

“OPTIMIZACIÓN DE LA FLOTACIÓN DE LA MOLIBDENITA FINA UTILIZANDO ÓXIDO DE POLIETILENO”

DARKO GERARDO ARIAS SALINAS

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

ENERO 2019

A mis padres, quienes constantemente me recuerdan que la constancia y el esfuerzo siempre dan frutos.

A mi hermana, por su apoyo y alegría siempre brindada.

A mi familia, amigos y compañeros por su inconsecuente amor entregado.

Todos ellos aportando de distintas y especiales maneras.

Darko Arias

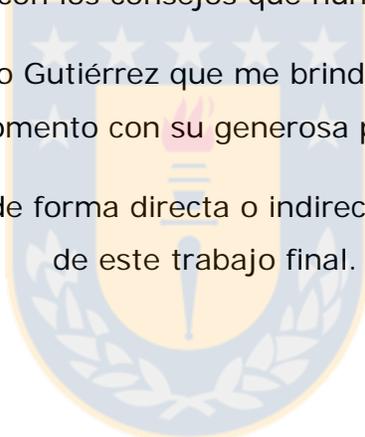


AGRADECIMIENTOS

A mi familia por ser el apoyo constante y estímulo de superación en cada paso realizado, junto con los consejos que nunca estaban de más.

A mi profesor tutor, Leopoldo Gutiérrez que me brindó valiosos consejos y me animo en todo momento con su generosa perseverancia.

Y de todas las personas que de forma directa o indirecta me apoyaron en la realización de este trabajo final.



RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso del óxido de polietileno (OPE) en la flotabilidad de la molibdenita fina utilizando agua convencional. Esta flotabilidad se realizó usando mineral de concentrado colectivo Cu – Mo para obtener resultados de distintos tipos de acondicionamiento de la pulpa y dosificaciones de OPE. El estudio se llevó a cabo realizando pruebas de flotación rougher (celda mecánica), flotación cleaner (celda columnar) y mediciones de turbidez.

Los resultados indicaron que en la flotabilidad colectiva del concentrado en que aplica OPE en la emulsión, se obtiene un 81 % de recuperación de molibdeno en comparación a la ausencia de este floculante donde sólo alcanza un 52 % de recuperación. La mayor alza en su recuperación se debe principalmente a la recuperación de finos en que el OPE actúa floculando selectivamente.

Resultados similares y positivos se obtuvieron para la recuperación de cobre alcanzando el 85 % de su recuperación al aplicar el floculante en la emulsión, en comparación a la ausencia de OPE donde solo alcanza un 63 % de recuperación de cobre. Este aumento de recuperación se debe principalmente a la acción del OPE a partículas de minerales de cobre que presentan hidrofobicidad inducida previamente de la etapa rougher. Se destaca que la óptima dosificación para la flotación de molibdeno y cobre, coinciden con una tendencia similar a la dosis de 25 ppm de OPE.

Finalmente, estudios realizados con equipos de tensiómetro, revelaron que es posible aumentar el área específica activa del colector al aplicar la emulsión de MIBC y diésel con presencia de OPE a dosificación óptima con pH 11.5 (Álvarez et al., 2018).

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the use of polyethylene oxide (OPE) in the floatability of fine molybdenite using conventional water. This floatability was carried out using Cu - Mo collective concentrate mineral to obtain results of different types of pulp conditioning and OPE dosages. The study was carried out by carrying out tests of rougher flotation (mechanical cell), cleaner flotation (columnar cell) and turbidity measurements.

The results indicated that in the collective floatability of the concentrate in which OPE is applied in the emulsion, an 81% recovery of molybdenum is obtained in comparison to the absence of this flocculant, where it only reaches a 52% recovery. The greatest increase in its recovery is mainly due to the recovery of fines in which the OPE acts selectively flocculating.

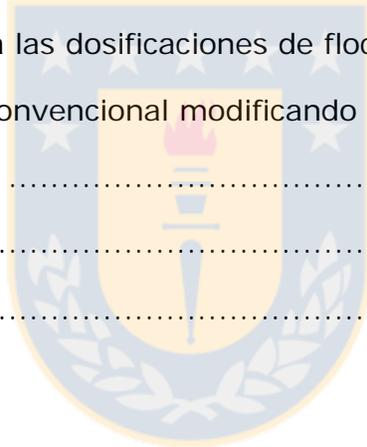
Similar and positive results were obtained for the recovery of copper reaching 85% of its recovery when applying the flocculant in the emulsion, in comparison to the absence of OPE where it only reaches a 63% recovery of copper. This increase in recovery is mainly due to the action of the OPE on copper mineral particles that present hydrophobicity previously induced by the rougher stage. It is noted that the optimal dosage for the flotation of molybdenum and copper, coincide with a trend similar to the 25 ppm dose of OPE.

Finally, studies carried out with tensiometer equipment, revealed that it is possible to increase the active specific area of the collector when applying the emulsion of MIBC and diesel with the presence of OPE at optimum dosage with pH 11.5 (Álvarez et al., 2018).

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivo general	2
1.2	Objetivos específicos	2
2.	ANTECEDENTES.....	3
2.1	Principios de flotación	3
2.2	Reactivos de flotación	4
2.2.1	Colectores	4
2.2.2	Espumantes.....	5
2.2.3	Modificadores de pH.....	5
2.3	Otros factores influyentes en flotación	5
2.3.1	Densidad de pulpa.....	5
2.3.2	Granulometría	6
2.3.3	Agua	6
2.4	Molibdenita.....	7
2.4.1	Mecanismo y flotación de la molibdenita.....	8
2.5	Floculantes.....	11
2.5.1	Óxido de polietileno (OPE)	11
2.6	Importancia de la microemulsificación de colector en presencia de molibdenita	14
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	16
3.1	Muestras y reactivos.....	16
3.2	Muestra de mineral utilizadas en los test de ciclo abierto.....	16
3.2.1	Cinética de molienda.....	17
3.2.2	Cinética de flotación rougher.....	17

3.2.3	Cinética de remolienda	20
3.2.4	Cinética flotación cleaner	21
3.3	Test ciclo abierto.....	23
3.4	Mediciones de turbidez.....	26
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	27
4.1	Pruebas de cinética etapa de molienda	27
4.2	Pruebas de cinética etapa de flotación rougher	28
4.3	Pruebas de cinética etapa de remolienda.....	29
4.4	Pruebas de etapa flotación cleaner	30
4.4.1	Flotación en agua convencional 0.01 [M] NaCl.....	30
4.4.2	Flotación respecto a las dosificaciones de floculante.....	32
4.4.3	Flotación en agua convencional modificando la emulsión	34
4.5	Mediciones de turbidez	37
5.	CONCLUSIONES.....	39
6.	RECOMENDACIONES	40



ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 . Representación proceso de flotación (Gutiérrez, 2017).	3
Figura 2. Adhesión de colector sobre partícula de mineral (Gutiérrez, 2017).	4
Figura 3. a) Estructura cristalina de molibdenita, con caras hidrofóbicas y bordes hidrofílicos. b) Distribución de átomos por capa, tipo Hexagonal de molibdenita (López-Valdivieso et al, 2006).	8
Figura 4. Ángulo de contacto de caras y bordes de cristales de molibdenita en función del pH (Tabares et al., 2006).	9
Figura 5. Flotabilidad de molibdenita de distintos tamaños en función del pH (López-Valdivieso & Song, 2006).	10
Figura 6. Recuperación fina de carbón en función de dosis de OPE y SHMP (Liang et al, 2015).	12
Figura 7. Efecto de la concentración de OPE en la tensión superficial de sus soluciones acuosas (Álvarez et al., 2018).	13
Figura 8. Efecto de la concentración de OPE en la solución acuosa con respecto a la tensión interfacial aceite/agua (Álvarez et al., 2018).	13
Figura 9. Efecto de la cantidad de colector en la recuperación del mineral (Xiaofang et al, 2017).	15
Figura 10. Roleo y cuarteo manual del mineral concentrado Cu - Mo y cortador rotatorio (deltalab) para obtener muestras homogéneas.	16
Figura 11. Celda de flotación mecánica automatizada EDEMET.	18
Figura 12. Celda de flotación neumática Partridge - Smith 229 mL. (a) Fluviómetro, (b) Columna estabilizadora, (c) Entrada flujo de nitrógeno.	21
Figura 13. Celda de flotación mecánica EDEMET.	23
Figura 14. Celda de flotación neumática Partridge-Smith. Celda de 229 mL utilizada en etapa de limpieza (cleaner).	24
Figura 15. Diagrama de flujo de pruebas de flotación colectiva Cu-Mo. Ciclo abierto de concentración, considerando etapas de molienda, flotación rougher, remolienda y flotación cleaner (Elaboración propia).	25
Figura 16. Turbidímetro HACH 2100 N.	26
Figura 17. Cinética de distribución de partículas para etapa de molienda, agua convencional.	27

Figura 18. Cinética de flotación rougher, agua convencional.	28
Figura 19. Cinética distribución de partículas para etapa de remolienda, agua convencional.....	29
Figura 20. Recuperación de molibdeno en función del tiempo, en presencia y ausencia de floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5...	30
Figura 21. Recuperación de cobre en función del tiempo, en presencia y ausencia de floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.	31
Figura 22. Recuperación de Molibdeno en función de la dosificación de OPE, Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.	32
Figura 23. Recuperación de cobre en función de la dosificación de OPE, Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.	33
Figura 24. Recuperación de molibdeno en función de la dosificación de OPE, en ausencia y presencia de emulsión con floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.	34
Figura 25. Recuperación de cobre en función de la dosificación de OPE, en ausencia y presencia de emulsión con floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.	35
Figura 26. Suspensión de mineral $M < 45 \mu\text{m}$, (a) 0 ppm OPE, (b) 10 ppm OPE, (c) 30 ppm OPE y (d) 50 ppm OPE. Agua convencional, 1 h sedimentación.	37

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Principales características de la molibdenita	7
Tabla 2. Ángulo de contacto medido a partir de muestras de molibdenita (Xiaofang et al, 2017)	14
Tabla 3. Composiciones principales del mineral M.....	16
Tabla 4. Variables utilizadas en la celda EDEMET, etapa rougher de flotación mecánica. Agua convencional.....	19
Tabla 5. Condiciones de flotación etapa cleaner.....	24
Tabla 6. Condiciones utilizadas en la prueba de turbidez	26
Tabla 7. Turbidez aplicada con y sin floculante OPE. Turbidímetro HACH 2100 N. Agua convencional, mineral < 45 µm y 1 h sedimentación.....	38



NOMENCLATURA

Cm³: Centímetros cúbicos

h: Horas

kg: Kilogramos

L: Litros

M: Molaridad

MIBC: Metil isobutil carbinol

mL: Mililitros

NTU: Unidad nefelométrica de turbidez

OPE: Óxido de polietileno

pH: Potencial de hidrógeno

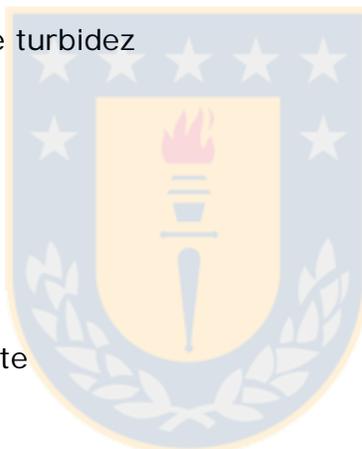
ppm: Partes por millón

P80: Tamaño del 80 % pasante

μm: Micrón

XIPS: Xantato isopropílico de sodio

% w: Fracción másica de sólidos en pulpa



1. INTRODUCCIÓN

La minería ha marcado una evidente importancia durante la historia chilena, entregando aportes imprescindibles al país y con visión a futuro, esta industria de largo plazo se considera innegable y de carácter vital. En la actualidad, la actividad minera se confronta a desafíos de procesamiento de menas de baja ley a medida que se explotan los yacimientos, por lo que se requiere un mayor consumo de agua y tratamiento de material fino.

El molibdeno es considerado un subproducto importante económicamente para el país, este metal presenta características físicas y químicas que lo hacen atractivos para la fabricación de aleaciones ferrosas más resistentes a altas temperaturas y corrosión. La molibdenita (MoS_2) es la principal fuente de extracción comercial del molibdeno, y es encontrada y extraída mediante el proceso de flotación de minerales como subproducto de la concentración de sulfuros de cobre.

La relevancia de recuperar molibdenita fina y de cómo su recuperación se realiza a pH alcalino, es una causa importante para considerar. El enfoque que se debe buscar son alternativas eficientes y fuentes de abastecimiento, de manera que se obtengan las mejores recuperaciones de mineral y mejor aún con el óptimo consumo de recursos. Para ello es importante utilizar las dosificaciones óptimas en procesos productivos de concentración y la utilización de agua de mar tanto de forma desalinizada como de forma directa, debido a su bajo costo de operación y por ser un recurso relativamente inagotable.

Respecto a las partículas finas, nace la propuesta de flocular de manera selectiva estos minerales, Rubio (1976) propuso el proceso de floculación selectiva mediante la adición de óxido de polietileno (OPE), el cual actúa floculando partículas sólidas hidrofóbicas naturales o inducidas y sin flocular partículas hidrofílicas. Como hipótesis se estableció que es posible realizar una floculación selectiva al concentrado Cu - Mo mediante el uso de OPE con el objetivo de producir un mejoramiento importante en la recuperación del concentrado de bajo tamaño que presenta comportamientos coloidales.

1.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es evaluar el uso de óxido de polietileno (OPE) para la optimización de la flotación de molibdenita fina utilizando mineral real para distintos parámetros de acondicionamiento.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la flotabilidad de la molibdenita en presencia de OPE en agua convencional con distintas dosis de floculante y a través de pruebas de ciclo abierto utilizando mineral real.
- Evaluar alternativas de acondicionamiento para optimizar la recuperación de molibdenita.
- Evaluar la recuperación global de molibdeno y cobre causado por la acción del OPE en agua convencional.



2. ANTECEDENTES

2.1 Principios de flotación

La flotación es un proceso industrial ampliamente utilizado en la separación selectiva o concentración físico-química de minerales valiosos con respecto a otros minerales de menor interés y se lleva a cabo en un medio formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La selectividad se realiza por medio de la adhesión partícula-burbuja, las que son colectadas como un concentrado rico en el mineral de interés y las partículas no valiosas, que no se adhieren a las burbujas son rechazadas y constituyen la cola o relave de flotación (Figura 1). La adhesión partícula valiosa y burbuja se debe a la hidrofobicidad (natural o inducida) del mineral de interés y además es la fuerza motora de la flotación en sí misma.

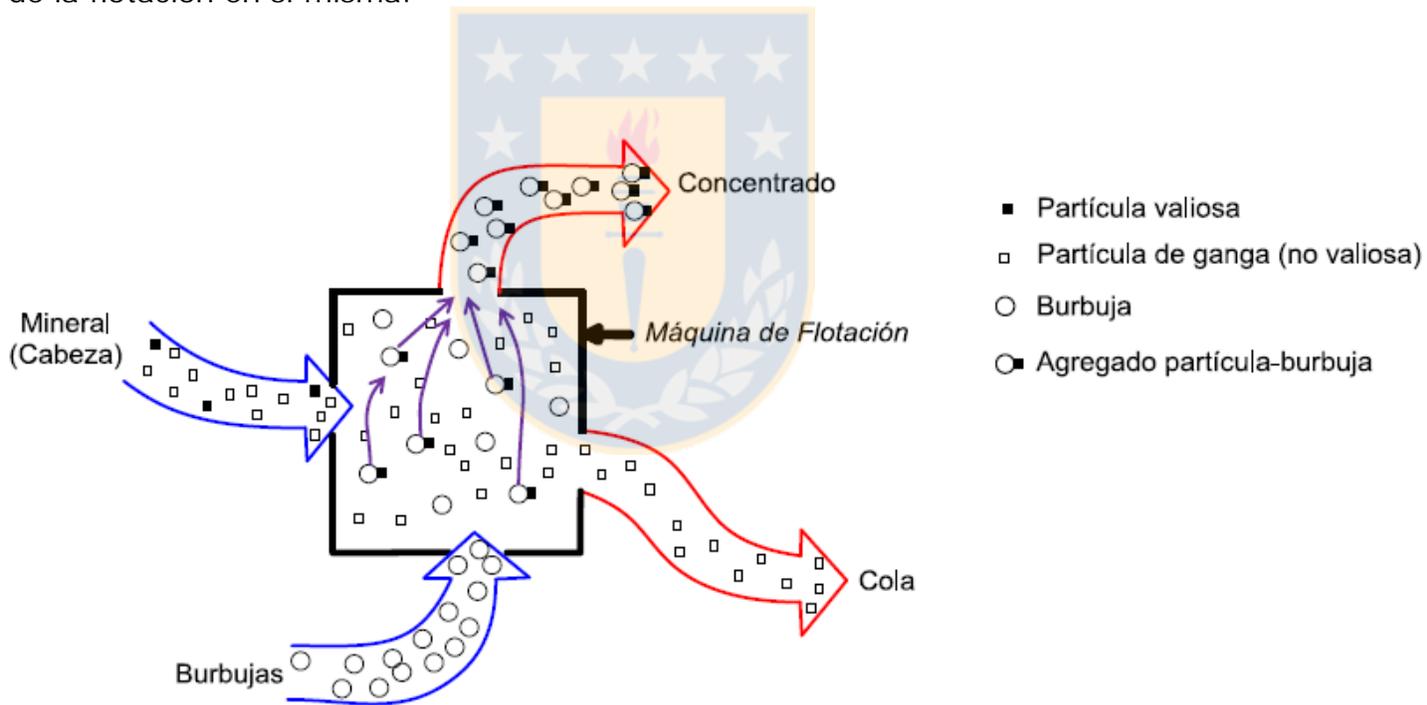


Figura 1 . Representación proceso de flotación (Gutiérrez, 2017).

2.2 Reactivos de flotación

Los reactivos de flotación son sustancias químicas que promueven, modifican e intensifican las condiciones óptimas de este mecanismo físico-químico de la flotación y con lo cual llevan a cabo su mejor funcionamiento de este proceso. Los reactivos más utilizados en la flotación son el colector, que permite inducir hidrofobicidad en partículas minerales, el espumante que disminuye el tamaño de burbuja y aumenta el área de contacto entre burbuja-partícula y, el modificador, que crea las condiciones óptimas para la interacción de los reactivos de flotación con las superficies de los minerales.

2.2.1 Colectores

Los colectores son sustancias orgánicas cuya función es inducir hidrofobicidad a las partículas valiosas. Su estructura está integrada por un extremo polar y otro apolar, el extremo polar se adsorbe en la superficie de la partícula valiosa, cubriendo sitios activos que interactuaban con el agua y el extremo apolar queda orientado hacia afuera de la partícula generando un recubrimiento hidrofóbico, dándole el carácter hidrofóbico al mineral (Figura 2). Además, Cuanto más larga sea la cadena de hidrocarburo, mayor será la potencia del colector (Fuerstenau & Miller, 1967).

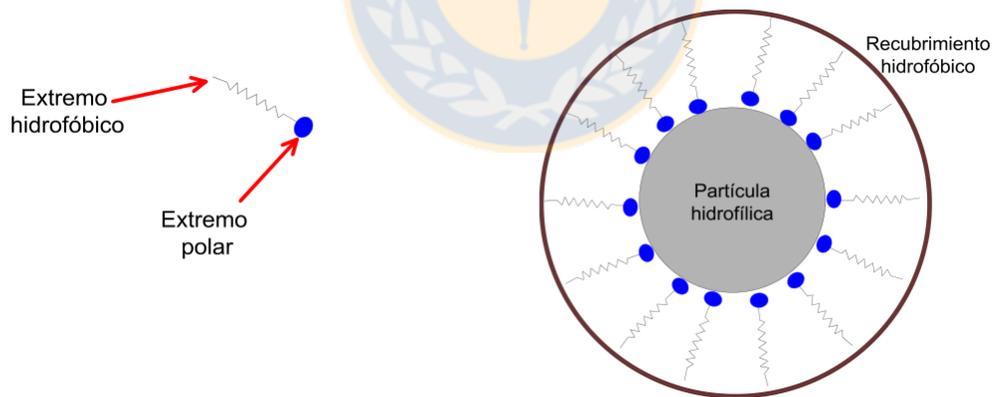


Figura 2. Adhesión de colector sobre partícula de mineral (Gutiérrez, 2017).

2.2.2 Espumantes

Los espumantes son agentes tensoactivos que tienen la función de mejorar la estabilidad de la espuma, lo que hace que puedan ser removidas antes que las burbujas coalezcan, reducen el tamaño de burbuja y con ello generan un aumento del área superficial. Por consecuencia a estas causas, se produce un menor tiempo de inducción (adhesión partícula-burbuja). Estos reactivos se pueden caracterizar utilizando técnicas como las mediciones de tensión superficial y concentración crítica micelar, índice de espumabilidad dinámica (DFI), mediciones de distribución de tamaño de burbujas, concentración crítica de coalescencia (CCC) y mediciones de tiempo de inducción.

2.2.3 Modificadores de pH

El proceso de flotación es muy sensible al pH, pues dependiendo de su valor se promoverá o suprimirá la ionización de los reactivos, por lo que los modificadores promueven el control de la selectividad de los reactivos y más importante aún la depresión de minerales. Su regulación a escala industrial en la flotación se realiza utilizando cal cuando se trabaja a pH básico y con H_2SO_4 cuando es a pH ácido.

2.3 Otros factores influyentes en flotación

2.3.1 Densidad de pulpa

Este parámetro viene determinado desde la etapa de molienda luego de pasar por una etapa de clasificación y es un factor que influye en los resultados de flotación cuando se llega a valores extremos. Una pulpa demasiado densa, sobre los 40 % sólidos, reduce significativamente la velocidad de flotación y causa un efecto negativo en la recuperación del mineral valioso. En cambio, una pulpa demasiado diluida, menor a 10 % sólidos, lleva a una excesiva dilución de los reactivos y presencias de especies indeseadas en el agua de flotación.

2.3.2 Granulometría

La granulometría es la graduación de la distribución de tamaño adquirida por el mineral luego de ser sometido a los procesos de conminución previos a la flotación. Considerando lo anterior, existirá una disminución de la recuperación en la flotación si la granulometría presente por el mineral es muy fina, pues las partículas no adquieren la energía cinética suficiente para formar un agregado partícula-burbuja estable. Considerando que para minerales laminares como la molibdenita se disminuye la relación cara/borde con la disminución del tamaño, formando partículas más hidrofílicas a causa de ello. A modo contrario, para partículas muy gruesas no dejan ser arrastradas por las burbujas y por lo tanto no son colectadas o concentradas.

La liberación es un concepto clave, que se expresa como la cantidad de mineral de interés que puede quedar libre de material estéril cuando se realiza una determinada reducción de tamaño, por lo que, con una mayor liberación de mineral y la reducción del tamaño necesaria, la flotación será más selectiva y estará contribuyendo con una mayor recuperación.

2.3.3 Agua

El agua es el medio por el cual se desenvuelve el proceso de la flotación, puede ser suministrada por dos vías; las cuales son agua fresca (ríos, potable y otras) o de recirculación, que son muy utilizadas a escala industrial tanto en espesadores, filtros o relaves. Ahora bien, de acuerdo a qué tipo de fuente pertenece se debe tener ciertas precauciones como en el caso de la recirculación, que pueden tener reactivos químicos residuales que dificultan la flotación. Para el caso de agua de mar la presencia de iones disueltos que afectan negativamente los procesos fisicoquímicos de la flotación, pueden ser tratados y abatidos de acuerdo a su finalidad propuesta utilizando un control adecuado.

2.4 Molibdenita

La molibdenita (MoS_2) es el predominante rentable en mineral de molibdeno, pertenece al grupo de los minerales sulfurados, es un mineral de estructura laminar, compuesta por una capa de átomo de molibdeno entre dos capas de azufre (59.94 % de Mo y 40.06 % de S), posee dureza 1.5 en la escala de Mohs y densidad 4.73 g/cm^3 . Tiene una apariencia similar al grafito y físicamente es un mineral de tacto graso (untuoso), exfoliación perfecta en láminas y color gris azulado.

Este mineral tiene la cualidad de ser muy hidrofóbico en forma natural, se puede flotar eficazmente sólo con espumantes y que a la adición de hidrocarburos de petróleo como colectores no polares aumentan considerablemente su flotabilidad, y mejor aún aplicados en emulsión (emulsiones + tensoactivos), donde el área superficial por unidad de volumen de colector aumenta. Un resumen de las propiedades más importantes de la molibdenita se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características de la molibdenita

Propiedad	Descripción
Fórmula	MoS_2
Dureza	1-1.5 Mohs
Densidad	4.73 g/cm^3
Peso molecular	160 g/mol
Estructura cristalina	Hexagonal
Color	Gris azulado
Raya	Gris azulada
Hábito	Placas hexagonales
Brillo	Metálico
Propiedades ópticas	Opaco
Tacto	Graso y escamoso

2.4.1 Mecanismo y flotación de la molibdenita

Como se ha mencionado, las industrias de plantas concentradoras buscan generar un concentrado de molibdeno de muy alta pureza y recuperación, por lo que el reto ante todo es remover efectivamente toda la ganga y la piritita dispuesta, debido a que la concentración de molibdeno son muy bajas.

Aspectos importantes a considerar de acuerdo a la flotabilidad natural de la molibdenita son el tamaño y su estructura cristalina, estos factores cambian su nivel de recuperación en el proceso de flotación. De acuerdo a lo anterior, se pueden presentar bajas de recuperación debido a la falta de liberación, molibdenita muy fina presente o depresión de la molibdenita a causa del exceso de cal. Siendo la problemática principal la presencia de partículas finas, debido a su disposición estructural junto con su razón área cara/área borde presente en la fractura de la molibdenita, se le atribuye un comportamiento más hidrofílico a la reducción de estas partículas.

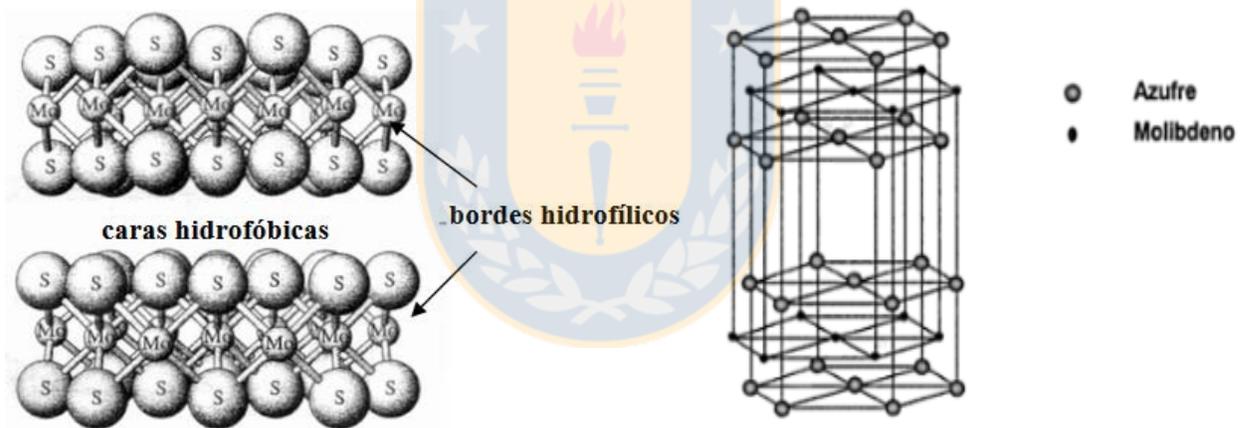


Figura 3. a) Estructura cristalina de molibdenita, con caras hidrofóbicas y bordes hidrofílicos. b) Distribución de átomos por capa, tipo Hexagonal de molibdenita (López-Valdivieso et al, 2006).

Otras consideraciones son el ángulo de contacto y de inmersión, que han determinado que la cara de la molibdenita presenta una totalidad hidrofóbica al rompimiento de los enlaces de Van der Waals entre átomos de azufre en su estructura y se ha estudiado el ángulo de contacto que presentan tanto las caras como bordes de partículas de molibdenita en función del pH mostrado en la Figura 4. Se observa que los bordes de molibdenita de comportamiento hidrofílico presentan ángulo de contacto de 0° y que para las superficies de las caras presentan un alto grado de ángulo de contacto en un amplio rango de pH. Por lo que se puede distinguir que a un leve aumento de pH, se siguen manteniendo las mismas características anisotrópicas de la superficie de este mineral.

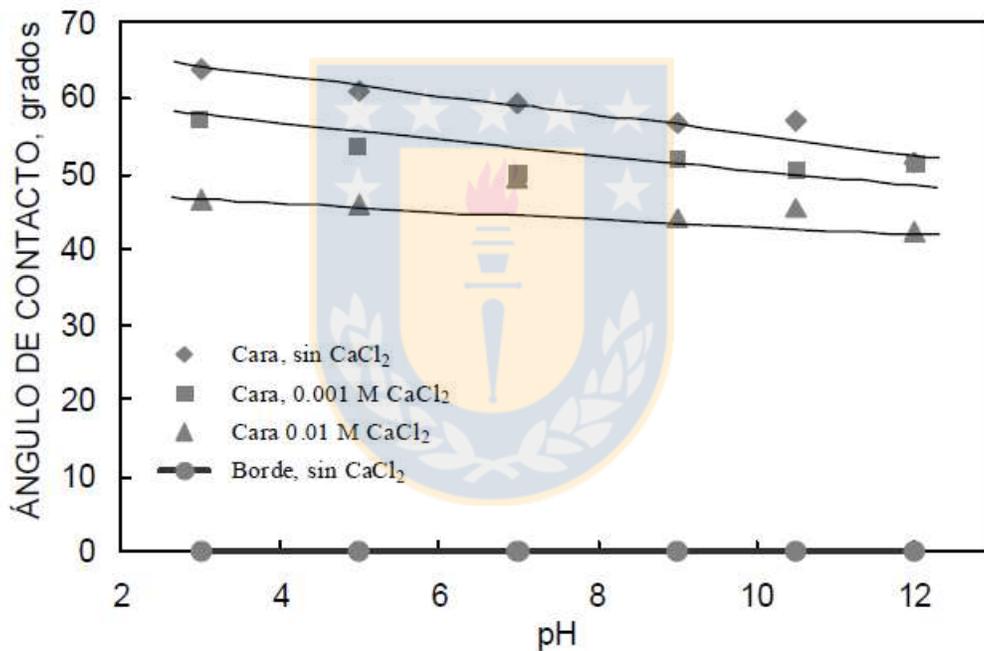


Figura 4. Ángulo de contacto de caras y bordes de cristales de molibdenita en función del pH (Tabares et al., 2006).

Ahora bien, si consideramos el tamaño de las partículas, con respecto a la flotabilidad natural, las concentradoras de sulfuros metálicos han sido diseñadas para la recuperación de partículas de mediano tamaño y con alta cinéticas de flotación. Al respecto de lo anterior, las condiciones de molienda, clasificación, acondicionamiento y parámetros operacionales siempre han afectado al subproducto de mineral que es el molibdeno, ya que todos estos parámetros anteriormente nombrados son adecuados a la maximización de la recuperación y por ende liberación del mineral de cobre, debido a

esto se estudió la forma de cómo afecta esta reducción de tamaño, que puede ser crítica (obteniendo bajos tamaños) en la recuperación a distinto pH.

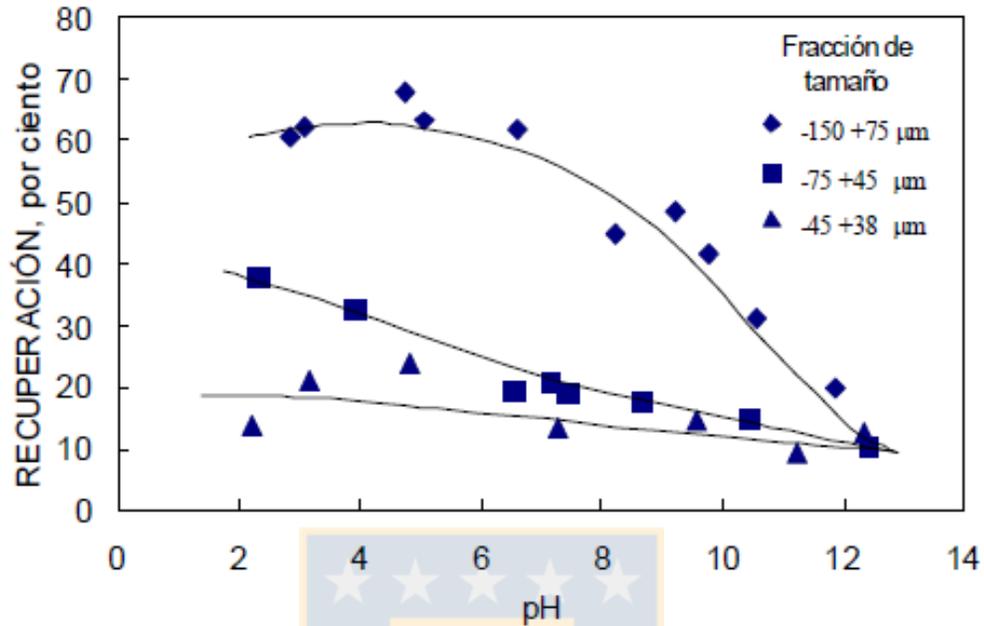


Figura 5. Flotabilidad de molibdenita de distintos tamaños en función del pH (López-Valdivieso & Song, 2006).

La Figura 5 muestra la flotabilidad de partículas de MoS_2 en distintos tamaños. Se puede apreciar que, a mayor tamaño de partícula la flotabilidad es más alta. Además, se observa que con el aumento del pH la flotabilidad de MoS_2 disminuye, efecto relacionado con el potencial eléctrico que se tiene en la interface borde/solución acuosa.

2.5 Floculantes

Los floculantes son polímeros ampliamente utilizados en el proceso de concentración de minerales, específicamente en áreas de espesamiento de concentrados (procesos físicoquímico de separación de minerales sulfurados de cobre y otros elementos como el molibdeno del resto de mineral), en filtración y espesamientos de relaves que permiten una recuperación de una gran parte de agua utilizada en las operaciones anteriores molienda-flotación.

Una de las aplicaciones relevantes implementados hoy en día por estos polímeros son la floculación selectiva, esta técnica aprovecha la diferencia de propiedades físico-química de diversos componentes minerales a flocular para solo dejar un remanente de partículas en suspensión, como es por ejemplo en la floculación del carbón en presencia de caolín. Esta floculación selectiva funciona de la siguiente forma:

- Existe una dispersión de partículas minerales de forma estable y uniforme en la suspensión.
- Se comienza la adsorción selectiva de partículas y la formación de flóculos.
- Finalmente se rige el condicionamiento de los flóculos, para la posterior separación de las partículas floculadas con las dispersas.

2.5.1 Óxido de polietileno (OPE)

En la floculación selectiva, el OPE es uno de los poliéter más implementados este último tiempo, debido a que se ha demostrado que puede flocular mineral valioso hidrofóbico, registrándose mejoras como en la flotación de finas partículas de carbón mediante esta floculación selectiva (Liang et al, 2015).

El OPE flocula parcialmente partículas hidrofóbicas encontrándose la calcopirita, covelina, el grafito, talco y últimamente también probadas en el molibdeno (Rubio & Kitchener 1976). Hay que considerar que la adsorción de OPE se desfavorece en sitios hidratados y también si la superficie del sitio activo se encuentra ionizada.

Como se menciona anteriormente, se ha registrado una mejora en la flotación de finos de carbón mediante floculación selectiva, aumentando la flotabilidad de finos de partículas y dispersando caolinita con SHMP (hexametáfosfato de sodio) como se muestra en la figura 6.

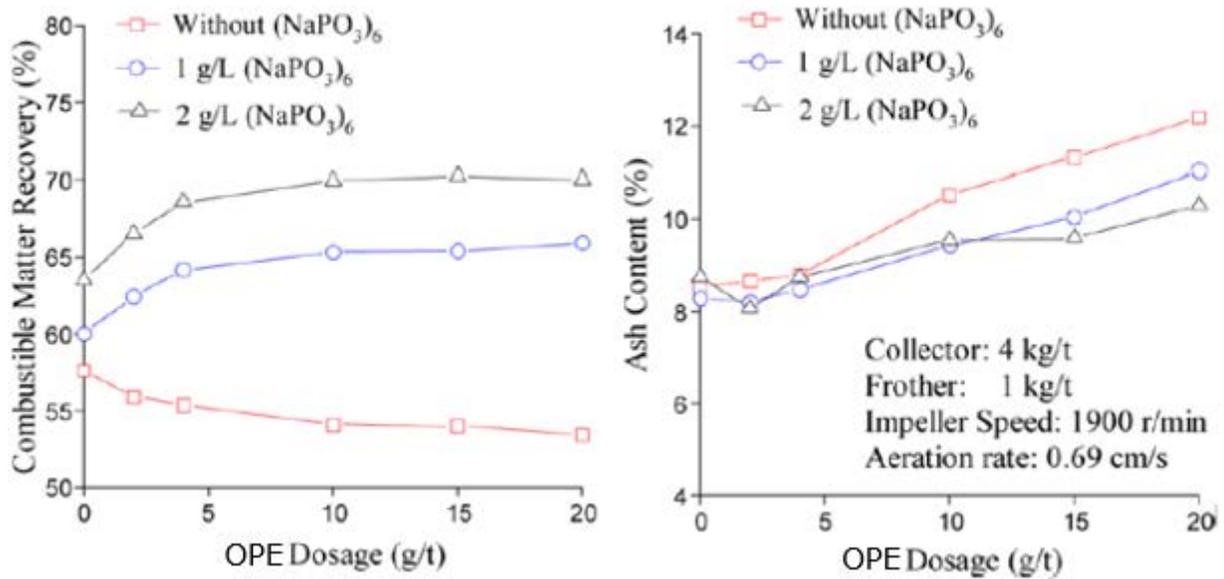


Figura 6. Recuperación fina de carbón en función de dosis de OPE y SHMP (Liang et al, 2015).

En la industria del cobre y molibdeno, el uso de floculantes poliméricos puede afectar la recuperación de molibdeno en OPE los circuitos OPE de flotación, debido al uso de recirculación de agua donde las moléculas de polímeros residuales se pueden acumular. La posible presencia de estos floculantes o derivados degradados en agua recirculada, plantea una causante que puede ser considerada en la flotación de minerales Cu - Mo y afectar a la molibdenita directamente.

Song et al. (2012) informó la importancia de trabajar con una buena emulsificación de colector de aceite para la flotación fina de molibdenita. El autor indica que, para obtener buenos resultados de flotación, es necesario disponer de un buen acondicionamiento de los reactivos a utilizar en el proceso, debido a que ellos son los que marcan la diferencia a la hora de concentrar. Además, demostró que sus resultados de flotación dependían críticamente del tamaño de las gotas de aceite, mientras más pequeñas eran estas gotas, mejores eran los resultados de la flotación de molibdenita.

Es cierto que la adición de OPE en presencia de partículas finas de molibdenita, existe una clara agregación de finos. Sin embargo, este efecto cuando se tiene OPE en presencia de aceite, el sistema de agregación de finos es mucho más pronunciado. La Figura 7 muestra la tensión superficial de las soluciones acuosas de OPE, mientras que

la Figura 8 ilustra el efecto de la concentración de OPE en la solución acuosa de diésel/agua.

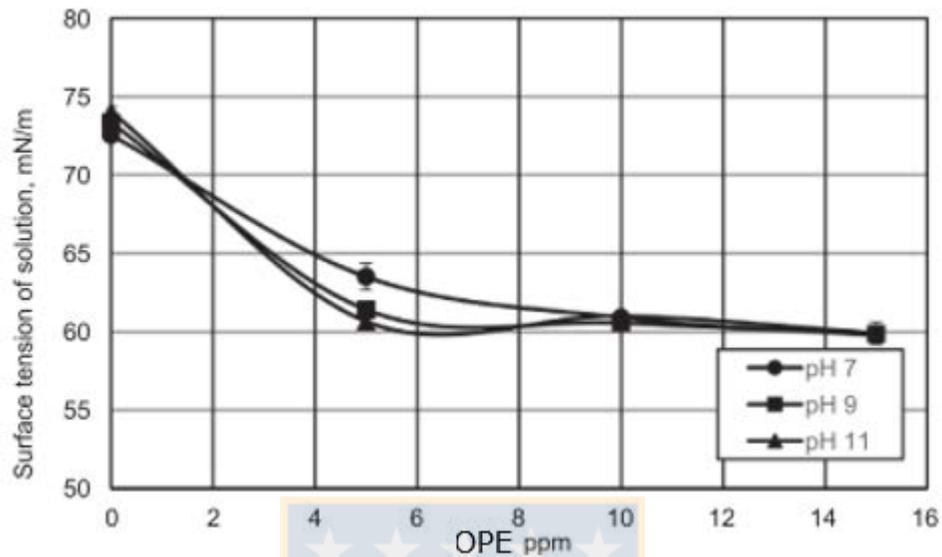


Figura 7. Efecto de la concentración de OPE en la tensión superficial de sus soluciones acuosas (Álvarez et al., 2018).

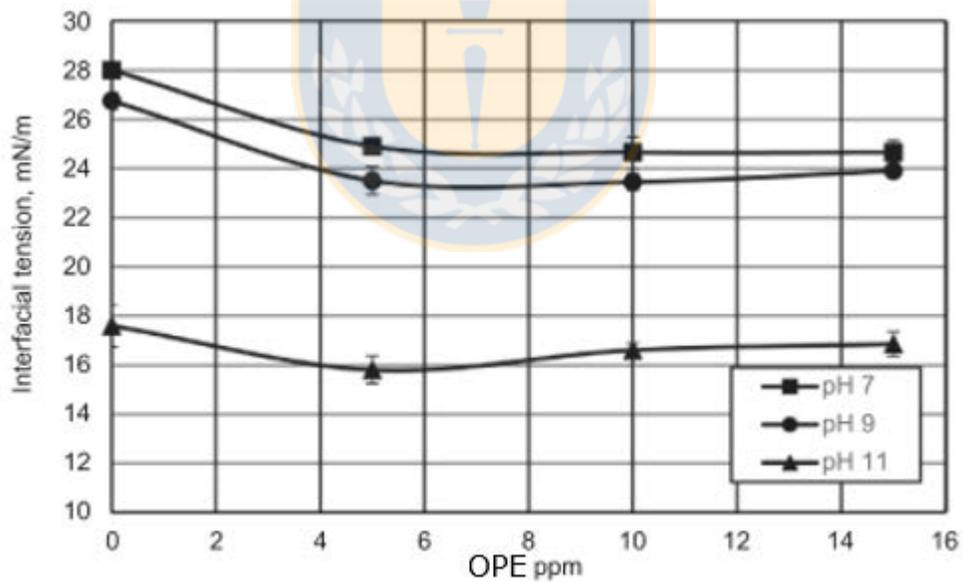


Figura 8. Efecto de la concentración de OPE en la solución acuosa con respecto a la tensión interfacial aceite/agua (Álvarez et al., 2018).

Como indican los resultados de la Figura 8, la dosificación de OPE disminuye la tensión interfacial aceite/agua notoriamente, por lo cual se tiende a formarse gotas de diésel

más pequeñas en continuidad acuosa. Entregando como hipótesis que el OPE cumple un rol importante para obtener un buen emulsionante de diésel.

2.6 Importancia de la microemulsificación de colector en presencia de molibdenita

Se ha estudiado que el colector de aceite emulsificado en la etapa de acondicionamiento, entrega una buena eficiencia en la flotación de molibdenita, se plantea también que la presencia de una microemulsión del colector entregaría mejores resultados. Debido a que las mediciones del ángulo de contacto del colector microemulsificado demostraron ser más efectivas para aumentar la hidrofobicidad de la superficie de la molibdenita.

La medición de ángulo de contacto en presencia y ausencia de colector (diésel o microemulsión) se muestran en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Ángulo de contacto medido a partir de muestras de molibdenita (Xiaofang et al, 2017)

Tipo de colector	Agua	Diésel	Microemulsión
Ángulo de contacto [°]	74.2	79.6	84.7

Se puede observar que la presencia de diésel o la microemulsión provoca un aumento en los ángulos de contacto con respecto a la medida en agua pura. Esto sugiere que la adsorción de ambos colectores incrementa la hidrofobicidad de la superficie de la molibdenita. Además, se observa que el ángulo de contacto de la microemulsión es más alta que la de diésel y resulta consistente con todos los estudios anteriormente mostrados.

La Figura 9 muestra dos curvas de recuperación de mineral con microemulsión y diésel, en que ambas muestran un aumento en su recuperación al incremento de la dosificación de colector hasta por sobre los 200 mg/L y sorpresivamente la recuperación disminuye ligeramente por un aumento adicional del colector, posiblemente esta cantidad adicional de colector cause burbujas más inestables (Xiaofang et al, 2017).

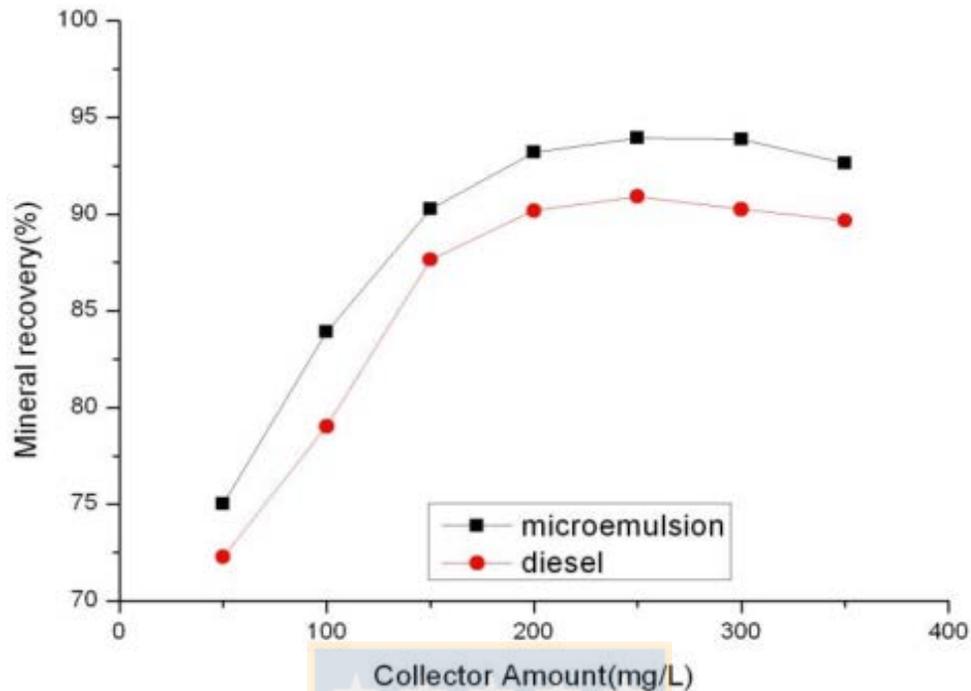


Figura 9. Efecto de la cantidad de colector en la recuperación del mineral (Xiaofang et al, 2017).

Se comparó el rendimiento del colector microemulsionado y el diésel convencional, donde se muestra que el primero fue más efectivo para aumentar la hidrofobicidad y se establece que estas microemulsiones están compuestas de agua, aceite, surfactante y una cadena corta de un alcohol que actúa como co-surfactante. El tamaño promedio de las gotas de microemulsión son de 5 a 100 nm en comparación a cientos de micrones para una emulsión convencional (Huibers, 1996). Estos estudios aplicados a la emulsión de colector se trabajan con la finalidad de optimizar la flotación de mineral de molibdenita, haciéndolas cinética y termodinámicamente más estables.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Muestras y reactivos

La muestra de mineral Cu - Mo usada en este estudio se encontraba chancada a -10 # y con altos contenidos de molibdeno a tratar. Primeramente, el mineral fue roleado y cuarteado manualmente para luego ser cortado nuevamente por un cortador rotatorio de mineral (deltalab) para así garantizar la homogeneidad de la muestra.



Figura 10. Roleo y cuarteo manual del mineral concentrado Cu - Mo y cortador rotatorio (deltalab) para obtener muestras homogéneas.

3.2 Muestra de mineral utilizadas en los test de ciclo abierto

En los tests de ciclo abierto se utilizaron dos muestras de 2 kg de mineral que tenían un contenido como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Composiciones principales del mineral M

Mineral	%Cu	%Fe	%Mo
Muestra M	0.66	4.67	0.041

Para estos tests de ciclo abierto, se utilizaron estudios iniciales de cinética de molienda, cinética rougher, cinética de re-molienda y cinética de flotación cleaner. Estos estudios fueron la base para establecer los tiempos de operación de cada etapa del circuito de flotación y se describen en los siguientes puntos.

3.2.1 Cinética de molienda

Para el estudio de cinética de molienda, que será la alimentación de la etapa de flotación rougher, se ajustó la granulometría a un P80 de 150 μm con las siguientes consideraciones:

1. Agregar 1 kg de mineral bajo 10# en el molino de bolas tipo Marcy y 493 mL de agua convencional para obtener una pulpa de 67 % en masa de sólido.
2. Se comienza la molienda para distintas pruebas a tiempos respectivos de 5, 8, 12 y 16 min.
3. Extraer la pulpa del molino tipo Marcy y tamizar en húmedo en un tamiz de 150 μm , se tiene que conservar el mineral de sobre tamaño y bajo tamaño por separado.
4. Secar la muestra en el horno hasta que se retire toda la humedad.
5. Después de seco el mineral, medir la masa en una balanza electrónica dos veces.
6. Calcular el porcentaje retenido por la malla 100# para cada uno de los tiempos considerados.
7. Graficar el porcentaje retenido con respecto a los tiempos de cada muestra aplicados y ajustar una curva con dichos datos, con ello calcular el tiempo de molienda que considera el P80 igual a los 150 μm .

3.2.2 Cinética de flotación rougher

Esta etapa de concentración de mineral se alimenta de la etapa anterior de molienda y su descripción de operación es la siguiente:

1. El mineral ya tratado en la molienda en forma de pulpa, se debe vaciar en una celda de 5,7 L de capacidad y agregar agua convencional para obtener un 30 % en masa de sólido. Hay que considerar que se utiliza una celda de flotación EDEMET con una

alimentación de 2 kg de mineral, por lo tanto, se realizaran dos moliendas por cada etapa rougher de flotación.

2. Tener a disposición los reactivos colectores y espumantes a utilizar con la secuencia siguiente; xantato - MIBC - tionocarbamato - diésel en dosis de 30 g/t para cada reactivo y disponerlas en un vidrio de reloj por gotas justo antes de acondicionar la pulpa.

3. Utilizar la máquina de flotación EDEMET, celda mecánica de aireación forzada mostrada en la Figura 11, que cuenta con un variador de frecuencia que permite controlar de forma constante la velocidad de rotación del impulsor, minimizando variaciones en la tensión de la red. Además, dispone de un suministro interno e independiente de aire, que asegura una presión constante y evita impurezas que puedan llegar de la red de aire.



Figura 11. Celda de flotación mecánica automatizada EDEMET.

Otra ventaja presente en esta celda EDEMET, es la pantalla de 4 líneas retroiluminada, que permite leer claramente las variables y ajustar fácilmente cualquier parámetro.

Teniendo en consideración todas las capacidades que presenta y con una previa inducción de su manejo operativo, se realiza posteriormente la configuración de las variables a utilizar, descritas en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables utilizadas en la celda EDEMET, etapa rougher de flotación mecánica. Agua convencional

Variable	Cantidad
Acondicionamiento	4 min
Flotación	12 min
Velocidad impulsor acondicionamiento	700 rpm
Velocidad impulsor flotación	950 rpm
Inyección de aire	12 L/min
Intervalo de paleteo	10 seg

4. Una vez la celda de flotación ya dispuesta y la maquina EDEMET ya configurada, se da inicio a la fase de acondicionamiento en que se ajusta el pH de la pulpa 8.5 con lechada de cal.

5. Comenzada la fase de tiempo de flotación y agregados los reactivos en la etapa de acondicionamiento, se da paso al flujo de aire 12 L/min y posterior colección de la espuma mediante un intervalo de 10 segundos.

6. Para la cinética se realiza intercambio de bandeja para la colección del concentrado a los 2, 4, 6, 8, 10 y 12 minutos.

7. Luego la cola, que es todo el material que quedo al término de la flotación en la celda se lleva a filtros con la finalidad de formar un queque de la cola y disponerla de forma más adecuada en otra bandeja.

8. Las muestras se llevan al horno para secarlas y posterior secas, se pesan cada una de ellas.

9. Se toma una poco de muestra representativa para hacer análisis químico y así conocer las leyes.

10. Calcular las recuperaciones en peso y finalmente determinar el tiempo en que la recuperación en peso sea superior a 12 %.

3.2.3 Cinética de remolienda

Esta etapa es la encargada de posteriormente alimentar con partículas de mineral valioso la etapa cleaner de flotación, ya que se encontrarán más liberadas y tendrán mayor probabilidad de ser concentradas. Esta remolienda se constituye con la unión de dos concentrados rougher de la siguiente forma:

1. Tomar los concentrados rougher y vaciarlos al molino de bolas tipo Marcy con la consideración de alimentarlo con un 67 % de sólidos e iniciar la molienda.
2. La molienda se realiza a tiempos de 0, 2, 4 y 8 min.
3. Luego la pulpa es retirada del molino y tamizada en húmedo en malla 325#, separando en distintas bandejas el sobre tamaño del bajo tamaño.
4. Enviar las bandejas al horno para su secado y luego masar para calcular el porcentaje retenido de cada tiempo de remolienda realizado.
5. Graficar las cantidades en masa retenidas respectos al tiempo de cada muestra y ajustar igual que en la etapa de molienda los datos obtenidos por medio de una curva.
6. Finalmente, obtener el tiempo de remolienda en la cual el 80 % está bajo 325# (45 μm).

3.2.4 Cinética flotación cleaner

Etapa alimentada por la remolienda, en la que se busca mayor selectividad y por lo tanto obtener mayores leyes del mineral de interés. Su desarrollo es de la siguiente forma:

1. La pulpa es homogeneizada por medio de agitación, con la finalidad de obtener muestras de 200 mL de pulpa con 10 % en sólido. Se utilizó una celda de flotación Partridge-Smith de un volumen total de 229 mL y con una altura mayor a la convencional (Figura 12) con el fin de evitar el arrastre mecánico de partículas dado la baja granulometría del mineral utilizado.

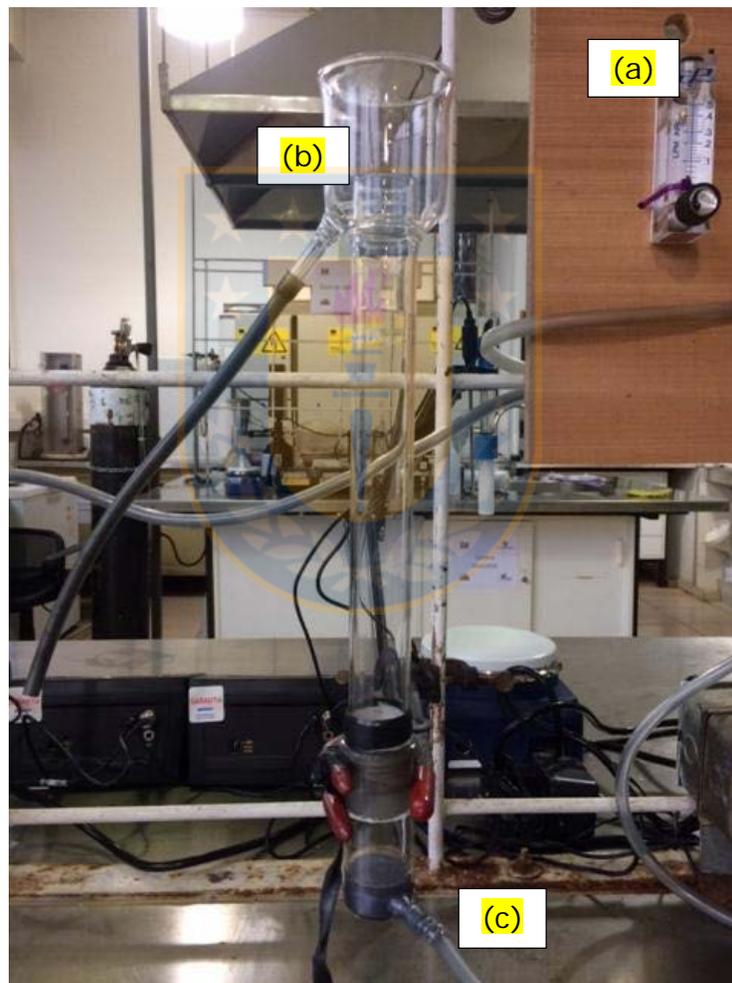


Figura 12. Celda de flotación neumática Partridge - Smith 229 mL. (a) Fluviómetro, (b) Columna estabilizadora, (c) Entrada flujo de nitrógeno.

2. Se dispone al acondicionamiento de la pulpa a pH 11.5 con lechada de cal y la preparación de soluciones madres de los reactivos MIBC - OPE - diésel que serán agregados en esta etapa de acondicionamiento en los primeros 5 minutos.

3. Las dosificaciones de colector diésel 50 ppm y espumantes MIBC 25 ppm y el paso de flujo de nitrógeno será de $90.90 \text{ cm}^3/\text{min}$ para comenzar la flotación.
4. Igualmente que en la etapa de flotación rougher, hacer cambios de bandeja de colección de concentrado a 3, 6, 9, 12, 15, 20 minutos en vasos precipitados de 250 mL.
5. Luego con el término de la etapa de flotación, se vierte la cola en otro vaso precipitado, para luego realizar un nuevo balance de masa recalculada de la cola y concentrados colectados.
6. Filtrar cada una de las muestras con ayuda de una bomba de vacío y papel filtro, para luego llevarlas al horno y secarlas.
7. Al tener las muestras secas, sacarlas del horno y masar cada una de ellas en una balanza electrónica y disponerlas para realizar análisis químico posteriormente.
8. Cabe destacar, que para la entrega de análisis químico debe ser roleada, cuarteada y pulverizada tanto las colas y concentrados en los distintos tiempos de colección.
9. El análisis realizado se ejecutó con la finalidad de conocer las leyes de cobre, hierro y molibdeno insolubles en las muestras.
10. Obteniendo los datos de recuperación masa mineral y de cada elemento, graficar la recuperación acumulada y de cada elemento con ajustes de curvas.

3.3 Test ciclo abierto

Los tests de ciclo abierto fueron realizados considerando una primera etapa de molienda, en la que se alimenta una pulpa con agua convencional con un 67 % sólido compuesta por 1 kg de mineral bajo malla 10# en un molino tipo Marcy de bolas en el tiempo de 13 minutos y 16 segundos con finalidad de obtener un P80 bajo 150 micrones.

En la siguiente etapa se vació la pulpa obtenida de ambas moliendas a la máquina de flotación EDEMET (Figura 13) en la etapa de flotación rougher, durante 12 min y con un porcentaje de sólidos de un 30 % en la pulpa. Considerar tiempo de acondicionamiento de 4 minutos a pH 8.5 y con la agregación de los reactivos colectores y espumantes, destacar que esta etapa de flotación se realizó con agua de lavado durante los 12 minutos de flotación.



Figura 13. Celda de flotación mecánica EDEMET.

En el proceso de desarrollo de la flotación rougher, se debe mantener un flujo de aire constante de 12 L/min, con una agitación de 950 rpm durante los 12 min y con la consideración de remoción de espuma manual de 10 segundos por paleteo. Se deben realizar por duplicado las primeras dos etapas para luego alimentar la fase de remolienda que considera un 67 % en porcentaje de sólido y se hace moler por 7 minutos y 38 segundos, obteniéndose una pulpa bajo 45 μm (malla 325#).

En la flotación cleaner, se debe obtener muestras de pulpa de 200 mL dentro de un vaso precipitado de 250 mL, para su posterior acondicionamiento de pH 11.5 y adición de soluciones madres MIBC - OPE - diésel en el orden respectivamente y en distintas dosificaciones. La celda a utilizar en esta última etapa es celda de flotación Partridge-Smith de un volumen total de 229 mL (Figura 14).



Figura 14. Celda de flotación neumática Partridge-Smith. Celda de 229 mL utilizada en etapa de limpieza (cleaner).

Tabla 5. Condiciones de flotación etapa cleaner

	Caso base	Caso de estudio
Tipo de agua	Agua convencional	Agua convencional
pH	11.5	11.5
OPE(ppm)	0	0, 25, 30, 50 y 150
Dosis colector diésel (g/t)	50	50
Dosis espumante (g/t)	25	25

Al finalizar este proceso de flotación cleaner, los concentrados que se colectaron por la parte superior de la celda columnar con intervalos de paletado de 10 segundos, se llevan en vaso precipitados para filtrarlos y secarlos en hornos, con la finalidad, de ser enviados a análisis químico.

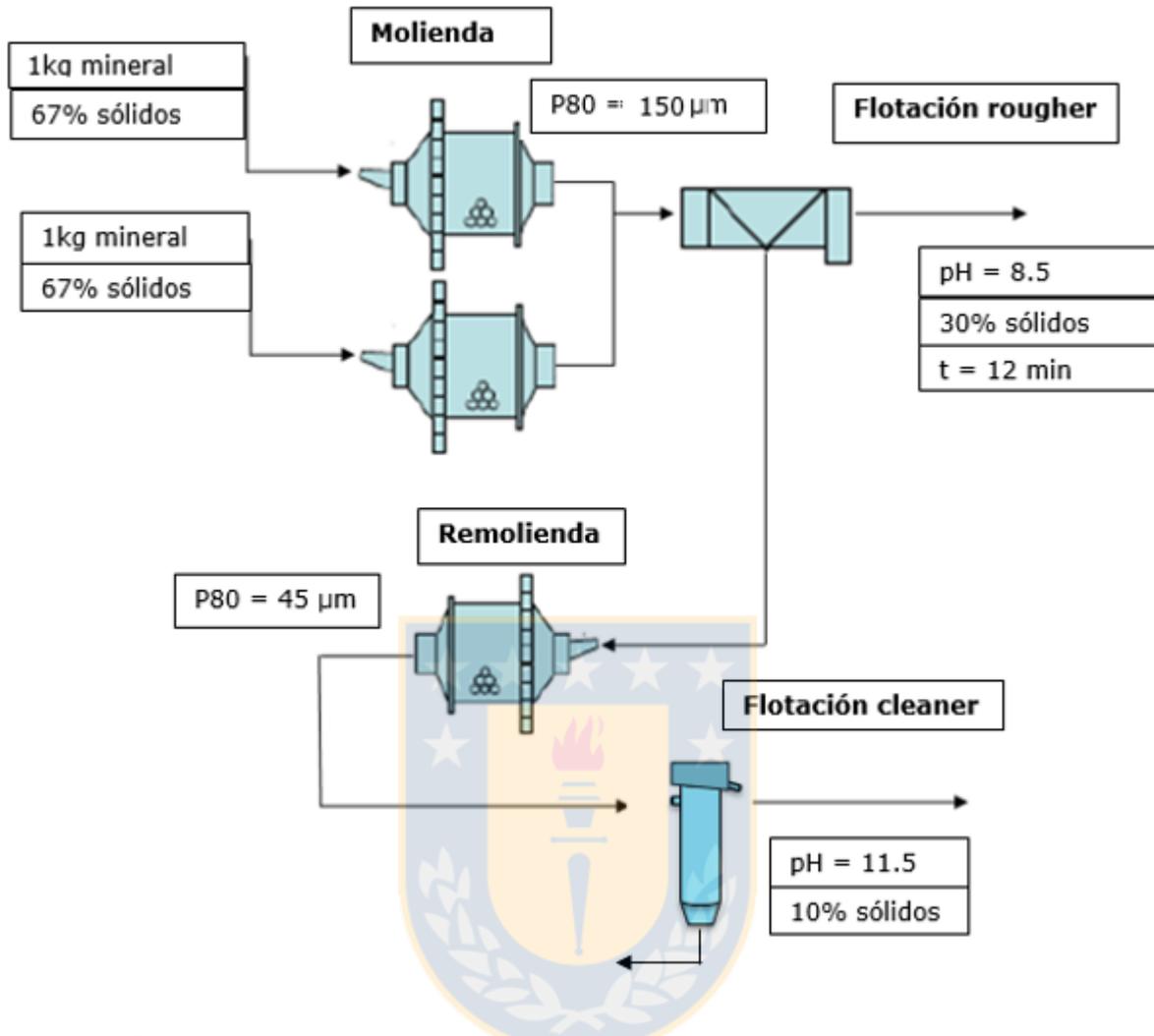


Figura 15. Diagrama de flujo de pruebas de flotación colectiva Cu-Mo. Ciclo abierto de concentración, considerando etapas de molienda, flotación rougher, remolienda y flotación cleaner (Elaboración propia).

3.4 Mediciones de turbidez

Como el OPE es un agente floculante efectivo para partículas hidrofóbicas, se realizaron pruebas de turbidez para flocular molibdenita fina, considerando que se acondiciona en primera instancia y que luego se deja decantar por un tiempo de 1 h para realizar una correcta medición.

Para la medición de turbidez se considera que al adicionar floculantes del tipo OPE, como hipótesis se debería demostrar que existiera una clarificación en las suspensiones de los sobrenadantes y que con la ausencia de este reactivo, el medio se volvería más turbio y con mayor presencia de partículas finas u coloidales.

Como se muestra en la Figura 16, estas pruebas de turbidez se realizaron en un turbidímetro HACH 2100N y fueron realizadas sin y con un acondicionamiento de 50 ppm de OPE. Finalmente la extracción de las muestras se obtuvieron mediante una jeringa de 60 mL a tiempos de una hora.

Tabla 6. Condiciones utilizadas en la prueba de turbidez

Mineral	Medio	pH	Floculante
Concentrado Cu-Mo	Agua convencional	9	0 y 50 [ppm]



Figura 16. Turbidímetro HACH 2100 N.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Pruebas de cinética etapa de molienda

En la Figura 17 se presenta la distribución de tamaño de partícula del mineral M en función del tiempo, que entrega un P80 de 150 μm a tiempo de 13 minutos 16 segundos. Esta etapa de cinética de molienda se realiza con 1 kg de mineral en un molino de bolas tipo Marcy y con 493 mL de agua convencional, con la finalidad de obtener una pulpa de 67 % en sólido.

Las pruebas se realizaron a tiempos respectivos de 5, 8, 12 y 16 minutos, hasta considerar obtener una masa de mineral seco con el 80 % pasante bajo malla 100#. Esta distribución de tamaño aplicada a estas pruebas de molienda es de vital importancia para el proceso de flotación, debido a que exige una suficiente liberación por parte del mineral útil a concentrar.

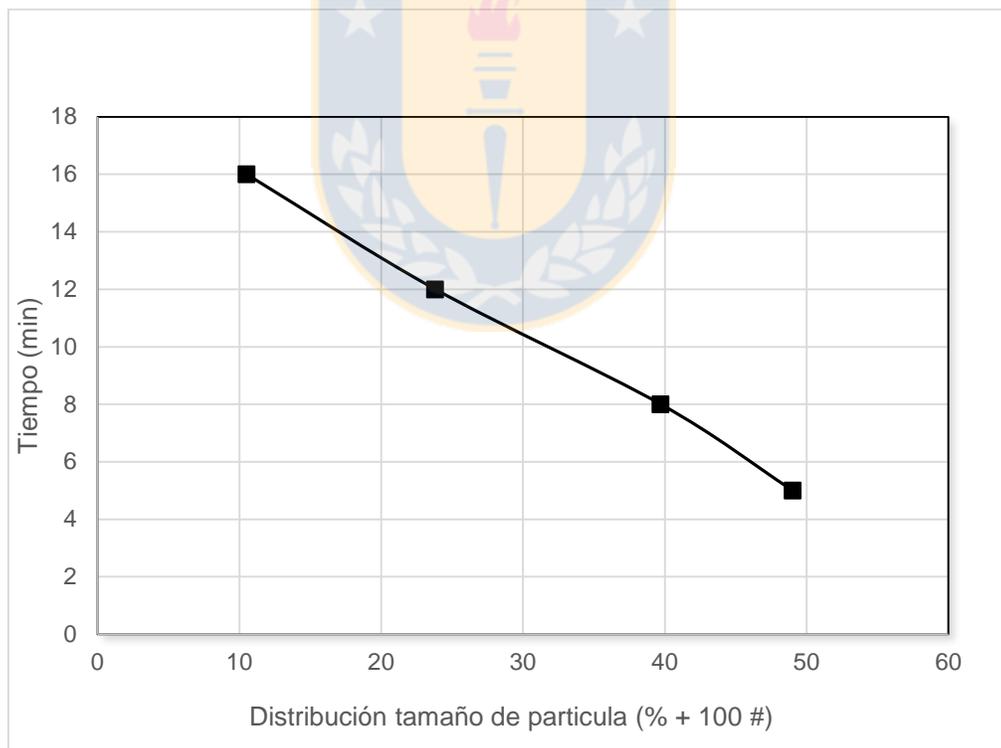


Figura 17. Cinética de distribución de partículas para etapa de molienda, agua convencional.

4.2 Pruebas de cinética etapa de flotación rougher

En la Figura 18 se observa la recuperación en peso y recuperación en cobre del mineral M, en la etapa de flotación rougher considerando tiempos de colección del concentrado. Se estableció obtener recuperaciones por sobre los 12 % en peso de mineral y mayores a un 80 % en cobre, resultando en un tiempo óptimo de 12 minutos.

En estas pruebas de concentración, se dosificaron con una mezcla de colectores Xantato y Tionocarbamato a dosis de 30 g/t para obtener mejores selectividad y recuperación del mineral M. Considerando la necesidad de concentrar de mejor manera los sulfuros de cobre y también, se aplica a estas pruebas la dosificación de diésel en el acondicionamiento con 30 g/t a modo de cubrir zonas de baja hidrofobicidad y mejorar la hidrofobicidad global de las partículas de molibdenita presentes.

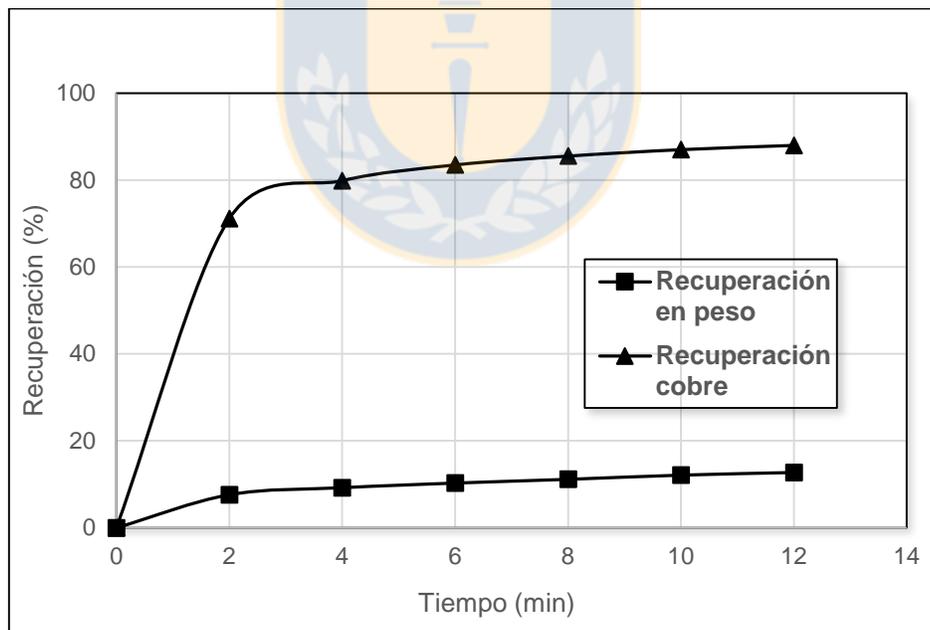


Figura 18. Cinética de flotación rougher, agua convencional.

Se trabaja en esta etapa considerando variables óptimas para el concentrado de cobre, como la aplicación de un pH de pulpa 8.5, ideal para su concentración y que se encuentra en el rango operacional aplicado industrialmente hoy en día.

También cabe destacar que la utilización de la celda mecánica automatizada EDEMET ayuda a obtener mejores y más confiables resultados, con respecto a las variables presentes.

4.3 Pruebas de cinética etapa de remolienda

En la Figura 19 se presenta la distribución de tamaño de partícula del mineral M en función del tiempo, que busca del mismo modo que en la etapa de molienda, obtener un parámetro ideal de tamaño para sus procesos posteriores. Se estableció un P80 de 45 μm , que resulta de una molienda húmeda con un 67 % sólido en la pulpa a tiempo de 7 minutos y 38 segundos. Obteniéndose así, un tamaño óptimo para conseguir mayores selectividades y leyes requeridas en la etapa de limpieza del mineral.

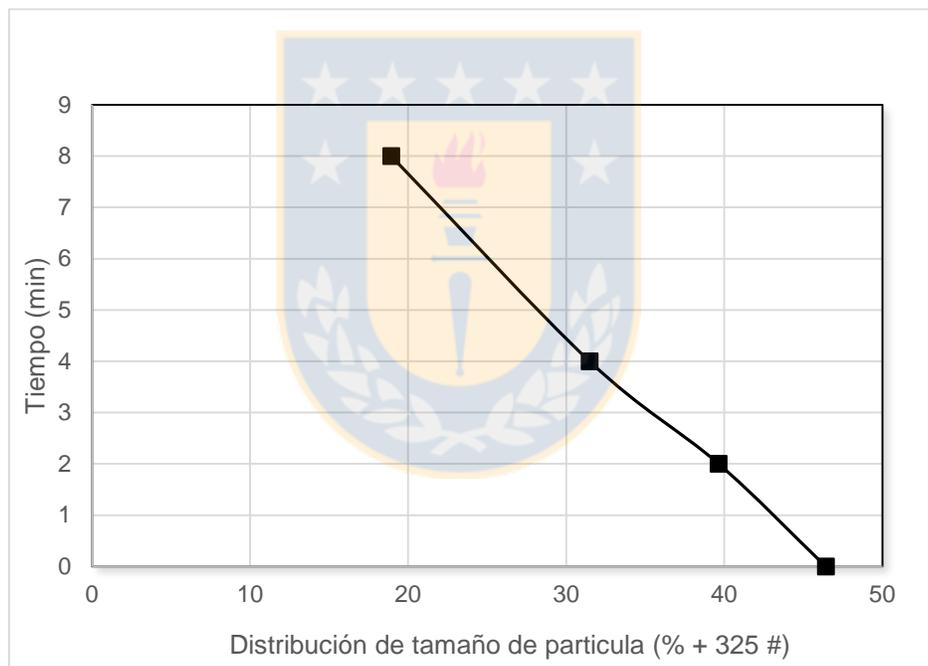


Figura 19. Cinética distribución de partículas para etapa de remolienda, agua convencional.

Se obtiene como resultado de esta cinética de remolienda una masa de 100.4 gr, que será la alimentación de las pruebas de flotación cleaner en la etapa colectiva. Considerando que en esta etapa de flotación cleaner se contemplara con un porcentaje de sólido de 10 % utilizando una celda de flotación Partridge-Smith de 229 mL.

4.4 Pruebas de etapa flotación cleaner

Ahora bien, considerando nuestro ciclo abierto de concentración presentado en la Figura 15, se procede al proceso de flotación cleaner en el cual se da paso al estudio de pruebas de dosificación del floculante OPE y sus métodos diferentes de emulsión. Hay que considerar que se acumuló el concentrado de la etapa rougher en un recipiente agitado mecánicamente, para posteriormente alimentar varias pruebas de flotación cleaner.

4.4.1 Flotación en agua convencional 0.01 [M] NaCl

En la figura 20 se presenta el comportamiento de la molibdenita en solución de agua convencional, con el propósito de identificar en pruebas con y sin floculante, el efecto que causa el OPE a pH 11.5 de acondicionamiento, condiciones alcalinas que industrialmente se emplean.

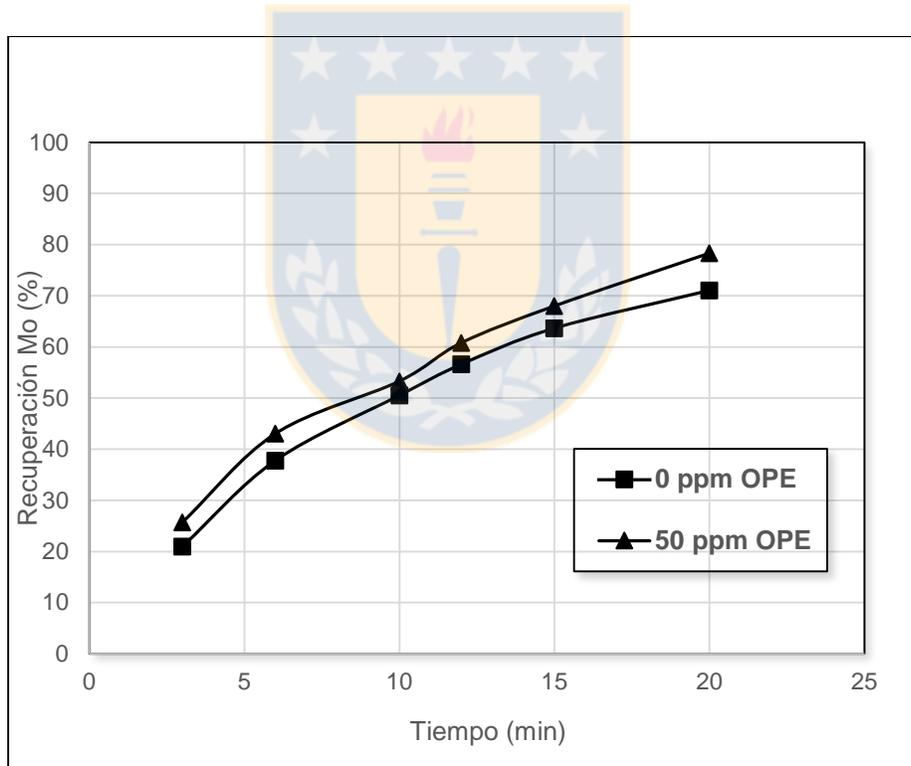


Figura 20. Recuperación de molibdeno en función del tiempo, en presencia y ausencia de floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.

Se destaca que existe una mejora en la flotabilidad natural de la molibdenita, alcanzando recuperaciones de 78 % a tiempos de 20 min en una dosificación de floculante de 50 ppm. La recuperación del mineral aumenta, debido a su floculación selectiva del mineral

valioso hidrofóbico, por lo tanto se obtienen mejoras en la flotación fina de minerales de molibdenita.

En la figura 21 se presenta la recuperación de cobre, con el propósito de identificar en pruebas con y sin floculante, el efecto que causa el OPE a pH 11.5 de acondicionamiento.

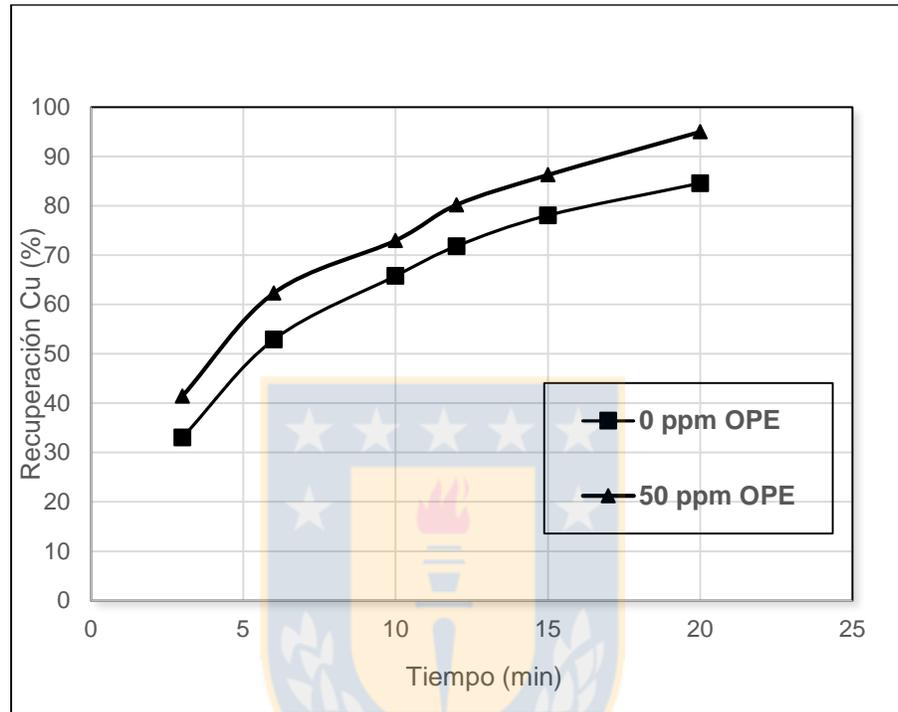


Figura 21. Recuperación de cobre en función del tiempo, en presencia y ausencia de floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.

La aglomeración hidrofóbica es una vía importante para agregar tanto partículas finas como coloidales en solución acuosa. Esta aglomeración hidrofóbica observada tanto en la Figura 20 y 21, se originan a partir de la atracción hidrofóbica que existen entre las partículas y se encuentra favorecida con la presencia del diésel con una dosificación de 50 ppm.

La molibdenita y calcopirita tiene una alta flotabilidad en condiciones de dosificación de OPE, obteniéndose una mejora en la recuperación con la aplicación de este floculante y cumpliendo parte de las hipótesis planteadas al principio de esta investigación tanto para minerales de molibdeno y cobre.

4.4.2 Flotación respecto a las dosificaciones de floculante

Para demostrar el efecto del floculante en la recuperación de la molibdenita y encontrar la óptima dosificación de OPE, se realizaron pruebas de 0, 50, 100, 150 y 200 ppm de dosis de OPE, en condiciones de acondicionamiento de pH 11.5 con cal, 25 ppm de MIBC y 50 ppm de emulsión de diésel. En las Figuras 22 y 23 se observa un aumento general en la recuperación de mineral a medida que aumenta la dosificación de OPE y posteriormente, hay un decrecimiento por exceso de OPE. Como hipótesis este decrecimiento en la recuperación de molibdeno, se debe principalmente a la generación de flóculos muy grandes.

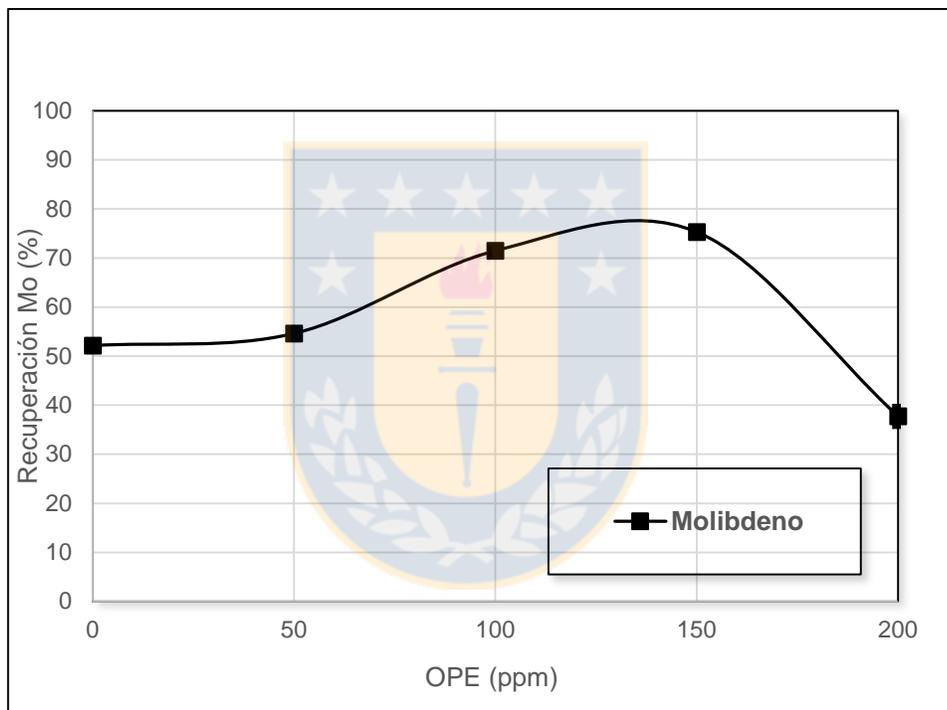


Figura 22. Recuperación de Molibdeno en función de la dosificación de OPE, Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.

En la Figura 22 se observa que la mejor opción de dosificación es en los 150 ppm de OPE, en la cual se obtiene recuperaciones de molibdeno por sobre el 70 % y que luego a una dosificación mayor, el floculante no se comporta de forma deseada, obteniéndose un exceso de este reactivo y por lo tanto, su notoria disminución en la recuperación del mineral de molibdenita.

La recuperación de cobre en función de la dosificación de OPE a pH 11.5 se muestra en la Figura 23. Es evidente que se observa un máximo en su recuperación y además es

visible que el máximo coincide con el óptimo en recuperación de molibdeno, mostrado en la Figura 22.

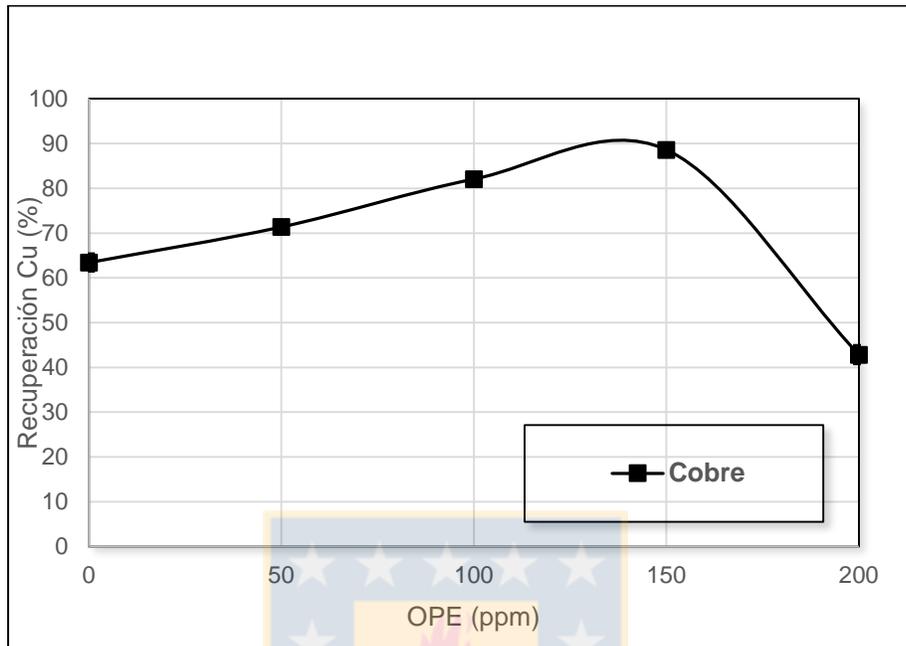


Figura 23. Recuperación de cobre en función de la dosificación de OPE, Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.

4.4.3 Flotación en agua convencional modificando la emulsión

Es importante en el estudio del proceso de flotación, el llevar a cabo las mejores medidas de acondicionamiento de la pulpa para obtener los mejores resultados posibles, por ello se realizaron pruebas de emulsión con OPE y sin este flocculante, para hacer una comparativa en dosificaciones de 10, 25 y 50 ppm, a un pH alcalino de 11.5 y agua convencional como se observa en la figura 24.

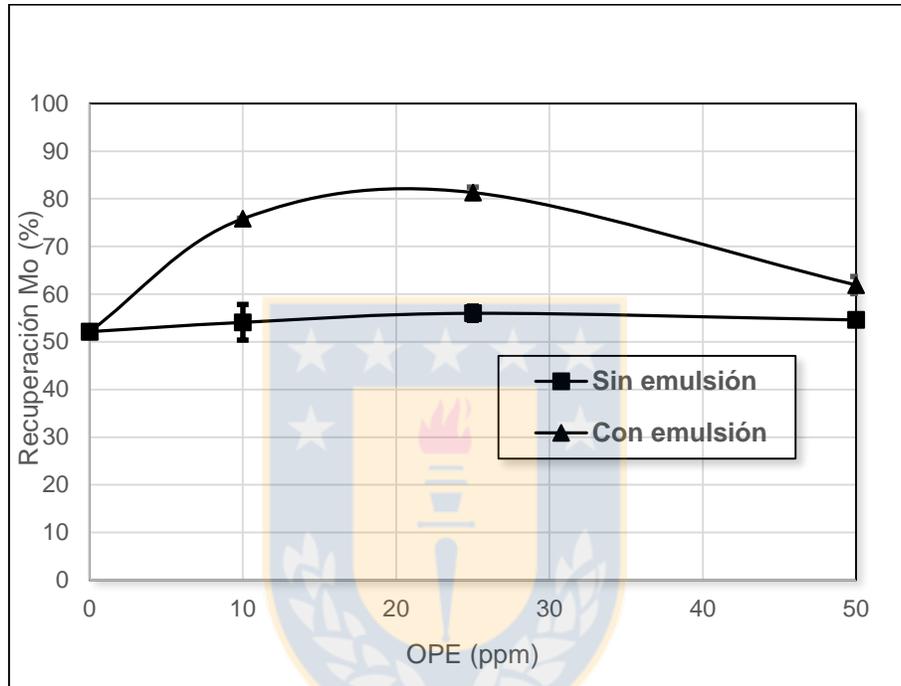


Figura 24. Recuperación de molibdeno en función de la dosificación de OPE, en ausencia y presencia de emulsión con flocculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.

Como se observa en la figura 25, la presencia de OPE claramente aumenta la recuperación de molibdeno debido a partículas más finas de molibdeno que son recolectadas. Sin embargo, cuando el OPE y diésel están presentes juntos en la emulsión, se visualiza que la recuperación del mineral en el sistema se convierte mucho más favorable. Esta modificación en su acondicionamiento es muy probable que sea debido a una mejor emulsificación del diésel en el agua cuando se agrega este floculante selectivo.

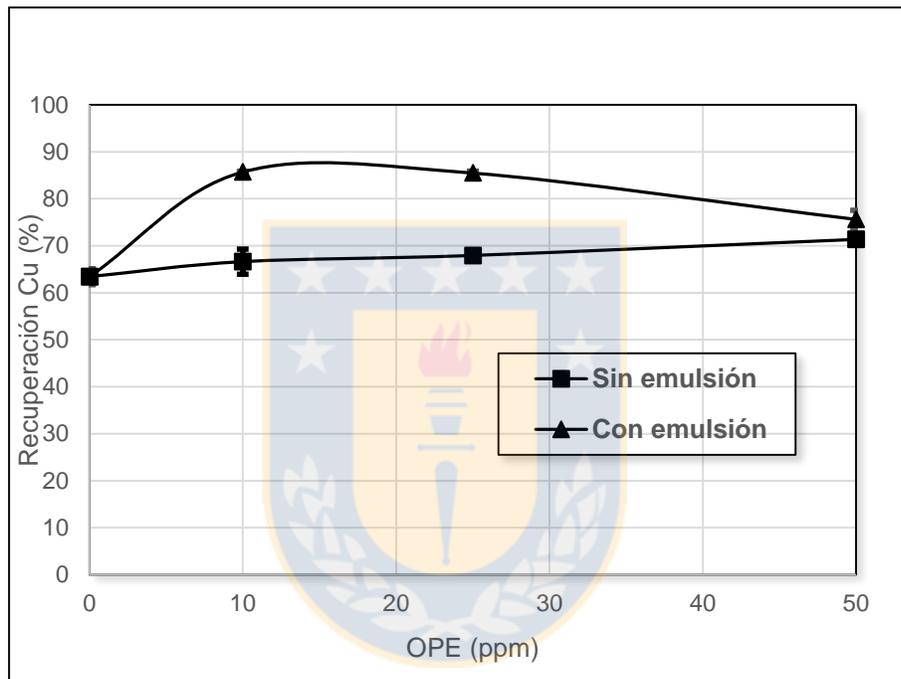


Figura 25. Recuperación de cobre en función de la dosificación de OPE, en ausencia y presencia de emulsión con floculante. Condiciones: Agua destilada, 25 ppm MIBC, 50 ppm diésel, pH 11.5.

La emulsificación del colector diésel es vital para obtener resultados que favorecen la flotación fina de molibdenita. Song et al. (2012) estudió el importante efecto de la emulsificación de este aceite y que en cuanto "más pequeñas" eran sus gotas, mejor era la flotación e interacción con el mineral. Se han realizado estudios con equipos de tensiómetro, en el cual la tensión interfacial aceite/agua disminuye notoriamente en presencia del OPE, lo que conlleva a la formación de emulsiones de mayor estabilidad y la posibilidad de formar gotas de diésel más pequeñas en continuidad acuosa. Dicho efecto causa el aumento del área específica activa del colector y mejor aglomeración de partículas finas de molibdenita en la flotación (Álvarez et al., 2018).

Los resultados más favorables fueron los obtenidos a una dosificación de 25 ppm de OPE presente en la emulsión en la etapa de acondicionamiento de la pulpa, donde alcanza recuperaciones del orden de 81 % en recuperación de molibdeno y disminuye 25 puntos porcentuales con la ausencia de este floculante en la emulsión. La formación de micro gotas de aceite genera la hipótesis de que partículas más finas consideradas bajo 45 micrones, puedan tener mayor probabilidad de cubrir sus zonas apolares activas y mejorar así la hidrofobicidad global de las partículas de molibdenita.

Es importante destacar el efecto que tienen las fuerzas superficiales, debido que a medida que la partícula disminuya su tamaño, las fuerzas gravitacionales pierden preponderancias siendo las más significativas las fuerzas superficiales (Fuersteneau, 1982). Resultados similares se logran mostrar en la Figura 25, donde se representa la recuperación obtenida de cobre, por las mismas condiciones de emulsión con presencia y ausencia del OPE.



4.5 Mediciones de turbidez

En la figura 26 se realizó a modo de demostración pruebas de análisis visual de turbidez para el mineral M con aplicación de OPE, donde se observa como el sobrenadante se comporta en la sedimentación de la suspensión. El aumento en la dosificación de OPE atribuye una mayor clarificación del sobrenadante y por lo tanto, una menor presencia de partículas finas en su suspensión.

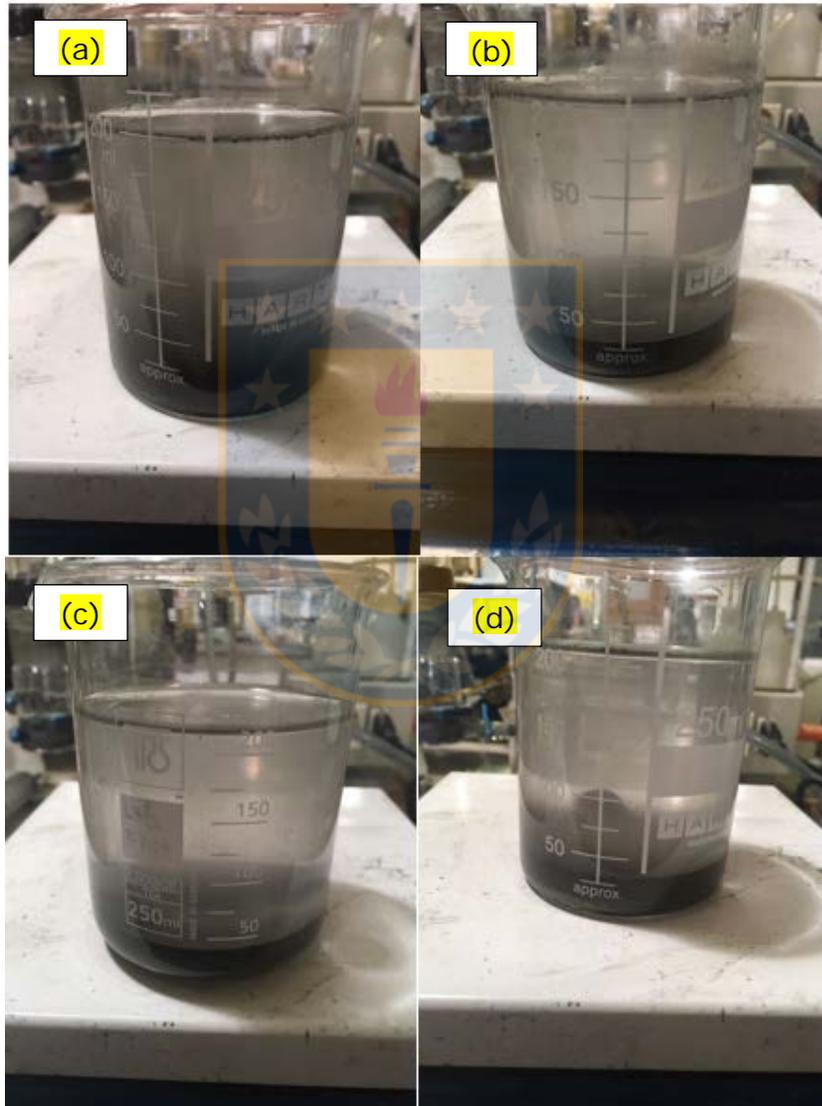


Figura 26. Suspensión de mineral M < 45 μm , (a) 0 ppm OPE, (b) 10 ppm OPE, (c) 30 ppm OPE y (d) 50 ppm OPE. Agua convencional, 1 h sedimentación.

Ahora, aplicando una perspectiva más analítica, se realizaron mediciones con el equipo Turbidímetro HACH 2100 N para obtener los resultados de turbidez aplicados con y sin floculante, a dosis de 50 y 0 ppm de OPE respectivamente mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Turbidez aplicada con y sin floculante OPE. Turbidímetro HACH 2100 N. Agua convencional, mineral < 45 μm y 1 h sedimentación.

Sin OPE	OPE 50 [ppm]
[NTU]	[NTU]
737	193
760	194

De los resultados mostrados, se indica que la turbidez existente es mayor en ausencia de OPE y que al dosificar el floculante la turbidez disminuye. Esto se debe principalmente a que el floculante actúa agregando partículas y de esa forma generando flóculos que permiten una mejor sedimentación.



5. CONCLUSIONES

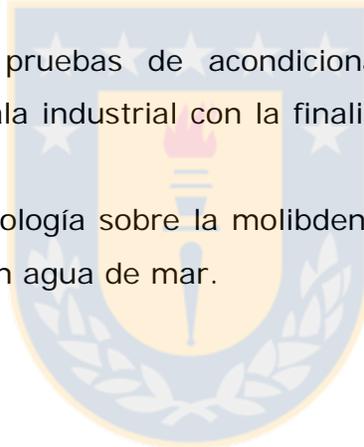
Los resultados indicaron que la molibdenita tiene una mejora en la flotabilidad cuando se adiciona el agente floculante de OPE, lo que aumenta progresivamente con un incremento en su dosificación, este efecto se asocia a la aglomeración de partículas finas de especies hidrófobas que se hacen más estables con el aumento de su tamaño. Los acondicionamientos estudiados para la molibdenita respondieron de buena forma a la flotación, obteniéndose recuperaciones sobre los 81 % para el caso del molibdeno, este resultado concuerda con los esperados de acuerdo a diversos autores (Song et al, 2012; Yang & Song, 2014 & Álvarez, 2018). Esta recuperación fue considerada por la buena emulsión que se aplicó, en que el floculante disminuye la tensión interfacial existente aceite/agua aumentando de esta forma el área específica activa del colector y como resultado obteniéndose un mejoramiento en su hidrofobicidad.

En presencia del floculante OPE en las pruebas de flotación cleaner, se observó un buen comportamiento de captación de finos hidrófobos de mineral, que a su vez aplicándose directamente a la emulsión, se obtienen mejores resultados que sin la aplicación del floculante en la preparación de la emulsión del aceite. Los resultados de la ausencia del floculante en esta emulsión mostraron un descenso en su recuperación de 25 puntos porcentuales, lo que demuestra una gran diferencia entre aplicar el floculante en la emulsión o directamente a la pulpa del concentrado colectivo. Respecto a la dosificación del floculante para condiciones alcalinas $\text{pH} > 11$, la mejor dosificación para el cobre y molibdeno se presentó a 150 ppm de OPE. Ahora bien, existen mejores respuestas cuando se aplica una alta agitación en la emulsión con la presencia de OPE, de la misma forma coinciden con su óptimo en recuperación y esto se lleva a cabo a 25 ppm del floculante.

Se demostró que el colector microemulsificado podría usarse con una buena eficiencia en la flotación de molibdenita, debido al tamaño nanométrico que podrían tener las gotas de aceite. Esta investigación abre camino al uso de colector microemulsificado con OPE en la flotación de molibdenita, en que se reemplaza el emulsionado convencional por un colector microemulsificado.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de flotación con mineral real en agua de mar, probando el uso de SHMP en conjunto con el floculante selectivo de óxido de polietileno a pH alcalino y encontrar si existen condiciones favorables para su recuperación.
- Realizar flotaciones de partículas finas de molibdenita y calcopirita en presencia de microemulsificación a diferentes pH alcalinos de la pulpa.
- Estudiar la formación de los aglomerados hidrófobos de OPE en celdas mecánicas y observar si ellos prevalecen al ser sometidos a una agitación operacional óptima.
- Seguir realizando pruebas del comportamiento superficial de la molibdenita en presencia del OPE por medio de pruebas de potencial zeta, tiempo de inducción, XPS, etc.
- Realizar las mismas pruebas de acondicionamiento y utilizar los mismos procedimientos, a escala industrial con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos.
- Realizar pruebas de reología sobre la molibdenita en presencia de SHMP, tanto en agua fresca como en agua de mar.



BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A. (2018). *Floculación selectiva de molibdenita de bajo tamaño mediante el uso de óxido de polietileno* (tesis de pregrado), Universidad de Concepción.
- Castro, S., Lopez-Valdivieso, A. & Laskowski J.S. (2016). Review of the flotation of molybdenite. Part I – surface properties and floatability. *Int. J. Miner. Process.* 48-58.
- Chander, Fuerstenau. (1972). On the natural flotability of molybdenite. 62-69
- Cochilco. (2017). Mercado internacional del molibdeno.
- Fuerstenau, D.W., (1982). Activation in the flotation of sulphide minerals. In R.P. King, ed. *Principles of Flotation*. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy. pp.183-99.
- Gochin, R.J., Leikili, M. & Shergold, H.I. (1985). The mechanism of flocculation of coal particles by polyethylene oxide. *Coal Preparat*, 2, 19-34.
- Gutiérrez, L. (2017). Presentaciones curso flotación. Departamento Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.
- Glembotsky, V.A., (1968). Investigation of separate conditioning of sands and slimes with reagents prior to joint flotation. *In: Proc. International Mineral Processing Congress, 8, Paper S-16*.
- Hubbers P.D. (1996). Surfactant self-assembly, kinetics and thermodynamics of micellar and microemulsion systems.
- Klassen, V.I., Mokrousov, V.A., (1963). An Introduction to the Theory of Flotation, London, Butterworths. 329-335, 251-254.
- Kracht, W. (2012). Flotación de Minerales, Departamento Ingeniería en Minas, Universidad de Chile.
- Laskowski, J.S., Gutiérrez, L. & Alvarez, A. (2018) Use of polyethylene oxide of improve flotation of fine molybdenite. Water Research centre for agriculture and mining (CRHIAM), University of Concepción. *Minerals Engineering*, 127, 232 – 237.

Liang, L., Tan, J., Li, Y. & XieCoal, G. (2015). Flotation improvement through hydrophobic flocculation induced by polyethylene oxide.

Li, L., Lu, X., Qiu, J. & Liu, D. (2013). Effect of microemulsified collector on froth flotation of coal. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113, 877-880.

Lopez-Valdivieso, A., Madrid-Ortega, I., Reyes-Bahena, J.L., Sánchez-López, A.A., Song, S. (2006). Propiedades de la interface molibdenita/solución acuosa y su relación con la flotabilidad del mineral.

Rubio, J. & Kitchener, J.A. (1976). Mechanism of adsorption of poly (ethylene oxide) flocculant on silica.

Song, S., Zhang, X., Yang, B. & Lopez-Mendoza, A. (2012). Flotation of molybdenite fines as hydrophobic agglomerates. *Separation and Purification Technology*, 98, 451-455.

Tabares, J. et al., (2006). Surface properties and floatability of molybdenite. In Proceedings of 2006 ChinaMexico Workshop on Minerals Particle Technology.

Xiaofang, Y., Lin L. & Xianjun, L. (2017). Flotation of molybdenite in the presence of microemulsified collector. *Physicochem. Probl. Miner. Process*, 53(1), 333-341.

Yang, B. & Song, B. (2014). Hydrophobic agglomeration of mineral fines in aqueous suspensions and its application in flotation.

Yianatos, J. (2005). *Flotación de minerales*. Departamento de Procesos Químicos, Universidad Técnica Federico Santa María.

Yin W., Zhang L. & Feng X. (2010). Flotation of Xinhua molybdenite using sodium sulfide as modifier. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 702-706.

Zhang, B. & Zhong, H. (2010). Review on Research Progress of Molybdenite Flotation and its Collectors. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 3, 17.

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

Título: Optimización de la flotación de molibdenita fina utilizando óxido de polietileno
Nombre Memorista: Darko Gerardo Arias Salinas

Modalidad	Investigación	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		Prof. Leopoldo Gutierréz B.
Calificación		
Fecha		
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		
		Ingeniero Supervisor:
		Institución: Universidad de Concepción

Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Oscar Jerez R.	Prof. Fernando Parada L.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso del óxido de polietileno (OPE) en la flotabilidad de la molibdenita fina utilizando agua convencional. Esta flotabilidad se realizó usando mineral de concentrado colectivo Cu – Mo para obtener resultados de distintos tipos de acondicionamiento de la pulpa y dosificaciones de OPE. El estudio se llevó a cabo realizando pruebas de flotación rougher (celda mecánica), flotación cleaner (celda columnar) y mediciones de turbidez.

Los resultados indicaron que en la flotabilidad colectiva del concentrado en que aplica OPE en la emulsión, se obtiene un 81 % de recuperación de molibdeno en comparación a la ausencia de este floculante donde sólo alcanza un 52 % de recuperación. La mayor alza en su recuperación se debe principalmente a la recuperación de finos en que el OPE actúa floculando selectivamente.

Resultados similares y positivos se obtuvieron para la recuperación de cobre alcanzando el 85 % de su recuperación al aplicar el floculante en la emulsión, en comparación a la ausencia de OPE donde solo alcanza un 63 % de recuperación de cobre. Este aumento de recuperación se debe principalmente a la acción del OPE a partículas de minerales de cobre que presentan hidrofobicidad inducida previamente de la etapa rougher. Se destaca que la óptima dosificación para la flotación de molibdeno y cobre, coinciden con una tendencia similar a la dosis de 25 ppm de OPE.

Finalmente, estudios realizados con equipos de tensiómetro, revelaron que es posible aumentar el área específica activa del colector al aplicar la emulsión de MIBC y diésel con presencia de OPE a dosificación óptima con pH 11.5 (Álvarez et al., 2018).