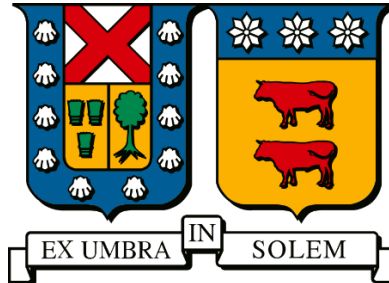


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



**PRETRATAMIENTO DE ESCORIA DE CODELCO-DVEN USANDO
MICROONDAS Y LIXIVIACIÓN CLORURADA ÁCIDA EN MEDIO OXIDANTE
UTILIZANDO PERÓXIDO DE HIDRÓGENO.**



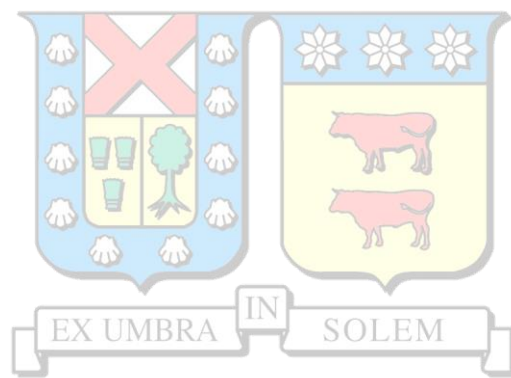
Presentado por:

DIEGO IGNACIO BAEZ ORMEÑO

Memoria para optar al Título de:
INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

Profesor Guía
Dr. Jorge Ipinza Abarca

Santiago, junio de 2023



AGRADECIMIENTOS.

Empiezo agradeciendo a mis padres los cuales se esforzaron en educarme e inculcarme objetivamente valores y principios, los cuales me orientan a discernir entre lo que es correcto, lo que no y sacar lo mejor de mí. A mi hermano, por su compañía y paciencia incondicional. Además, la entrega de afecto y confianza de todos mis familiares.

A mis compañeros de universidad, los cuales, aunque distintas carreras estuvieron desde el principio, acompañándome en los momentos difíciles; que, aunque ya no estén, siguen presentes infinitamente en mi corazón. Agradezco también a los maquinas con los que juego por internet, entreteniéndonos, compartiendo y distrayéndonos, divirtiéndonos en cada momento, personas que en cada momento difícil estuvieron levantándome el ánimo y motivando los momentos difíciles, que estaban fuera de mi sitio de confort.

Agradecer a la sala de musculación, ya que desde mi inicio universitario pude liberar estrés, ira y tristeza. Dar las gracias a la profesora Karen, a Claudio y a Erik que estuvieron en dichas sesiones de entrenamiento tanto funcional, basquetbol o pesas.

Agradecer al deporte, sobre todo el atletismo, que, aunque nunca he sido muy bueno realmente lo amo con locura; lo mismo el basquetbol, el cual disfruto ver y que seguiré viendo eternamente, sobre todo al equipo de la universidad, con el cual estaré en las buenas y en las malas, apoyando al máximo. Agradecer a mis entrenadores y compañeros quienes juntos aprendimos liderazgo, disciplina y esfuerzo. Lo aprendido no se pierde y luego, con el tiempo, solo se refuerza.

Agradecer a mi profesor guía el doctor Jorge Ipinza, que sin su paciencia y determinación no hubiera podido realizar esta tesis y llegar tan lejos.

Quiero hacer una mención especial de agradecimiento a mis amigos más cercanos, a la Yoyi, Sofi, Naty, Javi, Yayita, Greek, Aldo, Shenkei y Andrés, los cuales estuvieron siempre y espero que esto siga así. Los nombres los escribí aleatoriamente y no tiene que ver con la importancia que tienen cada uno para mí, ellos lo saben.

“El mal es el mal. Menor, mayor, mediano, es igual, las proporciones son convenientes y las fronteras son borrosas. No soy un santo ermitaño, no siempre he obrado bien. Pero si tengo que elegir entre un mal y otro, prefiero no elegir en absoluto”

RESUMEN

La escoria de cobre es un subproducto de la fundición de cobre que contiene una variedad de metales valiosos, como cobre, hierro, plomo y zinc, así como impurezas como sílice y alúmina. Para recuperar los metales valiosos de la escoria, se utilizan varios procesos, que incluyen la lixiviación, flotación y fusión. La elección del proceso depende de la composición de la escoria y del tipo de metales valiosos que se desean recuperar. Por lo general, es necesaria una reducción de tamaño para generar la liberación adecuada para la extracción, esto se debe a su matriz vítrea y poco porosa, que afecta la difusión de los reactivos para producir las reacciones químicas de la disolución de los metales de interés económico. El uso de nuevas tecnologías para aumentar las fracturas dentro de la matriz ayudaría con este objetivo, por lo que se propone un pretratamiento con radiación de microondas utilizando escorias con tamaño grueso (P_{80} igual a 2 pulgadas), que posteriormente a través de un enfriamiento brusco o temple, formaría microgrietas en el cuerpo de la escoria, para continuar con un pretratamiento químico en un medio $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$ para disolver algunos sulfuros metálicos y terminar con una lixiviación clorurada en medio ácido sulfúrico, sin y con presencia de peróxido de hidrógeno, en la búsqueda de una extracción de cobre que haga viable el proceso planteado.

Se obtuvo que la extracción de cobre en las primeras 24 h aumenta en 0,9% Cu usando microondas. La adición de peróxido permite un aumento de 0,6% Cu sin microondas, la que es mucho menor a la de 1,7% Cu obtenida en la lixiviación convencional, mostrando el efecto del ácido sulfúrico a menores. Obteniendo finalmente una extracción de cobre de 9.3%, en un total de 11 días para el procedimiento con mejores resultados: pretratamiento de temple, con curado y lixiviación clorurada en ambiente oxidativo, con un consumo total de 30 kg de peróxido de hidrógeno por tonelada de escoria.

ABSTRACT

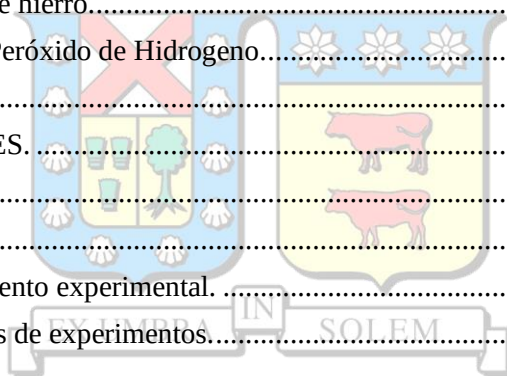
Copper slag is a by-product of copper smelting that contains a variety of valuable metals, such as copper, iron, lead and zinc, as well as impurities such as silica and alumina. To recover the valuable metals from the slag, several processes are used, including leaching, flotation and smelting. The choice of process depends on the composition of the slag and the type of valuable metals to be recovered. Generally, size reduction is necessary to achieve proper liberation for improved extraction. This is due to its vitreous and poorly porous matrix, which affects the diffusion of reagents necessary for the chemical reactions to dissolve the economically valuable metals. The use of new technologies to increase fractures within the matrix would aid in this objective. Therefore, a pre-treatment with microwave radiation is proposed using coarse-sized slag (P_{80} equal to 2 inches), which would then be rapidly cooled or quenched to form micro-fractures within the slag body. This would be continued by a chemical pre-treatment in a $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$ medium to dissolve some metallic sulfides, and, a chloride leaching in an acidic medium, with and without the presence of hydrogen peroxide, in search of a viable extraction of copper as envisioned in the process.

It was obtained that the recovery in the first 24 hours increases 0.9% comparing only the use of microwaves and that the peroxide saw an increase of 0.6% and 1.6% compared to the process without microwaves and the one without microwaves with conventional leaching, respectively. Finally obtaining a copper recovery of 9.3%, in a total of 11 days for the procedure with better microwave pretreatment results, with chloride curing and chloride leaching in oxidative environment, with a consumption of 30 kg of hydrogen peroxide per ton of slag.

INDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
INDICE.....	6
INDICE DE FIGURAS.....	8
INDICE DE TABLAS	10
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Hipótesis.....	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo General.	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
2 ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1 Aspectos generales de la escoria de cobre.....	14
2.1.1 Caracterización de escorias.....	14
2.1.2 Clasificación de escorias.....	16
2.2 Conminución de escoria	17
2.3 Aglomeración y curado	22
2.3.1 Curado en medio NaCl-H ₂ SO ₄	26
2.4 Lixiviación.	27
2.4.1 Cinética de especies de cobre.	28
2.4.2 Lixiviación en medio sulfúrico clorurado.	32
2.4.3 Lixiviación con agente oxidante.	34
2.4.4 Bio lixiviación.	36
2.4.5 Lixiviación de Escoria de cobre.....	37
2.5 Flotación de partículas finas	41
2.5.1 Cavitation System.....	42
2.5.2 Flotación de escoria	43
2.6 Microondas.....	43

2.6.1	Balance de energía.....	45
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	47
3.1	Materiales.....	47
3.2	Ensayos de caracterización física y química de la escoria.....	48
3.2.1	Distribución granulométrica.....	48
3.2.2	Densidad absoluta, humedad natural, de impregnación y CEA.....	49
3.3	Pretratamiento con exposición a rayos de microondas.....	49
3.4	Consumo de peróxido de hidrógeno.....	51
3.5	Lixiviación en botellas.....	50
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1	Caracterización física y química.....	52
4.2	Pruebas de microondas.....	53
4.3	Resultados de los ensayos de lixiviación en botella.....	59
4.3.1	Cinética de extracción de cobre.....	59
4.3.2	Extracción de hierro.....	61
4.3.3	Adición de Peróxido de Hidrogeno.....	64
5	CONCLUSIONES.....	67
6	RECOMENDACIONES.....	68
	ANEXOS.....	74
	ANEXO A. Equipos.....	74
	ANEXO B. Procedimiento experimental.....	78
	ANEXO C. Resultados de experimentos.....	82



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de conminución en la Planta de Tratamiento de Escorias (PTE) de Codelco-DET.....	18
Figura 2.2: Extracción de cobre según el tamaño de partícula. (Bulatovic, 2007).	19
Figura 2.3: Esquema de equipos necesarios para conminución según tamaño necesario (Minero, 2006).	20
Figura 2.4: Equipos y sus valores típicos de reducción de tamaño (Minero, 2006).	20
Figura 2.5: Ejemplo de circuito con chancado de 3 etapas clásico previo a ingreso al molino de barras (Minero, 2006).	21
Figura 2.6: Ejemplo circuito de chancado de 1 -2 etapas típico previo a ingreso a minino AG-SAG (Minero, 2006).	21
Figura 2.7: Migración de finos con la adición de distintos aglutinantes (Lewandowski, 2009).	22
Figura 2.8: Diagrama de Pourbaix para sistema cobre-agua a 25° C (Domic, 2001).	23
Figura 2.9: Diagrama de Pourbaix para sistema cobre-cloro-agua a 25° C, Concentraciones molares unitaria para todas las especies y presión atmosférica. (Ipinza, 2014).	24
Figura 2.10: Efecto de la adición de H_2SO_4 en la disolución del SiO_2	25
Figura 2.11: Reacción de polimerización del ácido orto silícico en agua. (Melgar & Torres, 2008).	25
Figura 2.12: Esquema del modelo de núcleo no reaccionado.	29
Figura 2.13: Comportamiento modelo núcleo sin reaccionar.	30
Figura 2.14: Control químico. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.	31
Figura 2.15: Control difusional. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.	31
Figura 2.16: Efecto del pCL sobre el potencial de equilibrio en sistema Cu-Cl-H ₂ O (Ipinza, 2014).	33
Figura 2.17: Curva de Extracción de cobre vs tiempo en medio clorado a distintas temperaturas.	34
Figura 2.18: Reducción de hierro ferroso y peróxido de hidrógeno durante la oxidación de EO/PO(fuente: Kitis et al., 1999).	35
Figura 2.19: Curva de extracción de cobre vs tiempo (Bobadilla-Fazzini et al., 2017).	36
Figura 2.20: Hierro total vs tiempo de reacción (Bobadilla-Fazzini et al., 2017).	37

Figura 2.21: Curva de extracción de hierro y cobre según concentración de HCl, temperatura ambiente y lixiviación agitada a 350 [min ⁻¹] (Dimitrijevic et al., 2017).	39
Figura 2.22: Curva de extracción de hierro y cobre según concentración de H ₂ O ₂ , 1M de HCl, temperatura ambiente y lixiviación agitada a 350 [min ⁻¹] (Dimitrijevic et al., 2017).	40
Figura 2.23: Curva de extracción de hierro y cobre con o sin agitación, temperatura ambiente (Dimitrijevic et al., 2017).	40
Figura 2.24: Curva de extracción de hierro y cobre a diferentes temperaturas y lixiviación agitada a 350 [min ⁻¹] (Dimitrijevic et al., 2017).	41
Figura 4.1: Granulometría de la muestra de escoria fundición Codelco ventana.	52
Figura 4.2: Muestra 1 punto de muestra 1 a microscopio x5 natural zoom en fractura.	54
Figura 4.3 Muestra 1 punto de muestra 1 a microscopio x5 pos-exposición junto con muestra de 500[g] zoom en fractura.	54
Figura 4.4: Muestra 1 punto de muestra 1 a microscopio x5, Foto 1 muestra preexposición, foto 2 prueba con exposición de 5 [min] con muestra de 500 [g], foto 3 y 4 con exposición por 1 [min] muestra solitaria.	55
Figura 4.5: Muestra 1 punto de muestra 2 a microscopio x5, Foto 1 muestra preexposición, foto 2 prueba con exposición de 5 [min] con muestra de 500 [g], foto 3 y 4 con exposición por 1 [min] muestra solitaria.	55
Figura 4.6: Muestra 2 punto de muestra 1 a microscopio x5.	56
Figura 4.7: Muestra 2 punto de muestra 1 a microscopio x5 pos-exposición de 3 [min].	56
Figura 4.8: Comparativa de muestra 2 punto de muestra 1 a microscopio x10 antes y después respectivamente.	57
Figura 4.9: Cinética de extracción de cobre total para diferentes condiciones experimentales.	59
Figura 4.10: Concentración de ion de cobre para las pruebas de lixiviación.	60
Figura 4.11: Extracción y concentración de cobre total luego de 11 días.	61
Figura 4.12: Extracción de hierro total de las pruebas realizadas.	62
Figura 4.13: Concentración de ion ferroso para los tiempos de muestra.	63
Figura 4.14: Extracción de hierro total luego de 11 días.	64
Figura 4.15: curvas de potencial redox vs el tiempo, mostrando el momento de regulación del potencial redox.	65
Figura 4.16: Decrecimiento de potencial redox durante el tiempo, para distintas inclusiones de H ₂ O ₂ en ml durante la lixiviación.	66
Figura 0.1: Experimento del comportamiento refino utilizado a medida que se agrega H ₂ O ₂ .	92

INDICE DE TABLAS

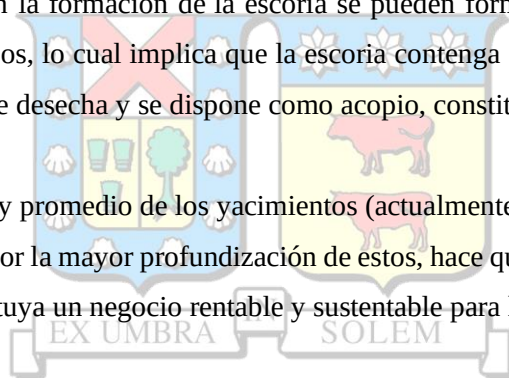
Tabla 2.1: Analisis de fluorescencia de rayos x, Muestra fundición ventana o DVEN (OYARZUN KNEER, 2013), Codelco, División El Teniente - Fundición Caletones o FCAL (Orizola Gómez, 2006) y otro (Al-Jabri et al., 2009).	15
Tabla 2.2: Valores de work index para distinto tipos de rocas.	18
Tabla 2.3: Velocidades de solución de las principales especies de cobre, a 25C, al ser expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido. Fuente (Domic, 2001).....	28
Tabla 2.4: Caracterización química de muestra de escoria del CPS.	37
Tabla 2.5: Caracterización química de muestra de escoria del HA.	37
Tabla 2.6: Resultado de análisis de cobre soluble de la muestra CPS.	38
Tabla 2.7: Resultado de análisis de cobre soluble de la muestra HA.	38
Tabla 2.8: Composición escoria utilizada para pruebas de lixiviación oxidativa(Dimitrijevic et al., 2017).	39
Tabla 2.9: Composición escoria utilizada para pruebas de lixiviación oxidativa y microondas (TURAN et al., 2017).	41
Tabla 2.10: extracción de cobre de partículas finas en celdas.	42
Tabla 2.11: Composición de aditivos compuestos.	43
Tabla 2.12: Razón de calentamiento y temperatura máxima para distintos compuestos.	45
Tabla 3.1: Masas requeridas para los procedimientos por muestra.	48
Tabla 3.2: Experimentos a realizar para optimización de pretratamiento, masa de muestras de escoria aproximadas.	50
Tabla 3.3: Composición del refinó a utilizar en la memoria.	51
Tabla 4.1: Caracterización física de la escoria fundición Codelco ventana.	53
Tabla 4.2: Resultados experimentos de calibración de temperatura.	57
Tabla 4.3: Calor especifico calculado para cada muestra de escoria.	58

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria minera, el procesamiento de minerales primarios conlleva al uso de procedimiento de flotación y posterior pirometalurgia. El concentrado obtenido (27 a 30% de ley de cobre) se procesan en plantas pirometalúrgicas con operaciones unitarias de alta temperatura (1.200 a 1.500°C), con finalidad de recuperar cobre en forma de lingote o placas con purezas de 98% y 99,9999%, respectivamente. En estas etapas unitarias de fusión y conversión se producen 2 fases: una llamada mata o eje, la cual contiene cobre, y la otra llamada escoria. En general, por cada tonelada de cobre recuperado se generan entre 2 a 3 toneladas de escoria dependiendo de las condiciones operacionales en el proceso pirometalúrgico (Gorai et al., 2003).

La escoria es una sustancia vítrea, la cual está formada de impurezas, que flotan en el crisol de los hornos metalúrgicos. En la formación de la escoria se pueden formar burbujas enriquecida con minerales de cobre sulfurados, lo cual implica que la escoria contenga leyes considerables de cobre, como mínimo 1%, el cual se desecha y se dispone como acopio, constituyendo un pasivo ambiental.

La disminución de la ley promedio de los yacimientos (actualmente menor a 0,6% en promedio) y el aumento de los costos por la mayor profundización de estos, hace que el tratamiento de la escoria con alta ley de cobre constituya un negocio rentable y sustentable para la extracción de este.



1.1 Planteamiento del problema

El procesamiento de escoria presenta un problema al momento de tratarla, ya que la forma diseminada en la que se encuentra el cobre requiere reducir el tamaño para obtener una gran liberación de este metal, necesaria para la flotación o lixiviación exitosa. Se ha observado que la liberación se logra con una reducción de tamaño orientada a un P_{80} menor a 75 [μm] (Valderrama et al., 2018), lo que impone un alto consumo específico de energía. En esta condición de granulometría, la extracción de cobre por flotación no supera el 85% (caso de Minera El Teniente, Minera Copper, Mantos Blancos, entre otras), mientras que la lixiviación puede lograr extracciones sobre 90% para esta misma granulometría (Romero, 2017).

El uso de la escoria como árido para la construcción en el hormigón se ve mermado por normativa NCh 163, que evita la utilización de materiales que posean sulfatos solubles o sulfuros oxidables para hormigones. El uso de la escoria tiene mayor efectividad y resistencia en esta labor. Por lo anteriormente mencionado, uno de los desafíos en las fundiciones es extraer el cobre presente en la escoria, con granulometría 100% -1", evitando un proceso costoso como la conminución y se obtendría ripio estéril. Durante el 2022-20223, se han realizado ensayos a escala Piloto en Planta Matta (ENAMI) y en Biocobre (Pucobre), usando granulometría 100% - ½", con un ciclo de lixiviación de más de 300 días (similar a lo usado en la biolixiviación) obteniendo soluciones de 5 g/L Cu que se envían a la planta de SX-EW existente.

Considerando los antecedentes técnicos, resulta difícil la lixiviación de la escoria en esta granulometría de 1", por la característica vítrea que presenta y la alta diseminación del cobre en ella, que está asociada con una baja permeabilidad hidráulica y porosidad. Sin embargo, los últimos ensayos de pilotajes abren una ventana para hacer viable una operación de lixiviación en pilas de las escorias, favorecidas por la alta ley de cobre.

En la presente memoria de título se propone resolver el problema planteado mediante el uso de microondas en un pretratamiento de la escoria, con el objetivo de producir agrietamiento en la matriz vítrea, favoreciendo el transporte del lixivante y de los productos de la reacción de disolución de las especies de cobre, para incrementar significativamente la extracción.

1.2 Hipótesis

El pretratamiento con rayos de microondas, aumentara la formación de microgrietas en la matriz vítrea de la escoria (P_{80} de 1”), incrementando la extracción de cobre en la lixiviación en botellas en medio ácido clorurado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

- Estudiar el efecto de las microondas para el pretratamiento de una escoria de cobre 100 - 1” proveniente de Codelco-DVEN para incrementar el nivel de agrietamiento para aumentar la extracción de cobre en la lixiviación en botellas.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Validar el uso de las microondas en la producción de microfractura de una escoria de cobre.
- Determinar la extracción de cobre y hierro en un medio $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$ y $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ usando botellas de lixiviación, sin y con el uso de las microondas.
- Cuantificar el impacto de la adición de un aditivo oxidante (H_2O_2) en el proceso de lixiviación en botellas.

2 ESTADO DEL ARTE.

2.1 Aspectos generales de la escoria de cobre.

La escoria de cobre se genera en la fusión y conversión del concentrado de cobre. En la fusión se induce la formación de una fase escoria para contener las impurezas del concentrado, principalmente hierro, mediante la adición de SiO_2 . Durante la fundición se separan dos fases: la mata, sustancia rica en cobre (sulfuros); y la escoria (sulfuros de hierro), donde aproximadamente por cada tonelada de cobre procesado se generan 2,2 toneladas de escoria (Gorai et al., 2003).

Escoria con leyes de 0,8% Cu se desecha o se puede vender como producto con propiedades similares, como basalto natural (cristalino) o la obsidiana (amorfo), pero debido a la composición de la escoria con materiales solubles, la norma NCh163 no permite usar la escoria como árido para hormigones. Es por esto, que en la actualidad tiende a ser acopiada ocupando terreno que puede ser utilizado con otro fin, transformándose en un pasivo ambiental, pese a su alta ley en cobre.

2.1.1 Caracterización de escorias.

Los concentrados de cobre que alimentan la planta pirometalúrgica producen dos tipos de escorias con propiedades y contenidos de cobre totalmente diferentes: i) escorias de fusión y ii) escorias de conversión. En adelante referiremos el análisis técnico

Aunque las propiedades de las escorias de cobre dependen de su formación y elementos presentes en el momento de la etapa pirometalúrgica, estas escorias tienden a tener características semejantes, con apariencia de color negro y, según su formación, con superficie lisa o porosa, por lo que su humedad de impregnación está entre los 0,15 a 0,55%. Debido a su carácter vítreo, tiende a tener formas irregulares, dureza de 4 a 6, densidad entre 3.160 a 3.870 $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ y granulometría diversa entre 4" a material fino menor a 0,08[mm].

La característica de fase vítrea que posee la escoria está relacionada fuertemente a la velocidad de enfriamiento de ésta luego del sangrado, alcanzando un 75 a 95% de esta fase en enfriamiento rápido y un 45% en enfriamiento lento (Malhotra, 1987).

Las escorias se componen mayoritariamente de grandes cantidades de óxidos, en específico óxidos de hierro, seguido por óxidos de silicio, cinc y calcio para el caso de escorias formadas en procesos de conversión, (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Análisis de fluorescencia de rayos x, Muestra fundición ventana o DVEN (OYARZUN KNEER, 2013), Codelco, División El Teniente - Fundición Caletones o FCAL (Orizola Gómez, 2006) y otro (Al-Jabri et al., 2009).

ELEMENTO	CONCENTRACION (%)			OXIDO	CONCENTRACION (%)		
	DVEN	FCAL	(Al-Jabri et al., 2009)		DVEN	FCAL	(Al-Jabri et al., 2009)
Fe	48.16	46.7	37.38	Fe ₂ O ₃	68.85	66.76	53.45
O	34.76	35.95		--		--	
Si	8.92	10.64	15.45	SiO ₂	19.08	22.76	33.05
Zn	1.82	0.23		ZnO	2.26	0.29	
Ca	1.48	0.88	4.33	CaO	2.07	1.23	6.06
Al	1.37	1.82	1.48	Al ₂ O ₃	2.59	3.44	2.79
Cu	0.86	1.15	0.37	CuO	1.08	1.43	0.46
Mg	0.57	0.46	0.94	MgO	0.95	0.76	1.56
Na	0.55	0.62	0.21	Na ₂ O	0.75	0.83	0.28
K	0.46	0.57	0.51	K ₂ O	0.55	0.68	0.61
S	0.29	0.24	0.76	SO ₃	0.73	0.61	1.89
Ti	0.18	0.31		TiO ₂	0.31	0.52	
Pb	0.10	0.04		PbO ₂	0.12	0.04	
Co	0.09			CoO	0.12		
Ba	0.07	0.02		BaO	0.07	0.03	
Mn	0.007	0.03	0.04	MnO ₂	0.11	0.04	0.06
Mo	0.06	0.24		MoO ₃	0.09	0.36	
Cr	0.03	0.06		Cr ₂ O ₃	0.05	0.11	
Sb	0.03	0.03		Sb ₂ O ₅	0.04	0.04	
Ni	0.02			NiO	0.03		
P	0.02	0.03		P ₂ O ₅	0.06	0.06	
Sn	0.01			SnO ₂	0.02		
Zr	0.01	0.01		ZrO ₂	0.02	0.01	
Sr	0.01	0.009		SrO	0.01	0.01	

2.1.2 Clasificación de escorias.

En general, las escorias se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **El grado de silicatos:** la adición de SiO_2 y/o CaO , como fundentes, forma escoria fallalítica (2FeO SiO_2), la cual está compuesta principalmente en óxidos de hierro, sílice, aluminio, calcio, entre otros. La sílice, en esta combinación, tiene la condición ácida, al igual que la alúmina. Para los otros componentes poseen carácter básico.

La Escoria, que depende de su carácter ácido o básico, posee un comportamiento distinto sobre otros materiales, por lo que se puede evaluar el carácter de la escoria según los índices de silicatación, y grado de saturación.

- **Tiempo de enfriamiento:** La rapidez en la cual se enfría la escoria cumple un rol fundamental en la formación de fase vítrea o cristalina (Rojas, 2004). Uno de los métodos consiste en pasar la escoria líquida por un pozo de granulación, el cual contiene agua que se renueva constantemente, generando un enfriamiento brusco, formando escoria granallada. Esta técnica es la utilizada por la fundición de Caletones (Moreno, 1998). Este proceso no produce modificaciones químicas, si no mecánicas y físicas al generar un cambio brusco de temperatura formando material mayormente de estructura amorfa o vítrea. Por lo que provee mayor porosidad, aumentado su humedad de impregnación y menor densidad. Otro enfriamiento rápido es por expansión, provocada por la inclusión en el proceso agua, aire y vapor de manera controlada, generando una escoria más ligera, que es triturada y clasificada para dar mayor valor tecnológico a la escoria. (Rojas, 2004).

En cambio, si se genera un enfriamiento lento, usualmente provocado por la deposición en botadero, facilita la cristalización del material, reduciendo la porosidad y humedad de impregnación, aumentando la densidad y limitando las reacciones posteriores. Aun así, estudios concluyeron que la velocidad de enfriamiento no afecta a la lixiviación a temperatura ambiente (Romero, 2017).

2.2 Conminución de escoria

El concepto de conminución, tiene que ver con la acción de reducir el tamaño de los minerales y que permita liberar las especies valiosas de la matriz de ganga (Minero, 2006). En el caso específico de la escoria, la cual habitualmente está dispuesta en botaderos, la conminución empieza con el proceso de chancado, el cual reduce el tamaño inicial a pulgadas (P_{80} menor a 2"). Cuatro son los factores de importancia para la elección de un chancador:

- El tipo de mineral.
- El tamaño de alimentación.
- Capacidad.
- Características requeridas para el producto final.

La conminución de escoria de cobre posee grandes diferencias a la de minerales sulfurados de cobre ya que sus índices de trabajo son distintos, cuyo parámetro es uno de los más importantes, la escoria de cobre posee valores promedio de 23 [$\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$] (Valderrama et al., 2018) a diferencia de los minerales sulfurados que van en valores entre los 11 a 18 [$\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$] (Camus Yeomans, 2017). La planta de tratamiento de escorias (PTE) de Codelco División El Teniente maneja un valor de WI para la molienda de bolas entre 17 y 18 KWh/t .

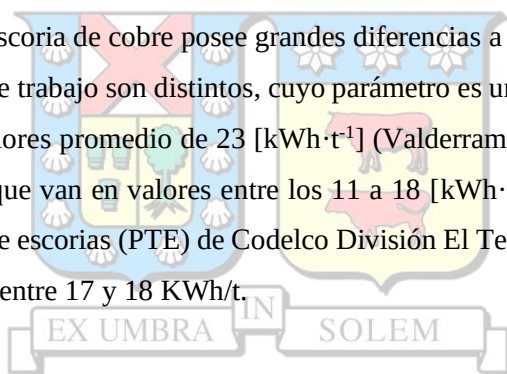


Tabla 2.2: Valores de work index para distinto tipos de rocas.

Sólidos	Wi [kWh/ton corta]	Sólidos	Wi [kWh/ton corta]
Andesita	18.25	Gneiss	20.13
Aceite de esquisto	15.84	Hernatita	12.84
Arcilla	6.30	Magnesita	11.13
Arena de sílice	14.10	Magnetita	9.97
Baritina	4.73	Materia prima de cemento	10.51
Basalto	17.10	Mineral de cobre	12.72
Bauxita	8.78	Mineral de estaño	10.90
Caliza	12.74	Mineral de manganeso	12.20
Carbón de piedra	13.00	Mineral de níquel	13.65
Carburo de sílice	25.87	Mineral de oro	14.93
Coque	15.13	Mineral de pirita	8.93
Cuarcita	9.58	Mineral de plomo	11.90
Cuarzo	13.57	Mineral de plomo-zinc	10.93
Diorita	20.90	Mineral de potasa	8.05
Dolomita	11.27	Mineral de pyrrhotita	9.57
Escoria	10.24	Mineral de rutilo	12.68
Escoria de cemento	13.45	Mineral de spodumeno	10.37
Esmeril	56.70	Mineral de titanio	12.33
Esquisito	15.87	Mineral de zinc	11.56
Feldespató	10.80	Molibdeno	12.80
Ferro-cromo	7.64	Pedernal	26.16
Ferro-manganeso	8.30	Pizarra	14.30
Ferro-silicona	10.01	Rocka de fosfato	9.92
Fluoro natural	8.91	Rocka de trapeciana	19.32
Gabro	18.45	Roca de yeso	16.06
Grafito	15.13	Sienita	13.13
Granito	20.13	Silicato de sílice	13.40
Gravilla	43.56	Taconita	14.61
		Vidrio	12.31

Para lograr los tamaños granulométricos de liberación óptima para los procesos de flotación y lixiviación agitada, se requiere implementar una secuencia de chancado y molienda como la que se muestra en la Figura 2.1.

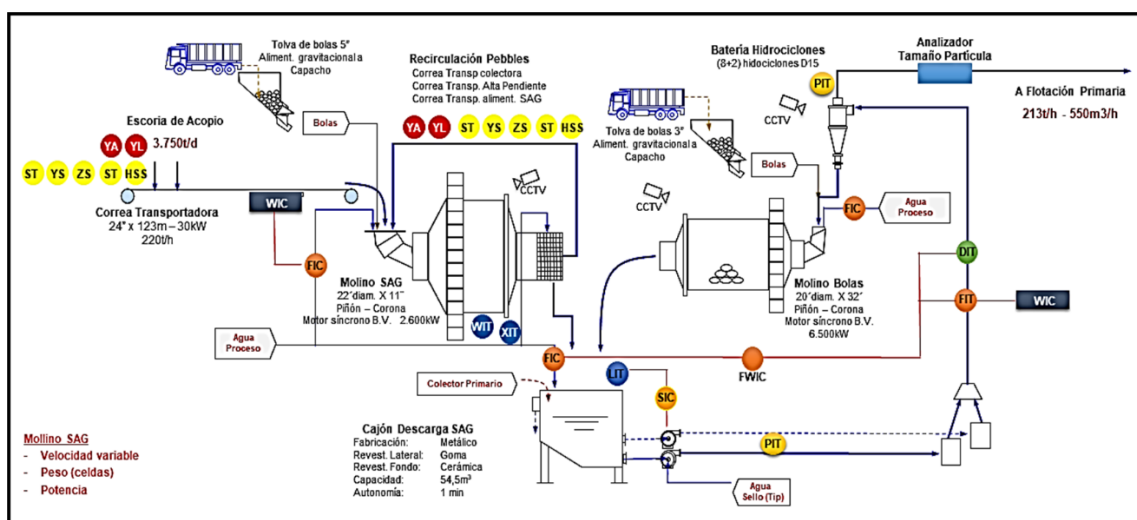


Figura 2.1: Diagrama de conminución en la Planta de Tratamiento de Escorias (PTE) de Codelco-DET.

Además, la granulometría óptima para la flotación se encuentra a un pasante acumulado de un 75% menor a 75 μm (malla Tyler 200), a diferencia de la flotación de minerales convencionales, el cual su tamaño óptimo está entre los 100 a 150 μm .

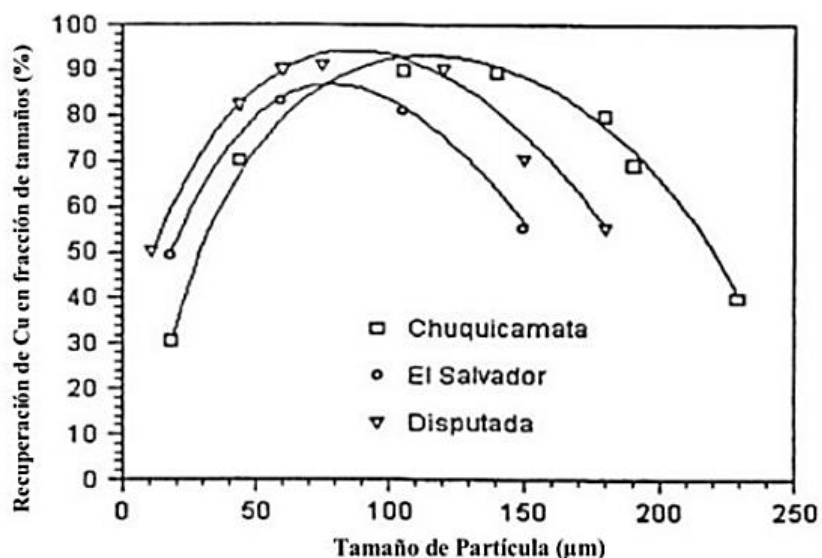


Figura 2.2: Extracción de cobre según el tamaño de partícula. (Bulatovic, 2007).

Esto implica que el número de etapas necesarias para la reducción de tamaño de la escoria es mayor, con el objetivo de no generar una sobrecarga en la maquinaria, aumentando los costos. La producción de una gran cantidad de partículas bajo D50 hace que reporten en el relave final junto con aquellas que tienen un tamaño superior a 250 μm , lo que ha llevado a estudiar el uso de una flotación neumática para la recuperación de finos o bien de la cavitation flotation para los gruesos.

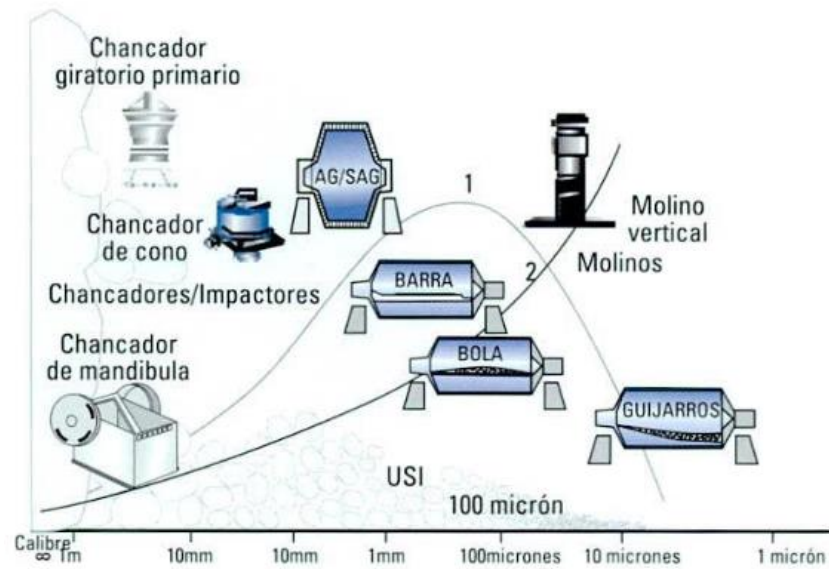


Figura 2.3: Esquema de equipos necesarios para conminución según tamaño necesario (Minero, 2006).

Para todos los equipos involucrados en el proceso, se tiene una relación diferente entre los tamaños de alimentación y descarga, llamada razón de reducción.

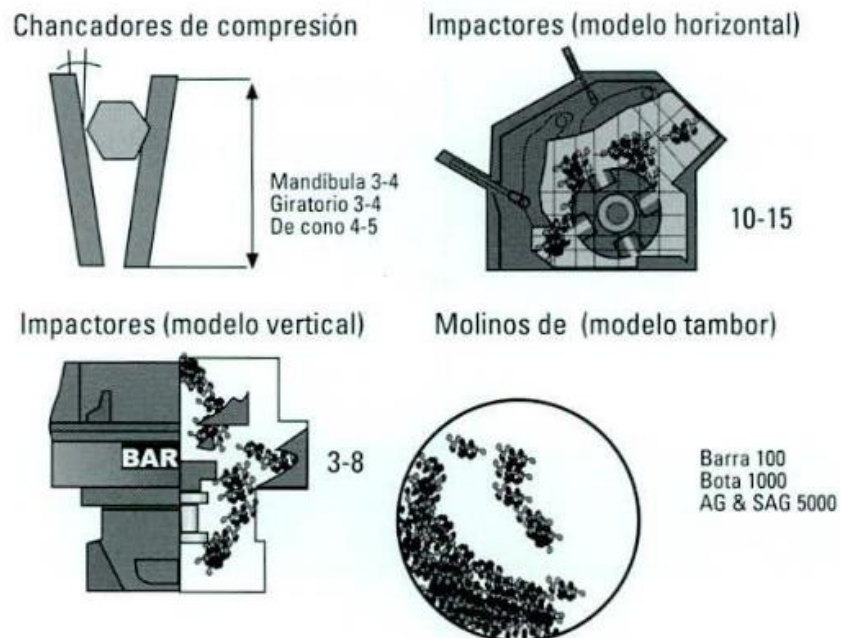


Figura 2.4: Equipos y sus valores típicos de reducción de tamaño (Minero, 2006).

Con la razón de reducción, se puede obtener las etapas necesarias para obtener los tamaños mencionados anteriormente. En las figuras siguientes se muestra circuitos de ejemplo.



Figura 2.5: Ejemplo de circuito con chancado de 3 etapas clásico previo a ingreso al molino de barras (Minero, 2006).

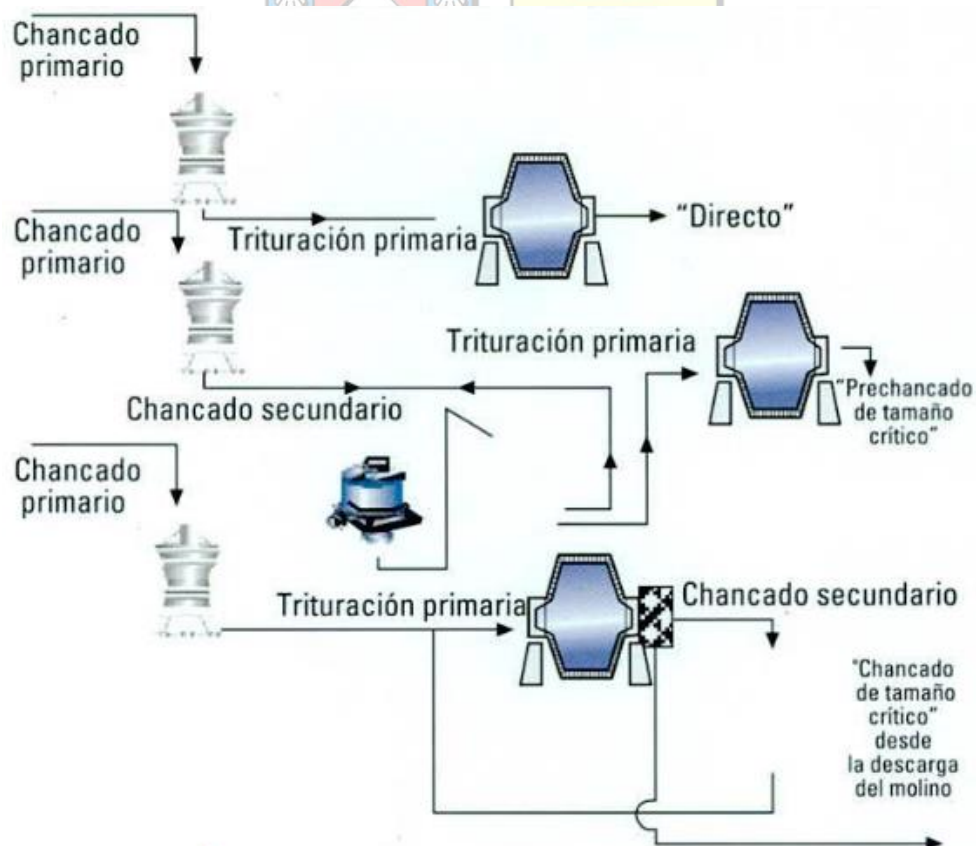


Figura 2.6: Ejemplo circuito de chancado de 1 -2 etapas típico previo a ingreso a minino AG-SAG (Minero, 2006).

2.3 Aglomeración y curado

La aglomeración, tiene como objetivo preparar el material mineralizado para facilitar la lixiviación, generando un alto coeficiente de permeabilidad. Su funcionamiento es simple, hace que las partículas pequeñas se adhieran a la superficie de partículas gruesas (Lewandowski & Kawatra, 2009).

Este funcionamiento, se realiza mediante la humectación del mineral con una solución ácida, ayudando para la futura lixiviación. Además, se puede agregar aglutinante o ligante, el cual evita la migración de partículas finas. Cabe destacar que el ácido sulfúrico concentrado tiene un grado de ligante. Gracias a esto, se puede obtener una reducción de migración de partículas finas de hasta un 93% (Lewandowski & Kawatra, 2009).

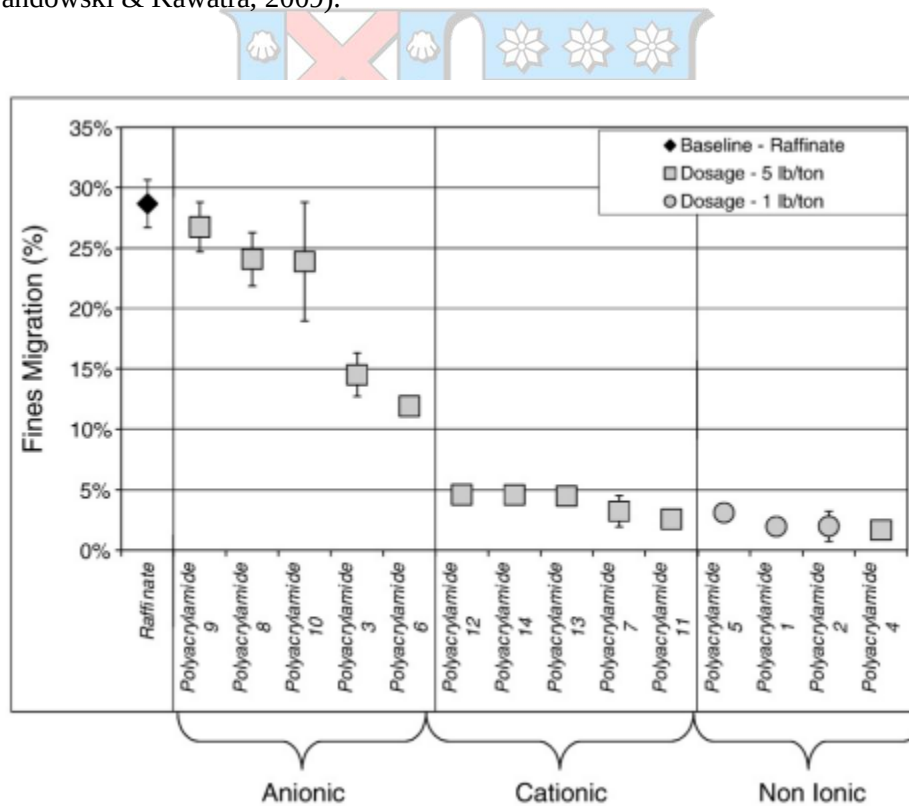


Figura 2.7: Migración de finos con la adición de distintos aglutinantes (Lewandowski, 2009).

La lixiviación de minerales de cobre, a los que no está ajeno el material de escoria, requiere condiciones de Eh y de pH para una eficiente disolución (Figura 2.8; Error! No se encuentra el

origen de la referencia.). Sin embargo, si el mineral o escoria, presenta ganga reactiva o moderadamente reactiva, a medida que progresa la lixiviación en un frente descendente, el ácido se va consumiendo (Domic, 2001). Si la velocidad de reacción de la solución (mineral y ganga o bien, escoria y ganga) es mayor a la velocidad de reposición del ácido, entonces se puede llegar a perder iones férricos y posteriormente, a la disminución de iones de hidrógeno, por lo que las condiciones de Eh/pH de la solución dejará de estar en el campo estable de ion Cu^{2+} , y pasará al campo de estabilidad de otros elementos de cobre, generando sedimentación o precipitación.

Una forma de contrarrestar este efecto es el pretratamiento con ácido concentrado, de tal manera de no generar un sobre consumo de ácido en el proceso, e inhibir la disolución de especies indeseables como aluminio o la propia sílice. Este pretratamiento, recibe el nombre de curado ácido y consta en realizar un contacto entre el ácido y el mineral al lixiviar.

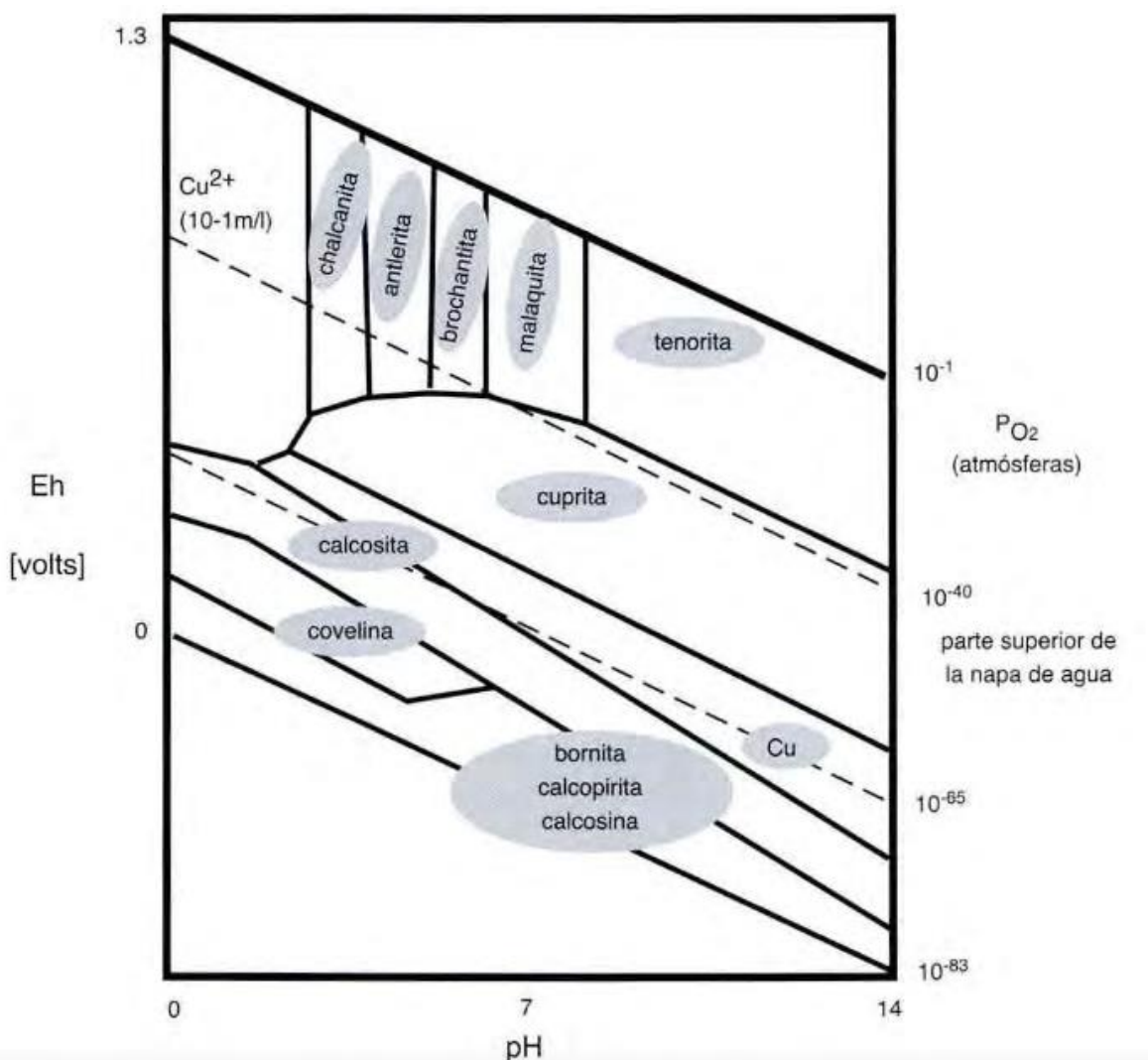


Figura 2.8: Diagrama de Pourbaix para sistema cobre-agua a 25° C (Domic, 2001).

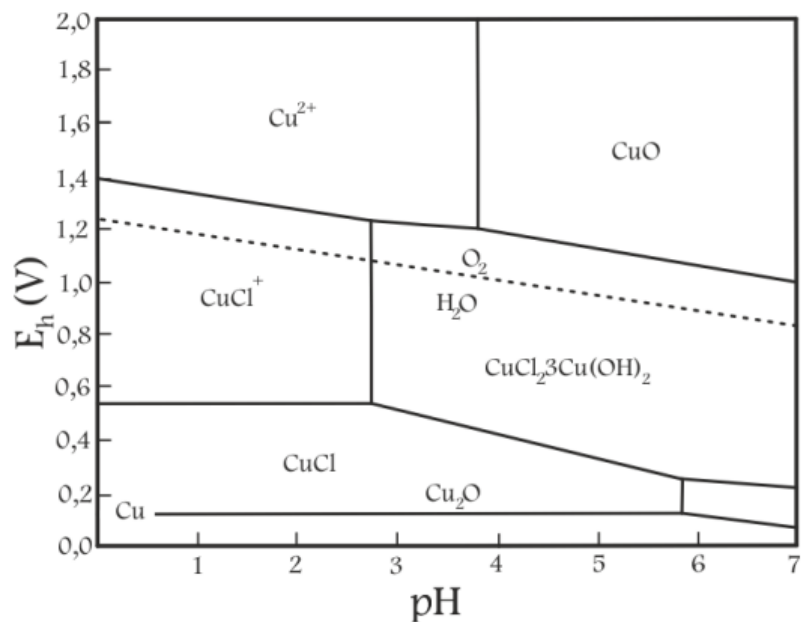


Figura 2.9: Diagrama de Pourbaix para sistema cobre-cloro-agua a 25° C, Concentraciones molares unitaria para todas las especies y presión atmosférica. (Ipinza, 2014).

Cabe destacar que el curado químico de una escoria podría no ser recomendable por las razones que se comentan a continuación. Durante el curado químico la adición de ácido sulfúrico concentrado produce un aumento de la estabilidad de la sílice o cuarzo (SiO_2) evitando la formación de silanol (SiOH), un compuesto sólido coloidal que puede afectar negativamente la permeabilidad líquida y gaseosa de un lecho de escoria. La Figura 2.10 muestra que al aumentar la adición de ácido

sulfúrico concentrado en el curado disminuye significativamente la disolución de la sílice, llegando a menos de 2 g/L cuando la adición es de 24 kg H₂SO₄/t de mineral.

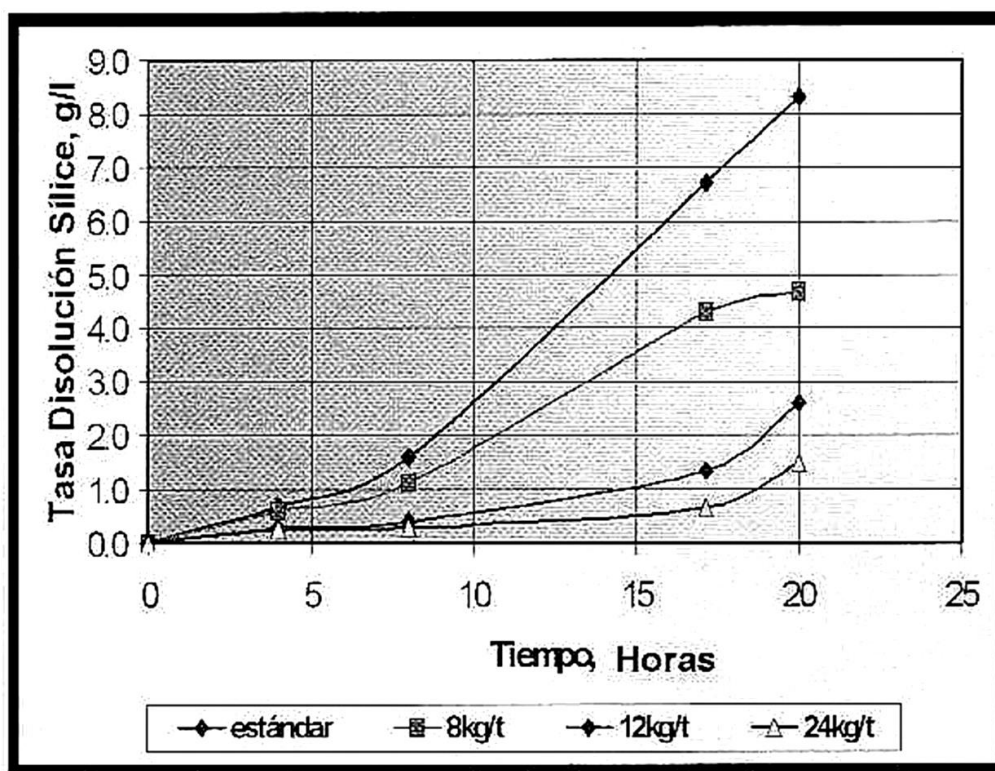


Figura 2.10: Efecto de la adición de H₂SO₄ en la disolución del SiO₂.

La sílice disuelta o ácido orto silícico se polimeriza lentamente a una suspensión coloidal como se muestra en la Figura 2.11.

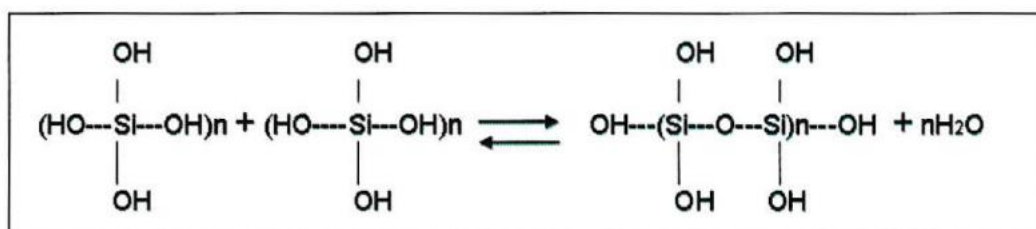


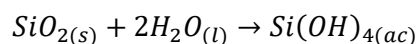
Figura 2.11: Reacción de polimerización del ácido orto silícico en agua. (Melgar & Torres, 2008).

En la polimerización se forman dímeros, trímeros, tetrámeros y polímeros de bajo peso molecular (oligómeros) los cuales aumentan de tamaño hasta formar micelas terminando el proceso al formar coloides que dependiendo de su abundancia y estabilidad pueden o no flocular y formar un precipitado de sílice por medio de un proceso de nucleación homogénea. Este proceso depende de factores como

la temperatura, pH, tensión superficial, radio de la partícula, concentración de sílice reactiva y salinidad.

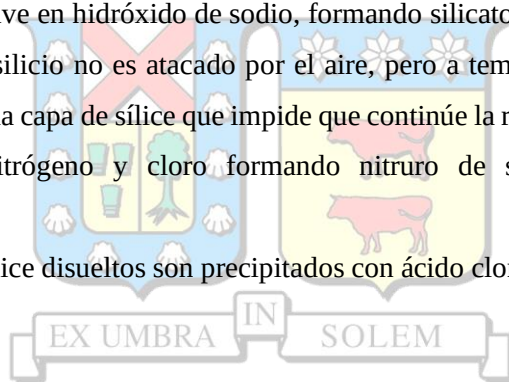
La máxima velocidad de polimerización ocurre entre un pH 6-9 y la mínima velocidad a un pH 2. El contenido de sílice en aguas naturales varía comúnmente entre un rango de 1 a 30 [mg L⁻¹], aunque no son raras concentraciones de 100 [mg L⁻¹] e incluso 1000 [mg L⁻¹], en algunas aguas salobres y piélagos (Melgar & Torres, 2008). Sílice disuelta en agua existe en forma hidratada como ácido orto silícico Si(OH)₄ y ácido meta silícico H₂SiO₃. La existencia de ácido orto silícico en el agua natural puede deberse a la disolución de las rocas silíceas y minerales como la albita.

La generación de ácido orto silícico en agua es por disolución de cuarzo y sílice amorfo (Al-Mutaz & Al-Anezi, 2002).



El silicio se disuelve en ácido fluorhídrico formando el gas tetrafluoruro de silicio, SiF₄, y es atacado por los ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico, aunque el dióxido de silicio formado inhibe la reacción. También se disuelve en hidróxido de sodio, formando silicato de sodio y gas hidrógeno. A temperaturas ordinarias el silicio no es atacado por el aire, pero a temperaturas elevadas reacciona con el oxígeno formando una capa de sílice que impide que continúe la reacción. A altas temperaturas reacciona también con nitrógeno y cloro formando nitruro de silicio y cloruro de silicio respectivamente.

Los silicatos y la sílice disueltos son precipitados con ácido clorhídrico el cual los deshidrata parcialmente.



2.3.1 Curado en medio NaCl-H₂SO₄.

Con el objetivo de mejorar el proceso de curado, este pretratamiento, consiste en el contacto de solido- solido del mineral o escoria frente a cloruro de sodio. Esta mezcla es luego contactada con una fracción estequiométrica de ácido sulfúrico, de tal manera de generar ácido clorhídrico, el cual posee una fuerza acida mayor a la del ácido sulfúrico. La formación de ácido clorhídrico está dada por las ecuaciones (1) y (2), cuyas ocurrencias dependerán del calor generado en la reacciones exotérmica involucrada en la mezcla (Ibañez, 2013).

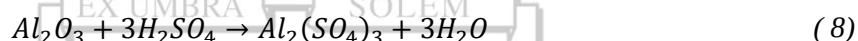
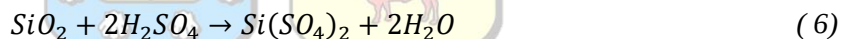


Este ácido, tiene la capacidad de interactuar con la capa de azufre que suele ser insoluble para otro tipo de ácido, ayudando al futuro proceso de lixiviación.

El uso de esta mezcla asegura la disolución de la mayoría de los sulfuros de cobre con excepción de la enargita.

2.4 Lixiviación.

La lixiviación, se denomina como una etapa de disolución selectiva de los metales desde los sólidos que lo contienen, mediante una solución disolvente acuosa (Domic, 2001). De esta manera, se obtiene una solución rica en metales de interés y el sólido insoluble sin valor. Dicha disolución puede ser parcial o total. Como ejemplo, la reacción de la tenorita (reacción 3) y la cuprita (reacción 4) en presencia del ácido sulfúrico.



Usualmente, actúan agentes externos que intervienen en la reacción, como oxidantes o reductores, variando el potencial redox de la solución lixiviaste (Aravena Maureira, 2020). En el caso de las especies de cobre, es de utilidad agentes oxidantes como Fe^{3+} o O_2 .

En medio cloruro ácido la presencia de O_2 es necesaria para evitar la formación y precipitación del cloruro cuproso (CuCl) insoluble en medio ácido sulfúrico. La existencia del ion cloro-férrico es necesaria para la oxidación del mineral sulfurado.

2.4.1 Cinética de especies de cobre.

Dependiendo de las características y reactividad de algunas especies de cobre, poseen distintas cinéticas a la hora de ser lixiviados (Tabla 2.3). Al interactuar la solución ácida con el mineral de cobre, tanto la especie mineralizada como la ganga portadora reaccionan de acuerdo con las velocidades características de cada uno, definiendo así el consumo de ácido.

Tabla 2.3: Velocidades de solución de las principales especies de cobre, a 25C, al ser expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido. Fuente (Domic, 2001)

cinética Relativa	Tiempo de referencia	Especie de minerales de cobre en esta categoría.
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos a minutos Disolución es completa	Carbonatos (malaquita, azurita), Sulfatos y Cloruros.
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas Disolución es completa	Óxidos Cúpricos (tenorita), Silicatos.
Moderna (requieren oxidante)	Días a semanas Disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos complejos y óxidos cuprosos (cuprita).
Lenta (requieren oxidante)	Semanas a meses Disolución puede ser incompleta	Sulfuros simples (cs, cov).
Muy lenta (requieren oxidante)	Años Disolución es incompleta	Sulfuros complejos (cpy, bornita, enargita).

Una forma de entender la reacción de cinética heterogenia es utilizando el modelo de núcleo no reaccionado (Levenspiel, 1987).

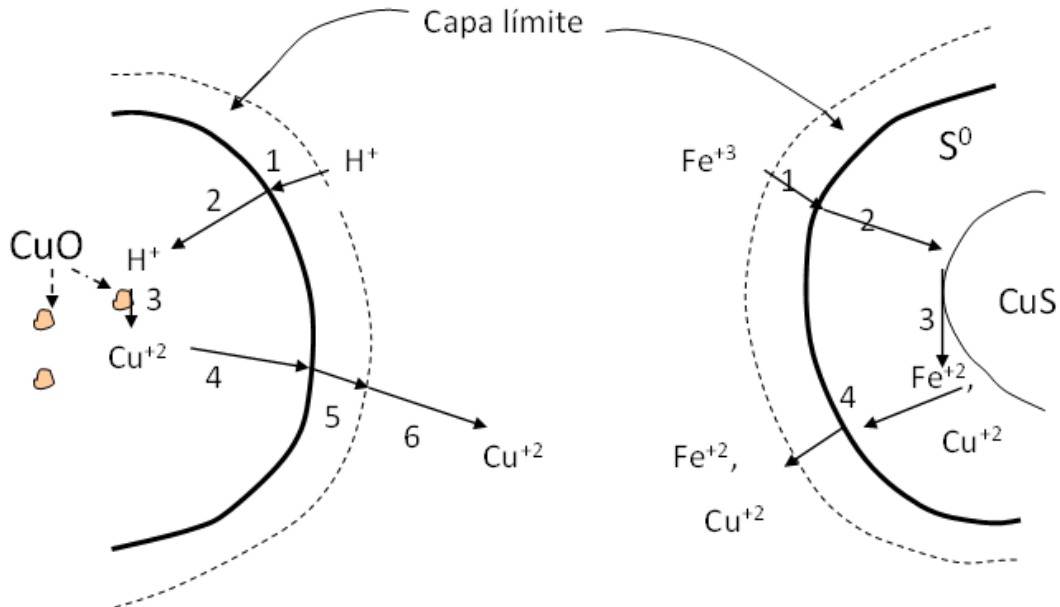


Figura 2.12: Esquema del modelo de núcleo no reaccionado.

Las etapas del modelo son:

1. Reactivo lixivante (H^+ , Fe^{+3}) difunde a través de capa límite hacia superficie de la partícula.
2. Reactivo lixivante difunde en el interior de la partícula hacia la zona de reacción.
3. Ocurre la reacción química, se forman productos de la reacción.
4. Productos solubles de la reacción (Cu^{+2} , Fe^{+2}) difunden en el interior de la partícula hacia la superficie de ésta.
5. Productos solubles difunden a través de la capa límite hacia el seno de la solución.

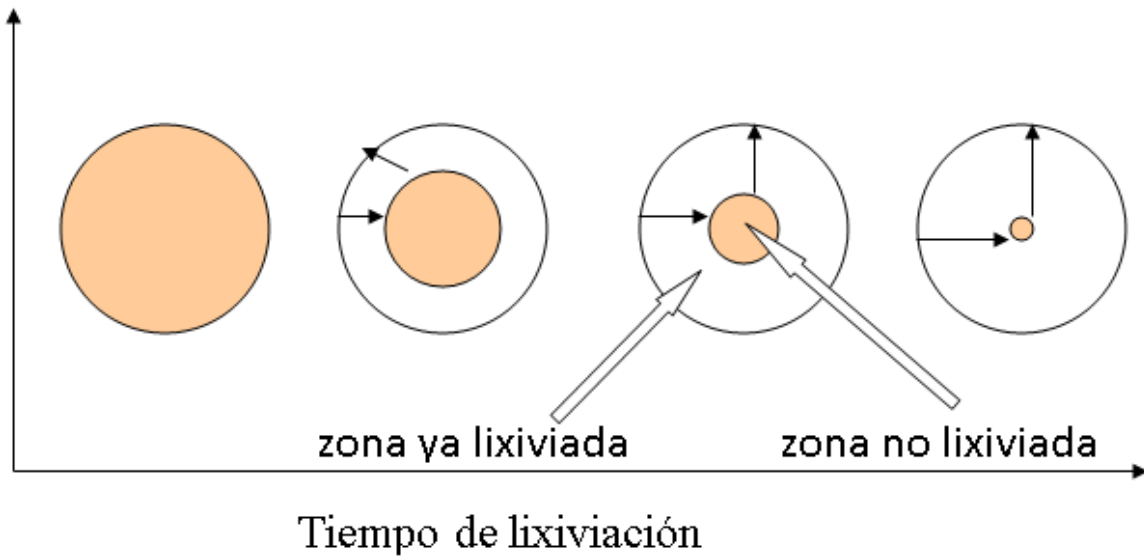


Figura 2.13: Comportamiento modelo núcleo sin reaccionar.

Inicialmente, la velocidad de reacción es rápida, debido a las especies reactivas en la superficie de la partícula y con el tiempo esta velocidad disminuye ya que la superficie de reacción está cada vez más lejos de la superficie de la partícula. Debido a esto, se puede obtener que la velocidad de lixiviación puede depender de la velocidad de reacción entre la solución y el mineral (control químico) o la velocidad de difusión de la solución a través de la partícula (control difusional).

- *Control químico.*

Ocurre, cuando la velocidad de la reacción es independiente a cualquier tiempo de demora, entre la interacción entre solución y mineral reactivo. La cantidad de sustancia reactante es proporcional a la superficie disponible del núcleo sin reaccionar. De manera simplificada, este control se comporta como la función (10).

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - x_B)^{1/3} \quad (10)$$

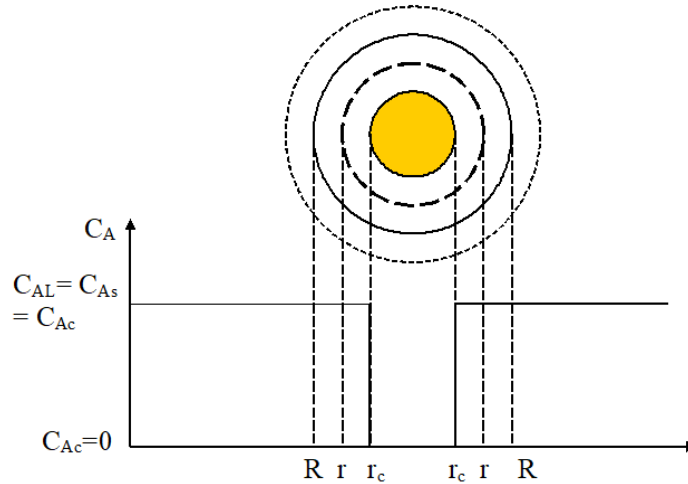


Figura 2.14: Control químico. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.

- Control Difusional.

Ocurre, cuando el tiempo de reacción entre la solución y especie mineral es despreciable y la velocidad solo depende del transcurso de la solución a la superficie a reaccionar. Este comportamiento, se modela según la ecuación (11).

$$\frac{t}{\tau} = [1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3] \quad (11)$$

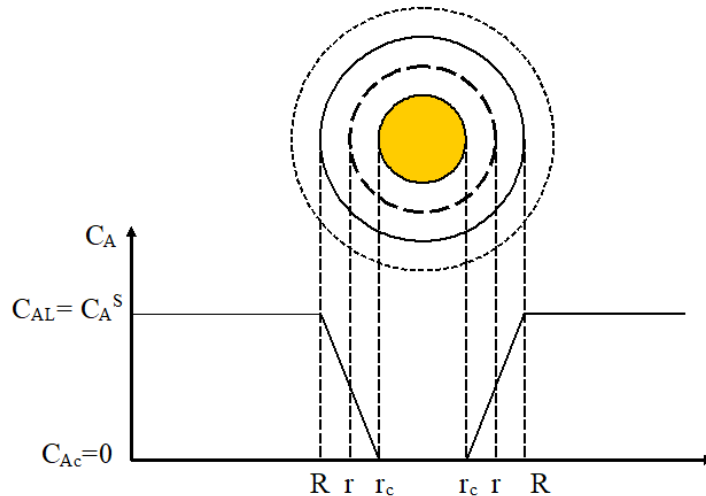


Figura 2.15: Control difusional. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.

La escoria, posee un problema similar a los sulfuros primarios como la calcopirita, debido su alta estabilidad en sistemas acuosos, lo que les da un carácter refractario a los procesos convencionales de lixiviación. La razón primordial, es que las especies de cobre se presentan diseminada en una matriz vítrea provocando que no sean reactivas debido a falta de superficie de reacción, necesitando proceso de conminución más extensos.

La disolución del SiO_2 en medio ácido sulfúrico es relativamente rápida y en la medida que ocurre se produce la liberación de las especies de cobre contenidas, incrementando la extracción de cobre. Bajo este concepto los consumos de ácido sulfúrico son elevados, mayor a 100 kg H_2SO_4 /t escoria.

2.4.2 Lixiviación en medio sulfúrico clorurado.

La lixiviación en medio sulfúrico tiene un gran beneficio al agregar cloruro a la mezcla, mejorando el comportamiento redox (disminución respecto al medio sulfato) y al aumentar la tasa de lixiviación. Esto es debido a que los iones de cobre cuproso se estabilizan gracias a las reacciones con los iones de cloruro (Davis-Belmar et al., 2014). Este poder del cloruro es debido a su alta electronegatividad. Estos iones, son capaces de modificar la morfología de la capa de azufre pasivamente de los sulfuros primarios, formando una estructura cristalina y porosa, mejorando la cinética (Z. Y. Lu et al., 2000).

La interacción de los iones cobre y hierro está presente durante la lixiviación. La oxidación de los sulfuros de cobre se inicia con el ion férrico (Fe^{3+}), generando iones cúpricos (Cu^{2+}) y reduciendo los iones de hierro a iones ferroso (Fe^{2+}). La presencia del cloruro da la capacidad al ion cúprico para oxidar parcialmente al ion ferroso.

La reacción llega al equilibrio termodinámico dependiendo de la concentración de los iones involucrados en la solución, el cual depende de la constante de equilibrio, que, a su vez depende de la concentración de cloruro, dada la existencia de complejos de cobre-cloruro. Mientras más complejos con cloruro, mayor es la constante, lo cual es favorable, generando más ion férrico, que vuelve a reaccionar en el proceso.

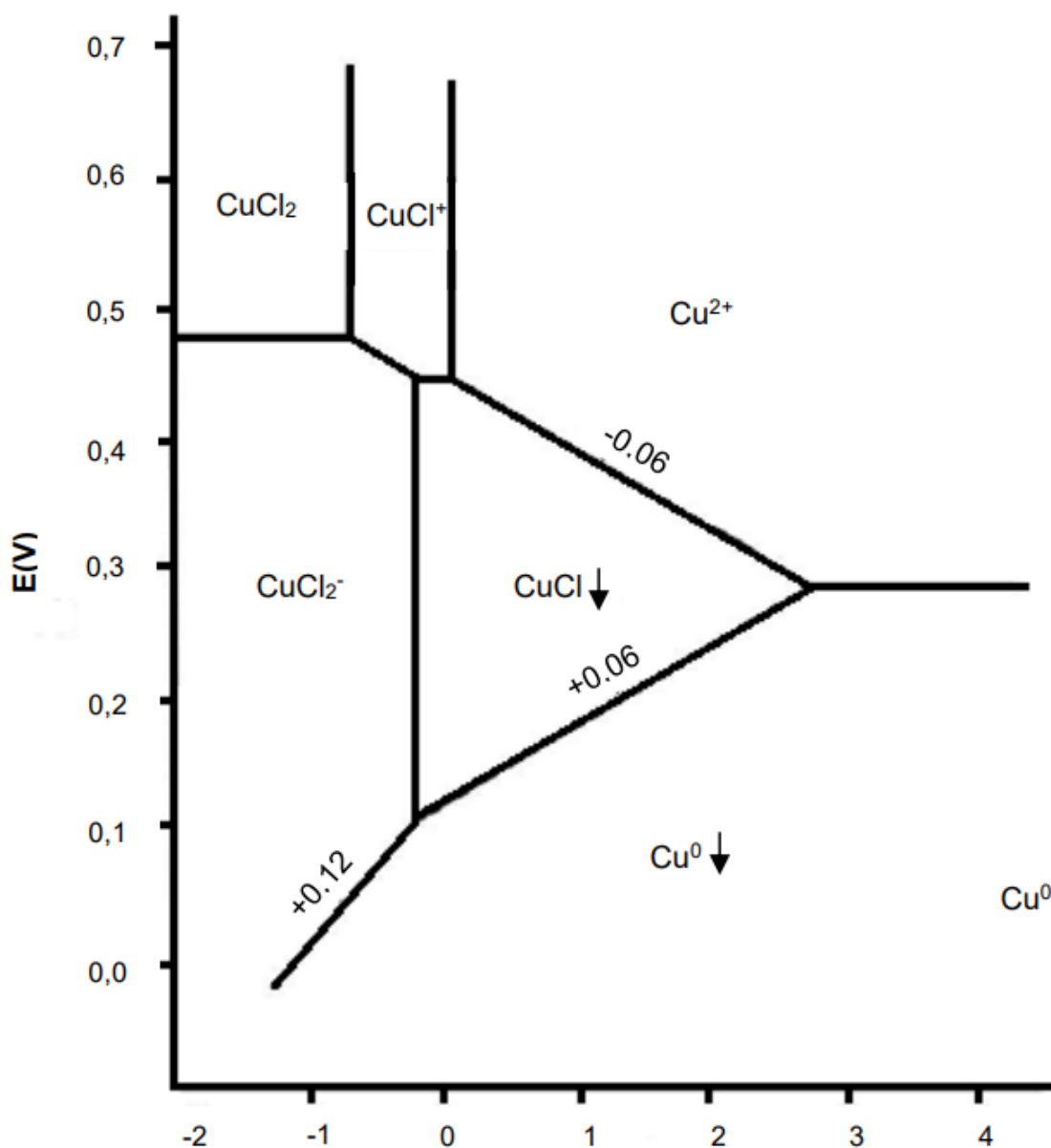


Figura 2.16: Efecto del pCl sobre el potencial de equilibrio en sistema Cu-Cl-H₂O (Ipinza, 2014).

Este diagrama Eh-pCl (Figura 2.16; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), indica la zona de estabilidad del ion cuproso Cu⁺ y también muestra las diferentes zonas de predominio de todas las especies. Cabe destacar que, aunque el precipitado de CuCl es el primero en estabilizar el ion cuproso, este grado de oxidación también se estabiliza gracias a la formación de complejos superiores, como el CuCl₃²⁻, que se generan en concentraciones de ion cloruro extremadamente elevadas.

Esta facilitación de la reacción va aumentando con la temperatura, obteniendo extracciones de hasta 66% en 400 [hr] aproximadamente (J. Lu & Dreisinger, 2013a).

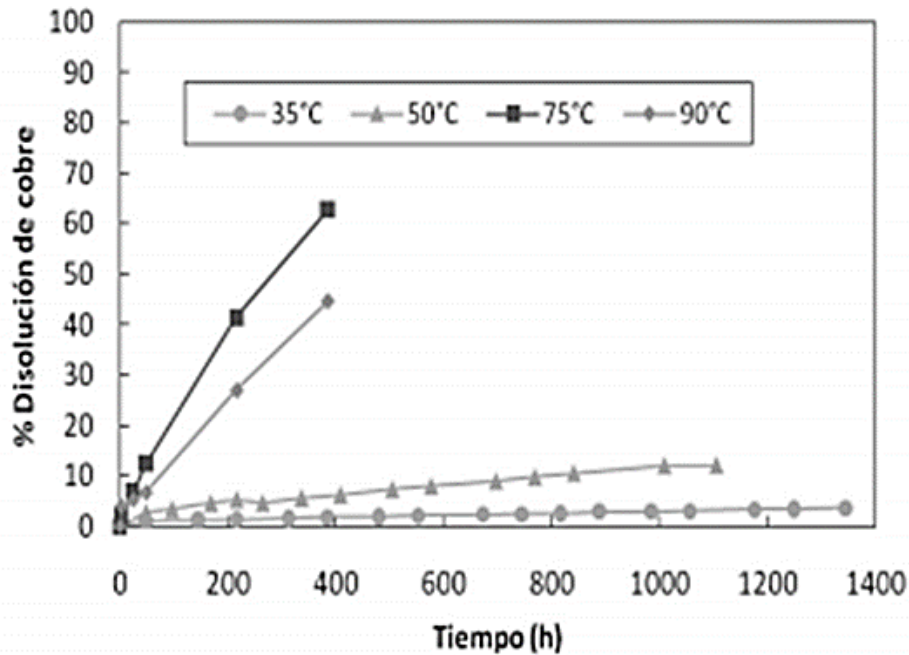


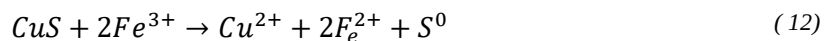
Figura 2.17: Curva de Extracción de cobre vs tiempo en medio clorado a distintas temperaturas.

Además, se puede llegar a obtener una extracción de hasta el 99% de un concentrado puro de calcopirita (J. Lu & Dreisinger, 2013b). Este estudio, fue sin tomar en consideración impurezas del sistema.

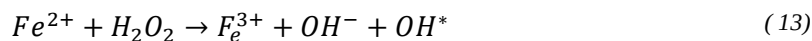
Los principales problemas de este método, es la alta corrosividad que posee el cloruro en los materiales, por lo que es de alta necesidad que los equipos sean resistentes a esta, por lo cual son más caros (Watling, 2013).

2.4.3 Lixiviación con agente oxidante.

Los agentes oxidantes, son empleados para la lixiviación de algunos sulfuros y algunos metales. Los elementos más usados son el Fe^{3+} y el O_2 .



La integración de peróxido de hidrogeno, en la solución interactúa además con el ion ferroso provocando su oxidación, llamada reacción de Fenton (Herrero et al., 2008; Mendez et al., 2010).



Existen la reacción opuesta llamada FENTON-LIKE, que el mismo peróxido reduce el Fe^{3+} generando Fe^{2+} pero cuya velocidad y constante de equilibrio es muy baja provocando una baja reactividad. Estos procesos, se pueden observar en el Reducción de hierro ferroso y peróxido de hidrógeno durante la oxidación de EO/PO(fuente: Kitis et al., 1999).Figura 2.18, donde se denota que la reacción de H_2O_2 genera una reducción sólo en el caso con ion ferroso y donde la presencia de ion férrico no provoca una disminución notable comparando con el caso base sin interacción (Kitis et al., 1999).

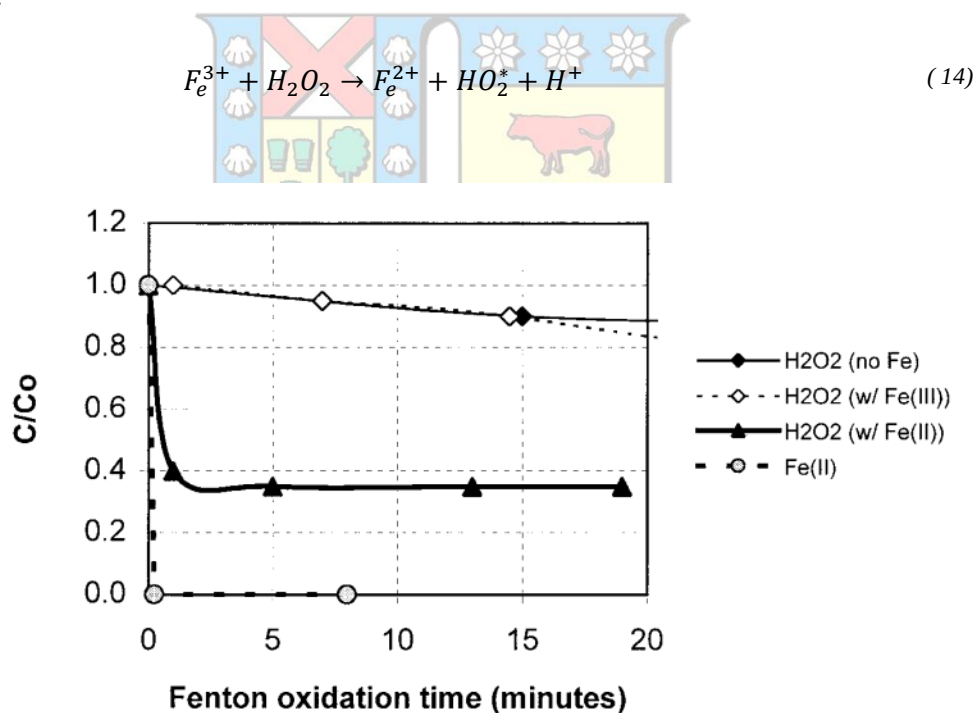


Figura 2.18: Reducción de hierro ferroso y peróxido de hidrógeno durante la oxidación de EO/PO(fuente: Kitis et al., 1999).

De esta manera, se recicla el ion ferroso para mantener la concentración de agente lixiviaste. Además, el peróxido de hidrógeno en un ambiente ácido se puede comportar como oxidante (15) y reductor (16) generando un efecto de dismutación, dando como resultado de la interacción de 2 moléculas de peróxido de hidrogeno oxígeno gaseoso y agua (17).



2.4.4 Bio lixiviación.

Este método, consiste en liberar una colonia de microbiana en el proceso de lixiviación. Estas bacterias regeneran el Fe^{3+} y H^+ en el sistema, mejorando la lixiviación de minerales sulfurados, como la calcopirita (Castro & Donati, 2016).

Estudios realizados, comparando este método con el de lixiviación con cloruro a una temperatura constante de 30°C, arroja baja extracción de cobre, encontrando un máximo de 35% luego de 70 días por método de bio lixiviación. El resultado más cercano a éste por medio de lixiviación con cloruro, fue de 34% en el mismo tiempo (Bobadilla-Fazzini et al., 2017).

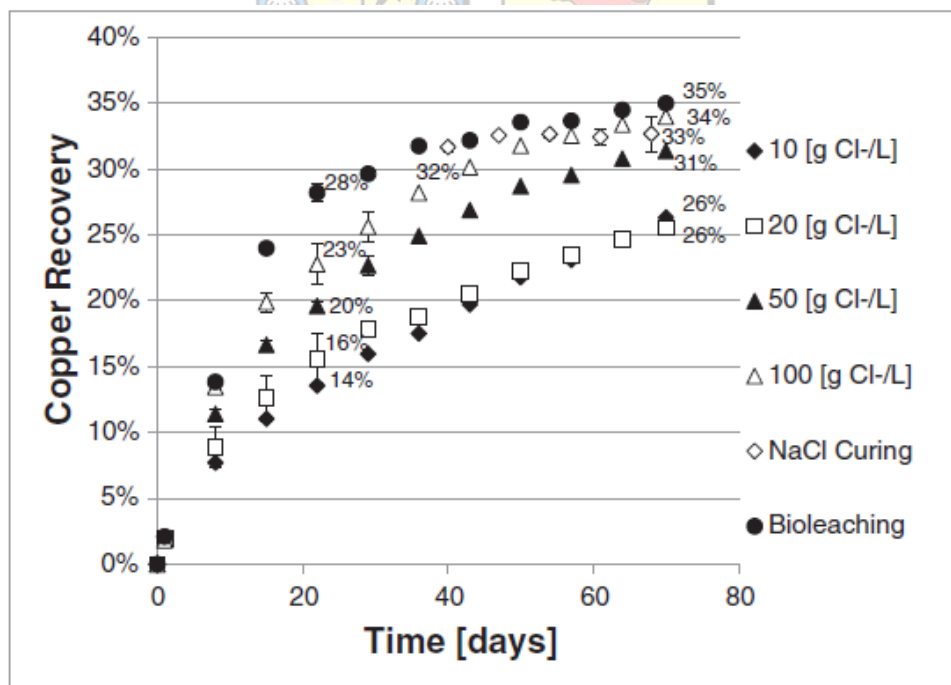


Figura 2.19: Curva de extracción de cobre vs tiempo (Bobadilla-Fazzini et al., 2017).

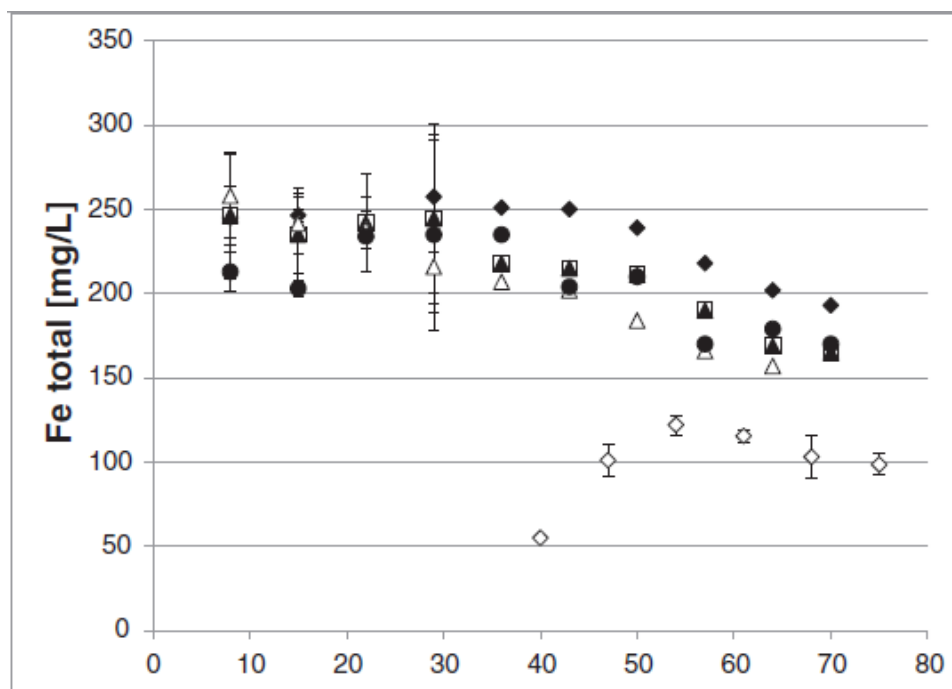


Figura 2.20: Hierro total vs tiempo de reacción (Bobadilla-Fazzini et al., 2017).

Además, hasta el momento, no se pueden mezclar ambos métodos, debido a que la presencia de cloruro inhibe la actividad microbiana (Davis-Belmar et al., 2014).

2.4.5 Lixiviación de Escoria de cobre.

En pruebas experimentales (Romero, 2017) realizadas en escoria de cobre proveniente de la fundición de Potrerillos, específicamente de convertidores Peirce Smith y escoria de hornos anódicos con el objetivo de encontrar el mejor método para extraer cobre. Las escorias poseen un enfriamiento rápido (ER) o enfriamiento lento (EL).

Tabla 2.4: Caracterización química de muestra de escoria del CPS.

Muestra	%Cu	%Fe	%SiO ₂	%Zn	%Al	%MgO	%S	%As
CPS EL 1	33.5	32.2	9.16	0.77	2.37	0.23	0.1	0.09
CPS EL 2	32.4	32.2	9.08	0.68	2.31	0.22	0.08	0.16
CPS ER 3	28.7	31.8	9.61	0.63	2.95	1.93	0.16	0.18

Tabla 2.5: Caracterización química de muestra de escoria del HA.

Muestra	%Cu	%Fe	%SiO ₂	%Zn	%Al	%MgO	%S	%As
HA EL 4	40.49	28.9	7.35	0.64	2.03	0.32	0.02	0.14
HA ER 5	38.57	29.81	7.61	0.73	2.11	0.28	0.03	0.11
HA ER 6	41.12	27.78	7.33	0.78	2.17	0.43	0.03	0.14

Tabla 2.6: Resultado de análisis de cobre soluble de la muestra CPS.

	%CuS-sulf.	%CuS-cít.
CPS EL 1	5.3	4.13
CPS EL 2	5.64	4.92
CPS ER 3	4.96	3.28

Tabla 2.7: Resultado de análisis de cobre soluble de la muestra HA.

	%CuS-sulf.	%CuS-cít.
HA EL 4	7.41	7.21
HA ER 5	7	6.51
HA ER 6	7.54	8.26

Además, se realizó un proceso de tostación, que se basa en la reacción de sólido con gases a temperaturas elevadas, sin llegar a la fusión, generando que los minerales se transformen a otros más solubles. Las especies de cobre sulfurado son difíciles de lixiviar, pero este proceso genera sulfatos solubles en agua y óxidos en ácido sulfúrico.

En las pruebas de lixiviación agitada, realizadas con escoria con granulometría de 100% menor a la malla 100, se encontró que para la escoria de CPS se encontró una extracción máxima de 80% y para la HA un máximo de 85% después de 24 horas de lixiviación. la mejor extracción se obtuvo con la adición de oxígeno a 90 °C, logrando una extracción de cobre del 95,04%.

Por otro lado, en las pruebas de lixiviación en columnas, con una granulometría de escoria de 100% menor a ¼ [in], realizadas con una mezcla de ambas escorias con enfriamiento rápido, con aglomerado y curado de las escorias y una solución lixivante de H₂SO₄ a 160 g/L, la extracción obtenida fue del 71,4% de cobre, pero con un consumo que supera los 900kg/t de escoria. Finalmente, en las pruebas de lixiviación de las calcinas de tostación a 50°C, se logró una extracción de cobre del 93,66%.

Otras pruebas de lixiviación (Dimitrijevic et al., 2017), con características de escoria similares a las de los hornos reverberos del caso anterior (Tabla 2.8) y granulometría menor a 75[μm]. Se obtuvieron extracciones de 35% de cobre con 2 M de HCl y 55% de extracción con 1.5 a 2 M de HCl. Al utilizar peróxido de hidrogeno en la lixiviación (Figura 2.22), se obtuvo que a la concentración de 3M de H₂O₂, máxima concentración estudiada, se encontró una extracción de 73%,

aumentado con diferencia al 30% obtenido sin peróxido. La extracción de hierro pasa de un 40% sin peróxido, a 55% en el mejor de los casos.

Tabla 2.8: Composición escoria utilizada para pruebas de lixiviación oxidativa(Dimitrijevic et al., 2017).

Especie	Contenido [%]
Cu total	0.97
Cu óxidos	0.15
Cu sulfuros	0.82
SiO ₂	33.75
Al ₂ O ₃	3.78
Fe ₂ O ₃	8.05
FeO	33.8
Fe ₃ O ₄	9.39
Fe total	39.09
CaO	6
MgO	1.66

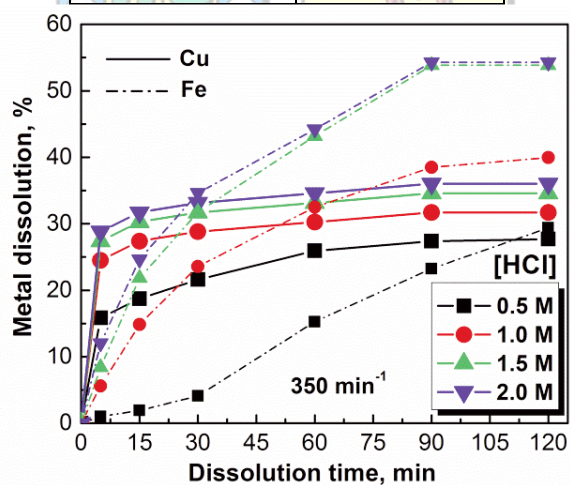


Figura 2.21: Curva de extracción de hierro y cobre según concentración de HCl, temperatura ambiente y lixiviación agitada a 350 [min⁻¹] (Dimitrijevic et al., 2017).

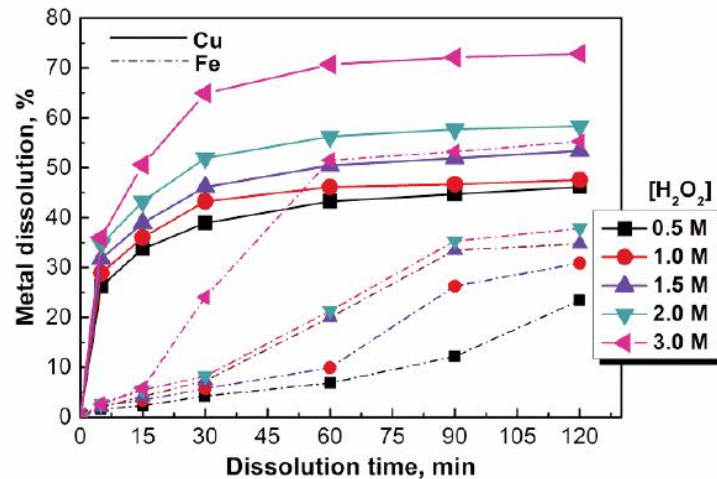


Figura 2.22: Curva de extracción de hierro y cobre según concentración de H_2O_2 , 1M de HCl, temperatura ambiente y lixiviación agitada a 350 $[min^{-1}]$ (Dimitrijevic et al., 2017).

Además, el mismo estudio se puede observar que la agitación no posee una gran importancia en el proceso, como se muestra en los datos graficados (Figura 2.23). La temperatura en cambio ayuda notablemente a la lixiviación de los compuestos dando la mayor extracción en la mayor temperatura estudiada, 50°C (Figura 2.24).

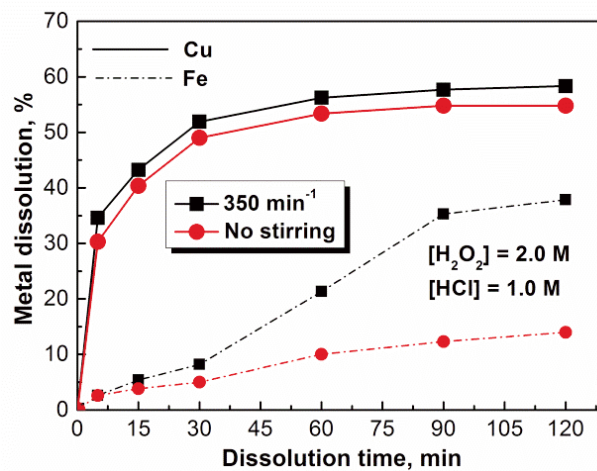


Figura 2.23: Curva de extracción de hierro y cobre con o sin agitación, temperatura ambiente (Dimitrijevic et al., 2017).

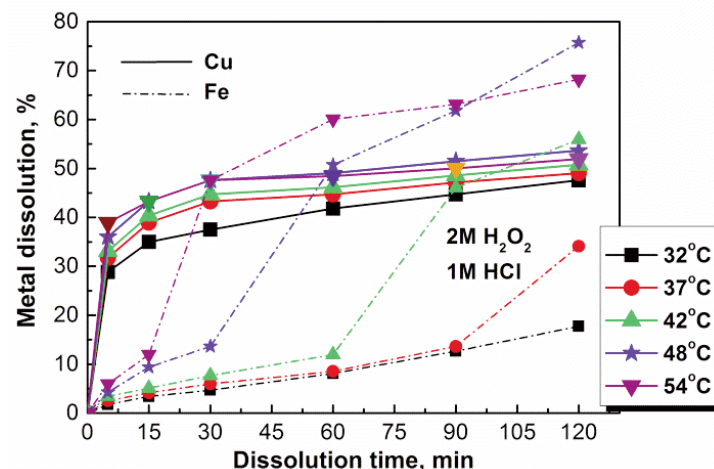


Figura 2.24: Curva de extracción de hierro y cobre a diferentes temperaturas y lixiviación agitada a 350 [min⁻¹] (Dimitrijevic et al., 2017).

Pruebas de lixiviación que incluyeron microondas en el procedimiento (TURAN et al., 2017), en la cual ocuparon escoria D₉₀ menor a 80[μm], realizando la lixiviación dentro de un horno microondas usando peróxido de hidrogeno y ácido acético. Donde la mayor extracción obtenida fue de 95% con lixiviación de 30 minutos, concentraciones de ácido acético y H₂O₂ de 4M, potencia de microondas de 900W, con el único objetivo de realizar el procedimiento a 100°C.

Tabla 2.9: Composición escoria utilizada para pruebas de lixiviación oxidativa y microondas (TURAN et al., 2017).

Especie	Contenido [%]
SiO ₂	32
Al ₂ O ₃	3.5
Fe ₂ O ₃	51
SO ₃	2.4
K ₂ O	0.5
CuO	3.8
CaO	0.7
ZnO	1.66

2.5 Flotación de partículas finas

La alternativa de flotación de escorias requiere una molienda intensiva para lograr la completa liberación de la escoria vítrea, a valores menores a 50 μm. La flotación de tamaños de partículas tan

finos requiere el uso de celdas de flotación neumática (SFR, Jameson, Hydrofot, entre otras) u otras tecnologías disponibles en el mercado como es el caso de la celda de Eriez: “Cavitation System”.

2.5.1 Cavitation System

Este método de flotación sirve para optimizar extracción de partículas finas y ultrafinas. “Este tipo de aspersor utiliza el principio de cavitación hidrodinámica para la generación de burbujas extremadamente pequeñas llamadas pico-bubbles”(Concha & Wasmund, 2013)

La cavitación, se produce cuando la presión disminuye lo suficiente para estar por debajo de la presión del vapor del líquido a temperatura normales, usualmente en altas velocidades de flujos(Maoming et al., 2010).

La flotación de partículas finas por métodos clásicos ocurre en flotadores cleaner y scavenger, en un estudio de “Eriez flotation división” se compara la tecnología “Cavitation system” con un proceso corriente de una mina oro-cobre donde “el concentrado de la primera limpieza es enviado a la segunda y última etapa limpieza. El relave de la primera limpieza pasa a la etapa cleaner scavenger que se hace en celdas mecánicas de 50 [m³], el relave cleaner scavenger es dispuesto como relave final”(Concha & Wasmund, 2013).

Tabla 2.10: extracción de cobre de partículas finas en celdas.

Malla Tyler	Tamaño µm	Recuperación de Cobre (%)				
		Día 1A Celda Columna	Día 1B Celda Columna	Día 1 Planta	Día 2 Celda Columna	Día 2 Planta
200	75	65.48	72.30	80.15	78.39	86.66
270	53	86.04	84.90	80.78	88.36	82.52
325	45	78.13	71.50	77.82	88.42	81.14
400	38	79.47	66.79	74.54	91.14	84.90
350	32	72.97	75.52	76.41	91.92	81.05
500	25	80.62	76.01	77.76	93.08	87.24
635	20	90.07	84.38	84.88	93.84	87.37
-635	-20	87.65	86.15	84.39	92.04	86.40
Total		84.51	82.12	81.92	91.32	85.22

Lo que muestra que es mayor la extracción de esta nueva tecnología, cuando se compara con otros métodos, así mismo se obtienen valores similares a las convencionales en planta.

2.5.2 Flotación de escoria

En estudios realizados en escorias del horno de reverbero (HR) y del convertidor Teniente (CT) de la Fundición Hernán Videla Lira-Paipote (ENAMI), se obtuvo que en pruebas de flotación Rougher a escala de laboratorio determinaron que la granulometría para ambos casos corresponde a 70% menor a 74 μm , lográndose extracciones de 59,2% para la escoria HR y 86,8% para la escoria del CT, cuyas leyes de cobre en el concentrado fueron de 3,7% y 23,6% respectivamente. Las dosis de reactivos utilizados fueron de 40 g/t de F-703 como colector y 30 g/t de H-70 como espumante.

Los tiempos óptimos de flotación de las etapas rougher y cleaner de ambas escorias, se determinaron mediante cinéticas de flotación. Finalmente, se realizaron pruebas a nivel industrial con los resultados de laboratorio, alcanzándose una ley de 18,2% de cobre (extracción de 56,1%) para la escoria HR, mientras que para la escoria CT se obtuvo una ley de 39,1% de cobre con una extracción de 91,4%. (Valderrama et al., 2018),

Otras pruebas realizadas a escorias (Guo et al., 2016), presentan un pretratamiento el cual consiste en molerla a un tamaño menor a los 0,15[mm] , mezclarlas con 12% de aditivos (cal quemada y aditivos compuestos (Tabla 2.11) y mezclar a altas temperaturas (1350°C por 120 min) para luego enfriarlas lentamente (hasta los 900°C). Esta escoria enfriada pasa por un proceso de flotación. Se encontró que el concentrado de cobre más grueso se incrementó de 6,43% a 11,04%, pero manteniendo la extracción de cobre en torno al 72%.

Tabla 2.11: Composición de aditivos compuestos.

Elemento	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Cu	S
Porcentaje	52,44	2,09	0,77	0,68	1,63	9,30	1,23	12,13

2.6 Microondas

El microondas, consta de un magnetrón, el cual genera ondas pequeñas de alta densidad, las cuales dentro del microondas rebotan en las paredes metálicas y calientan los objetos por dentro,

usualmente alimentos. Existen 3 tipos de materiales según su interacción con la radiación microondas: aislantes, conductores y absorbentes.

Los *materiales aislantes* en general transmiten es su totalidad las ondas, por lo que no se calientan en lo más mínimo, es el caso de los vidrios. Los *conductores* reflejan las ondas y al igual que los anteriores, no se calientan por el mismo hecho de reflejar. En cambio, los *absorbentes* o *dieléctricos* se ven alterados por esta radiación, este es el caso del agua que es la responsable de calentar los alimentos debido a su alta constante dieléctrica.

El estudio de las microondas y las rocas llevan más de 50 años, pero con ninguna aplicación comercial. A diferencia de varios elementos que no se calientan como los metales que refleja las ondas y el vidrio que las atraviesan, la constitución multifásica que poseen las rocas facilita el calentamiento de éstas.

Al igual que en los alimentos, el haz de microondas entra por la escoria, sin perder su alta potencia. Un efecto de esto es el ensanchamiento gaussiano o de Doppler al haz de microondas, el cual es significativo si el ancho del haz no es mayor a la longitud de onda. En materiales heterogéneos, la dispersión provoca desviaciones en la propagación del haz, y dependiendo de las propiedades dieléctricas presentes en la escoria, se absorbe la radiación de distinta manera, provocando un aumento de temperatura de manera selectiva (Meisels et al., 2015). Este calentamiento selectivo, provoca la dilatación térmica de forma dispareja dentro del mineral, provocando grietas. En primeros estudios corroboran que la microestructuras tienen alta influencia en la reducción de la resistencia por calentamiento selectivo (Jones et al., 2005). En investigaciones en minerales de hierro, taconita y titanio, al exponerlo al microondas, el tratamiento térmico afecta al mineral de manera favorable, disminuyendo su resistencia y la energía a utilizar para la generación de fractura (Koleini & Barani, 2012).

Otras pruebas de irradiación se realizó con concentrado de cobre expuesto dentro de un horno convencional, obteniendo resultados favorables al reducir un 50% el work index, además, si se realizaba un temple a la muestra, se reduce en un 65% el work index (Vorster et al., 2001). Otros estudios (Walkiewicz et al., 1988) apuntan al calentamiento selectivo o inactividad de compuestos dando la Tabla 2.12, donde se observa que varios componentes presentes en la escoria estudiada (Tabla 2.1) están presentes y con distintas velocidades de calentamiento, donde el óxido de fierro,

que compone casi el 60% de la escoria, alcanza temperaturas altas en comparación al óxido de sílice, que solo alcanza los 70 °C, cuyo compuesto compone el 20 %.

Tabla 2.12: Razón de calentamiento y temperatura máxima para distintos compuestos.

Compuesto		Velocidad de calentamiento (°C/min)	Máxima temperatura alcanzada
Activo	Ni ₂ O ₃	400	1300
	CoO ₃	300	900
	CuO	200	800
	Fe ₂ O ₃	170	1000
	FeS	135	800
	CuS	120	600
Dificultad calentamiento	Al ₂ O ₃	80	1900
	PbO	70	900
	MgO	33	1300
	ZnO	25	1100
	MoO ₃	15	750
Inactivo	CaO	5	200
	CaCO ₃	5	130
	SiO ₂	2-5	70

Otro factor importante para el aumento de temperatura es el tamaño de partículas, según un estudio, partículas por debajo de 4.75[mm], el calentamiento de estas partículas no genera una gran diferencia en su resistencia a la trituración, a diferencia de partículas más grandes. Lo sugerido por los autores, es que estas partículas pequeñas generan una transferencia de calor por conducción considerable (Wang et al., 2017).

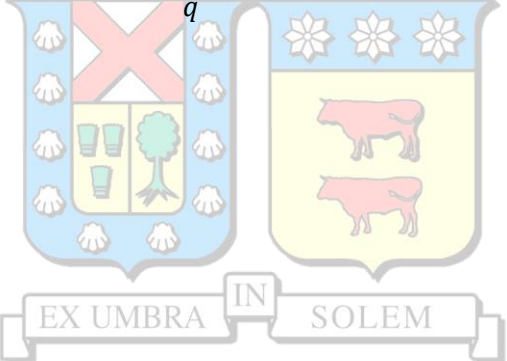
2.6.1 Balance de energía.

Para determinar el calentamiento teórico de la escoria dentro del microondas se sabe que la escoria es sometida a un aporte de calor sobre toda su superficie, donde cuyo sistema no recibe ninguna corriente de entrada de masa ni salida, por lo que la masa se mantiene constante. Si hay un aumento de temperatura como consecuencia del aporte de energía (q).

De esta manera, se puede plantear una ecuación general de los balances de energía calorífica para un sistema sin caudales de entrada ni salida (18), donde se asume que no hay variación de energía potencial, cinética y desconociendo el aporte del plato giratorio.

$$C_v(T - T_{ref}) \frac{dM}{dt} + MC_r \frac{dT}{dt} = q \quad (18)$$

Donde simplificando se puede llegar a la ecuación (19), donde M es la masa de escoria, C_v es el calor específico de la escoria, T_f la temperatura final, T_i temperatura inicial y q la energía suministrada. Con esta fórmula, se puede estimar el tiempo necesario para alcanzar la temperatura necesaria para el calentamiento óptimo de la escoria.

$$t = \frac{MC_v(T_f - T_i)}{q} \quad (19)$$


3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

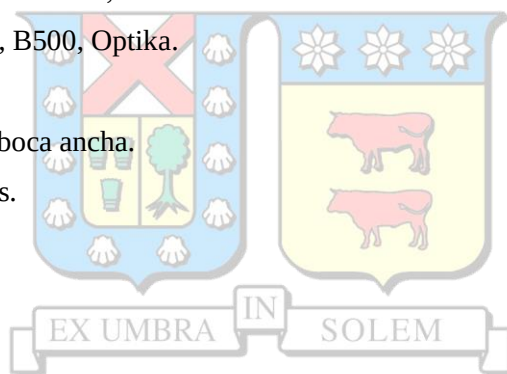
3.1 Materiales.

Equipos

- Horno microondas, TH- 25 DM, 900W.
- Sistema de rodillos, Hebro 328x100, labtech Hebro Ltda.
- Balanza digital, winkler.
- Cámara térmica, Hikimicro, modelo M10.
- Tamices 1” , ¾”, ½”, 3/8”, ¼”, Gilson .
- Harnero vibratorio, TS, Gilson.
- Medidor de pH digital, HI 2211, Hanna Instruments.
- Electrodo de ORP, HI4430B, Hanna Instruments.
- Microscopio óptico, B500, Optika.

Materiales.

- Botellas de 2 litros boca ancha.
- Vasos para muestras.
- Vasos precipitados.
- Pipeta.
- Picnómetro.
- Vidro reloj.
- Tambor.
- Hielo.



Reactivos.

- Ácido sulfúrico, 98%.
- NaCl, al 97%.
- H₂O₂, p/p 50%.
- Sulfato de Cu II.
- Sulfato de Fe II.
- Sulfato de Fe III.

3.2 Ensayos de caracterización física y química de la escoria.

3.2.1 Distribución granulométrica.

Se procede a masar la escoria y realizar separación por tamaño mediante el harnero. El tiempo de este procedimiento es de 5 min. Posteriormente, se masa la escoria retenida en cada bandeja, para finalmente generar la curva de distribución granulométrica.

Se dispone cada fracción de tamaño de partículas en baldes y se toman muestras representativas para cada procedimiento. La masa necesaria se muestra en la Tabla 3.1. Esta caracterización se realiza mediante un manto y cuarteo de las fracciones de tamaño, de tal manera de obtener la cantidad representativa según la curva de distribución granulométrica y generar muestras representativas para los ensayos planificados.

Tabla 3.1: Masas requeridas para los procedimientos por muestra.

Proceso	Muestra necesaria[g]
Análisis inicial de escoria	50
Distribución granulométrica.	2500
Densidad absoluta.	250
Humedad natural.	500
Humedad de impregnación.	500
Consumo específico de ácido sulfúrico.	200
Pretratamiento con exposición a rayos de microondas y lixiviación.	2300
Lixiviación final.	3500

Es importante reducir el tamaño (100%-100[μm]) para los casos de densidad absoluta, consumo específico de ácido sulfúrico y análisis de escoria o ripio, por lo que se procede a chancar la escoria, separarla por muestra y luego, pulverizarla. Se corrobora el tamaño menor a 100 [μm] mediante tamiz.

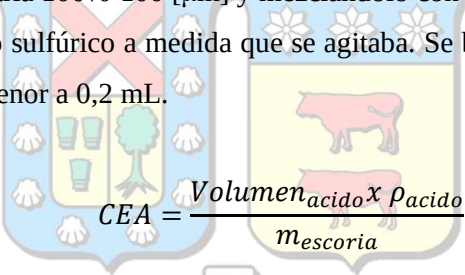
3.2.2 Densidad absoluta, humedad natural, de impregnación y CEA.

La determinación de densidad absoluta es mediante el picnómetro, se utiliza muestra granulometría 100%-100 [µm] y se realiza mediciones en triplicado para corroborar el dato.

La humedad natural, se calculó en triplicado masando la muestra de escoria antes y después del secado de esta en una estufa por 24 [h].

La humedad de impregnación se calculó masando la escoria (100 [g] aproximadamente) y posteriormente sumergiendo el mineral durante 20 minutos en 500[ml] de agua destilada. Luego se filtró por 2 h y se masa la escoria resultante.

El cálculo de consumo específico de ácido sulfúrico se realizó en triplicado y se utilizó 50 [g] de escoria con una granulometría 100%-100 [µm] y mezclándolo con 450 [ml] de agua destilada. Se midió el pH y se agregó ácido sulfúrico a medida que se agitaba. Se buscaba que la variación entre cada adición de ácido fuese menor a 0,2 mL.


$$CEA = \frac{Volumen_{acido} \times \rho_{acido}}{m_{escoria}}$$

EX UMBRA IN SOLEM

3.3 Pretratamiento con exposición a rayos de microondas.

Este proceso se inicia con el uso del microscopio, con el objetivo de tener registro de las características visuales de la escoria antes del pretratamiento. Antes de esto, se realiza un corte con una sierra a una muestra de escoria, para generar una cara limpia para la observación en el microscopio; y luego se marcan dos puntos de referencia para obtener dos vistas referenciales para la toma de datos antes y después de la aplicación de microondas.

Se coloca una de las muestras cortada junto a 500[g] de escoria en un microondas, durante 5 min a la potencia más alta que posee el horno, luego se pasa por el proceso de templado, mediante agua con hielo. Se finaliza el proceso secando la escoria durante 24[h] para poder colocar la muestra en el microscopio. Se observa en el microscopio la muestra tratada luego del proceso. Se realiza el mismo procedimiento a la otra muestra cortada en distintos intervalos y se verifica el efecto de la aplicación

de microondas con el microscopio, buscando en particular microfracturas generadas o crecimiento de las fracturas existentes antes del tratamiento.

Luego, con el objetivo de seleccionar el pretratamiento más apto, se dispone a hacer las pruebas descritas en la Tabla 3.2, donde el criterio de selección es el procedimiento que genere mayor temperatura en un tiempo de exposición de microondas más corto.

Tabla 3.2: Experimentos a realizar para optimización de pretratamiento, masa de muestras de escoria aproximadas.

Masa		500 [g]	250 [g]		125 [g]	----
Disposición		junta	junta	separada	junta	unitaria
Experimento N°	1	5				
	2		5			
	3			1		
	4			3		
	5				1	
	6					1
	7					1
	8					1
	9					1
	10		3			
	11	5				

3.4 Lixiviación en botellas.

Al obtener el pretratamiento óptimo de microondas, se realizan 4 pruebas principales, un experimento en blanco, el cual consiste en un curado convencional con ácido sulfúrico y sin radiación de microondas; y 3 experimentos con curado clorurado los cuales se diferencian en que el primero no se irradia con microondas y los otros 2 en los que, en el proceso de lixiviación, uno de ellos se regula el potencial mediante la adición de peróxido para mantener alrededor de 700[μm].

El curado se realiza agregando inicialmente los 500 [g] de escoria junto a un 70% de NaCl basado en la reacción estequiométrica, finalmente se agrega refino (composición en apartado 4.3) y luego, ácido sulfúrico concentrado. El ácido sulfúrico agregado corresponde al 30% del consumo

calculado con anterioridad, ya que el cálculo de este se realizó en escoria con granulometría menor a 100 [µm].

A medida que se agrega el ácido sulfúrico, se rolea la escoria para generar la suficiente mezcla. Se requiere dejar en reposo durante 7 días y realizar controles cada día para evitar pérdida de humedad de la muestra, efectuando la humectación con solución refino.

La lixiviación se realiza en botellas, se agrega la escoria junto al refino clorurado en relación 1:1, se masa la muestra y se ajusta el pH a 1.5, se dispone la botella en los rodillos, cuales hacen girar el sistema a 70 [RPM]. El muestreo se realiza a los 15 [min], 45[min], 2 [h], 6 [h] y finalizando en 24[h]. En cada muestreo se sacan muestras de 50 [ml] de PLS y se mide el pH junto con el potencial redox, regulando el pH para mantener constante en 1,5 y en el caso de la última experiencia, regulando el potencial redox agregando peróxido de hidrógeno hasta alcanzar los 700 [mV/ENH]. Al finalizar la prueba, se mide el volumen total de PLS, pH, potencial redox y se saca una muestra de este. Luego se lava el ripio y se seca durante un día, obteniendo una muestra para análisis. Cada muestra se analiza por EAA, por cobre y hierro total; y titulación volumétrica por ion férrico, en el caso de muestras líquidas.

Además, se agregaron 2 pruebas adicionales, con el mejor resultado, una aumentando el tiempo de radiación de microondas, optando por realizar el procedimiento 5 veces; y una lixiviación por más tiempo, por lo que los tiempos de muestreo se realizaron a los días 1, 8 y 11.

3.5 Consumo de peróxido de hidrógeno.

Se llevó a cabo un experimento con el objetivo de estimar la cantidad de peróxido de hidrógeno necesaria para aumentar el potencial a 700 [mV/ENH]. En este estudio, se utilizaron 40 [ml] del refino mencionado en la Tabla 3.3. Estos 40 [ml] se mezclaron con el propósito de ir incorporando gradualmente H₂O₂ y registrar la cantidad necesaria para alcanzar el potencial deseado (ANEXO C).

Tabla 3.3: Composición del refino a utilizar en la memoria.

Elemento	Concentración [g/l]
Cu ²⁺	0,2
Fe ²⁺	1,4
Fe total	3,4
Cl ⁻	40

Si el procedimiento óptimo de lixiviación se realiza con peróxido de hidrogeno, se estudiará el consumo de este mediante tiempos de muestreos (ANEXO C). Durante la lixiviación se dispondrá promedio de 0.2 [ml] de peróxido de hidrogeno por hora como mínimo, para mantener el potencial redox.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Caracterización física y química.

En la caracterización de la escoria de forma física, se obtuvo una distribución mayoritariamente de tamaño grueso donde más del 40 % de la muestra posee un tamaño mayor a una pulgada, además del número de partículas menores a 10 [mm] a 2%, por lo que las partículas pequeñas no generaran problemas de lixiviación, pero la superficie expuesta del mineral es menor.

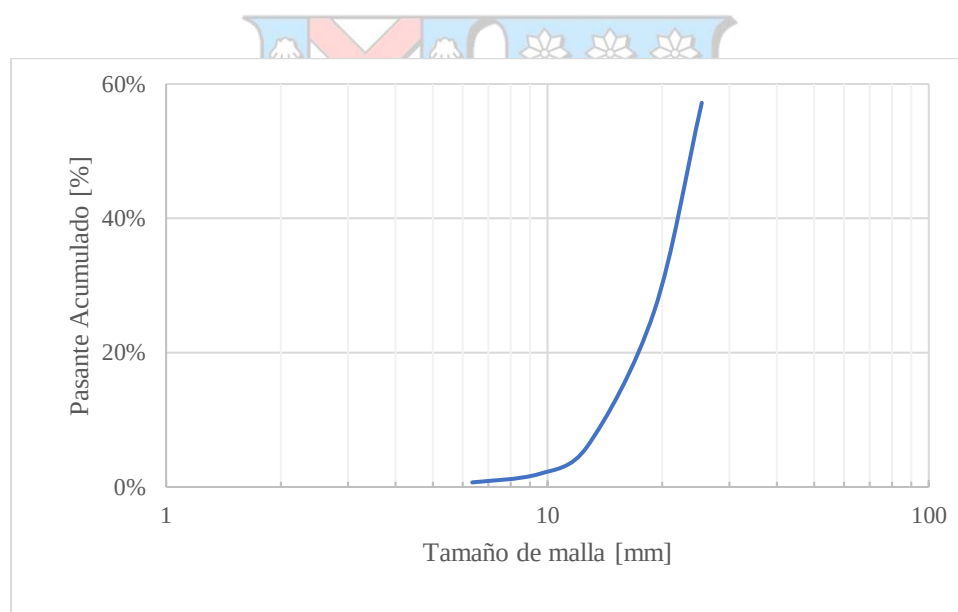


Figura 4.1: Granulometría de la muestra de escoria fundición Codelco ventana.

El tipo de escoria que se está trabajando es del tipo botadero, la cual según las características estudiadas se relacionan con las obtenidas experimentalmente (Tabla 4.1), obteniendo una densidad real elevada y humedad de impregnación baja, demostrando la baja porosidad, por lo que la lixiviación en pila de forma convencional se estima una baja extracción de cobre y alta de hierro.

El consumo de ácido sulfúrico, al que se llegó fue cercano al de 100 [kg] de ácido por tonelada de escoria, el cual fue mediante una prueba con granulometrías fina, por lo que para las pruebas siguientes se utiliza un consumo cercano al 30% de este resultado.

Tabla 4.1: Caracterización física de la escoria fundición Codelco ventana.

	Valor	Error	Unidad
densidad real	3,69	$\pm 0,07$	t/m ³
Humedad Natural	0,01	$\pm 0,01$	%
Humedad de impregnación	0,43	$\pm 0,30$	%
CEA*	106	± 12	kg/t de escoria

4.2 Pruebas de microondas.

En la primera prueba realizada se observó una sola microfractura generada en el proceso de microondas, esto posiblemente al tener sólo 2 puntos de muestreo para obtener muestras fotográficas. Un muestreo con una mayor magnificación mejoraría probablemente el número de microfracturas encontradas. Además, las microfracturas que son observables son las que florecen en la superficie, por lo que no pueden ser contabilizadas las generadas internamente.

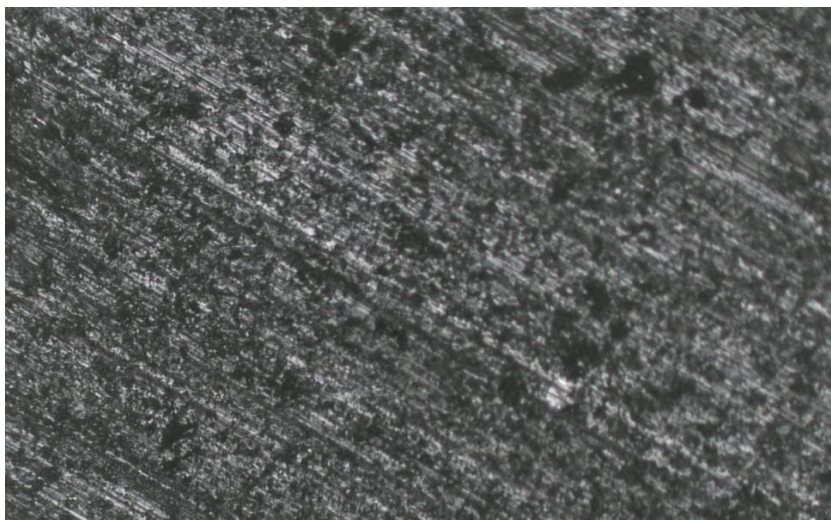


Figura 4.2: Muestra 1 punto de muestra 1 a microscopio x5 natural zoom en fractura.

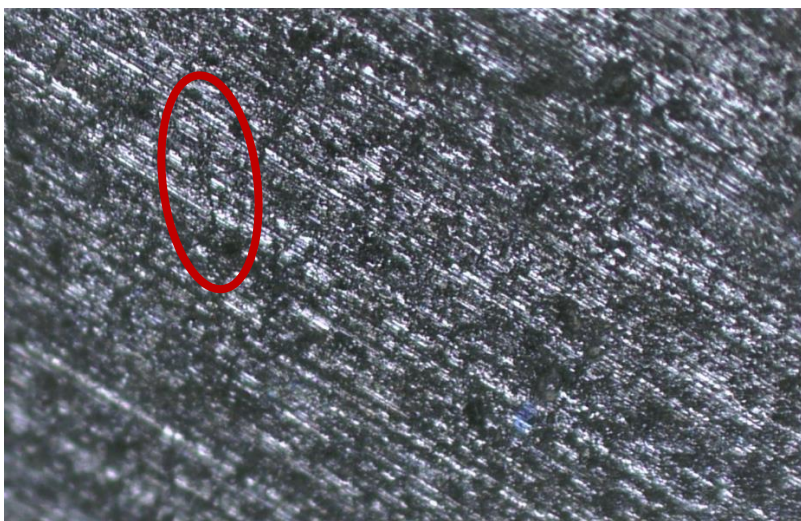


Figura 4.3 Muestra 1 punto de muestra 1 a microscopio x5 pos-exposición junto con muestra de 500[g] zoom en fractura.

Al exponer nuevamente la muestra al microondas de forma solitaria (independiente de las otras partículas), se puede encontrar más marcas de fractura superficial, por lo que el cambio térmico genera mayor cantidad de fracturas. Al calentar la muestra por separado, se descarta la formación de rasgaduras o grietas por el contacto con otra especie de escoria. Además, la temperatura alcanzada por la muestra es cercana a los 280 °C, a diferencia de la primera prueba (masa total de 500[g]) la cual está alrededor de 380 °C, infiriéndose que la formación de grietas puede lograrse a un intervalo de temperatura menor.

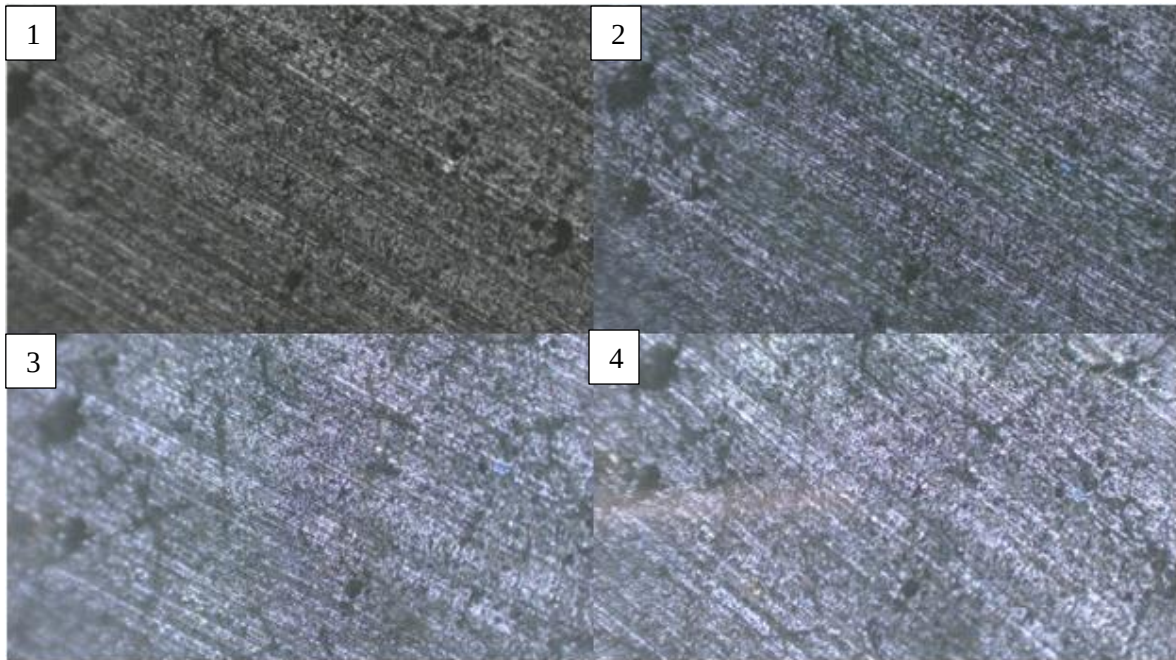


Figura 4.4: Muestra 1 punto de muestra 1 a microscopio x5, Foto 1 muestra preexposición, foto 2 prueba con exposición de 5 [min] con muestra de 500 [g], foto 3 y 4 con exposición por 1 [min] muestra solitaria.

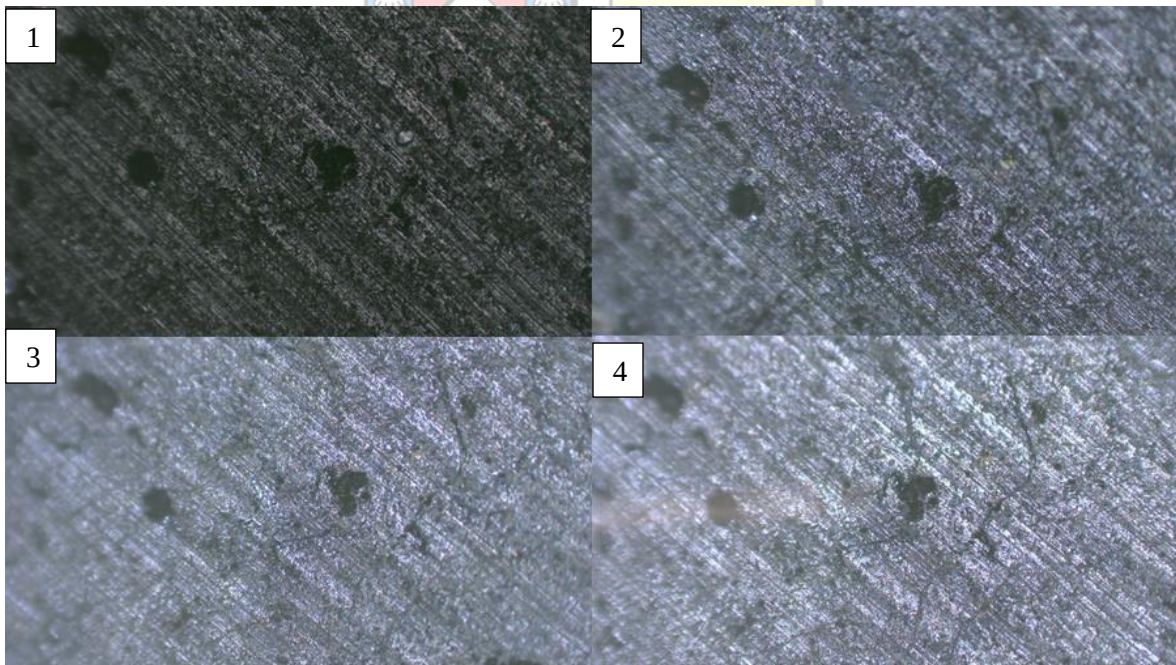


Figura 4.5: Muestra 1 punto de muestra 2 a microscopio x5, Foto 1 muestra preexposición, foto 2 prueba con exposición de 5 [min] con muestra de 500 [g], foto 3 y 4 con exposición por 1 [min] muestra solitaria.

En el caso de la muestra 2, la cual fue sometida de forma individual por 3 min, alcanzó una temperatura elevada, cercana a los 600 °C, mostrando un cambio de color de gris a un rojo intenso esperable para una muestra calentada hasta esa temperatura y posterior al enfriamiento, a un cambio de retorno al color inicial. En ésta se observa una microfractura más significativa que, además, se puede visualizar a simple vista. Cabe notar que el microondas no está diseñado para resistir materiales que alcanzan tan elevadas temperaturas.

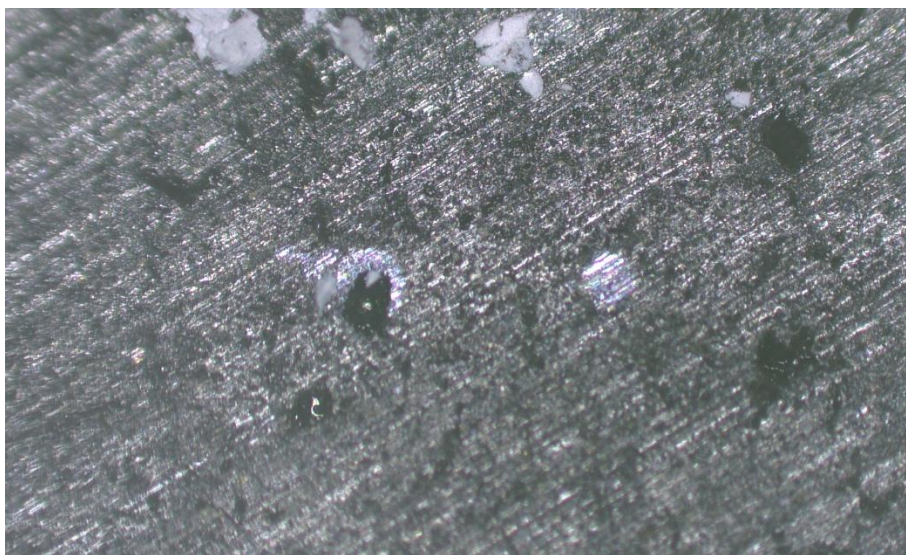


Figura 4.6: Muestra 2 punto de muestra 1 a microscopio x5.

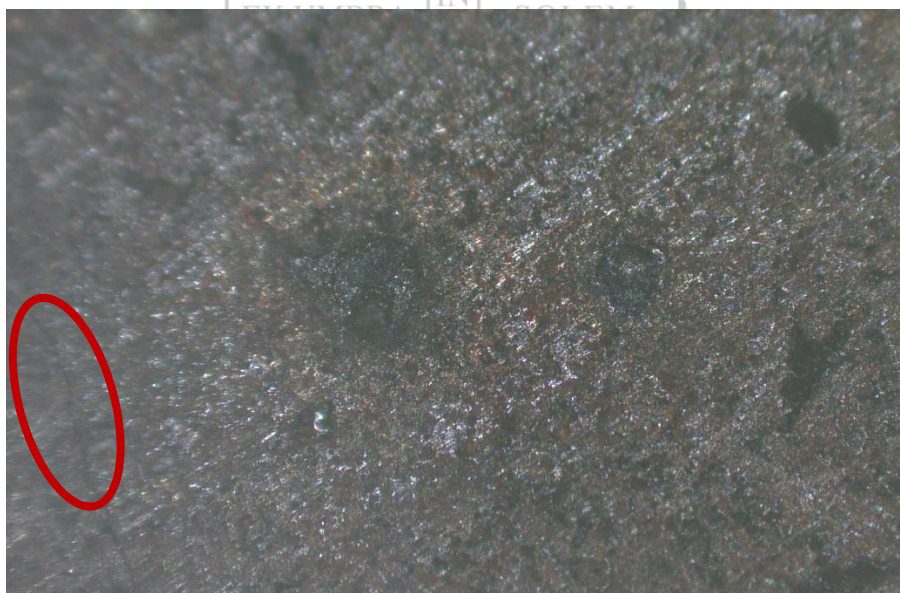


Figura 4.7: Muestra 2 punto de muestra 1 a microscopio x5 pos-exposición de 3 [min].

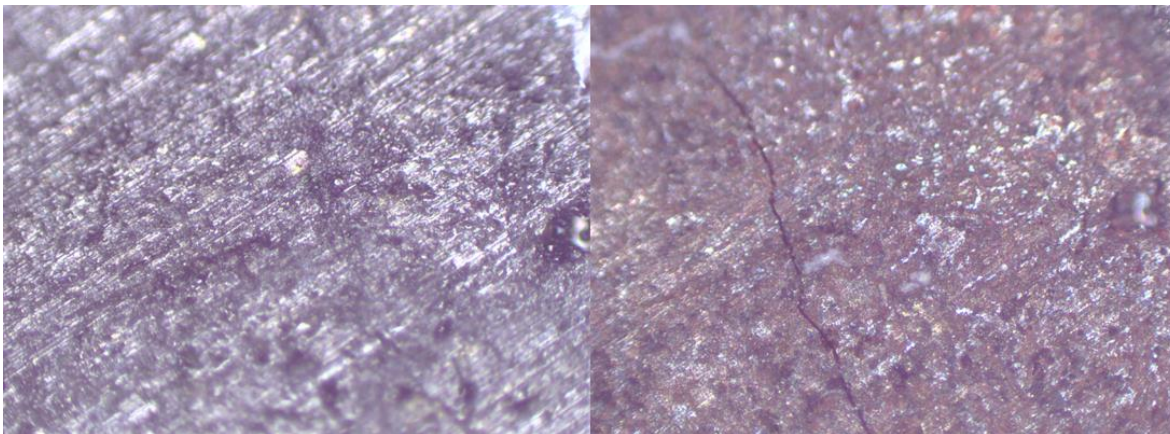


Figura 4.8: Comparativa de muestra 2 punto de muestra 1 a microscopio x10 antes y después respectivamente.

Los resultados de las pruebas de optimización del tiempo de calentamiento, se indican en la Tabla 4.2 , obteniéndose valores de calor específico de la escoria, cuyos resultados se tienen que comparar con el valor experimental bibliográfico de $1,8 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ (Cepeda López & Torres Muñoz, 2019).

Tabla 4.2: Resultados experimentos de calibración de temperatura.

Muestra	Distribución	Masa (g)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
1	Junto	499.6	5	370
2	Junto	242	5	370
3	Separado	258	1	140
4	Separado	249.5	3	390
5	3 escorias	113.2	1	170
6	Unitario	26.2	1	280
7	solo	79.7	1	236
8	solo	20.26	1	330
9	solo	26.58	1	360
10	junto	275.55	3	463
11	junto	512.73	5	435

Tabla 4.3: Calor específico calculado para cada muestra de escoria.

Muestra	Calor específico [kJ·kg ⁻¹ K ⁻¹]
1	1.57
2	3.23
3	1.82
4	1.78
5	3.29
6	8.08
7	3.2
8	8.7
9	6.1
10	1.3
11	1.3

De la Tabla 4.3 se puede deducir que, para masas pequeñas, es necesario aplicar más energía en comparación con la masa total a calentar, para lograr aumentar la temperatura. Esto posiblemente debido a que en el contacto del plato de vidrio pyrex con la escoria, existe un intercambio térmico por convección, por lo que estas partículas se ven afectadas por las características del plato, sobre todo la masa y tamaño de partículas de la escoria, de forma similar a lo planteado por Wang en relación con las partículas pequeñas (Wang et al., 2017). La otra posibilidad es que, al tener menor cantidad de escoria, el efecto de rebote que se crea entre este material y la microondas disminuye, generando menor temperatura. Esto conlleva que el plato sea considerado en el sistema como una variable significativa.

De esta manera la temperatura máxima encontrada para escoria se encuentra en torno a los 450°C, por lo que se decidió exponer la escoria por 5[min] alcanzando una temperatura promedio de 400°C, ya que la otra opción sería calentar la muestra por fracciones, lo que demoraría más tiempo si se piensa en su aplicación a escala industrial.

4.3 Resultados de los ensayos de lixiviación en botella.

4.3.1 Cinética de extracción de cobre.

De las pruebas de cinética de lixiviación, se obtuvieron las curvas de extracción en función del tiempo. La Figura 4.9 muestra que las pruebas con microondas permiten lograr una mayor extracción de cobre que aquella sin este proceso. Además, la prueba con adición de peróxido hidrógeno exhibe una extracción de cobre mayor del orden de 4,0%, indicando la necesidad de la presencia de un oxidante en la etapa de lixiviación.

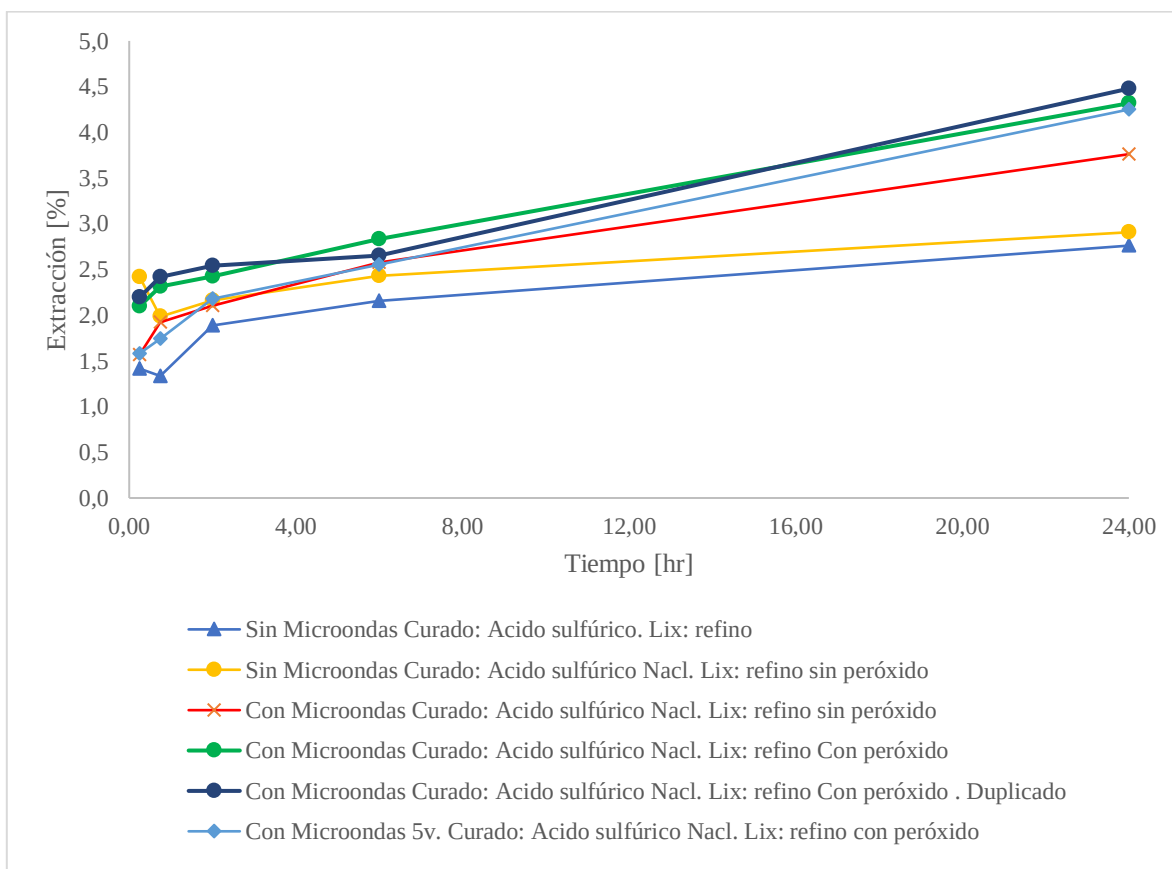


Figura 4.9: Cinética de extracción de cobre total para diferentes condiciones experimentales.

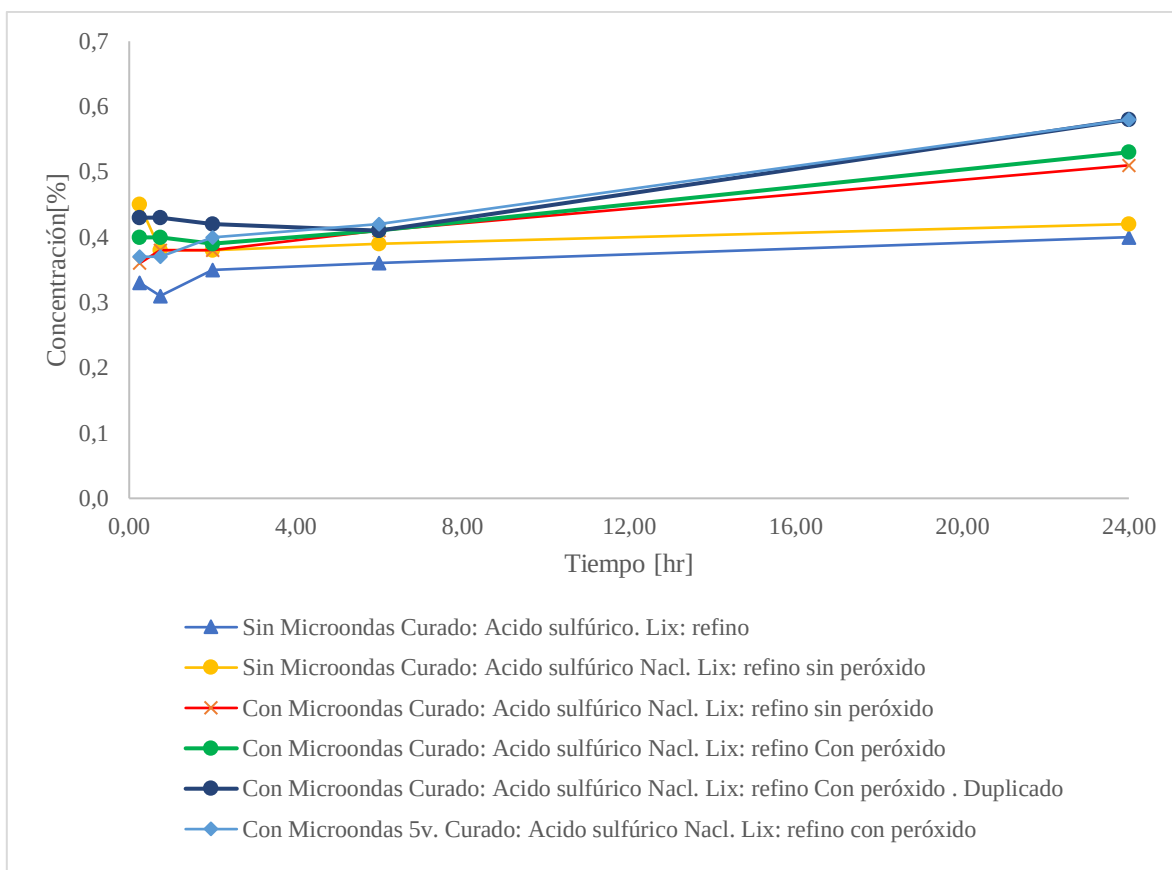


Figura 4.10: Concentración de ión de cobre para las pruebas de lixiviación.

La mejor cinética de extracción de cobre se logra con el uso de microondas, curado clorurado y lixiviación en medio ácido oxidativo (inclusión de peróxido).

Esta metodología se repite considerando un tiempo más prolongado (11 días de lixiviación), con el objeto de visualizar el avance de la reacción de disolución de las especies de cobre contenidas en la escoria.

La Figura 4.11 muestra la cinética de extracción de cobre considerando 11 días de lixiviación, incrementando la extracción de 9,26%. Esto puede explicarse a través de:

- i) Existencia de microgrietas que son lentamente alcanzadas por la solución lixivante.
- ii) Disolución con una cinética lenta de la sílice que forma la fase vítrea de la escoria.

Más importante que este valor, que naturalmente puede considerarse bajo, es que la disolución no se detiene y aún a los 11 días se nota una pendiente ascendente. Considerando que la biolixiviación de minerales de cobre con una ley de 0,6% CuT se proyecta sobre 400 días para lograr una extracción de cobre sobre 80%, es totalmente válido considerar que la escoria con cerca de 1,0% CuT en un

mismo periodo de tiempo pueda lograr extraer un valor similar. Además, por la presunta estabilización de la sílice por el curado, podría ser la causa del bajo efecto observado de la aplicación de microondas en este estudio.

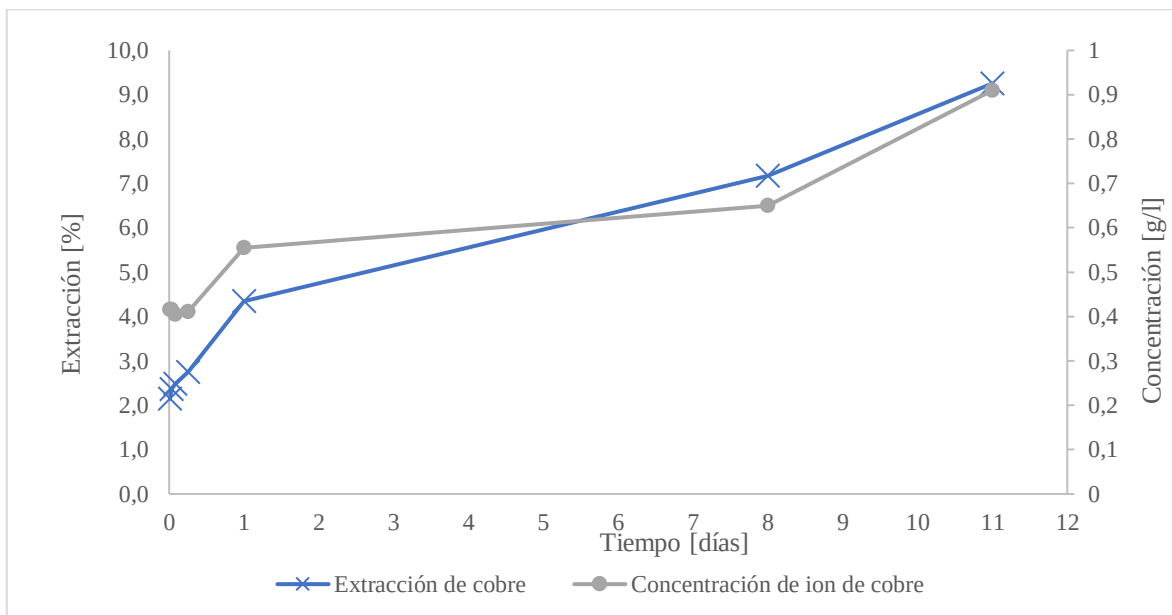


Figura 4.11: Extracción y concentración de cobre total luego de 11 días.

4.3.2 Extracción de hierro.

El hierro contenido en la escoria es muy superior al contenido de cobre, por lo que resulta relevante conocer su conducta en la lixiviación para evaluar el grado de selectividad del lixivante para cobre y hierro.

La Figura 4.12 muestra la cinética de extracción del hierro bajo las diferentes condiciones experimentales ensayadas. Puede notarse que en las pruebas donde se aplica un curado con NaCl y ácido sulfúrico, existe una mayor liberación de hierro en la solución, demostrando la eficiencia de un pretratamiento químico de este tipo, debido a que el ácido clorhídrico generado en este pretratamiento ataca la superficie de la escoria (SiO_2), liberando las especies de hierro, que se transforman en compuestos de hierro más solubles en el lixivante.

Se puede observar que para la mejor condición de extracción de cobre (curva verde), la extracción de hierro a las 24 h es de 1,3%, siendo en consecuencia la razón de extracción de Cu versus la de Fe

de $(4,0/1,3) = 3,0$. Si se compara este último valor con la de una cinética asociada a minerales se tiene $(80/12) = 6,6$, señalando la lixiviación de escoria es más selectiva en Cu/Fe que la de minerales de cobre.

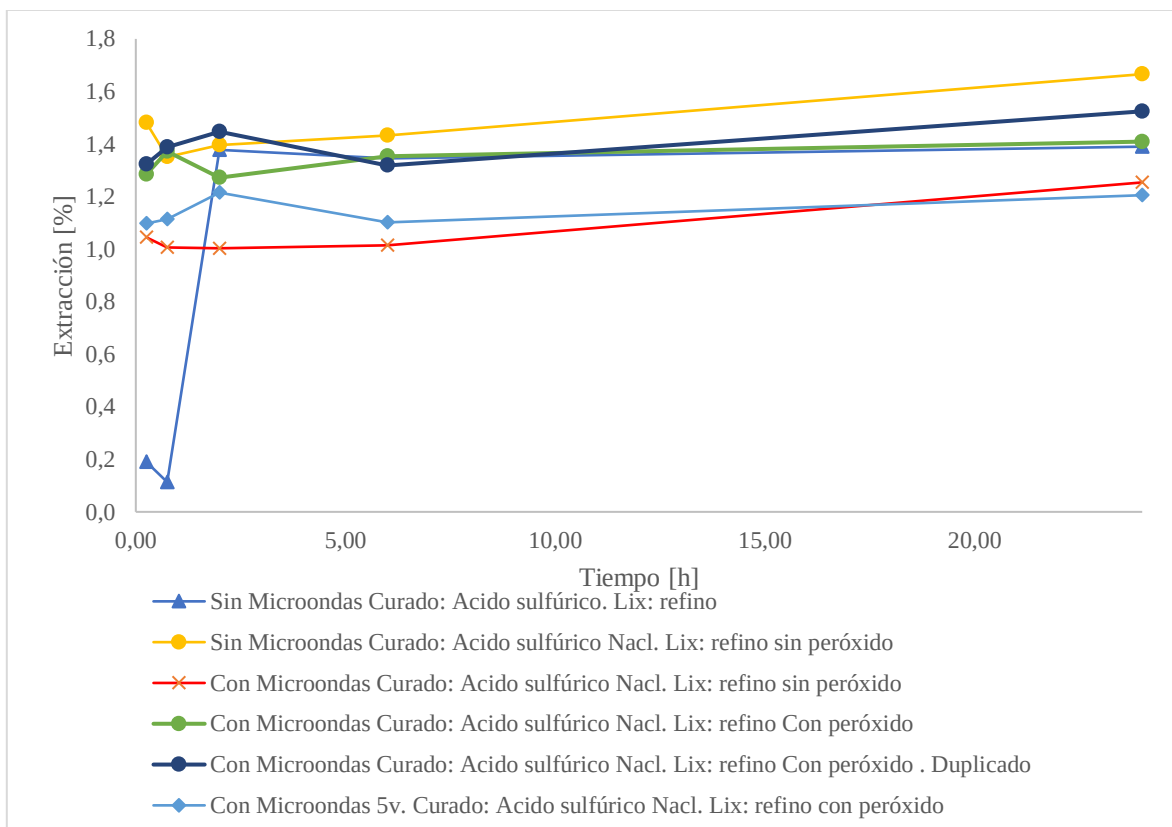


Figura 4.12: Extracción de hierro total de las pruebas realizadas.

La Figura 4.13 muestra que el tratamiento con microondas, considerando un curado químico con ácido sulfúrico concentrado y en la lixiviación la adición de peróxido de hidrógeno, usando un total de 3 [ml] a 50% p/p, promueven una disolución controlada de las especies de hierro contenidas en la escoria.

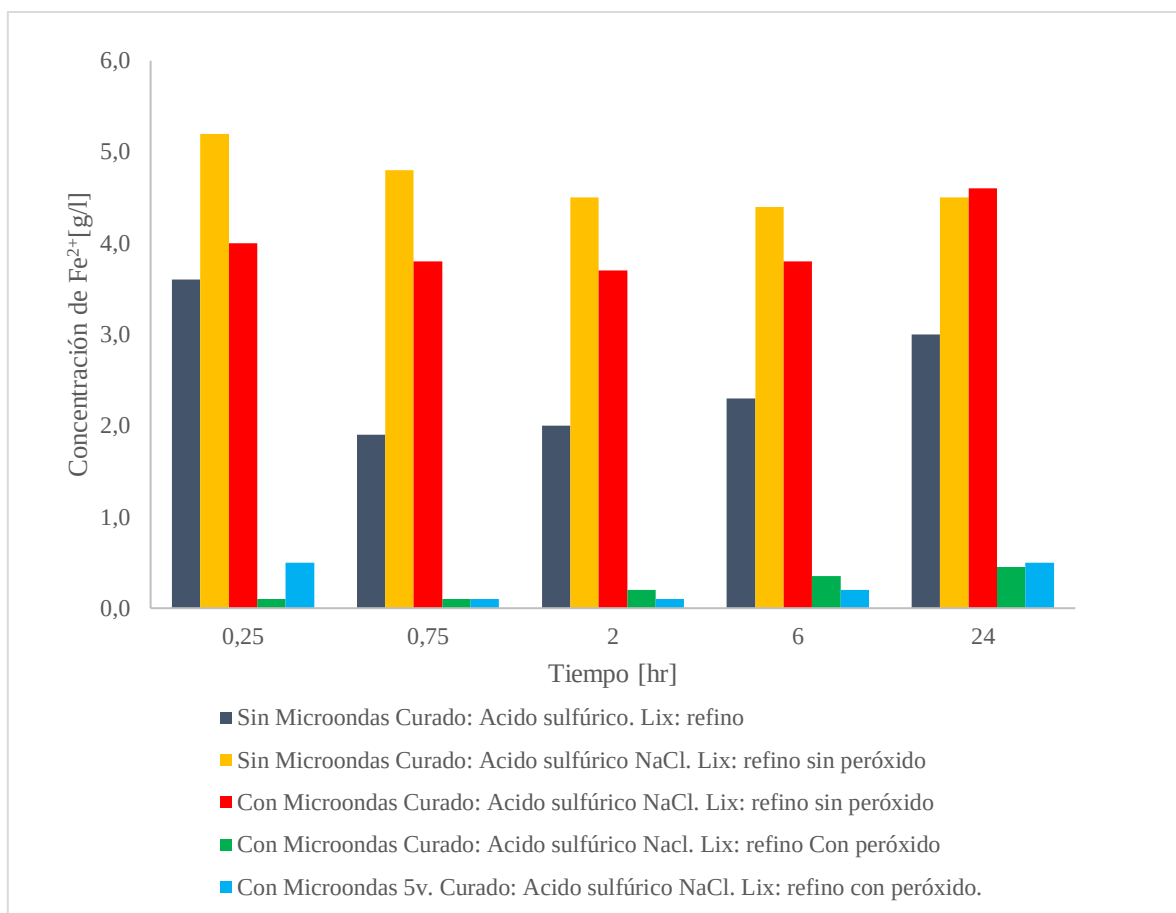


Figura 4.13: Concentración de ion ferroso para los tiempos de muestra.

La Figura 4.14 muestra la cinética de extracción de hierro en función del ciclo de lixiviación de 11 días. La conducta inicial del hierro hasta el primer día de lixiviación es lo que se esperaría de una lixiviación de una escoria. Enseguida se observa una oxidación acelerada del hierro presumiblemente al estado de férrico por la adición de peróxido de hidrógeno. La disminución de la concentración de hierro puede deberse a la sedimentación de este en otro compuesto, posiblemente natrojarosita, ya que se produjo una espuma luego de cuarto día, por la alta concentración de sodio presente en la solución.

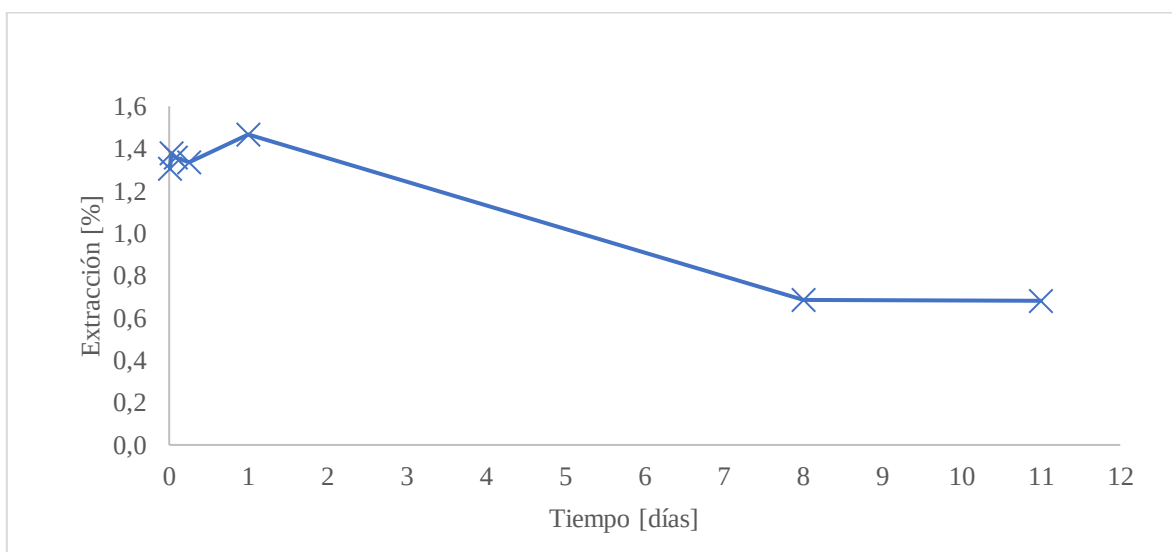


Figura 4.14: Extracción de hierro total luego de 11 días.

4.3.3 Adición de Peróxido de Hidrogeno.

Como anteriormente se indicó, la adición del peróxido aumenta la extracción de cobre, ya que el peróxido oxida los iones ferrosos presentes en la solución, aumentando la concentración de ion férrico y el potencial redox de la solución, en los rangos de los 720[mV/ENH], lo cual favorece la disolución del cobre.

Se puede observar en la Figura 4.15 que, sin adición de peróxido de hidrógeno, el potencial redox es cercano a 450 [mV/ENH], significativamente menor al que se obtiene con la adición de este reactivo. La conducta de las curvas con adición de H_2O_2 muestran que en los puntos en que se adiciona el reactivo oxidante alcanza un potencial redox del orden de 720 [mV/ENH]. Enseguida, disminuye rápidamente para alcanzar un potencial redox del orden de 550 [mV/ENH], muy superior al encontrado en el caso del blanco. Esta conducta de la curva en la forma de dientes de sierra corrobora la existencia de una reacción de reducción del ion férrico a ferroso debido a las reacciones de disolución. También es posible que ocurra simultáneamente o bien en forma dominante, la formación de natrojarosita, cuya ocurrencia solo sería posible si el pH de la solución sube por sobre 1,8 o formación de compuestos complejos como $[Fe(HO_2)]^{2+}$ y $[Fe(OH)(HO_2)]^+$ por la alta concentración de H_2O_2 e ion férrico. Estas subidas de potencial redox se lograron con 2 [ml] inicialmente y luego solo se necesito un total de 0.2 [ml] de peróxido de hidrogeno.

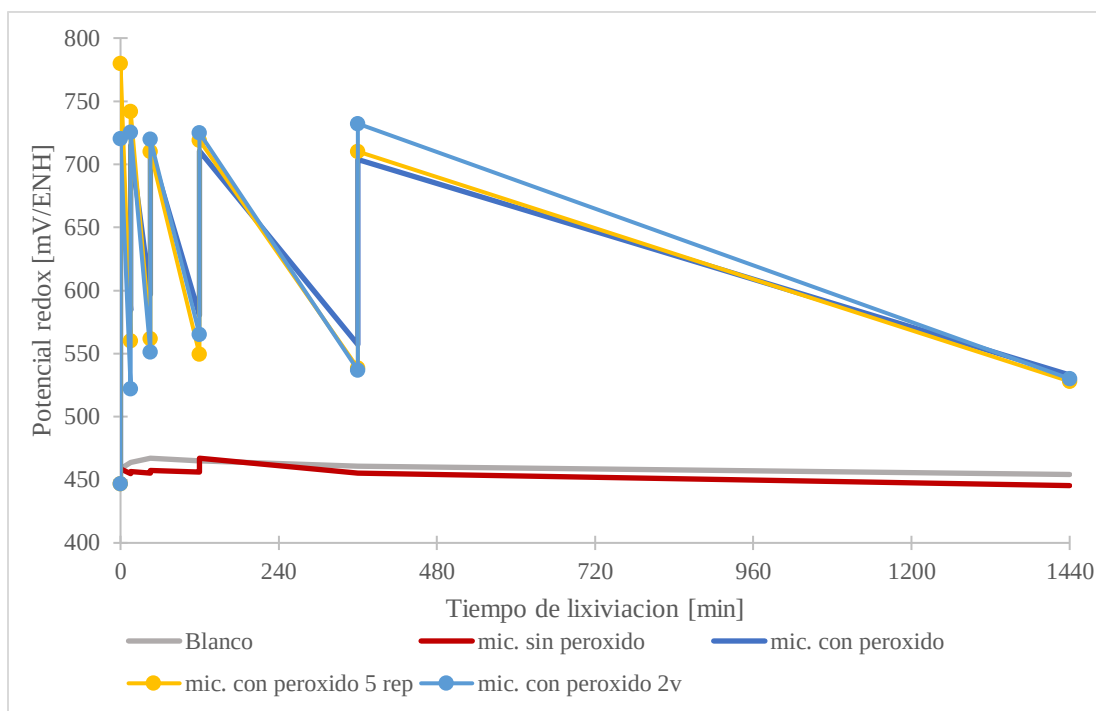


Figura 4.15: curvas de potencial redox vs el tiempo, mostrando el momento de regulación del potencial redox.

Se debe destacar que el aumento de potencial redox no es lineal como se muestra en la Figura 4.15, que se incrementa conforme se aumenta su adición en la solución refino. Inicialmente el crecimiento es bajo entre los 450 a 600[mV/ENH], para luego crecer de manera rápida desde los 600 a los 700 [mV/ENH].

En caso de la lixiviación de 11 días, en teoría el consumo total calculado (ANEXO C) es de 86,4 kg de peróxido de hidrogeno por tonelada de escoria, pero debido a la manera de integrar el peróxido de hidrogeno en la prueba, el consumo fue de 24.96 [ml] o 30 kg de peróxido de hidrogeno por tonelada de escoria. Además, existe un decaimiento del potencial más lento luego de varios días de lixiviación observable en la Figura 4.16, esto atribuido a la disminución de hierro total en la solución debido a sedimentación.

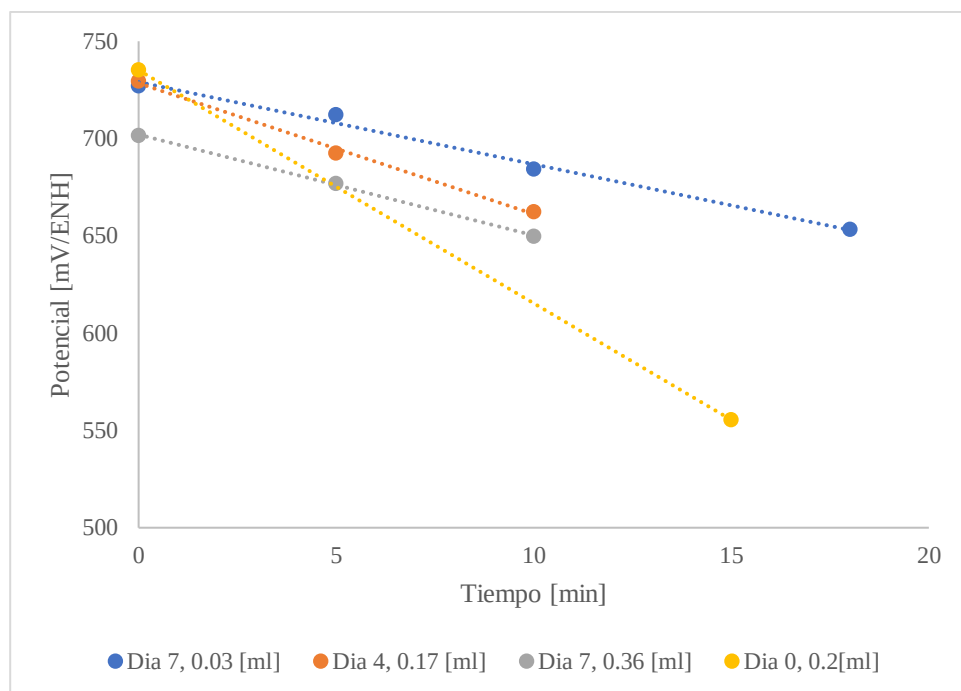
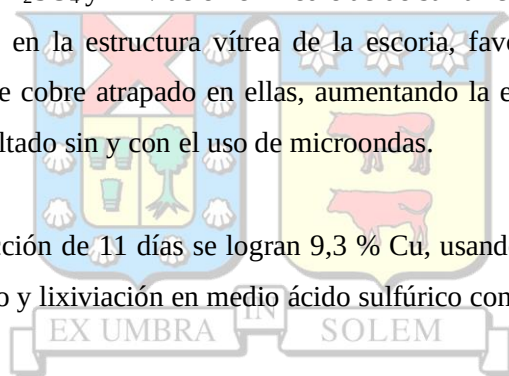


Figura 4.16: Decrecimiento de potencial redox durante el tiempo, para distintas inclusiones de H_2O_2 en ml durante la lixiviación.



5 CONCLUSIONES.

- La escoria se comporta de igual manera que los alimentos dentro del microondas, favoreciendo el calentamiento mientras mayor es la cantidad de escoria debido a que en pequeñas cantidades, la disipación por convección disminuye significativamente su valor.
- Los mejores resultados se obtuvieron con el pretratamiento con microondas, extrayendo 3,8% Cu en condiciones con curado ácido clorurado y con lixiviación ácida a temperatura ambiente durante 24 h. En el caso del uso de peróxido de hidrógeno, esta extracción aumenta a 4,3 %Cu.
- Estos valores son significativamente mayores al 2,8% Cu obtenido con un proceso sin microondas, con curado químico y lixiviación ácida sulfúrica; y de los 2,9 % Cu, con curado químico usando NaCl y H₂SO₄ y lixiviación en medio ácido sulfúrico. El efecto de las microondas produce microfracturas en la estructura vítrea de la escoria, favoreciendo el contacto de las partículas de mineral de cobre atrapado en ellas, aumentando la extracción en un 0,9% Cu, al contrastar el mejor resultado sin y con el uso de microondas.
- En la cinética de extracción de 11 días se logran 9,3 % Cu, usando microondas, con un curado químico ácido clorurado y lixiviación en medio ácido sulfúrico con adición de H₂O₂.
- Se verifica que el proceso de tratamiento de la escoria es suficientemente selectivo al hierro, con una razón de extracción Cu/Fe= 3,0. No obstante, podría existir una pérdida de hierro férrico a la forma de natrojarosita.
- La adición de H₂O₂ en la solución refino de lixiviación tiene un efecto positivo, incrementando la extracción del cobre probablemente por la oxidación del cloro-ferroso a cloro-férrico. También es altamente posible que tenga un rol relevante en la inhibición en la formación de la natrojarosita.



6 RECOMENDACIONES.

- Como se indicó previamente, la pendiente positiva observada al término de la cinética de 11 días es un indicativo que se pueden alcanzar mayores valores de extracción de cobre. Se recomienda considerar una lixiviación en columnas con un ciclo metalúrgico de 400 días, excluyendo el curado químico de la escoria para evitar la estabilización del SiO_2 , que posteriormente dificultan su disolución, sin y con uso de microondas.
- Para incrementar la temperatura de la escoria se recomienda usar un horno de microondas con mayor potencia.
- Resulta importante estudiar la probabilidad de ocurrencia de la reacción de formación de natrojarosita en la solución rica, que podría llevar a una pérdida significativa del ion cloro-férrico y consecuentemente, disminuir la extracción de cobre.



REFERENCIAS

- Castro, C., & DonAl-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Oraimi, S. K., & Al-Saidy, A. H. (2009). Copper slag as sand replacement for high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 483-488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>
- Al-Mutaz, I. S., & Al-Anezi, I. A. (2002). Silica reduction in reverse osmosis desalting plants. *The 6th Saudi Engineering Conference*, 2, 3-14.
- Aravena Maureira, J. (2020). *Desarrollo de un modelo para predecir la concentración de cobre en el PLS del Proyecto Lixiviación de Ripios de la Gerencia de Extracción y Lixiviación, Codelco–División Chuquicamata*.
- Bobadilla-Fazzini, R. A., Pérez, A., Gautier, V., Jordan, H., & Parada, P. (2017). Primary copper sulfides bioleaching vs. Chloride leaching: Advantages and drawbacks. *Hydrometallurgy*, 168, 26-31.
- Camus Yeomans, F. (2017). *Determinación del índice de trabajo a menas con contenido de minerales con valor comercial de diversos sectores de la IV Región*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19978.82886>
- Castro, C., & Donati, E. (2016). Effects of different energy sources on cell adhesion and bioleaching of a chalcopyrite concentrate by extremophilic archaeon *Acidianus copahuensis*. *Hydrometallurgy*, 162, 49-56.
- Cepeda López, N. C., & Torres Muñoz, V. A. (2019). *Recuperación de energía desde calor perdido de escoria en proceso fundición de cobre* [PhD Thesis]. Universidad Andrés Bello.
- Concha, J., & Wasmund, E. (2013). Flotación de finos y gruesos aplicada a la recuperación de minerales de cobre. *Delta*. [https://www.eriezflotation.com/pdfs/Flotacio% CC% 81n% 20de% 20Finos% 20y, 2.](https://www.eriezflotation.com/pdfs/Flotacio%20de%20Finos%20y%20Gruesos.pdf)

- Davis-Belmar, C., Cautivo, D., Demergasso, C., & Rautenbach, G. (2014). Bioleaching of copper secondary sulfide ore in the presence of chloride by means of inoculation with chloride-tolerant microbial culture. *Hydrometallurgy*, 150, 308-312.
- De Laat, J., & Gallard, H. (1999). Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by Fe (III) in homogeneous aqueous solution: Mechanism and kinetic modeling. *Environmental science & technology*, 33(16), 2726-2732.
- Dimitrijevic, M. D., Urošević, D. M., Milić, S. M., Sokić, M. D., & Marković, R. T. (2017). Dissolution of copper from smelting slag by leaching in chloride media. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 53(3), 407-407.
- Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: Fundamentos, Procesos y Aplicaciones*, ; Autor-Editor Genérico: Santiago, Chile, 2001 (Primera).
- Gallard, H., Laat, J. D., & Legube, B. (1999). Spectrophotometric study of the formation of iron(III)-hydroperoxy complexes in homogeneous aqueous solutions. *Water Research*, 33(13), 2929-2936. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00007-X)
- Gorai, B., Jana, R. K., & Premchand. (2003). Characteristics and utilisation of copper slag—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(4), 299-313. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4)
- Guo, Z., Zhu, D., Pan, J., Wu, T., & Zhang, F. (2016). Improving Beneficiation of Copper and Iron from Copper Slag by Modifying the Molten Copper Slag. *Metals*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/met6040086>
- Herrero, E., Ros, J., Bellí, G., & Cabisco, E. (2008). Redox control and oxidative stress in yeast cells. *Redox control of cell function*, 1780(11), 1217-1235. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2007.12.004>
- Ibañez, J. P., & I, J. (2013). Copper concentrate leaching in chloride-sulfate medium. *Copper*, 429-441.

- Jones, D. A., Kingman, S. W., Whittles, D. N., & Lowndes, I. S. (2005). Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*, 18(7), 659-669.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.011>
- Kitis, M., Adams, C. D., & Daigger, G. T. (1999). The effects of Fenton's reagent pretreatment on the biodegradability of nonionic surfactants. *Water Research*, 33(11), 2561-2568.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00476-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00476-X)
- Koleini, S. M. J., & Barani, K. (2012). Microwave Heating Applications in Mineral Processing. En W. Cao (Ed.), *The Development and Application of Microwave Heating*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/45750>
- Levenspiel, O. (1987). *Ingeniería de las Reacciones Químicas, Segunda*.
- Lewandowski, K., & Kawatra, S. K. (2009). Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching. *International Journal of Mineral Processing*, 91(3-4), 88-93.
- Lu, J., & Dreisinger, D. (2013a). Copper chloride leaching from chalcopyrite and bornite concentrates containing high levels of impurities and minor elements. *Hydrometallurgy*, 138, 40-47.
- Lu, J., & Dreisinger, D. (2013b). Copper leaching from chalcopyrite concentrate in Cu (II)/Fe (III) chloride system. *Minerals Engineering*, 45, 185-190.
- Lu, Z. Y., Jeffrey, M. I., & Lawson, F. (2000). An electrochemical study of the effect of chloride ions on the dissolution of chalcopyrite in acidic solutions. *Hydrometallurgy*, 56(2), 145-155.
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00068-2)
- Malhotra, V. (1987). *Supplementary cementing materials for concrete* (Vol. 86). Canada Centre for Mineral and Energy Technology.
- Maoming, F., Daniel, T., Honaker, R., & Zhenfu, L. (2010). Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part III): Specially designed laboratory scale column flotation of phosphate. *Mining Science and Technology (China)*, 20(3), 317-338.

- Meisels, R., Toifl, M., Hartlieb, P., Kuchar, F., & Antretter, T. (2015). Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks. *International Journal of Mineral Processing*, 135, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.01.003>
- Melgar, C., & Torres, K. (2008). Validación del método del molibdosilicato para la determinación de sílice en agua potable en el laboratorio central de la administración nacional de acueductos y alcantarillados. *Universidad del Salvador, Facultad de química y farmacia*, 24-28.
- Mendez, R. I., Garcia Reyes, R. B., Castillo Borges, E. R., & Sauri Riancho, M. R. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e Investigación*, 30, 80-85.
- Minero, P. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia. Minas, concentradoras, refinerías, fundiciones*. LIX/SX/EW (1st ed.). Chile, Santiago: Author.
- Moreno, J. M. (1998). *Factibilidad económica de instalar una planta de granalla de escoria de cobre en la fundición de Caletones* [PhD Thesis]. Universidad Andrés Bello.
- Orizola Gómez, S. A. (2006). *Uso de escoria de cobre en cementos*. Universidad de Chile.
- OYARZUN KNEER, I. A. (2013). *Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón* [PhD Thesis]. Universidad Austral de Chile.
- Rojas, F. (2004). *Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción* [PhD Thesis]. Tesis Ing. Civil Metalúrgico. Atacama, Univ. de Atacama, Fact. Ing. 165p.
- Romero, C. E. (2017). *Evaluación Técnica y Económica para el Tratamiento Hidrometalúrgico de Escorias de Convertidores Peirce Smith y Hornos Anódicos de la Fundición Potrerillos, División Salvador – CODELCO* (p. 108).
- Valderrama, L., Gonzalez, M., Santander, M., & Zazzali, B. (2018). RECUPERACIÓN DE COBRE CONTENIDO EN ESCORIA DE COBRE MEDIANTE FLOTACIÓN. *HOLOS*, 5, 40-50. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.7118>

- Vorster, W., Rowson, N. A., & Kingman, S. W. (2001). The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore. *International Journal of Mineral Processing*, 63(1), 29-44. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00069-7)
- Walkiewicz, J. W., Kazonich, G., & McGill, S. L. (1988). Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds. *Minerals & Metallurgical Processing*, 5(1), 39-42. <https://doi.org/10.1007/BF03449501>
- Wang, Y., Forssberg, E., & Svensson, M. (2017). Microwave assisted comminution and liberation of minerals. En *Mineral Processing on the Verge of the 21st Century* (pp. 3-9). Routledge.
- Watling, H. (2013). Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate–chloride and sulfate–nitrate process options. *Hydrometallurgy*, 140, 163-180.
- ati, E. (2016). Effects of different energy sources on cell adhesion and bioleaching of a chalcopyrite concentrate by extremophilic archaeon *Acidianus copahuensis*. *Hydrometallurgy*, 162, 49-56.
- Concha, J., & Wasmund, E. (2015). Flotación de Finos y Gruesos Aplicada a la Recuperación de Minerales de Cobre. In *II Congreso Internacional de Flotación de Minerales.*, 6-7-8-9.
- Davis-Belmar, C. S., Cautivo, D., Demergasso, C., & Rautenbach, G. (2014). Bioleaching of copper secondary sulfide ore in the presence of chloride by means of inoculation with chloride-tolerant microbial culture. *Hydrometallurgy*, 150, 308-312.
- J., L., & Dreisinger, D. (2013). Copper leaching from chalcopyrite concentrate in Cu (II)/Fe (III) chloride system. *Minerals Engineering*, 45, 185-190.
- Kodali, P., Depci, T., Dhawan, N., Wang, X., Lin, C. L., & Miller, J. D. (2011). Evaluation of stucco binder for agglomeration in the heap leaching of copper ore. *Minerals Engineering*, 24(8), 886-893.
- Lewandowski, K. A., & Kawatra, S. K. (2009). Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching. *International Journal of Mineral Processing*, 91(3-4), 88-93.

Lu, J., & Dreisinger, D. (2013). Copper chloride leaching from chalcopyrite and bornite concentrates containing high levels of impurities and minor elements. *Hydrometallurgy*, 138, 40-47.

Watling. (2013). Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate–chloride and sulfate–nitrate process options. *Hydrometallurgy*, 140, 163-180.

ANEXOS

ANEXO A. Equipos



Figura A 1: Horno microondas, TH- 25 DM, 900W.



Figura A 2: Balanza digital, winkler JA Series.



Figura A 3: Harnero vibratorio, TS, Gilson.



Figura A 4: Sistema de rodillos, Hebro 328x100, labtech Hebro Ltda.



Figura A 5: Microscopio óptico, B500, Optika.



Figura A 6:Termómetro digital Hikmicro, modelo M10.



Figura A 7:Electrodo de ORP, HI4430B, Hanna instruments.

ANEXO B. Procedimiento experimental.

Distribución granulométrica

- Masar la escoria y disponerla en el harnero. Hacer funcionar el harnero por 5 minutos.
- Finalizados los 5 minutos, masar lo que queda en cada bandeja del harnero.
- Mover los distintos mono tamaño a baldes.
- Tomar muestras representativas o escoria mono tamaño para las pruebas siguientes.

Procesos	Muestra necesaria. [g]
Análisis inicial de escoria	50
Distribución granulométrica.	2500
Densidad absoluta.	250
Humedad natural.	500
Humedad de impregnación.	500
Consumo específico de ácido sulfúrico.	200
Pruebas con exposición a rayos de microondas.	2300
Lixiviación final.	3500

Densidad absoluta.

- Limpiar bien el picnómetro. Se limpia con agua destilada y jabón, luego se enjuaga con agua destilada y al final se limpia con acetona. Enjuagar con agua destilada y secar en estufa.
- La muestra (granulometría 100% -10#) de ensayo puede estar con su humedad natural o seca en la estufa (a 80 °C hasta obtener masa constante).
- Pesar el picnómetro seco, vacío y tapado y anotar su peso (m_1).
- Retirar de la balanza, agregar la escoria dentro del picnómetro y pesar nuevamente (m_2).
- Agregar agua destilada cuidadosamente evitando la formación de burbujas, hasta alcanzar aproximadamente 3/4 de la capacidad del picnómetro.
- Remover el aire atrapado.
- Agregar agua destilada hasta llenar el picnómetro. Secar el exterior y pesar nuevamente (m_3).
- Finalmente, vaciar todo el contenido y lavar bien el picnómetro. Volver a llenar el picnómetro completamente con agua destilada. Secar el exterior y pesar (m_4).
- Calcular densidad con los pesos medidos.

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \rho_{agua}$$

Humedad natural de la escoria.

- Pesar vidrio reloj y tarar.
- Pesar 100 g de escoria (granulometría 100% -1 ½”) sobre vidrio reloj (m_n).
- Secar la escoria en una estufa (en mismo vidrio reloj), durante 2 horas a 105°C.
- Enfriar dentro de desecador de ser posible durante 15 min y sacar muestra escoria.

- Pesar masa de vidrio reloj más muestra seca. Al restar esta masa con la del vidrio reloj se obtiene la masa de muestra seca (m_s).
- Determinar la humedad natural mediante formula.

$$H = \frac{m_n - m_s}{m_s}$$

Humedad de impregnación de la escoria.

- Realizar 5 procedimientos.
- Pesar 100g de escoria (granulometría 100% -1 ½”) seco (m_s).
- En el vaso precipitado, mezclar el mineral con 500 ml de agua destilada. Luego dejar reposar por 20 min.
- Pesar el papel filtro previamente mojado y estilado junto con la bandeja metálica.
- Fijar papel filtro a un embudo.
- Trasvasiar pulpa (escoria + agua) al embudo, arrastrar restos de escoria con la piseta.
- Dejar reposar la escoria en el papel filtro por 2 horas Posterior a las 2 horas, asegurarse de que no caen gotas.
- Pesar la escoria junto con el papel filtro sobre la bandeja metálica. Al restar esta masa con la del filtro + bandeja, se obtiene la masa de la escoria impregnado con agua (húmedo) (m_i).
- Determinar la humedad de impregnación mediante formula.

$$H = \frac{m_i - m_s}{m_s}$$

Consumo específico de ácido sulfúrico (CEA).

- Realizar 5 procedimientos.
- Pesar 50 g de la escoria (granulometría 100% -10#).
- Medir 450 ml de agua destilada con probeta de 500 ml.
- Agregar el mineral y el agua destilada al vaso de 1000 ml.
- Agitar y medir pH.
- Sin dejar de agitar, agregar 0,3 ml de una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y medir pH.
- Agregar solución de ácido sulfúrico hasta que haya una variación de pH menor a 0,2.
- Determinar el consumo estándar de ácido mediante fórmula.

$$CEA = \frac{Volumen_{acido} \times \rho_{acido}}{m_{escoria}}$$

Observación con microscopio.

- Realizar 4 procedimientos.
- Se corta una muestra de escoria con granulometría mayor a 1”.
- Se marca la muestra por la zona cortada.
- Se inspecciona muestras de escoria con microscopio Optika en la zona marcada, para observar el estado antes de la exposición.
- Se expone a radiación microondas durante 1 minuto.
- Luego, se enfría la escoria por 10 [min], en un temple de agua con hielo con temperatura medida (cercana a 0 °).

- Se seca la muestra de escoria para una inspección de formación de microgrietas con microscopio Optika.

Pretratamiento con exposición a rayos de microondas.

- Se realizan 11 experimentos incluyendo duplicados importantes.
- Se tomarán la muestra representativa y se disponen dentro del microondas como se requiere para cada experiencia.
- Se expone a radiación microondas según los parámetros establecidos en la tabla.
- Luego, se enfría la escoria por 10 [min], en un temple de agua con hielo con temperatura medida (cercana a 0 °).
- Se secan las muestras en el horno.

Aglomerado y curado.

Curado muestras sin sal.

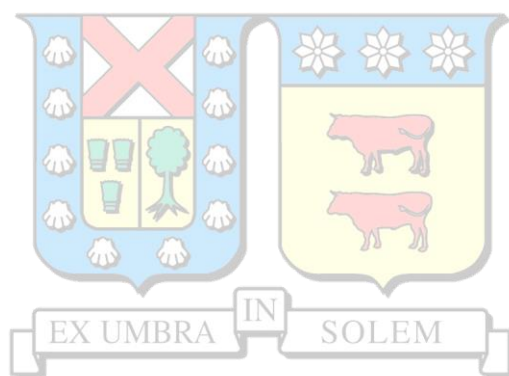
- Se masa muestra de 500[g].
- Con pipeta se agrega el 80% del consumo específico de ácido sulfúrico.
- Cada 10 gotas de ácido se homogeniza la muestra.
- Al agregar el líquido se busca no saturar la escoria con líquido, por lo que se anota el volumen agregado.
- Se coloca el mineral en un recipiente plástico y rotulado.
- Pesar recipiente y dejar reposar.
- Se humecta con ácido sulfúrico (0.5[ml]) cada día, siempre y cuando no se forme posas de agua o sobre saturación, durante 7 días.

Curado muestra con sal.

- Se masa muestra de 500[g] y se pasan por el microondas mediante el procedimiento elegido con anterioridad.
- Se agrega con pipeta volumen de refino.
 - $\text{Cu}^{2+}=0.2$ [g/l]
 - $\text{Fe}^{2+}=1.5$ [g/l]
 - $\text{Fe}^{3+}= 0.5$ [g/l]
 - pH=1.5
- Al agregar el líquido se busca no saturar la escoria con líquido, por lo que se anota el volumen agregado.
- Se agrega cantidad estequiométrica de NaCl con respecto a al ácido sulfúrico un 70%.
- Se coloca el mineral en un recipiente plástico y rotulado.
- Pesar recipiente y dejar reposar.
- Se humecta con refino a pH 1.5 cada día, durante 7 días.

Lixiviación en botellas

- Dentro de la botella se dispone la muestra de escoria de 500[g]
- Se agrega 40 [kg/t de escoria] de NaCl.
- Se realiza una solución de ácido (pH 1.5) en vaso precipitado.
- Se mezcla el mineral con la solución dentro de la botella de 2[l], en proporción 1:1.
- Se pesa el sistema y se registra el valor. (se realiza ajuste si es necesario).
- Se mide pH y se agrega ácido (anotando la cantidad), si se requiere para llegar a pH 1.5.
- Se realiza la lixiviación en botella con los rodillos, 70 [RPM].
- El tiempo de muestreo será durante los 15 [min], 45[min], 2 [h], 6 [h] y finalizando en 24[h], donde además se mide el volumen de PLS. Cada muestra de 50[ml]. Cada muestreo se realiza medición de pH.
- Todas estas muestras se analizan por EAA por cobre y hierro, y titulación volumétrica por Fe^{2+} .
- Lavar el ripio y secar ripio durante 24 [h] a 80 [°C].
- Se toma una muestra del ripio de 50 [g] para análisis por cobre y hierro total.



ANEXO C. Resultados de experimentos.

Tabla C 1: Granulometría cabeza de escoria fundicion ventana.

Malla [in]	Malla [mm]	Retenido[g]	Retenido [%]	Pasante acu[g]	P.A[%]
1	25.4	11007.6	42.8%	14714.1	57%
3/4	19.05	7984.2	31.0%	6729.9	26%
1/2	12.7	5190.5	20.2%	1539.4	6%
3/8	9.525	1039.4	4.0%	500.0	2%
1/4	6.35	324.6	1.3%	175.4	1%
- 1/4		175.4	0.7%		0%
Total		25721.7			

Tabla C 2:granulometria de las muestras para lixiviar.

exp	Masa	1	3/4	0.5	3/8	0.25	- 1/2	Total
1.1	500	221	152.8	100.8	20.7	6.5	3.4	505.2
2.1	500	218.3	153	101.1	20.4	6.2	3.4	502.4
3.1	500	215.3	155.7	101.7	20.9	6.3	3.4	503.3
4.1	500	220	155.6	100	20.4	6.3	3.4	505.7
4.2	500	221.5	157.4	99.6	20.1	6.3	3.4	508.3
5.1	500	213.1	157.7	101.1	20.4	6.4	3.4	502.1
6.1	500	222.6	154.8	100.4	20.9	6.2	3.4	506.7

Tabla C 3: Resultado de densidad real de escoria.

	Experimento	1	2	3	Unidad	
	N°pic	317	1453	1366	-	
Pic solo	M1	19.4948	21.2783	20.2284	[g]	
Pic+esc	M2	22.4648	23.9357	23.137	[g]	
Pic+esc+A	M3	46.6419	48.0432	46.9966	[g]	
Pic+A	M4	44.4652	46.126	44.865	[g]	Promedio
	d	3.7418331	3.588172121	3.74135052	[t/m3]	3.69

Tabla C 4: Resultados de humedad natural y de impregnación.

Humedad Natural				
EXP	Masa recipiente	Masa natural	Masa seco	HN
1	53.02	101.55	101.55	0.00%
2	54.11	105.39	105.39	0.00%
3	281.1	103.5	103.48	0.02%
			Promedio	0.01%

Humedad de Impregnación				
EXP	Masa recipiente	Masa Impregnación	Masa seco	HI
1	277.68	100.32	100.19	0.13%
2	277.68	92.14	91.46	0.74%
3	277.68	103.28	103.16	0.12%
4	277.7	100.78	100.06	0.72%
			Promedio	0.43%

Tabla C 5: Resultados de CEA para escoria.

Parámetros	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
pH inicial		8.88	8.92	8.44	8.53	8.53
total	ml	2.59	2.6	3.3	3	3.2
Densidad de acido	g/ml	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
Concentración de acido	%	98%	98%	98%	98%	98%
Masa escoria	[g]	50	50	50.03	50.03	50.03
CEA	kg de ácido/t de escoria	93.5	93.8	119.0	108.2	115.4
T	°C	16.3	15.8	14.2	14.2	14.2

Tabla C 6: Prueba Sin Microondas Curado: Ácido sulfúrico. Lix: refino.

Muestra	1.1
Masa inicial[g]	505.2
Masa que curar[g]	0.43%
H.IMP	2.17236
volumen total[ml]	29.1042988
consumo total[g]	7.46%
Consumó (%)	2.5
total dado[ml]	8.6%

muestreo	0	15	45	120	360	1440
Tiempo		15	30	75	240	1080
Antes de toma de muestra						
pH	0.8	0.75	0.77	0.8	0.87	1.06
mV/ENH	456.6	463.6	467.1	465	460.7	454.2
Post toma de muestra						
pH	-	0.82	0.84	0.9	0.93	
mV/ENH	-					
muestra						
edi	-	M11	M12	M13	M14	M15
MI	50	50	50	50	50	510
pH	-	0.75	0.77	0.8	0.87	1.06
mV/ENH	-	463.6	467.1	465	460.7	454.2

Tabla C 7: Prueba Sin Microondas Curado: Ácido sulfúrico NaCl. Lix: refino sin peróxido.

Muestra	2.1
Masa inicial[g]	502.11
Masa que curar[g]	502.11
H.I.M.P	0.43%
volumen total[ml]	2.159073
consumo total[g]	53.22366
Consumó (%)	7.5%
total dado[ml]	2.5
Consumó [%]	4.7%

muestreo	0	15	45	120	360	1440
Tiempo		15	30	75	240	1080
Antes de toma de muestra						
pH	1.49	1.58	1.42	1.6	1.49	1.55
mV/ENH						
Post toma de muestra						
pH	-	1.4	1.42	1.46	1.5	
mV/ENH	-					
muestra						
edi	-	M41	M42	M43	M44	M45
MI	50	50	50	50	50	495
pH	-	1.58	1.42	1.6	1.56	1.55
mV/ENH	-	-				

Tabla C 8: Pruebas Con Microondas Curado: Ácido sulfúrico NaCl. Lix: refino sin peróxido.

Muestra	3.1
Masa inicial[g]	503.3
Tiempo[min]	5
pos secado[g]	502.48
Masa que curar[g]	502.48
H.IMP	0.43%
volumen total[ml]	2.160664
consumo total[g]	53.26288
Consumó (%)	7.5%
total dado[ml]	2.5
Consumó [%]	4.7%

muestreo	0	15	45	120	360	1440
Tiempo		15	30	75	240	1080
Antes de toma de muestra						
pH	0.72	0.75	0.72	0.77	0.82	0.96
mV/ENH	458.8	454.9	455.2	456	455.2	445.4
Post toma de muestra						
pH	-	0.75	0.76	0.83	0.86	
mV/ENH	-	456.6	457.4	467.1	455.1	
muestra						
edi	-	M21	M22	M23	M24	M25
Ml	50	50	50	50	50	495
pH	-	0.75	0.71	0.82	0.82	0.92
mV/ENH	-	454.8	455.1	461.2	453.7	446.1

Tabla C 9: Pruebas Con Microondas Curado: Ácido sulfúrico NaCl. Lix: refino Con peróxido.

Muestra	4.1
Masa inicial[g]	505.7
Tiempo[min]	6
pos secado[g]	505.23
Masa que curar[g]	505.23
H.IMP	0.43%
volumen total[ml]	2.172489
consumo total[g]	53.5550898
Consumó (%)	7.5%
total dado[ml]	2.5
Consumó [%]	4.7%

muestreo	0	15	45	120	360	1440
Tiempo		15	30	75	240	1080
Antes de toma de muestra						
pH	0.92	1.44	1.45	1.4	1.56	1.81
mV/ENH	444.4	584.1	597	580.2	557.1	533.1
Post toma de muestra						
ml peróxido	2000	100	100	100	200	
ul	1.44	1.44	1.49	1.47	1.5	
mV/ENH	705.2	715	711.8	710.4	703.6	
muestra						
edi	-	M31	M32	M33	M34	M35
MI	50	50	50	50	50	490
pH	-	1.48	1.46	1.51	1.56	
mV/ENH	-	576.9	594.1	580.2	554.9	

Tabla C 10: Pruebas Con Microondas Curado: Ácido sulfúrico NaCl. Lix: refino Con peróxido.

Muestra	4.2
Masa inicial[g]	508.7
Tiempo[min]	6
pos secado[g]	506.56
Masa que curar[g]	506.56
H.IMP	0.43%
volumen total[ml]	2.178208

consumo total[g]	53.6960717
Consumó (%)	7.5%
total dado[ml]	2.5
Consumó [%]	4.7%

muestreo	0	15	45	120	360	1440
Tiempo		15	30	75	240	1080
Antes de toma de muestra						
pH		1.35	1.35	1.35	1.41	1.52
mV/ENH		522.2	551.1	565	537	545.3
Post toma de muestra						
ml peróxido	2000	200	100	100	200	
ul	1.31	1.35	1.35	1.4	1.42	
mV/ENH	720.2	725.4	720	725	732.2	
muestra						
edi	-	M61	M62	M63	M64	M65
MI	50	50	50	50	50	493
pH	-	1.23	1.28	1.32	1.47	
mV/ENH	-	529.6	579.4	566.9	547.4	

Tabla C 11: Pruebas Con Microondas 5v. Curado: Ácido sulfúrico NaCl. Lix: refino con peróxido.

Muestra	5.1
Masa inicial[g]	502.1
Tiempo[min]	6
pos secado[g]	500.6
Masa que curar[g]	500.6
H.IMP	0.43%
volumen total[ml]	2.15258
consumo total[g]	53.0643033
Consumó (%)	7.5%
total dado[ml]	2.5
Consumó [%]	4.7%

muestreo	0	15	45	120	360	1440
Tiempo		15	30	75	240	1080
Antes de toma de muestra						
pH	1.34	1.51	1.54	1.54	1.56	1.67
mV/ENH	446.9	560	561.9	549.4	538.4	528

Post toma de muestra						
ul peróxido	2400	200	100	100	200	
pH	1.53	1.53	1.51	1.54	1.54	
mV/ENH	780	742	710.1	719.2	710.3	
muestra						
edi	-	M51	M52	M53	M54	M55
MI	50	50	50	50	50	500
pH	-	1.51	1.54		1.56	1.67
mV/ENH	-	551.8	575.5	566.7	549.4	528

Tabla C 12: Pruebas Con Microondas Curado: Ácido sulfúrico NaCl. Lix: refino Con peróxido.

Muestra	6.1
Masa inicial[g]	506.74
Tiempo[min]	5
pos secado[g]	506.46
Masa que curar[g]	506.46
H.IMP	0.43%
volumen total[ml]	2.177778
consumo total[g]	53.68547151
Consumó (%)	7.5%
total dado[ml]	2.5
Consumó [%]	4.7%

día	Hora	Intervalo	Total		mV/ENH	pH	mV/ENH	pH	peróxido
21/11/2022	11:15	0	0 0:00	Inicio	450		700	1.51	2
21/11/2022	11:45	30	0 0:30	testeo	550	1.52	700	1.52	0.6
21/11/2022	16:00	0 4:15	0 4:45	Testeo	549.3	1.45	720	1.46	1.8
22/11/2022	11:15	0 19:15	1 0:00	Muestreo	522.3	1.68	740	1.47	0.6
22/11/2022	16:31	0 5:16	1 5:16	testeo	566	1.49	730	1.47	1.8
23/11/2022	10:00	0 17:29	1 22:45	testeo	534.9	1.54	719	1.51	0.2
23/11/2022	12:55	0 2:49	2 1:40	testeo	588.7	1.51	736	1.51	0.3
23/11/2022	16:30	0 3:30	2 5:15	testeo	577.6	1.54	716	1.5	0.9
24/11/2022	11:44	0 19:07	3 0:29	testeo	536.8	1.53	720	1.49	0.9
24/11/2022	16:24	0 4:33	3 5:09	testeo	577.6	1.47	700.5	1.48	1.8
25/11/2022	12:29	0 19:59	4 1:14	testeo	536	1.66	729.5	1.46	0.17
25/11/2022	12:43	0 0:05	4 1:28	testeo	692.6	1.47	692.6	1.47	0
25/11/2022	12:51	0 0:05	4 1:36	testeo	662.3	1.47	700	1.46	6
25/11/2022	14:45	0 1:50	4 3:30	testeo	558.6	1.56	711.3	1.48	1
28/11/2022	10:46	2 19:54	6 23:31	testeo	497	1.57	701.6	1.47	0.36

28/11/2022	11:05	0 0:05	6 23:50	testeo	677	1.47	677	1.47	0
28/11/2022	11:13	0 0:05	6 23:58	testeo	649.8	1.47	727	1.47	0.03
28/11/2022	11:18	0 0:05	7 0:03	testeo	712.3	1.47	712.3	1.47	0
28/11/2022	11:23	0 0:05	7 0:08	testeo	684.2	1.48	684.2	1.47	0
28/11/2022	11:31	0 0:08	7 0:16	testeo	653.2	1.44	698.6	1.41	3.6
29/11/2022	11:15	0 23:35	8 0:00	Muestreo	526.4	1.6	711.2	1.44	0.2
30/11/2022	15:48	1 4:21	9 4:33	testeo	520.6	1.5	706.6	1.5	0.9
01/12/2022	12:24	0 20:36	10 1:09	testeo	530.6	1.64	690	1.51	1.8
02/12/2022	10:00	0 21:36	10 22:45	Muestreo					

Tabla C 13: Concentración de cobre en muestras y refino.

Muestra	Muestreo	Fe[g/l]	Extracción [%]
1.1	1	0.33	1.41%
1.1	2	0.31	1.33%
1.1	3	0.35	1.89%
1.1	4	0.36	2.16%
1.1	5	0.40	2.76%
2.1	1	0.45	2.42%
2.1	2	0.38	1.98%
2.1	3	0.38	2.16%
2.1	4	0.39	2.43%
2.1	5	0.42	2.91%
3.1	1	0.36	1.57%
3.1	2	0.38	1.92%
3.1	3	0.38	2.10%
3.1	4	0.41	2.57%
3.1	5	0.51	3.76%
4.1	1	0.40	2.10%
4.1	2	0.40	2.31%
4.1	3	0.39	2.42%
4.1	4	0.41	2.83%
4.1	5	0.53	4.32%
4.2	1	0.43	2.20%
4.2	2	0.43	2.42%
4.2	3	0.42	2.54%
4.2	4	0.41	2.65%
4.2	5	0.58	4.48%

5.1	1	0.37	1.58%
5.1	2	0.37	1.74%
5.1	3	0.40	2.18%
5.1	4	0.42	2.56%
5.1	5	0.58	4.25%
6.1	1	0.65	4.24%
6.1	2	0.91	7.17%
6.1	3	1.05	9.26%
Refino	1	0.20	

Tabla C 14: Porcentaje de cobre total en ripio final.

Muestra	Cu [%]
1.1	0.911
2.1	1.005
3.1	0.979
4.1	0.905
4.2	0.920
5.1	1.012
6.1	0.836
Refino	0.817

Tabla C 15: concentración de hierro total y ion ferroso en muestras y refino.

Muestra	Muestreo	Fe[g/l]	Fe ²⁺ [g/l]	Extracción [%]
1.1	1	4.2	3.6	0.190%
1.1	2	3.8	1.9	0.113%
1.1	3	9.1	2.0	1.378%
1.1	4	8.4	2.3	1.345%
1.1	5	8.1	3.0	1.390%
2.1	1	9.2	5.2	1.482%
2.1	2	8.1	4.8	1.351%
2.1	3	7.8	4.5	1.395%
2.1	4	7.5	4.4	1.432%
2.1	5	8.0	4.5	1.666%
3.1	1	7.8	4.0	1.044%
3.1	2	7.2	3.8	1.007%
3.1	3	6.8	3.7	1.003%
3.1	4	6.5	3.8	1.013%
3.1	5	7.2	4.6	1.254%
4.1	1	9.1	0.1	1.285%

4.1	2	8.9	0.1	1.371%
4.1	3	7.9	0.1	1.272%
4.1	4	7.8	0.2	1.353%
4.1	5	7.6	0.4	1.409%
4.2	1	9.3	0.3	1.323%
4.2	2	9.0	0.1	1.388%
4.2	3	8.7	0.1	1.446%
4.2	4	7.6	0.3	1.318%
4.2	5	8.1	0.5	1.524%
5.1	1	8.0	0.5	1.097%
5.1	2	7.6	0.1	1.113%
5.1	3	7.6	0.1	1.215%
5.1	4	6.7	0.2	1.102%
5.1	5	6.8	0.5	1.206%
6.1	1	8.8	0.6	1.594%
6.1	2	5.9	0.4	0.684%
6.1	3	5.6	0.5	0.681%
Refino	1	3.4	1.4	

Tabla C 16: Porcentaje de hierro total en ripio final.

Muestra	Fe [%]
1.1	42.4
2.1	38.5
3.1	41.5
4.1	43.4
4.2	40.4
5.1	40.7
6.1	39.3
Refino	41.0

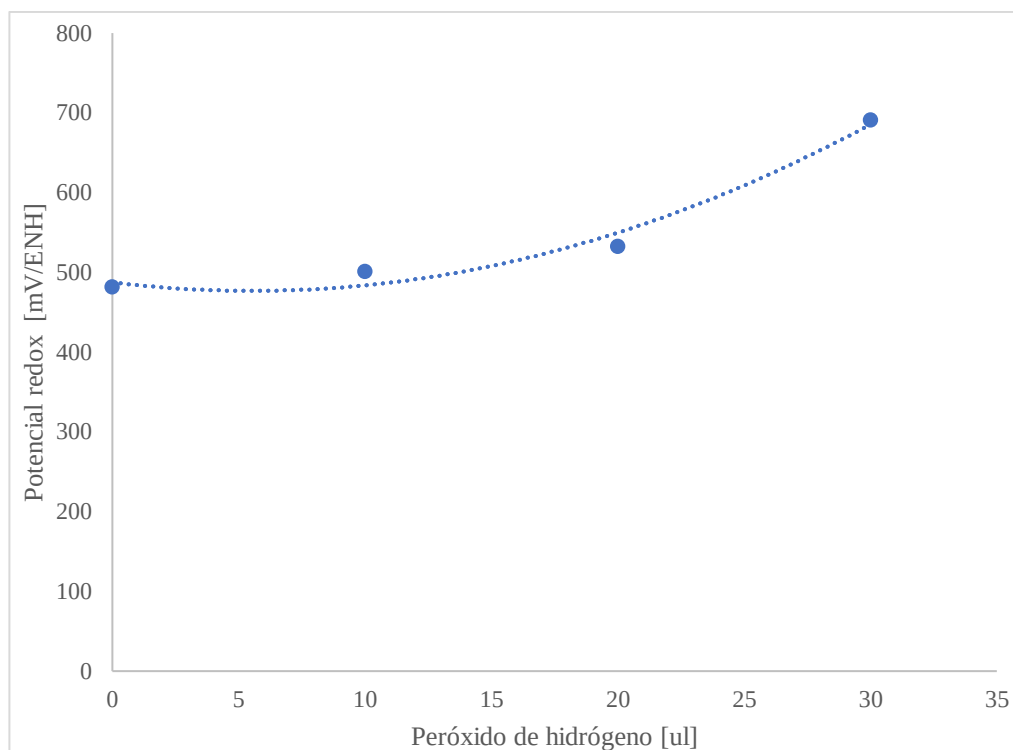


Figura 0.1: Experimento del comportamiento refino utilizado a medida que se agrega H₂O₂.

Según la estimación obtenida del experimento representado en la Figura 0.1, si se utiliza una cantidad de refino igual al de las pruebas, sólo se requiere utilizar 0,38[ml] para aumentar el potencial redox sobre los 700[mV/ENH].

En las pruebas de lixiviación de escoria, el H₂O₂ utilizado fue de 2 [ml] o 4,8 [kg por t de escoria], esta diferencia significativa está asociado con otras especies aportadas por la escoria que también son oxidadas en este proceso. De manera simplificada, el consumo de peróxido de hidrogeno (C) se representa con la siguiente función:

$$C = 1,8V + 7,8m \text{ [kg por t de escoria]}$$

Donde V es el volumen de solución [l] y m la masa de escoria [kg].

Cabe destacar que el potencial redox inicial promedio de la solución está en torno a 451[mV/ENH], y que durante el proceso e inclusive luego de varios días, la solución no disminuye de los 500[mV/ENH], por lo que si se quiere mantener el potencial redox en este rango se puede realizar sin dificultad.

Si se desea mantener el potencial redox de la solución sobre los 700 [mV/ENH], se debe suministrar de forma constante una cantidad de peróxido mucho menor a la inicial. Según las pruebas

y muestreos realizados en la lixiviación de 11 días, al inicio del proceso, el peróxido necesario es mayor que al final, donde el decrecimiento del potencial redox es más acelerado en los primeros días de la lixiviación que luego de varios días. Además, no importa la cantidad de peróxido adicionado para elevar el potencial, el decrecimiento es similar para varios de los casos estudiados y que, si se utiliza a medida que decrece el potencial redox, es menor la cantidad a utilizar, ya que para aumentar de un potencial desde 650 [mV/ENH] a sobre los 700[mV/ENH], sólo se utiliza 0,03[ml] de H_2O_2 , en cambio para aumentar un potencial de 530 [mV/ENH] a sobre los 700 [mV/ENH], se requiere como mínimo 0,17[ml]. El consumo de peróxido de hidrógeno necesario para mantener el potencial redox sobre los 700[mV/ENH], está en el rango de 0,1 a 0,27 [ml/h] o en el rango de 0,12 a 0,34 kg por tonelada de escoria por hora, lo que indica que, en el peor de los casos el consumo total de la prueba para mantener el potencial sobre los 700[mV/ENH] es de 71.28 [ml].

