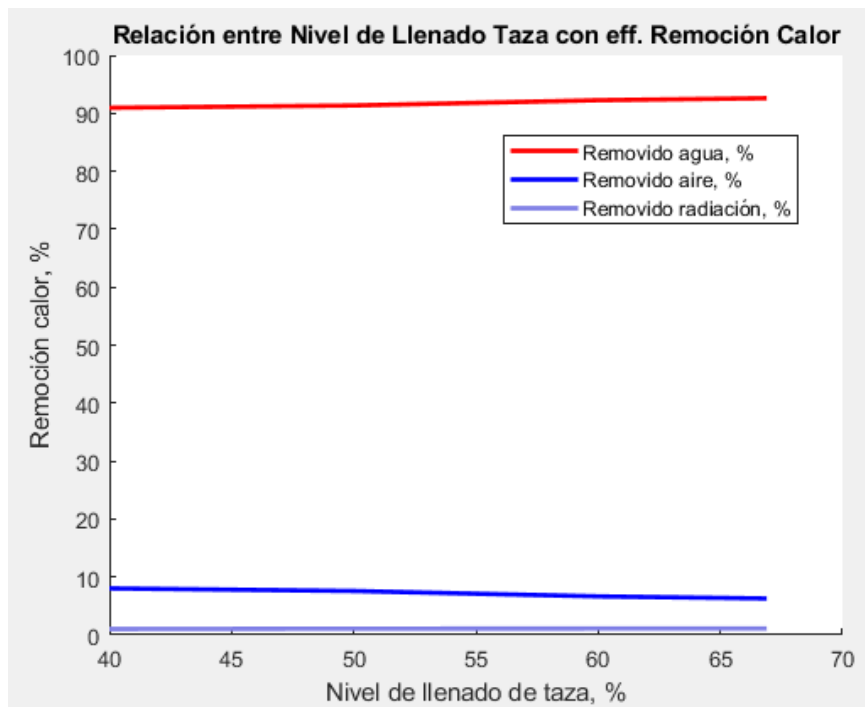


Figura 49. Comparación del efecto de la remoción de calor del agua, aire y radiación en función del nivel de escoria en la taza, desde un 40% hasta un 66.9% de llenado.

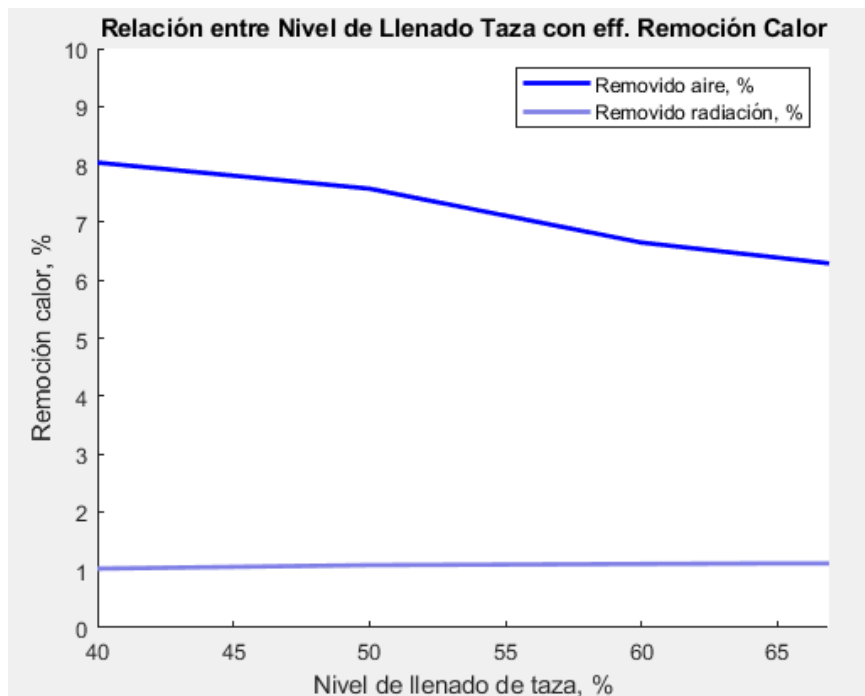


Figura 50. Comparación del efecto de la remoción de calor del aire y radiación en función del nivel de escoria en la taza, desde un 40% hasta un 66.9% de llenado.

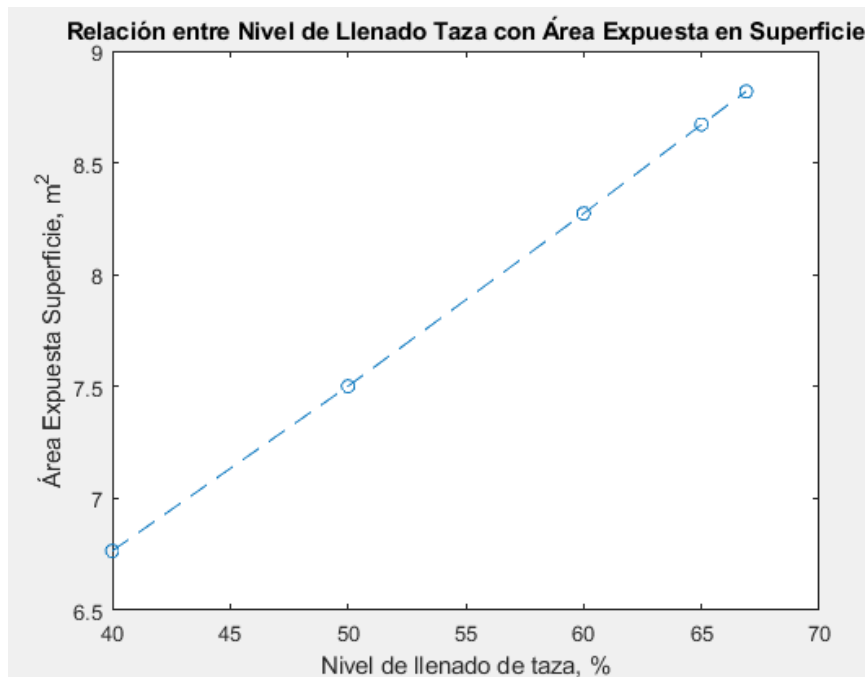


Figura 51. Relación lineal entre el nivel de llenado de taza con área superficial expuesta de transferencia de calor.

4.5 Evaluación económica

Resultados de la evaluación económica

Utilizando los parámetros disponibles en la “Alternativa 5 de enfriamiento en tazas” de CODELCO, fue realizada una evaluación con un horizonte de 10 años, a la tasa de descuento de 10.5 % [26]. Con esto, se obtuvo la VAN de 27,169,833 USD, TIR de 22 %, considerando un periodo de recuperación de capital de 4 años. La inversión en activos fijos y capital de trabajo son parte de la inversión inicial, que contempla las obras de relleno con material de concreto por superficie en m² y volumen requerido en m³, respectivamente. Se consideró una inversión en 110 tazas, con un costo de mantención anual de 10 %. No obstante, con respecto al camión CATE, no se considera la inversión adicional en otra maquinaria. De tal manera, para estimar el ingreso fueron considerados los datos de antecedentes económicos y el balance de masa del Anexo 5.

4.6 Evaluación de alternativas

Efecto del tamaño de la taza

El tamaño de la taza influye directamente en la eficiencia de enfriamiento. Al mismo volumen y tonelaje, la taza con mayor área de transferencia de calor resulta más eficiente al remover calor de la escoria de cobre. En consecuencia, resulta favorecida con el máximo nivel de llenado posible, de hecho, existe una mayor área disponible para transferir calor por la superficie, resultando crítico al comparar dos tamaños de tazas.

Por consiguiente, no resulta conveniente operar a niveles de llenado bajos al requerir una mayor cantidad de tazas operando al día, que es poco eficiente y realista, además de cumplir los estándares de seguridad, siendo el objetivo encontrar el óptimo del ciclo para enfriar la escoria de cobre en la taza.

La taza escogida será la actual de Caletones. Por consiguiente, el efecto del llenado de la taza, para la primera alternativa estudiada no resulta conveniente producto de una cantidad poco realista de 169 tazas operando al día y poco optimizado. En tanto, la cantidad de tazas en la segunda alternativa queda en 78 tazas, siendo conveniente utilizar el mismo nivel. Se descarta haber probado con un nivel de llenado superior, puesto que el efecto del área de transferencia de calor fue evidente para el tamaño de

la taza y por temas de seguridad, haciendo énfasis en la comparativa de las características de la escoria de cobre en taza y mismo volumen.

5. Conclusiones

En este trabajo, se logró estudiar el comportamiento de escorias de cobre provenientes de Convertidores Teniente (CT), enfriadas bajo configuraciones de enfriamiento natural y combinado. Así mismo, se realizaron simulaciones de enfriamiento en el software comercial MATLAB a partir de las cuales se determinó el ciclo de enfriamiento y se estudió el efecto de otros factores como el volumen y nivel de llenado de las tazas sobre el enfriamiento de la escoria. Por último, se efectuó la evaluación económica de la implementación del método de enfriamiento en tazas en la Fundición Caletones.

De acuerdo con la caracterización de las escorias, se puede concluir lo siguiente:

- Se efectuó la caracterización química de las escorias obtenidas bajo enfriamiento natural y combinado. La ley de Cu de la escoria enfriada combinado fue de 13.2 %, mientras que, la de la escoria proveniente del enfriamiento naturalmente fue de 6.8 %.
- Respecto de la composición mineralógica de las escorias, se determinó que la fayalita (Fe_2SiO_4) fue la especie mayoritaria en la escoria enfriada naturalmente. Esta misma especie se identificó en la escoria obtenida bajo enfriamiento combinado con la diferencia que se detectó una mayor presencia de magnetita (Fe_3O_4) respecto de la escoria enfriada naturalmente.
- Se caracterizaron físicamente las escorias mediante pruebas de dureza utilizando la metodología estandarizada del test de Bond, a partir de las cuales se obtuvieron valores del índice de trabajo o work index de los materiales investigados. En particular, se obtuvo el valor de 18.54 kWh/t para la escoria enfriada naturalmente y para la escoria bajo enfriamiento combinado, el índice fue de 27.21 kWh/t.

Con base a las pruebas de flotación:

- Se realizaron pruebas cinéticas de flotación bajo tres condiciones de reactivos, donde se investigó la evolución de la recuperación de metal Cu bajo distintas condiciones operacionales y se relacionaron los resultados de recuperación en peso y ley de Cu para cada una de las escorias ensayadas.
- (i) Con granulometría del 70 % bajo 42 μm y enfriamiento natural, se obtuvieron altos valores de recuperación en todas las condiciones; (ii) con enfriamiento combinado y granulometría del 80 % bajo 42 μm , se alcanzó una recuperación de hasta 93.2% bajo condición de planta; (iii) la escoria molida al 70 % bajo 42 μm logró 78.2% de recuperación con la menor relación de reactivos; y (iv) las elevadas leyes de Cu en pruebas con enfriamiento combinado se deben a las altas leyes del mineral de

cabeza, lo que podría distorsionar el efecto de otras variables operacionales. En conjunto, las pruebas confirman que la condición de planta actual, basada en el enfriamiento combinado, ofrece el mejor desempeño.

Con base a los resultados de la simulación de enfriamiento en tazas, se concluye:

- Se definieron las condiciones del mejor ciclo de enfriamiento en 58 h, que contempla 6 h de enfriamiento bajo convección natural y 52 h de convección forzada, esto sin considerar el tiempo requerido para otras actividades u operaciones. Lo anterior bajo la condición de suministro de un caudal de agua de enfriamiento de 4.31 L/min. Con este aspecto, se logró cumplir el objetivo de calcular el ciclo de enfriamiento industrial de la taza utilizada por la Fundación Caletones, lo que proporciona información útil pues los resultados del modelo dependieron de las propiedades térmicas de la escoria y que fueron definidas correctamente en el presente estudio.

Respecto de los resultados obtenidos de la evaluación económica del proceso de enfriamiento en tazas:

- Se efectuó la evaluación económica preliminar de un proyecto de estas características de acuerdo con parámetros de planificación encontrados en documentos técnicos disponibles en planta, siendo catalogado como rentable con base en valores de parámetros económicos como la VAN y TIR. La evaluación económica representa una medida de la factibilidad de implementar el proyecto en la fundición de cobre.

Con base en los resultados del presente estudio, se definen las siguientes recomendaciones:

- Lograr avances en el área a partir de estudios más rigurosos de caracterización física y química de escorias bajo enfriamiento en tazas, realizando pruebas de flotación con granulometría del 90 % bajo 42 μm , para estudiar el efecto sobre las características de los relaves de flotación de escorias.
- Lo anterior no solo permitiría evaluar el efecto de esta operación innovadora de enfriamiento sobre parámetros críticos como la recuperación de cobre y las características de los relaves que se generen, sino también respecto de sus costos y retribuciones los cuales deben ser considerados en la evaluación económica, a través del VAN y el TIR para lograr finalmente la implementación del proyecto.
- Respecto de las simulaciones térmicas, se requiere la implementación de un modelo de solidificación para la escoria en taza con base a la fracción de líquido y su evolución para comprender de mejor forma la evolución del bloque de escoria solidificado y su efecto sobre el proceso de enfriamiento y la calidad de la escoria final.

6. Bibliografía

- [1] M. Bastías, Descripción del proceso fundición Caletones, (2022).
- [2] Y. Tsunazawa, C. Liu, R. Toi, T. Okura, C. Tokoro, Crystal formation and growth by slow cooling for recovery of magnetite, MINERAL PROCESSING AND EXTRACTIVE METALLURGY 128 (2019) 248–255.
- [3] Z. Zivkovic, P. Djordjevic, N. Mitevska, Contribution to the Examination of the Mechanisms of Copper Loss with the Slag in the Process of Sulfide Concentrates Smelting, Min Metall Explor (2018).
- [4] SMS Group, SAF bulletin 2013, (2013).
- [5] A.M. Mihajlović, Ž. Kamberović, M. Korać, The effect of cooling rate of slag from primary copper production in the valorization of copper in the flotation process, (2015).
- [6] G. Alvear, W. Davenport, K. Sole, M. Schlesinger, Extractive metallurgy of copper, Sexta, Elsevier, 2022.
- [7] Worley Chile, Estudio de enfriamiento de canchas. Ingeniería conceptual mejoramiento canchas Enfriamiento de escorias - Caletones, (2022).
- [8] Complejo Metalúrgico Altonorte, Proyecto enfriamiento escoria en ollas, Introducción, (2022).
- [9] Jacobs, Ingeniería básica construcción planta de tratamiento de escorias de convertidores teniente, (2016).
- [10] K.N. Subramanian, N.J. Themelis, Slag composition loses priority to controlled cooling of the slag, JOURNAL OF METALS (1972).
- [11] K. N. Subramanian, N.J. Themelis, Recovery of copper from slags by milling, Centennial Meeting AIME (1971).
- [12] CODELCO, Procesos División Salvador, (n.d.). <https://www.flickr.com/photos/codelco/albums/72157682158280693/> (accessed March 3, 2025).
- [13] P. Godbehere, B. Brooks, Milling of Copper Slags from the Noranda Continuous Smelting Process, (1977).
- [14] N. Guarda, Efecto del enfriamiento controlado en el consumo de energía y la recuperación de valiosos en el procesamiento de escorias de fusión de cobre, (2015).

- [15] E.A. Soto, Control de la Tasa de Enfriamiento de Escorias de Fundición de Cobre, en la Recuperación Secundaria de Cobre, Universidad de Concepción, 2014.
- [16] X. Gao, Z. Chen, J. Shi, Effect of Cooling Rate and Slag Modification on the Copper Matte in Smelting Slag, (2020).
- [17] CODELCO, Resultados reactivos PTE, (2023).
- [18] A. Szklarz, A. Bydalek, P. Migas, A. Pytel, Analysis of Thermal Interactions in the Slag Pots for Transporting Copper Slags, (2021).
- [19] B. Gorai, R. Jana, Characteristics and utilisation of copper slag - a review, Resour Conserv Recycl 39 (2003) 299–313.
- [20] Sergio Castro, Flotación fundamentos y aplicaciones, n.d.
- [21] A.I. Diaz, Propuesta de flotación de cobre presente en escorias de fundición utilizando agua de mar como agua de procesos, Universidad Técnica Federico Santa María, 2021.
- [22] J.B. Yianatos, Flotación de minerales, 2006.
- [23] Y. Çengel, A. Ghajar, Heat and mass transfer: Fundamentals & Applications, Fifth Edition, McGraw-Hill Education, 2015.
- [24] H. Kotzé, P. Pistorius, A heat transfer model for high titania slag blocks, (2009).
- [25] CODELCO, Evaluación Económica - Ollas. Ingeniería Conceptual Mejoramiento Canchas Enfriamiento de Escoria - Caletones, 2023.
- [26] CODELCO, Parámetros de planificación 2025: Antecedentes económicos y comerciales para planificación, 2024.
- [27] Ú. Contreras, Geoquímica Ambiental del Molibdeno de Relaves Flotación de Escorias en Sistema de Transporte y Depositación Tranque Carén DET - Codelco Chile, (2010).
- [28] Maurice C. Fuerstenau, Kenneth N. Han, Principles of Mineral Processing, SME, 2003.

Anexos

Anexo 1. Test de Bond

Escoria bajo enfriamiento natural

Se analizaron dos fracciones granulométricas relevantes: el F_{80} , correspondiente al 80 % pasante de la muestra de alimentación al molino, y el P_{80} , que representa el 80 % pasante de la muestra final tras realizar el test. Ambos valores resultaron fundamentales para determinar el work index del mineral en cada ensayo. La Tabla 20 y Tabla 21 detallan los resultados de análisis granulométricos. En particular, para el producto fue realizado al octavo ciclo del test con 300 g de muestra. Finalmente, la Tabla 22 muestra los parámetros y ciclos del test.

Tabla 20. Análisis granulométrico de alimentación al test de Bond para escoria bajo enfriamiento natural.

Malla, #	Tamaño, μm	Tamaño promedio, μm	Peso		Mineral retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %	
			Peso malla, g	Peso malla + mineral, g				
10	2000	2000		0	0	0	100	
20	850	1304	422	704	282	58.8	58.9	41.1
70	212	526	352	512	160	33.4	92.3	7.7
100	150	281	347	382	35	7.3	99.6	0.4
140	106	173	341	343	2	0.4	100	0
170	88	123	344	344	0	0.0	100	0
200	74	95	329	329	0	0.0	100	
-200	-		470	470		0.0	100	

Tabla 21. Análisis granulométrico de producto al test de Bond para escoria bajo enfriamiento natural.

Malla, #	Tamaño, μm	Tamaño promedio, μm	Peso		Mineral retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %	
			Peso malla, g	Peso malla + mineral, g				
100	150	150	348	352	4	1.4	1.4	98.6
120	121	135	348	359	11	3.7	5.1	94.9
140	106	120	341	373	32	10.8	15.9	84.1
170	88	103	344	377	33	11.2	27.1	72.9
200	74	87	490	514	24	8.1	35.3	64.7

270	53	68	329	377	48	16.3	51.5	48.5
-270	-	-	259	402	143	48.5	100	0.0

Tabla 22. Cálculo de parámetros para test de Bond para escoria bajo enfriamiento natural.

Revoluciones	Ciclo	Alimento fresco					suma Q+T	Q(I)	gramos x revolución	Producto		F/Q	Gbp	phi_1(p1)
		Q	T	Peso+100M	Peso-100M	Peso+100M (T)				Peso-100M				
100	1	1598	0	1591.32	6.67964	1598	no rev	no rev	1461.7	136.30	1.00	1.2962	8.5294	
370	2	136.30	1461.7	1597.43	0.56973	1598	456.00	1.296	1246.2	351.80	11.71	0.9493	22.0150	
479	3	351.80	1246.2	1596.53	1.47052	1598	455.10	0.949	1193.6	404.40	4.54	0.8404	25.3066	
541	4	404.40	1193.6	1596.31	1.69039	1598	454.88	0.840	902.2	695.80	3.95	1.2825	43.5419	
354	5	695.80	902.2	1595.09	2.90844	1598	453.66	1.282	826.8	771.20	2.30	2.1719	48.2603	
209	6	771.20	826.8	1594.78	3.22362	1598	453.35	2.172	1318.2	279.80	2.07	1.3250	17.5094	
344	7	279.80	1318.2	1596.83	1.16956	1598	455.40	1.325	1132.3	465.70	5.71	1.3516	29.1427	
336	8	465.70	1132.3			1598	454.62	1.352	1344.4	453.60	3.4	1.3485	28.3853	
337	9	453.60	1144.4			1598	454.68	1.349	1598.0		3.5	-	-	

Muestra enfriamiento combinado

En la Tabla 23 y Tabla 24 se detallan los análisis granulométricos para alimentación y producto del test de Bond con la escoria bajo enfriamiento combinado. La Tabla 25 muestra los ciclos y parámetros relacionados con la prueba finalizada al sexto ciclo.

Tabla 23. Análisis granulométrico de alimentación al test de Bond para escoria bajo enfriamiento combinado.

Malla, #	Tamaño, μm	Tamaño promedio, μm	Peso malla, g	Peso malla + mineral, g	Peso mineral, g	Mineral retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %
10	1651	1651	-	-	0	0	0	100
20	841	1178.3	422	533	111	37.1	37.1	62.9
70	210	497.5	345	473	128	42.8	79.9	20.1
100	150	273.2	338	380	42	14.1	93.9	6.0
140	105	169.4	340	353	13	4.4	98.3	1.7
170	88	122.1	343	345	2	0.7	99.0	1.0
270	53	80.4	329	330	1	0.3	99.3	0.7
-270			260	262	2	0.7	100.0	0.0

Tabla 24. Análisis granulométrico de producto tras test de Bond para escoria bajo enfriamiento combinado.

Malla, #	Tamaño, μm	Tamaño promedio, μm	Peso malla, g	Peso malla + mineral, g	Peso mineral (g)	Mineral retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %
100	150	150	338	354	16	5.5	5.5	94.5
120	121	135	348	404	56	19.1	24.6	75.4
140	106	120	341	391	50	17.1	41.6	58.4
170	88	103	343	376	33	11.3	52.9	47.1
200	74	87	390	405	15	5.1	58.0	42.0
270	53	68	328	361	33	11.3	69.3	30.7
-270	-	-	371	461	90	30.7	100	0.0

Tabla 25. Cálculo de parámetros para test de Bond para escoria bajo enfriamiento combinado.

Revoluciones	Ciclo	Alimento fresco					suma Q+T	Q(i)	gramos x revolución	Producto		F/Q	Gbp	phi_1(p1)
		Q	T	Peso +100M	Peso -100M	eso +100M (T				Peso -100M				
100	1	1517	0	1425.68	91.32340	1517.0	no rev	no rev	1304.8	212.20	1.00	1.2088	13.9881	
348	2	212.20	1304.8	1504.23	12.77444	1517.0	420.65	1.209	1248.8	268.20	7.15	0.7340	17.6796	
569	3	268.20	1248.8	1500.85	16.14564	1517.0	417.28	2.554	840.5	676.50	5.66	1.1615	44.5946	
338	4	676.50	840.5	1476.27	40.72530	1517.0	392.70	6.604	978.0	539.00	2.24	1.4738	35.5307	
272	5	539.00	978.0	1484.55	32.44780	1517.0	400.98	4.983	1085.2	431.80	2.81	1.4678	28.4641	
278	6	431.80	1085.2	1491.01	25.99436	1517.0	407.43	3.994	1517.0		3.5			

Anexo 2. Diagrama de Heisler

El diagrama de Heisler es la forma simplificada de realizar el cálculo de temperaturas por elementos finitos para geometrías aproximadas al problema real. Para modelaciones de enfriamiento, en particular, se esperan diferencias en las temperaturas del centro y superficie. La simulación con la geometría de la taza obtuvo una temperatura de 450.5 °C para un llenado de taza del 66.9 % considerando un día de enfriamiento natural, y se realizó una comparativa con la simulación vista en literatura [5]. La diferencia es debido a que el Diagrama de Heisler no considera el efecto de la radiación en la superficie y contornos de la taza, además de presentar diferencias en la geometría, de cualquier manera, el aire y radiación son entendidos como enfriamiento natural con el medio.

La temperatura en la superficie al cabo de un día de simulación MATLAB fue de 273.9 °C, el valor obtenido es considerado más preciso debido a la geometría utilizada, que es semejante a la taza. En contraste, la temperatura calculada en la superficie según lo calculado en resultó de 150 °C. La literatura considera la Figura 10 y la Figura 11 para calcular estas temperaturas, en conjunto con la ecuación (11) y (12). El perfil de temperaturas en el centro y superficie de la simulación se observa en la Figura 52, aplicando enfriamiento natural.

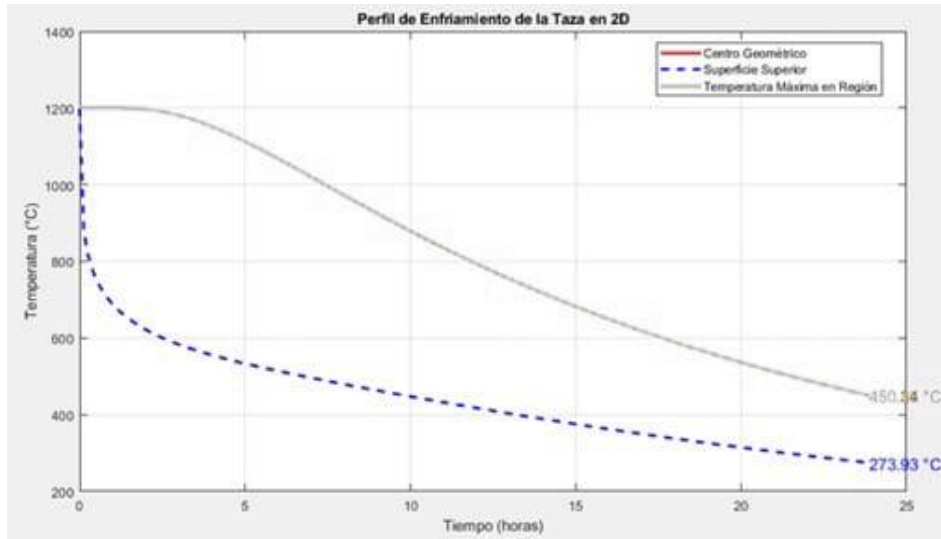


Figura 52. Perfil de temperatura en el centro y superficie luego de un día aplicando enfriamiento natural.

Anexo 3. Simulación MATLAB

Vectores de simulación MATLAB

Las variables de trabajo empleadas en la simulación con MATLAB se detallan a continuación. Estas, corresponden a vectores para la simulación realizada y algunos de ellos son: parámetros de geometría de la taza (Tabla 26), vectores de altura en función del nivel de llenado (Tabla 27), semiejes mayores y menores en función del llenado en (Tabla 28), la relación entre el nivel de llenado de taza y tonelaje métrico (Tabla 29). Finalmente, la relación entre el coeficiente de transferencia de calor convectivo y la velocidad del agua de enfriamiento (Tabla 30).

Tabla 26. Parámetros para la geometría de la taza.

Variable	Nombre	Valor, m
R1	Radio inferior fijo	1.16
R2_mayor	Radio superior de la taza llena	2.08
H	Altura total del tronco de cono	2.92
R2_menor	Semeje menor	1.55

Tabla 27. Vectores de altura en función con llenado de taza.

Nivel de llenado, %	10	20	30	40	50	60	65	70	75	80
Altura, m	0.32	0.64	0.95	1.27	1.59	1.91	2.06	2.22	2.38	2.54

Tabla 28. Vector de Semiejes mayor y menor en función de llenado de taza.

R_fill, m	1.26	1.36	1.46	1.56	1.66	1.76	1.81	1.86	1.91	1.96
R2_fill, m	1.20	1.24	1.28	1.32	1.37	1.41	1.43	1.46	1.48	1.50

Tabla 29. Relación nivel de llenado de taza y tonelaje de escoria.

Nivel de llenado, %	10	20	30	40	50	60	65	70	75	80
Tonelaje de escoria, t	3.1	6.9	11.6	17.1	23.6	31.1	35.3	39.7	44.5	49.6

Tabla 30. Relación entre velocidad del agua y coeficiente transferencia de calor convectivo en convección forzada.

Velocidad del agua, m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Coeficiente H, W/m ² ·K	228.7	246.3	254.6	259.6	263.0	265.6	267.3	268.6	269.8

Anexo 4. Balance de calor

Cantidad de agua requerida

La cantidad de agua requerida como caudal de enfriamiento está expresado en L/min. El valor de referencia utilizado en el enfriamiento en ollas por Altonorte es entre 4 – 6 L/min, también expresado entre 0.345 – 0.516 m³/t. En particular, para encontrar el caudal ajustado fue considerado el factor de eficiencia de agua percolada y vaporización de agua. Con esto, se cumple el balance de energía al remover calor de la escoria en taza con los tres mecanismos, es decir, por efecto del agua, aire y radiación alcanza el 100 % de remoción.

Calculando requerimiento:

$$h_{fg} = 620 \text{ kcal/kg} \cdot 4.184 \text{ J/cal} \cdot \frac{1000 \text{ cal}}{1 \text{ kcal}} = 2.59 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$Q_{\text{agua}} = h_{\text{agua}} \cdot A_{\text{placa, plana}} \cdot \Delta T_{\text{agua}} \cdot t_{\text{enf, forzado}} \cdot \varepsilon_{\text{percolación}}$$

$$Q_{\text{agua}} = 228.68 \text{ W/m}^2 \cdot 11.22 \text{ m}^2 \cdot (97 - 20) \text{ K} \cdot 187,200 \text{ s} \cdot 0.7445 = 2.70 \times 10^{10} \text{ J [W} \cdot \text{s]}$$

$$m_{\text{agua}} = \frac{Q_{\text{agua}}}{c_{p(\text{agua})} \cdot (97 - T_{\text{agua}}) + \varepsilon_{\text{vaporización}} \cdot h_{fg}} \Delta T_{\text{agua}}$$

$$m_{\text{agua}} = \frac{2.70 \times 10^{10} \text{ J}}{4195 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot (97 - 20) \text{ K} + 0.65 \cdot 2.59 \times 10^6 \text{ J/kg}} = 1.3448 \times 10^4 \text{ kg}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{m_{\text{agua}}}{t_{\text{enf, forzado}}} = \frac{1.3448 \times 10^4 \text{ kg}}{187,200 \text{ s}} = 0.0718 \text{ kg/s}$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{0.0718 \text{ kg/s}}{999.7 \text{ kg/m}^3} = 7.186 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Convirtiendo a unidades de L/min:

$$7.186 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 4.31 \text{ L/min}$$

$$4.31 \text{ L/min} \cdot \frac{1440 \text{ min}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \cdot 52 \text{ h (ciclo)} \cdot \frac{1 \text{ taza}}{36.91 \text{ t}} = 0.3643 \text{ m}^3/\text{t}$$

Siendo h_{fg} la vaporización del agua en (J/kg), Q_{agua} el calor removido por el agua en (J), h_{agua} el coeficiente de transferencia de calor en convección forzada por el agua en (W/m²·K), $A_{\text{placa, plana}}$ el área superficial de la escoria por correlación de placa plana en (m²), ΔT_{agua} la diferencia de temperatura del agua en (°C), $t_{\text{enf, forzado}}$ el tiempo de enfriamiento forzado en (s) y $\varepsilon_{\text{percolación}}$ la eficiencia de percolación del agua en (%). Además, m_{agua} indica la masa del agua en (kg), $c_{p(\text{agua})}$ la capacidad calorífica del agua en (J/kg·K), y \dot{m}_{agua} siendo el flujo másico del agua en (kg/s).

Por ello, para ajustar el balance de calor se utilizó el parámetro de $\varepsilon_{\text{vaporización}}$ y $\varepsilon_{\text{percolación}}$ con los valores de 65 % y de 74.5 % respectivamente. El agua ebulle a 97 °C a una altura de 1,570 msnm y el valor de la entalpía fue obtenido de la referencia de cálculo utilizada en canchas.

Correlaciones convección natural

El coeficiente de transferencia de calor convectivo en convección natural fue calculado por medio de correlaciones empíricas con el objetivo de aplicarlo al balance de energía. Para esto, calculando el número de Nusselt (8) en función de los números de Rayleigh (Ra_D) y Prandtl (Pr) para luego relacionarlo con el coeficiente de transferencia de calor convectivo. Los dos números mencionados anteriormente son utilizados en la correlación de Churchill y Chu para convección natural. En particular, la correlación (16) fue utilizada para convección natural en la placa plana y la correlación (17) para las paredes de la taza, asumiendo una geometría cilíndrica. En tanto, para los coeficientes de la ecuación (16) se utilizó $C = 0.10$ y $n = 1/3$ para un flujo turbulento.

$$Nu_L = C \cdot Ra_L^n \quad (16)$$

$$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 \cdot Ra_D^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (17)$$

Ajuste H natural

El factor de ajuste del coeficiente de transferencia de calor convectivo para la simulación, tanto en la Fase 1 y Fase 2 con la expresión de $H_{\text{ponderado}}$ en (W/m²·K) (18) fue necesario para reconciliar el balance de energía junto con la simulación realizada. El factor de ajuste $k = 0.7563$, o sea, el divisor que ajusta las correlaciones empíricas utilizadas en el balance de energía siendo H_{placa} para la placa plana en (W/m²·K) y H_{cilindro} en las paredes de la taza en (W/m²·K), y es justificación para considerar el coeficiente convectivo natural ponderado por efecto de la geometría de la taza y las correlaciones que la gobiernan.

$$H_{\text{ponderado}} = \frac{H_{\text{placa}} + \text{promedio}(H_{\text{cilindro}})}{0.7563} \quad (18)$$

$$H_{\text{ponderado}} = \frac{5.3701 + 5.975}{0.7563} = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Correlaciones convección forzada

Para el enfriamiento con agua representado por la segunda fase, se utilizó la correlación de Churchill y Bernstein (19), la cual calcula el número de Nusselt (Nu_D) en función del número de Reynolds (Re_D) y de Prandtl (Pr). Utilizando la correlación se relacionó con la velocidad del agua de la Tabla 30.

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (19)$$

Temperatura media logarítmica

Corresponde a un promedio logarítmico entre la diferencia de temperatura de dos fluidos, en particular, fue utilizada para el calcular la temperatura promedio de la superficie de la escoria en taza, para el balance de calor. Por ello, entre mayor es esta temperatura media logarítmica, existe una mayor cantidad de calor siendo transferido. La ecuación (20) muestra la expresión para esta temperatura promedio.

$$\Delta T_{\text{logarítmica}} = \frac{T_{\text{superficie}} - T_{\text{aire}}}{\ln\left(\frac{T_{\text{superficie}}}{T_{\text{aire}}}\right)} \quad (20)$$

Siendo $\Delta T_{\text{logarítmica}}$ la temperatura media logarítmica en ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\text{superficie}}$ es la temperatura de la escoria en la superficie al tiempo inicial en ($^{\circ}\text{C}$) y T_{aire} la temperatura del aire de enfriamiento en ($^{\circ}\text{C}$).

Temperatura promedio de la superficie

La temperatura media logarítmica fue definida y sirve para calcular la temperatura promedio de la superficie. Sin embargo, se requiere un valor más preciso para incluir la temperatura obtenida de la simulación en el balance de calor. El valor para la temperatura promedio en la superficie es calculado mediante la temperatura promedio de todos los vectores de temperatura obtenidos como salida en la simulación, para cada nivel de llenado. Asimismo, existe una diferencia de 21.37 °C en lo calculado con la expresión (20). Por ende, en términos de ajuste para el balance de energía y reconciliar con la simulación realizada, resulta preciso hacer este ajuste.

Anexo 5. Evaluación económica

Antecedentes económicos

En las Tablas se detallan las proyecciones en el cambio del dólar (Tabla 31), el precio del cobre (Tabla 32) y costo de refinación del cobre (Tabla 33).

Tabla 31. Proyecciones en el cambio del dólar respecto con el peso chileno según antecedentes económicos [26].

Cambio dólar, clp/usd	2024	2025	2026	2027	2028	Largo plazo
Nivel Superior	962	943	921	905	871	892

Tabla 32. Proyecciones en el precio del cobre en c/lb según parámetros de planificación [26].

Cobre, c/lb	2024	2025	2026	2027	2028	Largo plazo
Nivel bajo	406	385	377	375	397	338

Tabla 33. Proyecciones del costo de refinación en c/lb según parámetros de planificación [26]

2024	2025	2026	2027	2028	2029
8.1	6.6	7.3	9.1	9.8	10.1

Balance de masa

Con base al balance de masa de la PTE, fue aplicado en el diagrama de la Figura 53 para emplear una comparativa entre el método actual de enfriamiento en canchas y el método propuesto de enfriamiento en tazas. Asimismo, esta medida comparativa evalúa la efectividad del proyecto respecto a parámetros metalúrgicos.

El diagrama presenta además una ley de alimentación de 8 % en Cu que es alimentada a la flotación de escorias, obteniendo un relave actual de 0.65 % en Cu, lo que disminuye a un contenido de 0.4 % en Cu en este escenario con base al contenido de colas revisado en literatura. Cabe destacar que, se presenta el aumento porcentual de la recuperación de cobre cercana a 96 %, es decir, 1.4 puntos porcentuales adicionales y por ende, aumento de la ley de concentrado que retorna a la unidad FUCO.

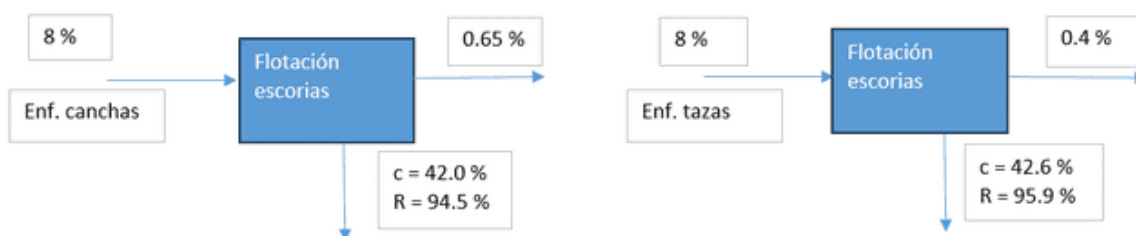


Figura 53. Diagrama de balance de masa comparativo en la PTE: enfriamiento actual en canchas y enfriamiento en tazas.

Flujo de caja

Con base a los antecedentes económicos y el balance de masa, y en base a los resultados obtenidos de VAN y TIR, el flujo de caja del proyecto con implementación del enfriamiento en tazas se detalla en la Tabla 34, realizado hasta el décimo año de evaluación. Los resultados están en dólares estadounidenses (USD).

Tabla 34. Flujo de caja al año diez en la evaluación económica de la implementación del enfriamiento en tazas.

FLUJO DE CAJA	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(+) Ingreso	\$ 18,339,957	\$ 17,025,352	\$ 16,847,756	\$ 17,840,669	\$ 15,075,817	\$ 21,155,516	\$ 23,719,505	\$ 26,993,889.7	\$ 30,750,494.3		
(-) Insumos PTE											
(-) Costo de operación CAITE	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828	\$ -3,903,828
(-) Costo de agua	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175	\$ -3,587,175
(-) Costo energía PTE											
(-) Costo de mantención tazas	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818	\$ -1,035,818
(=) EBITDA	\$ 9,813,136	\$ 8,904,331	\$ 8,320,934	\$ 8,498,530	\$ 8,320,934	\$ 9,313,847	\$ 6,548,996	\$ 12,628,695	\$ 15,192,684	\$ 18,407,068	\$ 22,223,613
(-) Depreciación											
(-) Valor Libro											
(-) Pérdidas de ejercicios anteriores	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(=) Resultado Antes de Impuestos	\$ 9,813,136	\$ 8,904,331	\$ 8,320,934	\$ 8,498,530	\$ 8,320,934	\$ 9,313,847	\$ 6,548,996	\$ 12,628,695	\$ 15,192,684	\$ 18,407,068	\$ 22,223,613
(-) Impuestos	\$ -3,925,254	\$ -3,561,732	\$ -3,328,374	\$ -3,399,412	\$ -3,328,374	\$ -3,725,539	\$ -2,619,598	\$ -5,051,478	\$ -6,077,073	\$ -7,362,827	\$ -8,889,445
(=) Resultado Después de Impuestos	\$ 5,887,882	\$ 5,342,599	\$ 4,992,561	\$ 5,099,118	\$ 4,992,561	\$ 5,588,308	\$ 3,929,397	\$ 7,577,217	\$ 9,115,610	\$ 11,044,241	\$ 13,334,168
(+) Depreciación											
(+) Valor Libro											
(+) Pérdidas de ejercicios anteriores											
(=) Resultado Operacional Neto	\$ 5,887,882	\$ 5,342,599	\$ 4,992,561	\$ 5,099,118	\$ 4,992,561	\$ 5,588,308	\$ 3,929,397	\$ 7,577,217	\$ 9,115,610	\$ 11,044,241	\$ 13,334,168
(-) Inversión Activos Fijos	\$ -10,358,182										
(-) Inversión Activos Intangibles											
(-) Inversión Capital de Trabajo	\$ -2,131,705										
(+) Valor Desecho											
(=) Flujo de Caja	\$ -12,489,887	\$ 5,887,882	\$ 5,342,599	\$ 5,099,118	\$ 4,992,561	\$ 5,588,308	\$ 3,929,397	\$ 7,577,217	\$ 9,115,610	\$ 11,044,241	\$ 13,334,168
Flujos de Caja Descd	\$ -12,489,887	\$ 55,328,399.69	\$ 44,375,503.08	\$ 33,779,272.90	\$ 33,348,684.50	\$ 33,392,102.53	\$ 32,158,501.12	\$ 33,766,810.41	\$ 34,100,978.75	\$ 34,496,508.05	\$ 34,912,958.97
Flujos Acumulado	\$ -12,489,887	\$ -7,161,487	\$ -2,785,984	\$ 993,289	\$ 4,341,973	\$ 7,734,076	\$ 9,892,577	\$ 13,659,387	\$ 17,760,366	\$ 22,256,874	\$ 27,169,833

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

Título: Efecto del enfriamiento de escorias en la recuperación de cobre por flotación

Nombre Memorista: Sebastián Matías Fernández Espinoza

Modalidad	Investigación	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha	26/06/25	Prof. Víctor Parra S. Prof. Andrés Ramírez M.
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Ingeniero Supervisor: Francisco Castro B.
		Institución: CODELCO

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Eduardo Balladares V.	
-----------------------------	--

Resumen

Se estudió la factibilidad técnica y económica de implementar el enfriamiento de escorias de cobre provenientes de etapas de conversión, sustituyéndolo por enfriamiento en tazas, tanto en su variante natural como combinada. Para ello, se caracterizó la escoria mediante análisis químico y mineralógico, pruebas de dureza y ensayos de flotación. En estos ensayos, se acondicionó la celda durante cinco minutos y se operó durante doce minutos a 6 L/min de aire y 30 % de sólidos, aplicando dosis de planta, media y baja relación de colectores para evaluar la recuperación de metal valioso, así como la ley y la recuperación en peso. Posteriormente, se desarrolló un modelo en MATLAB basado en la geometría de la taza y en las propiedades de la escoria (ρ , c_p , k). En la primera fase, se simuló el enfriamiento natural por aire y radiación en las aristas, y en la segunda, el enfriamiento forzado con agua en la superficie. Mediante análisis FEA y una animación GIF, se determinó que el tiempo óptimo de enfriamiento fue de 58 horas (seis horas a temperatura ambiente y 52 horas con agua), con caudales de 3,79 L/min para un llenado del 40 % y de 4,31 L/min para un llenado del 66,9 %, procesando 2 880 t de escoria por día y requiriendo 78 tazas por ciclo. El modelo también validó un coeficiente de transferencia de calor natural $K = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y demostró que la taza de mayor volumen (700 ft³ en Caletones frente a 495 ft³ en Altonorte) removía más calor en los niveles de llenado simulados. Finalmente, la evaluación económica arrojó un VAN de 27 169 833 USD, una TIR del 22 % y un período de recuperación de cuatro años, considerando la inversión en 110 tazas, un costo de mantención anual del 10 % y proyecciones del precio del cobre en USD para ajustar la rentabilidad del proyecto. Este análisis integral permite visualizar con mayor claridad la viabilidad y el impacto potencial de la implementación del nuevo sistema de enfriamiento en la operación.