UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE FLOTACIÓN DE COBRE PRESENTE EN ESCORIAS DE FUNDICIÓN UTILIZANDO AGUA DE MAR COMO AGUA DE PROCESOS.

Trabajo de titulación para optar al
Título de Técnico Universitario en
Minería y Metalurgia.

Alumnos:

Alejandro Ismael Díaz Muñoz.

Sergio Esteban Wastavino Farías.

Profesor Guía:

Sr. Erik Kohnenkamp.

2021

Dedicatoria

Terminada esta etapa universitaria, agradezco a aquellas personas que creyeron en mi desde un comienzo: A mi madre; Janet Farias, Mi hermana; Maira Wastavino, A mi mejor amiga y por último a mis compañeros que me acompañaron durante el proceso.

Sergio Esteban Wastavino Farias.

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, mis padres; Angélica Muñoz y Bernardo Díaz, mi familia, mi novia, mi compañero de tesis Sergio Wastavino y nuestro profesor guía Erik Kohnenkamp.

Gracias a todas estas personas que han estado apoyándonos y guiándonos en todo este proceso de formación y educación. Han sido un gran pilar en cada una de las etapas ya cumplidas. Me ayudaron a no decaer y poder concluir con éxito una etapa más en mi vida. Y, por último, pero no menos importante, agradecer a todos mis compañeros de trabajo que me han ayudado en distintos aspectos y sobre todo a mis jefes Wu y Eva, quienes me han dado la libertad para poder realizar mi tesis de la mejor forma posible y dándome los tiempos necesarios.

Alejandro Ismael Diaz Muñoz.

Índice

Dedicatoria **1**
Introducción **7**
Problemática **8**
Objetivos generales: **9**
Capítulo 1: Reconocer las variables para flotar cobre mediante búsqueda bibliográfica para definir las variables a controlar en la flotación escala laboratorio. **10**
1.1 Variables para controlar en la flotación. **11**
1.1.2 Granulometría de la mena. 11
1.1.3 Tipo y dosificación de reactivos de flotación. 11
1.1.4 Densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos. 11
1.1.5 pH 12
1.1.6 Aireación y acondicionamiento de la pulpa. 12
1.1.8 Calidad del agua. 12
1.1.9 Tiempo de residencia 13
1.2 Variables de flotación con agua de mar. **13**
1.2.1 Efecto de la salinidad sobre la flotación. 14
1.2.2 Agua de mar y tamaño de burbuja. 14
1.2.3 Efecto BUFFER y consumo de cal en agua de mar 15
1.2.4 Espumación de minerales de cobre en agua de mar 16
1.3 Origen de las escorias de fundición **17**
1.3.1 Características de la escoria de fundición. 17
1.3.2 Composición de la escoria de cobre 18
1.3.3 Composición Física. 18
1.3.4 Composición Cristaloquímica 18
1.4 Clasificación de las escorias de cobre **19**
1.4.1 Según el grado de silicatos 19
1.4.2 Según el tiempo de enfriamiento 19
1.4.3 Escoria Granallada 19
1.4.4 Escoria de botadero 20
1.4.5 Escoria Expandida 20
Capítulo 2: Flotar cobre a partir de escoria de fundición controlando variables críticas para construir una curva de recuperación versus tiempo. **21**
2.1 Recuperación de cobre contenido en escoria mediante flotación **22**
2.1.1 Resumen del experimento: 22
2.1.2 Pruebas: 22

2.1.3 Análisis químico: 23
2.1.4 Prueba de molienda: 23
2.1.5 Prueba de flotación: 23
2.2 Elección de parámetros 25
2.2.1 Tamaño de partícula 25
2.2.2 Elección de reactivos y cantidad de reactivos 25
2.2.3 Cálculo de reactivos 26
2.2.4 Cantidad de litros de agua. 26
2.3 Procedimiento de laboratorio para la flotación: 27
2.3.1 Pesaje del material: 27
2.3.2 Material en el molino 27
2.3.3 Material chancado. 28
2.3.4 Procedimiento de tamizaje 28
2.3.5 Programación de tamizadora digital 30
2.3.6 Procedimiento final. 30
2.4 Procedimiento de flotación 31
2.4.1 Pesaje de muestra. 31
2.4.2 Celda de flotación 32
2.4.3 Celda de flotación en marcha 32
2.4.4 Recolección de muestras. 34
2.4.5 Secado de muestras 34
2.5 Resultados obtenidos flotando con agua de mar no reposada 36
Capítulo 3: Identificar cambios en la curva de recuperación versus tiempo, dándole 10 días de reposo al agua de mar para verificar mejoras en la recuperación de cobre. 38
3.1 Análisis de flotación con agua de mar en reposo. 39
3.2 Resumen total de todas las muestras. 45
3.3 Costos de inversión 47
Conclusiones y recomendaciones 50
Bibliografía 52

índice de Figuras

Figura 1.1 Tamaño de burbuja en función del agua de mar, a distintos porcentajes de dilución con agua destilada, para el espumante Dowfroth-250.

Figura 1.2 Consumo de cal en la flotación Rougher a escala laboratorio en función de pH ajustado con la lechada de cal, para un mineral de Cu-Mo-Au en agua dulce y agua de mar.

Figura 1.3 Espesor de la capa de espuma (celda agitair LA-500 de 2,7 L) en función del pH en agua dulce y agua de mar; y masa total transferida al concentrado Rougher para un mineral de Cu-Mo (35% de solidos) (En agua dulce y agua de mar)

Figura 1.4: Características físicas de la escoria de cobre

Figura 2.1: Efecto de la granulometría sobre la ley y recuperación de cobre en escoria HR.

Figura 2.2: Efecto de la granulometría sobre la ley y recuperación de cobre en la escoria CT.

Figura 2.3: Molino de bolas a escala laboratório.

Figura 2.4: Información técnica del molino de bolas utilizado a escala laboratorio.

Figura 2.5: Datos técnicos de los tamices que se encuentran en el laboratorio de metalurgia, Elaborado por Pablo Carreño M. (2017).

Figura 2.6: Tamices colocados en la tamizadora digital.

Figura 2.7: Material fino recolectado desde la malla 200.

Figura 2.8: Pesaje del mineral, correspondiente a la muestra 1.

Figura 2.9: Celda en funcionamiento correspondiente a la muestra 1.

Figura 2.10: Información técnica de la celda de flotación utilizada.

Figura 2.11: Celda utilizada en el proceso de flotación.

Figura 2.12: Intervalo de muestras recolectadas a partir del experimento N°2.

Figura 2.13: Horno de secado del laboratorio de Minería y Metalurgia.

Figura 2.14: Muestra N°2 secada, procedente del horno de secado.

Figura 2.15: Curva de recuperación versus tiempo, obtenida de la muestra experimental N°1.

Figura 2.16: Curva de recuperación versus tiempo, obtenida de la muestra experimental N°3.

Figura 3.1: Curva de recuperación versus tiempo, obtenida de la muestra experimental N°2.

Figura 3.2: Curva de recuperación versus tiempo, obtenida de la muestra experimental N°4.

Figura 3.3: Análisis de material recuperado versus no recuperado de la muestra N°1.

Gráfico 3.4: Análisis de material recuperado versus no recuperado de la muestra N°2.

Figura 3.5: Análisis de material recuperado versus no recuperado de la muestra N°3.

Figura 3.6: Análisis de material recuperado versus no recuperado de la muestra N°4.

Figura 3.7: Comparación entre material recuperado y no recuperado de todas las muestras.

Figura 3.8: Media de comparación entre material recuperado en agua de mar reposada, no reposada y material que no se recuperó.

Figura 3.9: Ductos de águas de mar.

Índice de tablas

Tabla 1.1 Composición típica de agua de mar.
Tabla 2.1 Análisis Químico de las escorias en porcentaje.
Tabla 2.2: Elección de tamices.
Tabla 2.3: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°1.
Tabla 2.4: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°3.
Tabla 3.1: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°2.
Tabla 3.2: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°1.
Tabla 3.3: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°1.
Tabla 3.4: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°2.
Tabla 3.5: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°3.
Tabla 3.6: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°4.
Tabla 3.7: Resumen de material recuperado y no recuperado de todas las muestras.
Tabla 3.8: Media de material recuperado y no recuperado entre las muestras con agua de mar reposada y no reposada

Introducción

Chile es conocido mundialmente como uno de los principales actores de la industria minera metálica y no metálica. Siendo así líder mundial en la producción de cobre y renio en la minería metálica. Por otra parte, en la minería no metálica es líder en la producción de nitratos naturales y yodo.

Como ya sabemos, el producto más importante producido en Chile es el cobre, Lo que pone como a nuestro país, el mayor productor y exportador de este valioso mineral alrededor del mundo, siendo de gran relevancia para la economía de nuestro país, ya que, además, desde hace ya de más de un siglo, viene dando imagen a nuestra sociedad y cultura.

Una de las formas por la cual se extrae el cobre, es la pirometalurgia, la cual es una rama de la metalurgia, que se encarga de obtener y refinar los metales a través del calor. Así, extrayendo el mineral de la ganga.

Sin embargo, se debe considerar que no todo el mineral se llega a procesar, quedando una pequeña parte, pero importante cantidad de cobre para la industria minera, que puede provocar millones de pérdidas.
Según datos obtenidos, señalan que Chile puede llegar a producir 163 toneladas de escoria, con una ley de cobre promedio que supera al 40%, lo que presenta unas pérdidas cercanas a los US 450.000 cada 24 horas.

Por otra parte, existe otro problema a parte en el área pirometalurgia y generalmente en el resto de la actividad minera, que es el consumo excesivo de agua que demandan los diversos procesos para la obtención del cobre, que durante el pasar del tiempo, sigue aumentando su disminución por las leyes de cobre, que cada vez se van disminuyendo, lo que exige más agua para hacer relaves.

Debido a este problema, como propuesta para el gran consumo de agua que implica en el área metalúrgicas, propondremos la alternativa de utilizar agua de mar como agua de procesos.

Problemática

El agua en las mineras de cobre es esencial para los procedimientos mineros en sus distintos procesos. Por lo que el cuidado de esta y la sequía presente en el país principalmente, busca nuevos métodos o tecnologías que puedan sustituir o la solución para combatir esta crisis hídrica, utilizando la menor cantidad de agua dulce.
Desde el año 2013 la minera Candelaria ha estado utilizando su planta desalinizadora, ha sido una fuente viable de una buena gestión hídrica en este rubro minero. Siendo el consumo de agua, uno de los más bajos en la industria del país, además de reutilizar un 85% del agua usada en sus procesos productivos.

Por lo que usar plantas desalinizadoras, parece ser la fuente viable para gestionar esta crisis hídrica, que ocurre en el país y en la zona norte, ya que ahí es donde más escasa es el agua para esta industria. Pero si en vez de crear una planta desalinizadora, se utiliza agua de mar para estos procesos, el costo sería mucho menor comparado a una planta. Aunque habría que ver si este método podría ser sustentable, no necesariamente en el tiempo, sino más bien en el proceso recuperativo del mineral de interés.

Las plantas desalinizadoras utilizadas en las mineras utilizan el proceso de osmosis inversa. Este proceso en grandes rasgos se trata de utilizar una membrana parcialmente permeable, para separar iones, moléculas y partículas más grandes. Esto funciona a través de una presión, que rompa la presión osmótica. Pero la inversión de tener plantas desaladoras según Cristián Puga (Gerente de asuntos externos de Esperanza), hubiera sido de US$1.100 millones en la minera Esperanza, mientras tanto usar el agua cruda (salada), es de US$377 millones. Por lo que utilizar este método de tener plantas desaladoras, es una gran inversión, que no todas las mineras podrían sustentar, ya que si una de estas se encuentra en una zona cordillerana o al interior, que no tenga acceso al agua cruda, esto requiere más gasto al realizar ductos que transporten miles de litros por segundo, para poder realizar los procesos mineros, además de contar con la planta, por lo tanto es más factible utilizar el agua cruda, por un tema de recursos, sino también de tiempo.

Objetivos generales:

Se flota mineral de cobre presente en escorias de fundición, utilizando agua de mar como agua de procesos, para disminuir consumo de agua dulce en la minería.

Objetivos específicos:

Reconocer las variables para flotar mineral de cobre, mediante búsqueda bibliográfica, para definir las variables a controlar en la flotación, escala laboratorio.

Flotar mineral de cobre a partir de escoria de fundición, controlando variables críticas, para construir una curva de recuperación versus tiempo.

Identificar cambios en la curva de recuperación versus tiempo, dándole 10 días de reposo al agua de mar, para verificar mejoras en la recuperación de cobre.

Capítulo 1: Reconocer las variables para flotar cobre mediante búsqueda bibliográfica para definir las variables a controlar en la flotación escala laboratorio.

1.1 Variables para controlar en la flotación.

1.1.2 Granulometría de la mena.

Existen tipos de partículas que presentan una mayor recuperación metalúrgica, observándose, en general, una disminución de ésta para tamaños más gruesos y finos de la mena.

La recuperación se vería afectada para tamaños pequeños, lo cual tiene directa relación con la dificultad que tienen estas partículas, para adherirse a las burbujas, dado que éstas no adquieren la energía cinética suficiente, para producir un agregado partícula/burbuja estable.

Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas de mejor forma a la espuma, ya que el drenaje a la pulpa, se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación.

1.1.3 Tipo y dosificación de reactivos de flotación.

La función de un colector es hacer hidrofóbizar la superficie del mineral deseado, por lo cual, es el reactivo más importante utilizado en el proceso de flotación.
Por otro lado, la elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación.

La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda afecta al tiempo de retención de las partículas en la espuma.

La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante.
También se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento, para estar en contacto con la pulpa y de esta forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena.

1.1.4 Densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos.

La densidad de pulpa afecta el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación y de esta forma en la capacidad del circuito.
En una pulpa muy densa, aumenta la fricción entre las partículas y es probable que, por este efecto, se puedan desprender de las burbujas.

1.1.5 pH.

El pH es la variable de control más utilizada en el proceso de flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad, así como, en la depresión de minerales.

Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH. La regulación del pH en la flotación de cobre se realiza con cal.

1.1.6 Aireación y acondicionamiento de la pulpa.

El acondicionamiento es una etapa clave, ya que proporciona el tiempo necesario, para que actúen en forma eficiente con los reactivos de flotación.

La aireación de la pulpa en la celda, es una variable importante, la cual permite la aceleración o retardación de la flotación, en beneficio de la recuperación metalúrgica o de la ley del elemento de interés comercial.

1.1.7 Temperatura de la pulpa.

La temperatura tiene efecto sobre la velocidad, con que reaccionan los reactivos, con una temperatura alta, la flotación es más rápida y el concentrado más limpio.

Un aumento de la temperatura favorece la dispersión en la pulpa de los reactivos aceitosos y disminuye la viscosidad de la pulpa.

1.1.8 Calidad del agua.

Dada la gran cantidad de interacciones, que se producen entre las variables del proceso, las cuales acondicionan el ambiente fisicoquímico de la flotación, un aspecto interesante de analizar es la calidad del agua que se utiliza en el proceso.

Dependiendo de qué tipo de agua sea utilizada en el proceso, podría producir un aumento de algunos iones en solución, cuyo efecto en la flotación de los minerales, debe ser evaluado, a fin de evitar que éstos superen los niveles críticos para la flotación.

1.1.9 Tiempo de residencia.

El tiempo por el cual se emplea la flotación, depende de las características del material que se va a flotar, y de la conjugación de todos los demás factores que incidan en el proceso.

1.2 Variables de flotación con agua de mar.

La salinidad del agua de mar es aproximadamente del 35%, lo cual. Expresado en concentración de cloruro de sodio (NaCl), equivalente, es de alrededor de 0,55 M. El NaCl es el principal, pero no el único componente disuelto en esta, puesto que contiene también una serie de iones secundarios, en bajas concentraciones, tales como, iones de sulfato (2,7 g/kg); magnesio (1,29 g/kg); calcio (0,41 g/kg); bicarbonato (0,145 g/kg); etc.

Tabla 1.1 Composición típica de agua de mar

Iones	Concentración mg/kg	Partes de salinidad,%
Cloruro (Cl^-)	19.345	55,03
Sodio (Na^+)	10.752	30,59
Sulfato (SO_4^{2-})	2.701	7,68
Magnesio (Mg^{2+})	1.295	3,68
Calcio (Ca^{2+})	416	1,18
Potasio (K^+)	390	1,11
Bicarbonato (HCO_3^-)	145	0,41
Bromuro (Br^-)	66	0,19
Borato (BO_3^{3-})	27	0,08
Estroncio (Sr^{2+})	13	0,04
Fluoruro (F^-)	1	0,003

Fuente: Castro y Huber, 2005

Las sales principales (NaCl + KCl), representan alrededor del 86,7% de su salinidad total; mientras que los iones secundarios, sólo el 13,3%, siendo los más abundantes: el ion sulfato (7,68%); ion magnesio (3,68%); ion calcio (1,18%); e ion bicarbonato (0,41%).

A continuación, se nombrarán las variables a considerar para flotar minerales utilizando agua de mar:

1.2.1 Efecto de la salinidad sobre la flotación.

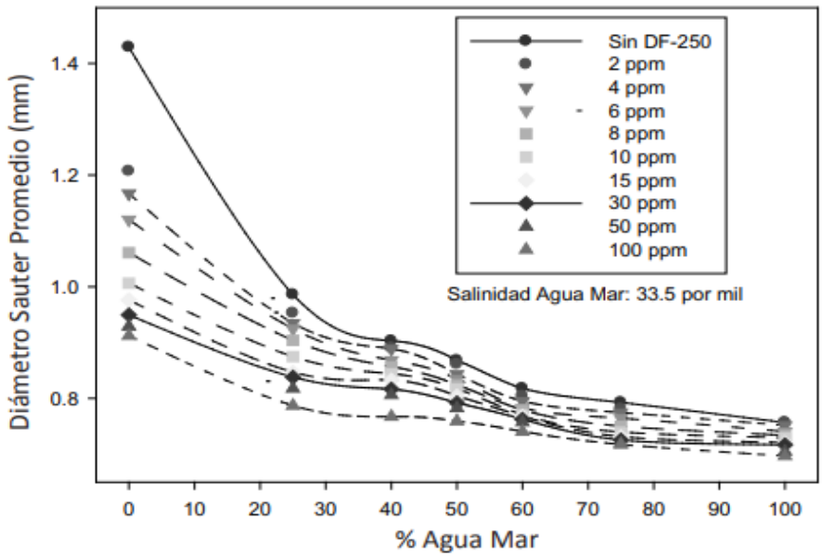
Se ha demostrado que minerales con flotabilidad natural, tales como carbón bituminoso, talco, azufre, etc. Flotan mejor en soluciones salinas, que en agua dulce. Esto demuestra que la salinidad no es intrínsecamente un factor negativo, para el proceso de flotación.

1.2.2 Agua de mar y tamaño de burbuja.

Los electrolitos inorgánicos, disminuyen la coalescencia de burbujas, en forma similar a como lo hacen los compuestos tensoactivos. Sin embargo, los electrolitos suben la tensión superficial del agua, mientras que los tensoactivos la bajan. Los mecanismos que inhiben la coalescencia de burbujas, en cada caso, son muy diferentes. Por lo tanto, el agua de mar puede prevenir la coalescencia de burbujas y reducir si tamaño, lo cual es favorable para el proceso de flotación.

El tamaño de burbuja en este ambiente es similar al que se obtiene en agua dulce, en presencia de un espumante débil como, por ejemplo, el Metil osobutil carbinol (MIBC). Además, al disolver un espumante de flotación en el recurso marino, se logra un efecto sinérgico entre electrolito y espumante. Por lo tanto, es este aspecto, este último tiene un efecto beneficioso sobre la flotación. Ver Figura 1.1

Figura 1.1 Tamaño de burbuja en función del agua de mar, a distintos porcentajes de dilución con agua destilada, para el espumante Dowfroth-250.



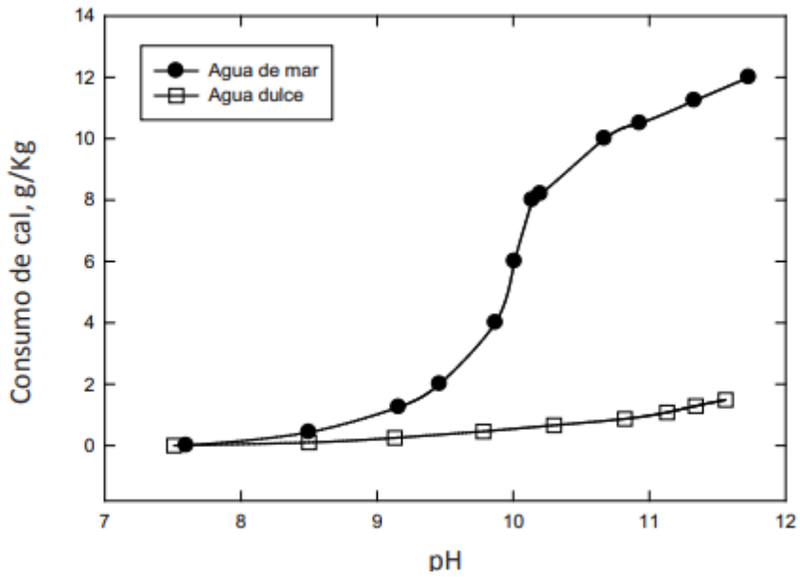
Fuente: Tamaño de burbuja en función del agua de mar, a distintos porcentajes de dilución con agua destilada, para el espumante Dowfroth-250 (Castro et al 2010)

1.2.3 Efecto BUFFER y consumo de cal en agua de mar.

El efecto buffer (Tampón),es una característica del agua de mar, que le permite a los océanos resistir o atenuar los cambios de pH. Las reacciones más importantes para mantener el balance ácido/base en este medio hídrico, son el buffer formado por el equilibrio entre CO_2 Disuelto /ácido carbónico) y los iones de bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}).

En la práctica de flotación, el agua de mar tiene la capacidad de consumir mucha más cal, que su símil dulce, cuando se ajusta el pH a un mismo valor. Este consumo genera un exceso de cal en pulpa. que puede afectar la eficiencia de flotación. En el caso de pulpas compuestas de minerales de cobre, a la curva de consumo de cal, aumenta exponencialmente en las cercanías de pH10, alcanzando a pH 11,5 – 12 consumos que pueden ser hasta 10 veces mayor, que en agua dulce. Ver figura 1.2

Figura 1.2 Consumo de cal en la flotación Rougher, a escala laboratorio en función de pH ajustado, con la lechada de cal, para un mineral de Cu-Mo-Au en agua dulce y agua de mar

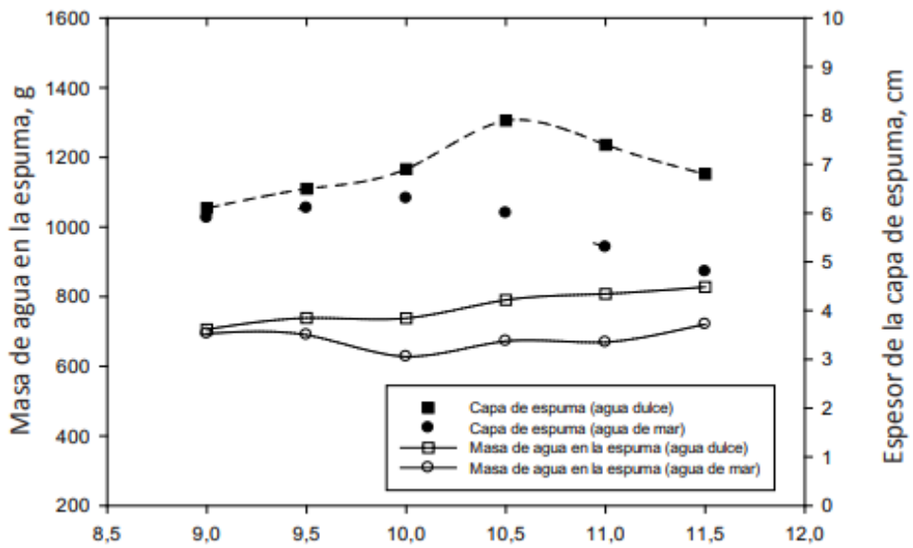


Fuente: Consumo de cal en la flotación Rougher a escala laboratorio en función de pH ajustado con la lechada de cal, para un mineral de Cu-Mo-Au en agua dulce y agua de mar (Castro, 2012)

1.2.4 Espumación de minerales de cobre, en agua de mar.

La espuma de dos fases, (Ausencia de partículas de minerales) originada por espumantes de flotación, muestra mayor espumabilidad en agua de mar, (y también en soluciones de electrolitos)) que en su símil dulce. Sin embargo, medidas del espesor de la capa de burbujas de tres fases en pruebas de flotación con agua de mar, muestran que el volumen de aquella es generalmente menor que en agua dulce. Además, en agua dulce la capa de espuma en la celda de flotación, depende del pH, mostrando un máximo alrededor de pH 10,5. En cambio, en el recurso hídrico del océano, el pH es menos influyente. Estos resultados sugieren que el pH 10,5, que comúnmente usan los circuitos Rougher industriales, podría tener más relación con la mejor espumación a ese pH, que, con una mayor adsorción del colector, que es lo que normalmente se cree. Por lo tanto, en agua de mar se obtiene volúmenes de burbujas más reducidos, con una menor dependencia del pH y con una cantidad inferior de masa de agua, transportada al concentrado. Ver Figura 1.3

Figura 1.3 Espesor de la capa de espuma, (celda agitair LA-500 de 2,7 L) en función del pH en agua dulce y agua de mar; y masa total transferida al concentrado Rougher, para un mineral de Cu-Mo (35% de solidos) (En agua dulce y agua de mar)



Fuente: Espesor de la capa de espuma (celda agitair LA-500 de 2,7 L), en función del pH en agua dulce y agua de mar; y masa total transferida al concentrado rougher para un mineral de Cu-Mo (35% de solidos) (En agua dulce y agua de mar) (Ramos et al.,2013).

1.3 Origen de las escorias de fundición.

Durante la fundición del mineral concentrado de cobre, se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se clasifican como: Mata rica en cobre (Sulfuros) y la escoria (Óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida, se va directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas.

1.3.1 Características de la escoria de fundición.

La escoria está formada por los óxidos contenidos en la carga del horno y los óxidos de hierro, que se producen por la oxidación durante el proceso pirometalúrgico. Dependiendo de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y de otros factores. Los óxidos que se presentan en la escoria son:

Óxidos de Hierro (FeO, Fe_3O_4) de 30 – 40%
Óxidos de silicio ($Si0_2$) de 35 – 40%
Óxidos de aluminio (Al_2O_3) hasta 10%
Óxido de calcio (CaO) hasta 10%

1.3.2 Composición de la escoria de cobre.

La composición física y química, depende de la materia prima usada y de la tecnología empleada. Las escorias se producen a partir de los 1600°C, al ser líquidas, su estructura amorfa-cristalina, dependerá de la forma de enfriamiento. Si es rápido, la estructura queda colapsada y es mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reactivo. En cambio, si el enfriamiento es lento, tenemos menor cantidad de estructura amorfa o vítrea, predominado estructuras cristalinas impidiendo la formación de nuevos enlaces.

1.3.3 Composición Física.

La escoria de cobre puede tener variadas formaciones, las que van en directa relación a sus propiedades físicas. Sin embargo, se pueden asemejar ciertas características, que se indican en la siguiente figura (1-4).

Figura 1.4: Características físicas de la escoria de cobre

Apariencia	De color negro, Textura lisas para las de botadero y porosas para las Granalladas
Forma de las Particulas	Irregular con bordes agudos.-
Densidad (kg/m3)	3160-3870
Abosorción de Agua (%)	0,15-0,55
Dureza	4-6
Granulometrias	Variada según su formación. Desde 4" hasta material fino menor a 0,08mm

Fuente: Tesis "Influencias de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Oyarzún U.A.CH (2013)

1.3.4 Composición Cristaloquímica.

Las escorias de cobre contienen un gran contenido de óxidos, también se caracteriza por tener altos contenidos de hierro, donde los principales componentes son la

Fayalita, Magnetita, además, podemos encontrar óxidos de calcio, aluminio, Silicato de Zinc y óxidos de cobre hierro.

1.4 Clasificación de las escorias de cobre

Las escorias de cobre se pueden clasificar según:

- El grado de silicatos.
- El tiempo de enfriamiento.

    - Escoria granallada.
    - Escoria de botadero.
    - Escoria expandida.

1.4.1 Según el grado de silicatos

La formación de la escoria de cobre se inicia en la etapa de fundición, por la adición de SiO_2 Y/O CaO como fundentes, así formándose escoria fayalita ($2FeO*SiO_2$). La composición de escoria a base de óxidos, donde se encuentran óxidos de fierro (Fe_eO_4), óxidos de sílice (SiO_2), Óxidos de aluminio (Al2O3), Óxidos de calcio (Ca0), entre otros.

1.4.2 Según el tiempo de enfriamiento

La escoria de cobre, la podemos obtener en terrenos cercanos a las fundiciones a temperatura ambiente. El tiempo que demore en llegar desde la temperatura en estado líquido, a la final de disposición, cumple un rol fundamental en la formación de fases cristalinas o vítreas, afectando el poder de reactividad del material.

1.4.3 Escoria Granallada

Este tipo de escoria se obtiene al pasar de estado líquido a sólido, en el menor tiempo posible. Una de las técnicas empleadas para ello, es la usada en Caletones, que consiste en verter la escoria fundida en un pozo de granulación o granallador, el que mantiene una cantidad de agua constante que se renueva de acuerdo con la granulación que se realice, en su interior se produce un enfriamiento brusco de escoria, pasando de estado líquido a sólido, desde una temperatura aproximada de 1150 °C a menos de °C respectivamente.
En este proceso no hay reacciones químicas que alteren su composición, si ocurren cambios mecánicos y físicos por el cambio de estado fundente, a granos sólidos, se forma un material constituido principalmente por una estructura amorfa o vitrea.

Esta forma, provee a la escoria de cobre, una mayor porosidad, aumentando la absorción de agua y una menor masa por unidad de volumen.

1.4.4 Escoria de botadero

Este tipo de escoria se obtiene por un proceso de enfriamiento lento, directamente en el lugar de acopio definitivo o algún espacio especialmente acondicionado, desde donde es llevada a disposición final. La escoria es vertida en estado líquido, en un depósito, la cual se enfría lentamente, hasta alcanzar la temperatura ambiente.
Siendo este tratamiento empleado, para obtener una fácil cristalización del material, reduciendo la porosidad y limitando la posibilidad de reacción en procesos posteriores. Se detecta un menor porcentaje de absorción de agua y es más densa que las granalladas.

1.4.5 Escoria Expandida

Se obtiene por un rápido enfriamiento, se expande por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada, aumenta su naturaleza vesicular, produciendo un material ligero, que luego es triturado y clasificado por fracciones, para darle un mayor valor tecnológico a las escorias.

Capítulo 2: Flotar cobre a partir de escoria de fundición controlando variables críticas, para construir una curva de recuperación versus tiempo.

OBJETIVO 2: Flotar mineral de cobre a partir de escoria de fundición, controlando variables críticas para construir una curva de recuperación versus tiempo.

2.1 Recuperación de cobre contenido en escoria, mediante flotación

Para este capítulo, se empezó por investigar referencias a cerca de la flotación de cobre, a partir de escorias de fundición, para tener en consideración variables que nos puedan ser útiles, al momento de realizar nuestros experimentos.

Encontrándose así, el siguiente experimento realizado en la fundición Hernán Videla Lira- Paipote, que se describirá a continuación.

2.1.1 Resumen del experimento:

El cobre se obtiene principalmente a partir de los sulfuros de cobre, mediante procesos clásicos de flotación y pirometalúrgicos, siendo Chile el mayor productor de cobre en el mundo. En nuestro país, existen siete fundiciones de cobre que generan grandes volúmenes de escoria. Este trabajo presenta los resultados obtenidos de la flotación de cobre, de escorias del horno de reverbero (HR) y del convertidor Teniente (CT), de la Fundición Hernán Videla Lira - Paipote. Así, mediante pruebas de flotación Rougher, a escala de laboratorio, se determinó que la granulometría, para ambos casos, corresponde a 70% menor a 74 μm, lográndose recuperaciones de 59,2% 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 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 (recuperación de 56,1%) para escoria HR, mientras que para la escoria CT se obtuvo una ley de 39,1% de cobre con una recuperación de 91,4%.

2.1.2 Pruebas:

Las pruebas de flotación de laboratorio se llevaron a cabo en una celda marca Denver D-12, utilizando una muestra de escoria molida. Operacionalmente la velocidad del impulsor fue constante (1.300 rpm). La prueba industrial se realizó en

planta M. A. Matta, en una sección que está constituido por un molino bolas, con descarga por rebalse y su clasificación mediante ciclones Krebs. El circuito de flotación se compone de 1 celdas OK-8 de 8 m3 de capacidad, para la etapa Rougher; 8 celdas OK-8, de 8 m3 de capacidad cada una, para la etapa Scavenger. 1 celda OK-3, de 2,8 m3 de capacidad, para la etapa cleaner. Todas las pruebas de flotación fueron realizadas a pH 8, con los reactivos de la Clariant, Hostaflot E-703 (tiono carbamato modificado), como colector y Flotanol H-70 (mezcla de éteres poliglicólicos y alcoholes) , como espumante.

2.1.3 Análisis químico:

La tabla muestra la composición química de los principales elementos y compuestos presentes en las escorias.

Tabla 2.1 Análisis Químico de las escorias en porcentaje.

Escoria	Cu	Fe	S	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Na_2O	K
H. Reverbero (HR)	0,83	33,3	0,5	37,9	7,7	1,4	7,5	2,1	1,1
C. Teniente (CT)	4,56	40,3	1,53	20,3	0,33	0,75	2,86	1,2	0,8

Fuente: Valderrama, González, Santander y Zazali (2018)

El peso específico de la escoria del HR es 3,3 kg/L y la del CT es 4,1 kg/L.

2.1.4 Prueba de molienda:

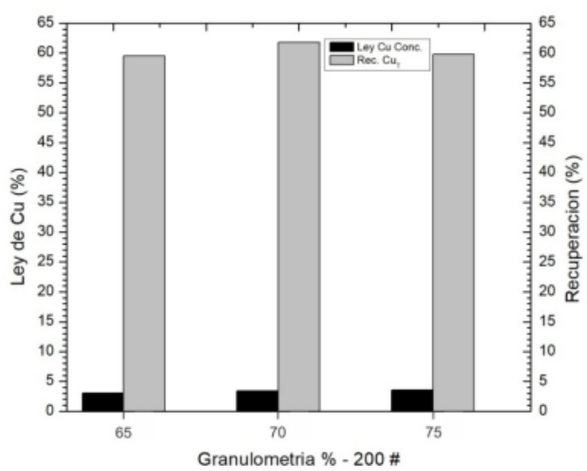
Las pruebas de molienda se realizan para determinar la granulometría óptima para la flotación. Así, se ejecutaron pruebas de molienda, para establecer los tiempos requeridos, para tener granulometrías de 65%, 70% y 75% bajo 75 micrómetros. De esta manera, se determinó que el tiempo necesario para obtener tamaños de 70%, bajo los 75 micrómetros para la escoria del HR, fue de 32,1 minutos, mientras que para la escoria del CT, esta granulometría se consigue a los 31,9 minutos.

2.1.5 Prueba de flotación:

Las pruebas de flotación, para ambas escorias, se realizaron con las granulometrías reportadas en las pruebas de molienda, usando dosis de 40 g/t, para el colector (E-703) y de espumante 30 g/t (H-70), cuyos tiempos de flotación fueron 15 minutos y un porcentaje de sólido de 35% (p/p) y pH 8.

Esas mismas pruebas, indican que un aumento en la fineza de la escoria HR, no garantiza un efecto significativo en la recuperación o en la ley del concentrado obtenido, donde las recuperaciones no superan el 60% con leyes de cobre en el concentrado por debajo del 5%; como consecuencia de ello, se hace necesario una etapa de limpieza, para lograr una mejor calidad del concentrado. Por otra parte, el mejor resultado se alcanza con una granulometría de 70% menor a 75 micrómetros, con una recuperación de 62,2% y ley de cobre en el concentrado de 3,7%. Esta baja recuperación, podría deberse a la baja ley de alimentación, así como el estado químico de cobre presente en este material. La figura también indica que una menor granulometría, no significa una mayor recuperación, posiblemente debido a una mayor cantidad de lamas, y estas podrían producir el recubrimiento de las partículas hidrofóbicas, por estos ultrafinos.

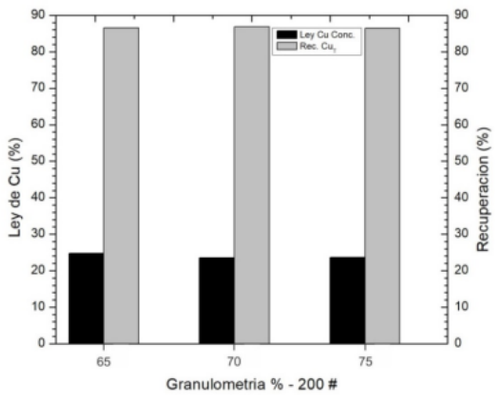
Figura 2.1: Efecto de la granulometría sobre la ley y recuperación de cobre en escoria HR.



Fuente: Valderrama, González, Santander y Zazali (2018)

Las escorias provenientes del CT, tienen una ley de cobre en la alimentación superior a 4%, condición que se observa en la Figura 4, lo que favorece la ley de cobre en el concentrado, superando el 20%, con recuperaciones levemente inferiores a 90%. Tal como se establece en la Figura 4, en todas las condiciones granulométricas consideradas, para una granulometría 70% bajo los 75 micrómetros, se logra una recuperación de 86,8% con una ley de cobre en el concentrado de 23,6%. Ver figura. 2.2

Figura 2.2: Efecto de la granulometría sobre la ley y recuperación de cobre en la escoria CT.



Fuente: Valderrama, González, Santander y Zazali (2018).

2.2 Elección de parámetros.

Una vez investigado los parámetros, se procedió a elegir las variables que utilizaríamos para los experimentos a realizar.

Se eligió por tomar dos muestras de agua de mar, no reposada y 2 muestras con agua de mar reposada, durante 1 mes.

Los parámetros para tomar fueron los siguientes:

2.2.1 Tamaño de partícula

Se determinó por elegir un tamaño de partícula fino, usando tamices número 200 hasta 300, ya que es una granulometría usada en las mineras, además que se obtiene un mineral bastante homogéneo, usando un rango de 100 de diferencia.

2.2.2 Elección de reactivos y cantidad de reactivos

Se seleccionó 1 tipo de colector y 1 tipo de espumante, siendo estos el AP3976 y MIBC.

Que fueron los que estaban disponibles a utilizar en el laboratorio.

2.2.3 Cálculo de reactivos

$$\frac{100}{\frac{35}{5{,}56}+\frac{65}{0{,}91}}=1{,}28\frac{ton}{m3}$$

Realizado este cálculo, se procedió a calcular la densidad del reactivo.

$$500=\frac{2{,}8}{500}\ \rightarrow\ v=\frac{2{,}8}{500}\ \rightarrow\ v=0{,}0056\,L\ \approx 5{,}56\,\frac{gr}{m^3}$$

Posteriormente la densidad de la pulpa

$$0{,}91\,L+1{,}28=2{,}19\ \approx 0{,}00219m^3$$

Finalmente se obtiene la masa del reactivo, que vamos a utilizar en las flotaciones:

$$1{,}28\cdot 0{,}00219=0{,}0028032\ \rightarrow\ 1{,}2\cdot\ 0{,}002803=\frac{0{,}00336384}{1{,}08}=0{,}00302\ microlitros$$

2.2.4 Cantidad de litros de agua.

La cantidad de agua a elegir fue de 0,91 Litros, los cuales fueron calculados de la siguiente forma.

$$\frac{500\ gr}{x}=0{,}35\ \rightarrow\ \frac{500\ gr}{0{,}35}=x\ \rightarrow\ 1428-500=\frac{928}{1{,}02}=910cm^3\approx 0{,}91\ Litro$$

2.3 Procedimiento de laboratorio para la flotación:

2.3.1 Pesaje del material:

Se procedió a pesar la escoria de fundición, para poder iniciar el proceso de molienda, para ello, se procedió a pesar 2 kilos de material para iniciar el proceso y así no poner tanto material en el molino para que el material sea reducido de tamaño de mejor forma posible.

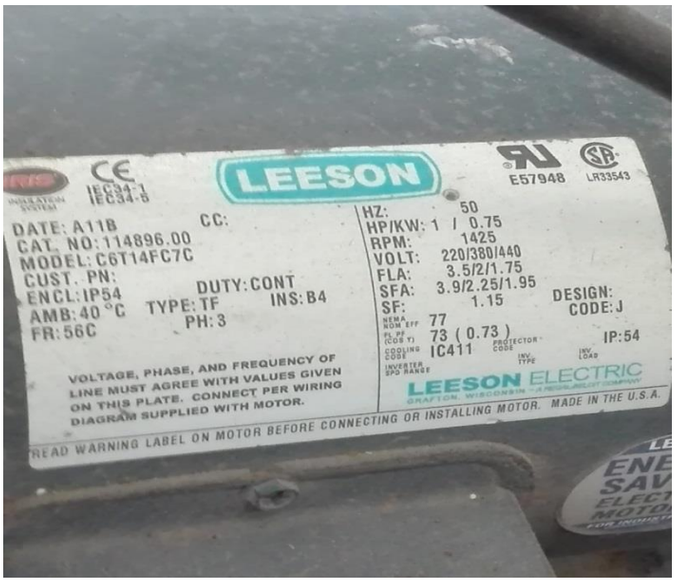
2.3.2 Material en el molino

Una vez pesado el material en la bandeja, se llevó la muestra al molino de bolas, para proceder a chancar el material. Primero se pusieron las bolas en el molino y luego fue vertido el material para finalmente cerrar el molino y proceder a encenderlo dejándolo a dar 300 vueltas. Ver Figura 2.3

Figura 2.3: Molino de bolas a escala laboratorio

Fuente: Propia

Figura 2.4: Información técnica del molino de bolas utilizado a escala laboratorio.



Fuente: Propia

2.3.3 Material chancado.

Una vez que el molino ha parado de dar las 300 vueltas, se procede a colocar la bandeja debajo del molino, para recolectar la muestra molida una vez abierto el molino y girándolo para que caiga el material.

2.3.4 Procedimiento de tamizaje.

Nuevamente se procede a pesar el material chancado, para luego introducir la muestra en los tamices que fueron seleccionados anteriormente, los cuales fueron los siguientes (Usando la malla 200, como malla de corte) Ver figura 2.2

Tabla 2.2: Elección de tamices

N° Tamiz	Peso del tamiz (gr)
40	372,2
100	336,6
200	326,4
270	314,2
300	547,6
-	485,0

Fuente: Propia

Figura 2.5: Datos técnicos de los tamices que se encuentran en el laboratorio de metalurgia, Elaborado por Pablo Carreño M. (2017)

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Sede José Miguel Carrera
Departamento de Mecánica
Carrera Técnico Univ. en Minería y Metalurgia
Laboratorio de Metalurgia

Revisión: 2017-Septiembre
Elaborado por: Pablo Carreño M.

Listado de tamices al 01 - septiembre - 2017.

	Item	Cantidad de tamices	SIZE	MICRONES	APERTURA INCH	APERTURA MM
SERIE GRUESA	1	1	1 1/2"	37500	1,5000	37,500
	2	2	1 1/4"	31500	1,2500	31,500
	3	2	1"	25000	1,0000	25,000
	4	2	3/4"	19050	0,7500	19,050
	5	2	0,53	13200	0,5300	13,200
	6	2	3/8"	9500	0,3750	9,500
	7	2	0,265	6730	0,2650	6,730
	8	2	1/4"	6350	0,2500	6,350
SERIE FINA	9	3	4	4750	0,1870	4,750
	10	2	5	4000	0,1570	4,000
	11	3	6	3350	0,1320	3,350
	12	2	8	2360	0,0937	2,360
	13	3	10	2000	0,0787	2,000
	14	2	12	1700	0,0661	1,700
	15	2	14	1400	0,0555	1,400
	16	2	16	1180	0,0469	1,180
	17	2	18	1000	0,0394	1,000
	18	2	20	850	0,0331	0,850
	19	3	30	600	0,0234	0,600
	20	3	40	425	0,0165	0,425
	21	2	45	355	0,0139	0,355
	22	3	50	300	0,0117	0,300
	23	2	60	250	0,0098	0,250
	24	3	70	212	0,0083	0,212
	25	2	80	180	0,0070	0,180
	26	3	100	150	0,0059	0,150
	27	4	120	125	0,0049	0,125
	28	3	140	106	0,0041	0,106
	29	3	170	90	0,0035	0,090
	30	3	200	75	0,0029	0,075
	31	1	270	53	0,0021	0,053
	32	1	400	38	0,0015	0,038

TAPA Y FONDO

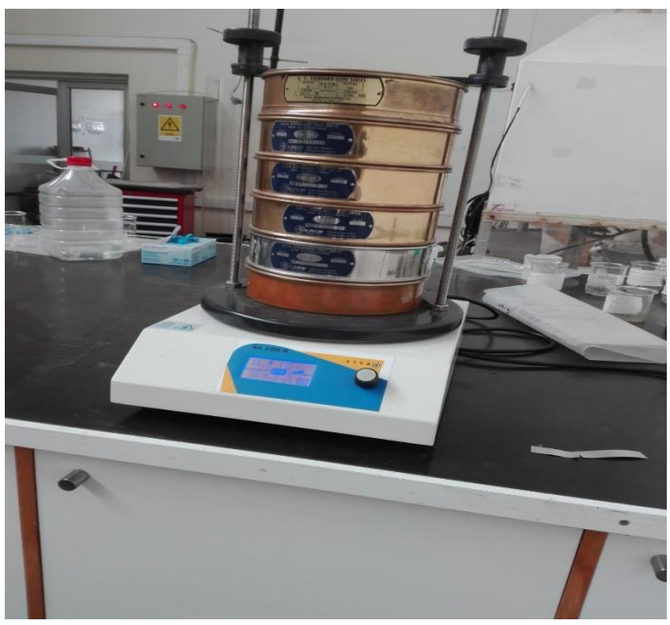
	30	2	8" X 2"	Tapas		
	31	2	8" X 2"	Fondos		

Fuente: Propia

2.3.5 Programación de tamizadora digital

Una vez puestos los tamices en orden y vertido el material, se procede a cerrarlo y poner los tamices en la tamizadora digital, por un tiempo de 5 minutos y a una amplitud de 1,2 mm.

Figura 2.6: Tamices colocados en la tamizadora digital.



Fuente: Propia

2.3.6 Procedimiento final.

Finalmente, el material obtenido desde la malla 200 fue pesado y almacenado para su posterior uso en el proceso de flotación. Ver figura 2.7

Figura 2.7: Material fino recolectado desde la malla 200.

Fuente: Propia

2.4 Procedimiento de flotación

2.4.1 Pesaje de muestra.

Se procede a pesar el material que se va a utilizar para el proceso de flotación, en este caso, se procedió con una muestra de 503,51 gramos para la muestra N°1.

Figura 2.8: Pesaje del mineral, correspondiente a la muestra 1

Fuente: Propia

2.4.2 Celda de flotación

Una vez pesado el material, es depositado dentro de la celda de flotación, junto a los litros de agua calculados anteriormente y se procede a agregar los reactivos elegidos.

2.4.3 Celda de flotación en marcha

Se procede a encender la celda de flotación, luego se procede a poner la manguera para la inyección de aire y se enciende.

Figura 2.9: Celda en funcionamiento, correspondiente a la muestra 1

Fuente: Propia

Figura 2.10: Información técnica de la celda de flotación utilizada.

Fuente: Propia

Figura 2.11: Celda utilizada en el proceso de flotación.

Fuente: Elaboración propia

2.4.4 Recolección de muestras.

Se dejó la celda en funcionamiento por 3 minutos, para luego ir recolectando 4 tipos de muestras durante 1,2,3 y 4 minutos, dándole un tiempo de 15 segundos de reposo, entre cada intervalo de muestra.

Figura 2.12: Intervalo de muestras recolectadas a partir del experimento N°2.

Fuente: Elaboración propia

2.4.5 Secado de muestras

Una vez recolectadas las muestras, se procede a llevarlas al horno de secado y dejadas allí durante 24 horas.

Figura 2.13: Horno de secado del laboratorio de Minería y Metalurgia.

Fuente: Elaboración propia

Por último, las muestras son sacadas del horno y se proceden a pesar, para comenzar con el análisis de recuperación.

Figura 2.14: Muestra N°2 secada, procedente del horno de secado.

Fuente: Elaboración propia

2.5 Resultados obtenidos flotando con agua de mar no reposada

Para este experimento, se utilizó 503,51 gramos para la muestra N°1 y 350,5 gramos para la muestra N°3.

Los resultados obtenidos en la etapa de flotación y secado fueron adjuntados en las siguientes tablas (Tabla 2.3 y Tabla 2.4):

Tabla 2.3: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°1.

Experimento 1				
Peso bandeja (gr)	Intervalo de muestra (min)	Peso material (gr)	Peso final (gr)	Porcentaje recuperado
5,12	03:00 - 04:00	15,81	10,69	10%
5,11	04:15 - 06:00	34,12	29,01	28%
5,15	06:15 - 09:00	41,56	36,41	35%
5,15	09:15 - 13:00	34,43	29,28	28%
Total	-	125,92	105,39	100%

Fuente: Elaboración propia

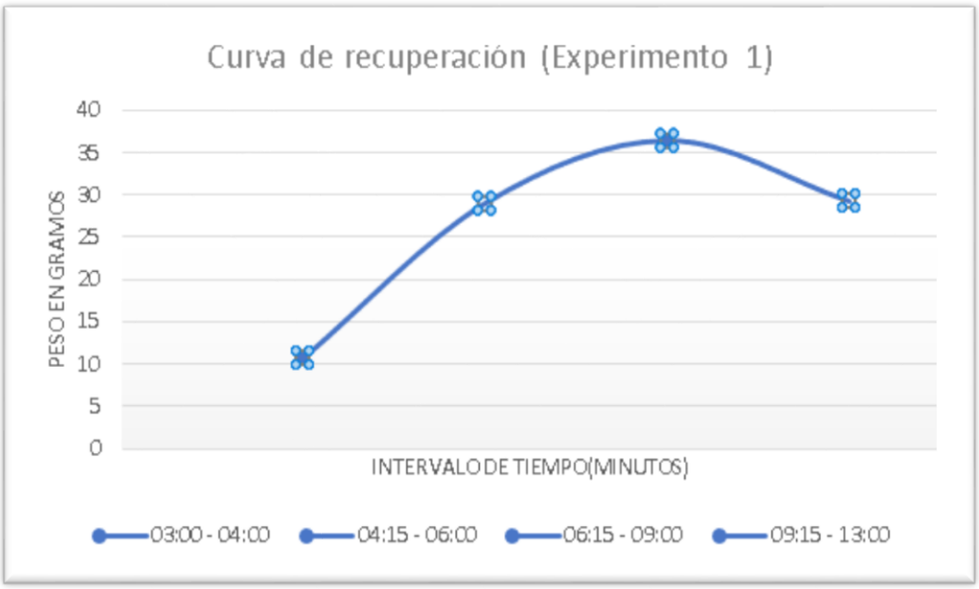
Tabla 2.4: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°3.

Experimento 3				
Peso bandeja (gr)	Intervalo de muestra (min)	Peso material (gr)	Peso final (gr)	Porcentaje recuperado
5,09	03:00 - 04:00	8,68	3,59	10%
5,1	04:15 - 06:00	16,05	10,95	31%
5,1	06:15 - 09:00	13,44	8,34	24%
5,16	09:15 - 13:00	17,31	12,15	35%
Total	-	55,48	35,03	100%

Fuente: Elaboración propia

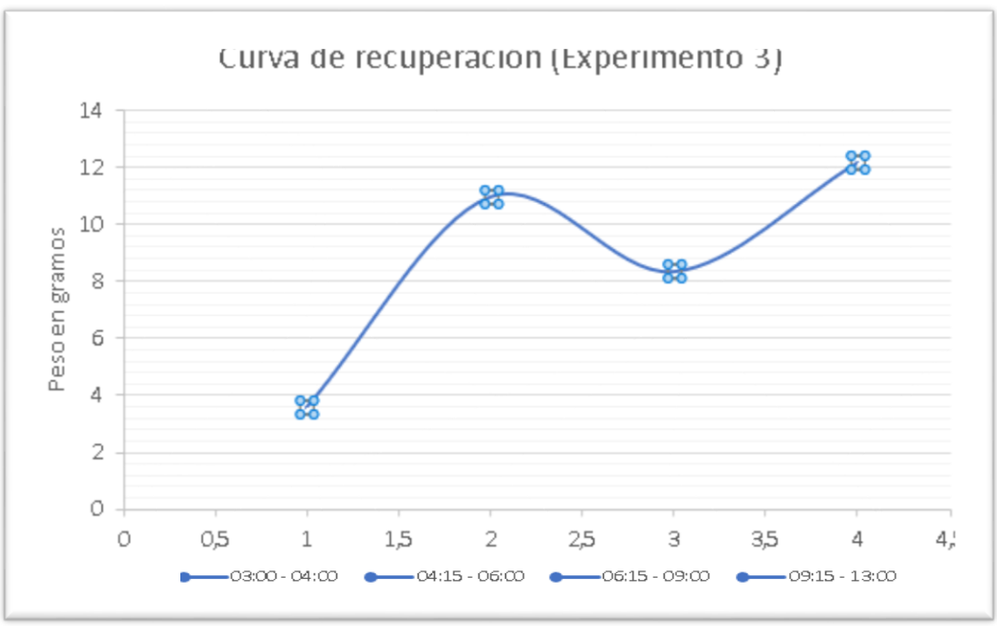
Una vez recolectados estos datos se procedió a elaborar la gráfica de recuperación versus tiempo, correspondiente a estas muestras (Figuras 2.15 y 2.16)

Figura 2.15: Curva de recuperación versus tiempo obtenida de la muestra experimental N°1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.16: Curva de recuperación versus tiempo obtenida de la muestra experimental N°3.



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3: Identificar cambios en la curva de recuperación versus tiempo, dándole 10 días de reposo al agua de mar, para verificar mejoras en la recuperación de cobre.

3.1 Análisis de flotación con agua de mar en reposo.

El procedimiento llevado a cabo en esta flotación es similar al procedimiento realizado anteriormente, con la diferencia en que se usó agua de mar reposada en refrigeración, para identificar si hay una diferencia en cuanto a la recuperación considerable entre el agua sin reposo, o ligeramente reposada, y el agua en estado de reposo por 1 mes.

Para estas muestras se utilizó 504,86 gramos de material para el experimento N°2 y 325,8 gramos para el experimento N°4

Los resultados obtenidos en la etapa de flotación y secado fueron adjuntados en las siguientes tablas (Tabla 3.1 y Tabla 3.2):

Tabla 3.1: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°2.

Experimento 2			
Peso bandeja (gr)	Intervalo de muestra (min)	Peso material (gr)	Peso final (gr)
5,11	03:00 - 04:00	39,92	34,81
5,12	04:15 - 06:00	51,47	46,35
5,09	06:15 - 09:00	34,85	29,76
5,11	09:15 - 13:00	24,85	19,74
Total	-	151,09	130,66

Fuente: Elaboración propia

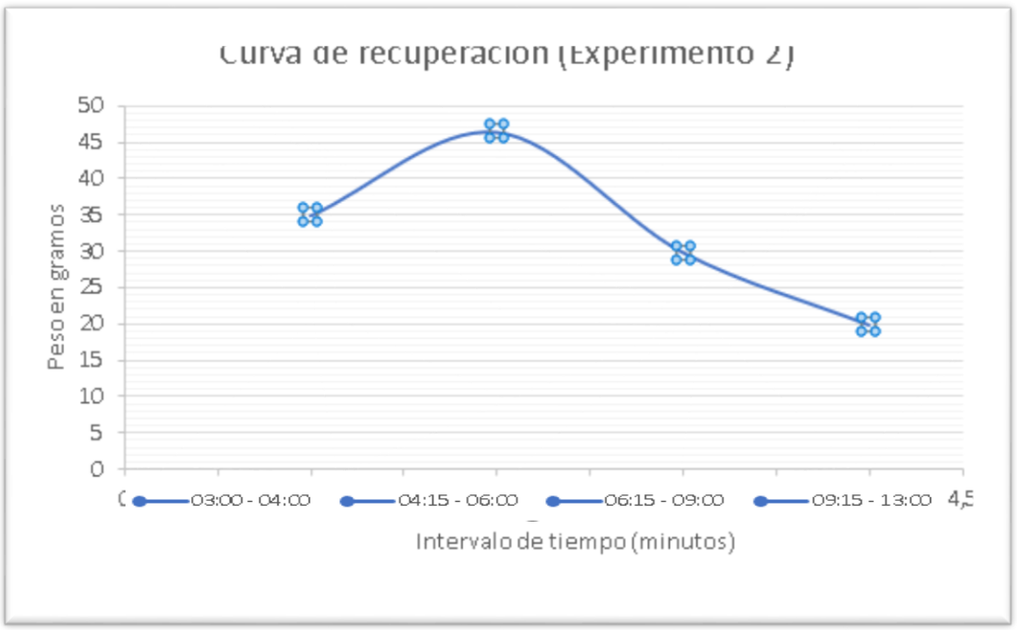
Tabla 3.2: Resultados obtenidos de la muestra experimental N°4.

Experimento 4			
Peso bandeja (gr)	Intervalo de muestra (min)	Peso material (gr)	Peso final (gr)
5,17	03:00 - 04:00	71,48	66,31
5,17	04:15 - 06:00	39,16	33,99
5,12	06:15 - 09:00	42,11	36,99
5,13	09:15 - 13:00	29,76	24,63
Total	-	182,51	161,92

Fuente: Elaboración propia

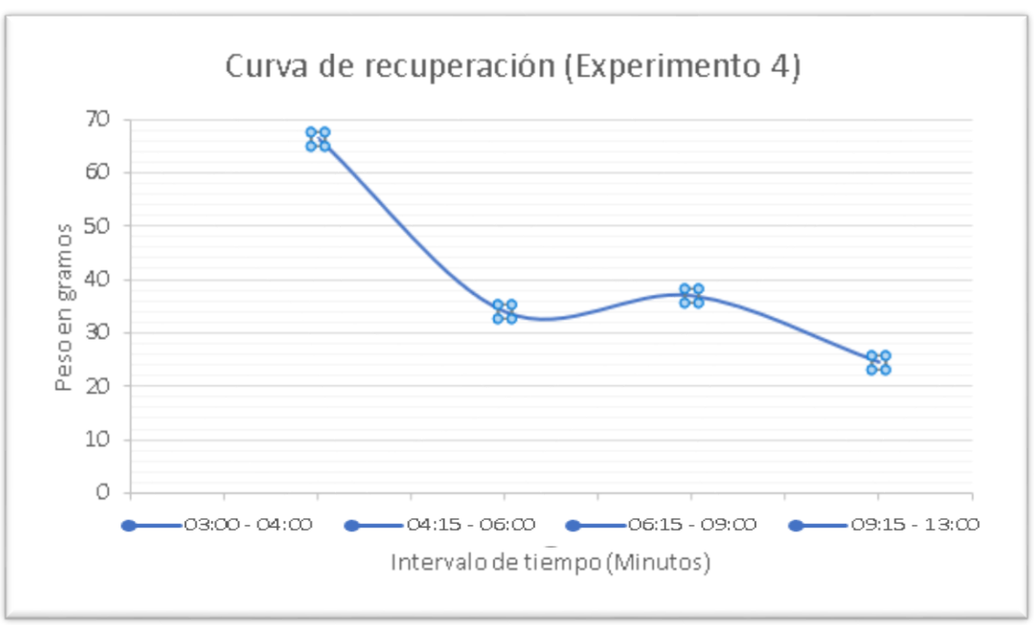
Una vez recolectados estos datos, se procedió a elaborar la gráfica de recuperación versus tiempo, correspondiente a estas muestras (Figuras 3.1 y 3.2)

Figura 3.1: Curva de recuperación versus tiempo, obtenida de la muestra experimental N°2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2: Curva de recuperación versus tiempo, obtenida de la muestra experimental N°4.



Fuente: Elaboración propia

Inicialmente, podemos decir a partir de estas gráficas, que la recuperación fue mayor en los primeros minutos del experimento, en comparación a las muestras N°1 Y N°3, ya que en las muestras N°2 y N°4, la recuperación fue superior del 20%, el primer minuto de recolección de la pulpa, incluso llegando al 41% en el experimento N°4.

Luego de analizados estos datos, se procedió a realizar un análisis en cuanto al material que se quedó en la celda de flotación y cuánto se pudo recuperar, en base al total de todas las muestras una vez secadas, obteniéndose así los siguientes resultados. (Tabla 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6)

Tabla 3.3: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°1.

Experimento 1		
Material de la muestra	503,51	gr
Material recuperado	105,39	gr
Material no recuperado	398,12	gr
Porcentaje de recuperación	20,93%	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°2.

Experimento 2		
Material de la muestra	504,86	gr
Material recuperado	130,66	gr
Material no recuperado	374,2	gr
Porcentaje de recuperación	25,88%	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°3.

Experimento 3		
Material de la muestra	350,5	gr
Material recuperado	35,03	gr
Material no recuperado	315,47	gr
Porcentaje de recuperación	9,99%	

Fuente: Elaboración propia

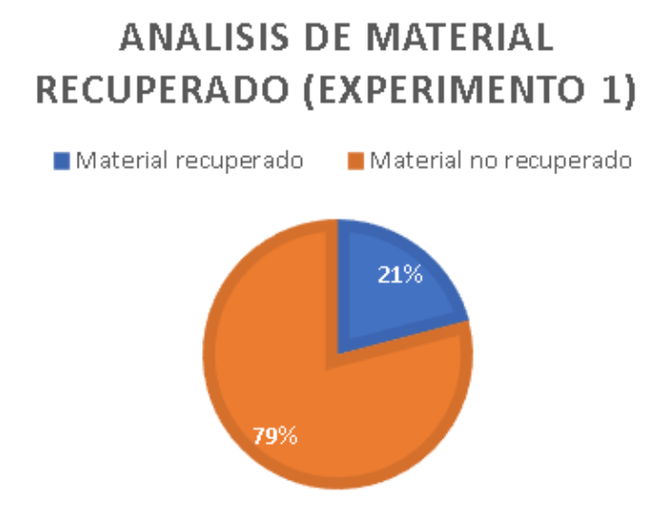
Tabla 3.6: Datos experimentales obtenidos de la muestra N°4.

Experimento 4		
Material de la muestra	325,8	gr
Material recuperado	161,92	gr
Material No recuperado	163,88	gr
Porcentaje de recuperación	49,70%	

Fuente: Elaboración propia

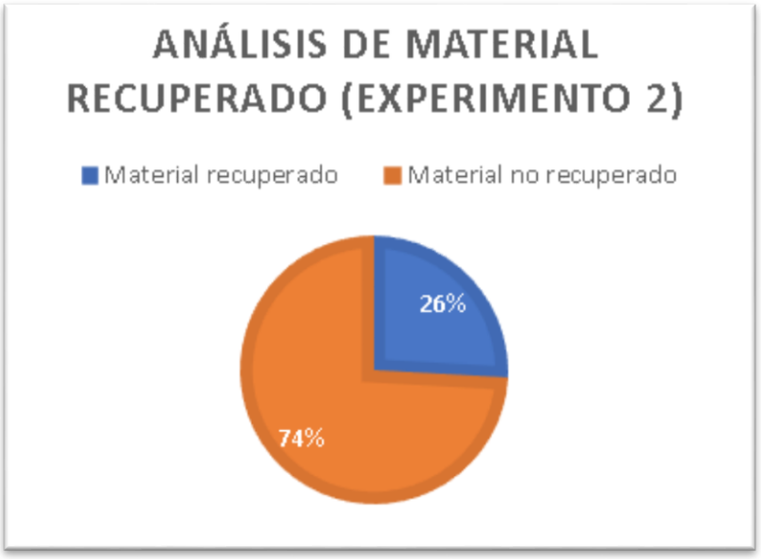
Teniendo los datos recolectados en las tablas correspondientes, se procedió a graficar la información, para así comparar ambos experimentos, en cuanto a la recuperación de material, obteniendo las siguientes gráficas (Figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6):

Figura 3.3: Análisis de material recuperado versus no recuperado de la muestra N°1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4: Análisis de material recuperado, versus no recuperado de la muestra N°2.

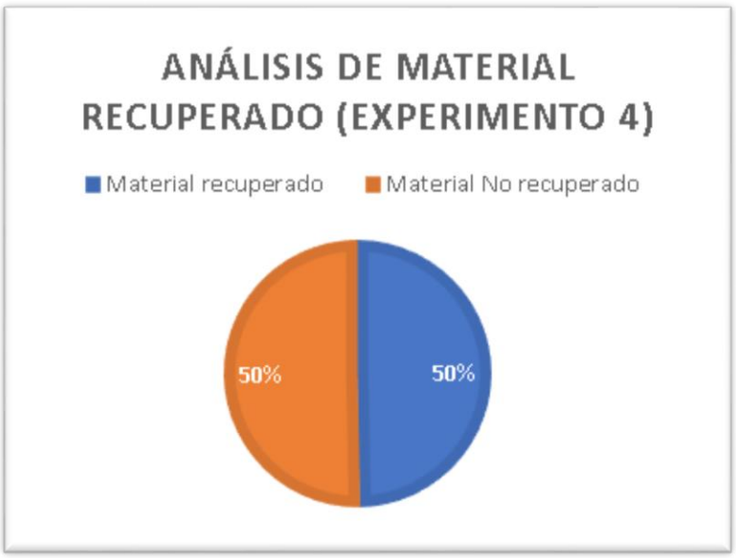


Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Análisis de material recuperado, versus no recuperado de la muestra N°3.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6: Análisis de material recuperado versus no recuperado de la muestra N°4.



Fuente: Elaboración propia

Con la información obtenida, pudimos observar que la recuperación fue mayor, en comparación al agua no reposada, mostrando un gran margen de diferencia en el experimento N°4, que su recuperación llegó a ser casi del 50%, siendo el doble de recuperación obtenida del experimento N°1 con agua de mar no reposada, que fue la que estuvo con más recuperación, usando ese tipo de agua.

3.2 Resumen total de todas las muestras.

A continuación, se presenta un resumen de todas las muestras realizadas durante el desarrollo del proyecto.

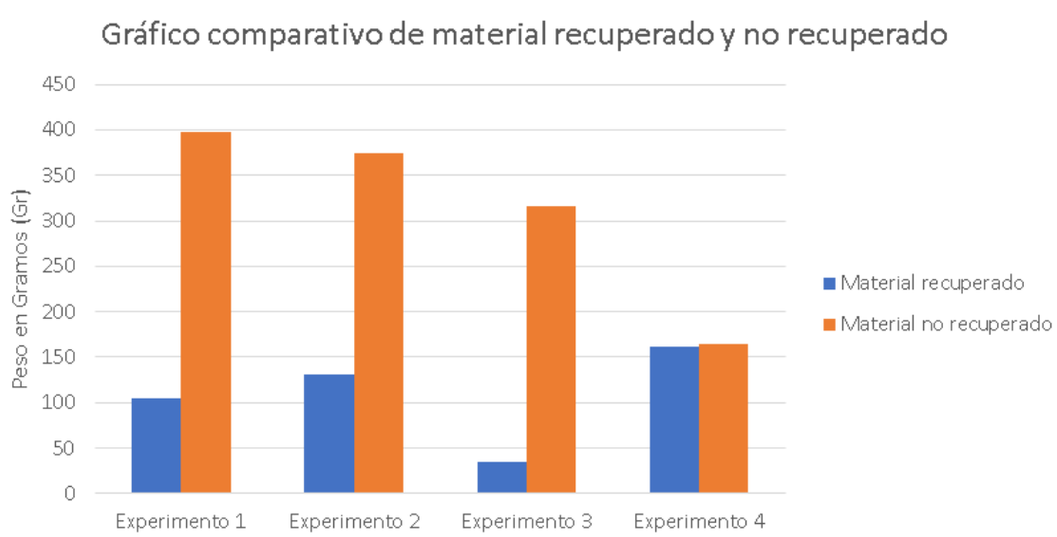
Tabla 3.7: Resumen de material recuperado y no recuperado de todas las muestras.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Material recuperado	105,39	130,66	35,03	161,92
Material no recuperado	398,12	374,2	315,47	163,88
Total	503,51	504,86	350,5	325,8
Porcentaje recuperado	21%	26%	10%	50%

Fuente: Elaboración propia

Luego, se procedió a graficar la información recolectada en el siguiente gráfico (Figura 3.7)

Figura 3.7: Comparación entre material recuperado y no recuperado de todas las muestras



Fuente: Elaboración propia

Luego se procedió a sacar una media, entre la obtención de material que se obtuvo con agua de mar reposada y no reposada, obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 3.8)

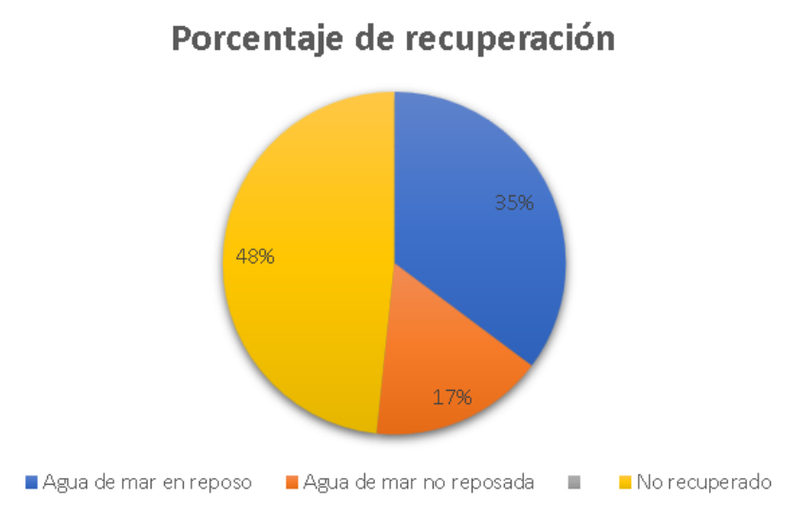
. Tabla 3.8: Media de material recuperado y no recuperado entre las muestras con agua de mar reposada y no reposada. (En gramos)

	Agua de mar en reposo	Agua de mar no reposada
Material recuperado	292,58	140,42
Material no recuperado	538,08	713,59
Total	830,66	854,01
Porcentaje de recuperación	35,22%	16,44%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se procedió a graficar los datos obtenidos, obteniéndose la siguiente gráfica (Figura 3.8):

Figura 3.8: Media de comparación, entre material recuperado en agua de mar reposada, no reposada y material que no se recuperó.



Fuente: Elaboración propia

3.3 Costos de inversión

El presupuesto para poder realizar flotaciones con agua de mar, en una minera, teniendo en cuenta los valores de transporte del agua, mantención de los equipos a utilizar, reactivos etc.… son los siguientes:

Vías de transporte agua salada: Según Cristián Puga (Gerente de asuntos externos de Esperanza), el costo de inversión de la creación de acueductos de agua cruda para la minera Esperanza, es de $377 millones de dólares, esto teniendo en cuenta, usando ductos que sean antioxidantes al momento del transporte del agua de mar, ya esto tiene un nivel mayor de oxidación en comparación con el agua dulce, de la misma forma este monto puede variar teniendo en cuenta la distancia en la que se encuentre la planta y la zona costera, por la cantidad de ductos que se tienen que instalar, para poder utilizar el agua de mar.

Reactivos: Para los reactivos no hay valor, ya que se debe de realizar una cotización para poder adquirir estos productos, no obstante, los reactivos que se pudo hallar son el colector "DSP 7465" y el espumante "DSF 9015", las características y aplicaciones de cada reactivo, son los siguientes:

Espumante "DSP 7465": es un espumante fuerte, soluble en agua, que se utiliza en variados circuitos de flotación, tanto de minerales metálicos, como no metálicos y sulfuros minerales con metales preciosos. El producto es una formulación equilibrada de glicoles de mediana viscosidad, que genera una espuma compacta, de buena persistencia y contribuye a una alta recuperación y selectividad en la flotación. El DES 9015 puede ser usado en un amplio rango de pH, desde ácido hasta alcalino, sin perjuicio de sus propiedades. Es compatible con espumantes tipo alcohol y con los colectores usuales, de los circuitos de flotación. El DFS 9015 es particularmente efectivo, cuando se utiliza en conjunto con hidrocarburos o aceites combustibles, para la flotación de carbón. El DSF 9015 se aplica a una dosis que varía entre 5 – 50 gpt. Sin embargo, la dosis óptima depende de diversos factores, propios de cada mineral y de cada proceso, tales como tipo de ganga, pH, granulometría, calidad del agua, etc. La dosis más apropiada, deberá encontrarse mediante pruebas de flotación de laboratorio. El producto se encuentra empaquetado en tambores de 200 litros.

Colector "DPS 7465": DSP 7465 es un colector soluble en agua, utilizado en circuitos de flotación de minerales sulfurados que contienen cobre, molibdeno, plomo, zinc, plata y oro. El DPS 7465 presenta gran selectividad a la pirita, en circuitos alcalinos, para la flotación de minerales de cobre sulfurados, minerales de zinc preactivados y minerales de oro, plata y minerales, que contienen metales nobles. En la flotación de minerales de cobre y cobre-oro, permite obtener muy buenas recuperaciones con concentrados muy limpios. DSP 7465 puede añadirse a la pulpa de flotación, tanto sin diluir como en solución acuosa diluida al 10%. El colector es de acción rápida, por lo que requiere, breves tiempos de acondicionamiento. Se sugiere adicionarlo en

los rebosaderos de clasificación, estanques de acondicionamiento y cajones que alimentan a las celdas de flotación. La dosis de DSP 7465, varía usualmente entre 20 – 60 gpt, aunque depende de diversos factores, propios de cada mineral y de cada proceso, tales como tipo de gangas, pH, espumantes, granulometría, calidad del agua, etc. La dosis más apropiada deberá encontrarse mediante pruebas de flotación de laboratorio. El producto se encuentra empaquetado en tambores de 200 litros.

Fuente: chile.pochteca.net

Mantenimiento: La mantención de los equipos a utilizar, ya sea las celdas de flotación, ductos, filtros etc., no se ha pódido el valor, no obstante la empresa que realiza la mantención y limpieza de estos equipos es "SoldesP" , esta empresa que se dedica a los servicios mineros dedicados a la mantención, con lo que cuenta con una amplia y variada cantidad de técnicos, que se reparten en varias áreas y especialidades.

Todo esto se realiza teniendo en cuenta, que el proceso de flotación sea realizado con agua de mar en una minera, saliendo del área de laboratorio, por lo que el costo sería elevado, teniendo en cuenta todos estos parámetros, más aún si, es que la planta minera se encuentra en una zona cordillerana.

Este proyecto, por lo que se pudo analizar, es rentable, teniendo en comparación con crear una planta desaladora, ya que todo el costo de crear la planta, se podría usar para el mantenimiento, para los años futuros o en mejorar los equipos. Solamente teniendo en cuenta que esto sería, para la flotación de escoria de cobre que sería rentable, para sulfuros y/o óxidos, por desconocimiento sería más recomendable construir plantas desaladoras.

Teniendo en cuenta esta información, para flotar escoria de cobre, sería rentable, viendo los otros costos de las plantas desaladoras, teniendo en consideración todo lo que esto conlleva.

Figura 3.9: Ductos de aguas de mar

Fuente: proyectos minera esperanza

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones.

Se puede concluir que al realizar una flotación con agua dulce o normal, se necesita tener en cuenta bastantes variables para obtener una flotación óptima, así también lo necesita el agua de mar, con ello se puede ver que hay variables que ayudan, de mejor manera a esta flotación, como por ejemplo la Cal, esta ayuda a obtener un pH bastante alto y muy regular, que a diferencia de que en el agua dulce, sólo alcanza el pH 10 como máximo y no puede quedar por mucho tiempo estable.

Además, que hay minerales cuyas propiedades se ven beneficiadas por la gran cantidad de cloruro Sodio y cloruro de Potasio, además de iones que están en mejor cantidad, pero igualmente afectan en la flotación del mineral y/o además en la formación y tamaño de la burbuja, por lo que se podría utilizar de manera normal, sin importar que sea agua salada. Obviamente se va a obtener mineral, pero usando las propiedades y conocer las variables que afectan en el agua de mar, es mejor, ya que hay minerales que se benefician de esta agua.

Por otra parte, además de todos los beneficios que reciben algunos minerales, para usar el agua de mar, se puede utilizar sin problemas, como agua reusada.

El uso de agua de mar poco reposada, demostró tener una baja recuperación de material, en el marco de las dos muestras realizadas.

Analizando y viendo los resultados obtenidos de las flotaciones con las primeras 2 flotaciones, se puede obtener como resultado que las flotaciones con agua de mar en reposo, se obtuvo una mejor recuperación.

Por lo tanto, para poder flotar escoria de cobre, sería una mejor opción realizando este proceso con agua de mar en reposo, ya que se decantó un porcentaje de la sal presente en estas aguas, por lo que esta decantación pudo haber influido en que el agua en reposo, haya obtenido más mineral. Entonces, para mejores resultados, se tiene que buscar no agitar el agua y evitar como lo que había decantado, no volviera a la superficie del agua. Para esto, lo que se realizó, fue poner el contenedor del agua de manera diagonal para que así no hubiera una caída tan abrupta de esta y corriera por la superficie del contenedor, y así evitar también, generar que esta agua haya perdido su reposo. Así mismo, se realizó el ingreso del agua a la celda, evitando cualquier movimiento que hiciera perder estas propiedades.

Como se ha podido observar, realizar la flotación de esta manera, logró que se pudiera evitar que el agua en reposo se haya agitado, y esto se puede ver en los resultados de las flotaciones en donde en el experimento 1 y 3 (agua de mar sin reposo), son de un 21% y 10% respectivamente, mientras que, con el agua en

reposo, es decir, el experimento 2 y 4, obtuvieron un porcentaje de recuperación respectivo del 26 y 50%.

Concluimos así que hay una gran diferencia en la recuperación entre ambas flotaciones, donde el proceso llevado a cabo con agua en reposo, se obtuvo de una mejor manera.

Recomendaciones.

Al terminar nuestro proyecto de titulación, podemos ver que se pueden hacer muchas mejoras y se puede tener mucho más conocimiento sobre el tema, ya que, por los motivos medioambientales, se empieza a usar esta metodología, por lo que es algo nuevo que se está implementando en la minería. Por lo que aún hay mucho por conocer y mejorar, por lo que motivamos a las próximas generaciones, a que puedan aprender, innovar y mejorar las técnicas que se usan en el rubro minero e incluso crear nuevas tecnologías.

Bibliografía

1. Valderrama, González, Santander y Zazali (2018).

   https://www.researchgate.net/publication/328947290_RECUPERACION_DE_COBRE_CONTENIDO_EN_ESCORIA_DE_COBRE_MEDIANTE_FLOTACION

2. Marcelo Vásquez, periodista VRIEA PUCV.

   https://www.pucv.cl/uuaa/vriea/noticias/nuestros-investigadores/en-chile-diariamente-se-desecha-cobre-avaluado-en-una-cifra-cercana-a

3. "Flotación de mineral sulfurado de cobre-molibdeno en PH alcalino usando agua residual de cerveza". Franz Navarro Barria y Maximiliano Albiña López (2018).

   https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47366/3560901064533UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

4. "Propuesta de reciclaje de la escoria de cobre de la fundición ventanas de Codelco, para mitigar el impacto ambiental. Pedro Carrasco Correa (2017).

   https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/39971/3560901063226UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

5. "Efecto del agua de mar en la recuperación de minerales de cobre-molibdeno por procesos de flotación". Lina Marcela Uribe Vélez (2017).

   http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/2691/3/Tesis_Efecto_del_agua_de_mar_.pdf

6. "Utilización de escoria de cobre de Codelco ventanas como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples en la región de Valparaíso". Yaichi Esteban Andrés Pérez Mejías (2017).

   https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/14088/3560900231483UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

7. “Mejoramiento proceso de limpieza de escoria en fundición de concentrado Chuquicamata”. Alejandra Arancibia Cruz (2008).

   http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCI8576_01.pdf

8. Libro “El agua de mar en la minería. Fundamentos y aplicaciones”. Luis cisternas y Luis Moreno (2014).

9. Apuntes Concentración de Minerales (2021). Profesor Cesar Álvarez.

10. http://www.pugamujica.cl/proyectos/minera-esperanza-minera-antucoya/