

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Leopoldo Gutiérrez B.

Co-Patrocinante

Dr. Ricardo Jeldres V.

***"Uso de Goma Guar como agente floculante de arcillas
en flotación de calcopirita"***

Hugo Matías Jeldres Valenzuela

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Septiembre 2017

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Gladys y Hugo, por todo el sacrificio realizado para entregarme las herramientas necesarias para poder cumplir mis sueños.

A Ricardo, mi hermano, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida, tanto en lo personal como en lo académico.

A mi polola Romina por todo el apoyo brindado en los momentos más complicados.

A mis primos, tíos y abuela por su cariño incondicional.

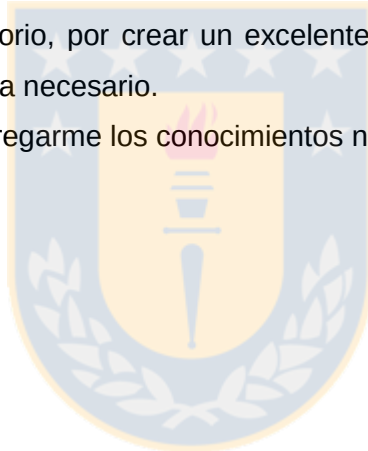
Al profesor Leopoldo Gutiérrez por darme la confianza de realizar esta memoria y entregarme los conocimientos necesarios para su desarrollo.

A mis amigos y compañeros por todos los momentos compartidos que nunca olvidaré.

A los jugadores de "RK3" por siempre luchar por el sueño de ser campeón, a pesar de nunca lograrlo.

A mis compañeros de laboratorio, por crear un excelente ambiente de trabajo y brindar ayuda en el momento que fuera necesario.

A todos los profesores por entregarme los conocimientos necesarios para realizar un buen desempeño laboral.



RESUMEN

Las arcillas están presentes en una gran cantidad de depósitos minerales y son comúnmente encontradas como ganga dentro de las operaciones de beneficio. Su compleja estructura química, caracterizada por superficies anisotrópicas, hace que su presencia sea un desafío permanente para las operaciones de flotación, provocando mayores consumos de reactivo, disminución de la calidad del concentrado e incremento de las propiedades reológicas del sistema. En este contexto, el objetivo principal de esta memoria fue mejorar la flotabilidad de minerales de calcopirita en presencia de arcillas, mediante el uso de un polímero orgánico de bajo peso molecular, que actúe como agente recubridor de la superficie de las arcillas. El reactivo escogido fue goma guar, que es un polisacárido extraído de semillas de *Cyamopsis tetragonoloba*, una planta de la familia de las leguminosas. Los resultados fueron analizados en términos de impacto del pH, tipo de agua que incluye agua de mar y reología del sistema.

Las pruebas de microflotación se llevaron a cabo en una celda Patridge-Smith de 150 cm³, utilizando aire comprimido como fase gaseosa a un caudal de 80 cm³/min. El tiempo de flotación fijado para todas las pruebas fue de 2 min. Los resultados revelaron que el uso de goma guar favorece la recuperación de calcopirita en presencia de caolinita, debido a que induce la formación de agregados de arcilla que decantan por efectos gravitacionales, impidiendo el 'efecto coating' y disminuyendo el excesivo consumo de colector por parte de la arcilla. El pH jugó un rol clave en el rendimiento de la goma guar, la cual presentó su mayor efectividad en agua convencional a condiciones altamente alcalinas (pH 11), en donde se logró mejorar la recuperación desde un 73% a un 90%. Sin embargo, el uso de agua de mar disminuyó la eficiencia del polisacárido, en donde se lograron leves mejoras, pero sólo a pH 11. Las pruebas reológicas se realizaron en un viscosímetro Haake RV-20 conectado a un sensor MV2-P. Se utilizó una configuración de cilindros concéntricos, con diámetro interior de 40.08 mm y diámetro exterior de 41.04 mm. Las superficies de los cilindros son rugosas con la finalidad de reducir al mínimo el fenómeno de deslizamiento. Los resultados indicaron que la reología de la pulpa se ve influenciada de diferente manera dependiendo del tipo de arcillas. A bajas concentraciones de este mineral, la viscosidad fue mayor en presencia de caolinita en comparación a montmorillonita, sin embargo, esta última presentó una mayor tasa de crecimiento con respecto a la concentración del sólido.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos generales.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
2	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1	Flotación.....	3
2.1.1	Hidrofobicidad.....	3
2.1.2	Modelo de doble capa eléctrica.....	4
2.1.3	Reactivos de flotación.....	6
2.2	Reología de suspensiones.....	9
2.2.1	Curvas de flujo.....	10
2.3	Arcillas.....	11
2.3.1	Clasificación de arcillas.....	12
2.3.2	Efecto de arcillas en flotación.....	14
2.4	Agua de mar.....	15
2.4.1	Precipitación coloidal de iones secundarios.....	15
2.4.2	Efecto buffer y consumo de cal.....	16
2.5	Goma guar.....	17
2.5.1	Estructura.....	17
2.5.2	Aplicaciones de la goma guar en minería no metálica.....	18
3	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	19
3.1	Minerales.....	19
3.1.1	Muestra de calcopirita.....	19
3.1.2	Muestra de arcillas.....	20
3.1.3	Cuarzo.....	20
3.2	Reactivos.....	20
3.3	Equipos y procedimientos.....	21
3.3.1	Solución madre de goma guar.....	21
3.3.2	Purificación de PAX.....	21
3.3.3	Solución de PAX y MIBC.....	23
3.3.4	Pruebas de Microflotación.....	23
3.3.5	Pruebas de reología.....	24
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	26
4.1	Pruebas de microflotación.....	26

4.1.1	Impacto de caolinita en la recuperación de calcopirita	26
4.1.2	Impacto de montmorillonita en la recuperación de calcopirita en agua convencional y agua de mar.	27
4.1.3	Goma guar como agente depresante de caolinita.....	28
4.1.4	Efectos de goma guar sobre flotación de cobre (calcopirita pura).....	29
4.1.5	Comportamiento de goma guar en presencia de agua de mar	30
4.2	Pruebas de reología	31
4.2.1	Impacto del pH sobre reología de pulpas minerales arcillosas.....	31
4.2.2	Efecto de la concentración de arcillas en la reología de la pulpa	33
4.2.3	Efecto de goma guar sobre reología de pulpas arcillosas	36
5	CONCLUSIONES	40
6	BIBLIOGRAFIA.....	41
7	ANEXOS.....	43
7.1	Anexo de pruebas de microflotación	43
7.1.1	Microflotación de calcopirita con presencia de caolinita.....	43
7.1.2	Microflotación de calcopirita con presencia de montmorillonita.....	44
7.1.3	Microflotación de calcopirita con presencia de montmorillonita en agua de mar	44
7.1.4	Efecto de goma guar en microflotación de calcopirita con presencia de caolinita	45
7.1.5	Efecto de goma guar en microflotación de calcopirita con presencia de caolinita en agua de mar.....	46
7.1.6	Efecto de Goma guar en flotación de calcopirita pura.....	47
7.2	Anexo pruebas de reología.....	48
7.2.1	Impacto del pH sobre recuperación de Cu en presencia de arcillas.....	48
7.2.2	Efecto de la concentración de arcillas en la reología de la pulpa	49
7.2.3	Efecto de la goma guar sobre la reología de pulpas arcillosas	51

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Máquina de flotación (Gutiérrez, 2015)	3
Figura 2: Equilibrio de fuerzas en el punto triple ente las fases sólido, líquido y gas (Gutiérrez, 2015).....	4
Figura 3: Distribución de cargas en solución en entorno de partícula cargada eléctricamente (De Hoyos, Martínez, & Farías, 2014).....	5
Figura 4: Punto de medición de potencial zeta (Cervantes, 2011).	6
Figura 5: Isopropil xantato de sodio (Yianatos, 2005).....	6
Figura 6: Representación adhesión del espumante a una burbuja de aire (Yianatos, 2005).	7
Figura 7: Esquema de una deformación de cizalle simple	9
Figura 8: Relaciones comunes entre esfuerzo de corte y velocidad de cizalle.	10
Figura 9: Estructura cristalinoquímica de la caolinita, adaptada de Flegman y George(1975)	13
Figura 10: Estructura de la montmorillonita de acuerdo a Hofmann, Endell, Wilm, Marshall, Maegdefrau and Hendricks.....	14
Figura 11: Consumo de cal (Castro, 2012)	17
Figura 12: Estructura goma guar.....	17
Figura 13: Reómetro Haake RV-20 y sensor MV2-P.....	25
Figura 14: Efecto de la concentración de caolinita sobre la recuperación de calcopirita a diferentes condiciones de pH. Colector: 25 ppm de PAX, Espumante: 20 ppm de MIBC. 27	
Figura 15: Efecto de la concentración de montmorillonita sobre la recuperación de calcopirita tanto en agua dulce como en agua de mar. Colector: 25 ppm de PAX, Espumante: 20 ppm de MIBC.	28
Figura 16: Recuperación de calcopirita a diferentes concentraciones de goma guar, 30 % de caolinita, diferentes pH, 25 ppm de PAX, 20 ppm de MIBC, en agua dulce.	29
Figura 17: Recuperación de calcopirita a diferentes concentraciones de goma guar, diferentes pH, 25 ppm de PAX, 20 ppm de MIBC, en agua dulce.	30
Figura 18: Recuperación de calcopirita a diferentes concentraciones de goma guar, 30 % de caolinita, diferentes pH, 25 ppm de PAX, 20 ppm de MIBC, en agua de mar.....	31
Figura 19: Reograma de pulpa compuesta por cuarzo y 10% de caolinita, a 65% de sólido y diferentes pH.....	32
Figura 20: Relación entre viscosidad aparente y pH a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} para una pulpa compuesta por cuarzo y 10% de caolinita, 65% de sólido y a diferentes pH.....	33
Figura 21: Reograma de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de caolinita y cuarzo, a 65% de sólido y pH 9.	34
Figura 22: Relación entre viscosidad aparente y concentración de caolinita a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} para una pulpa compuesta por 65% de sólidos, a pH 9. .	34
Figura 23: Reograma de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de montmorillonita y cuarzo, a 65% de sólido y pH 9.	35
Figura 24: Relación entre viscosidad aparente y concentración de montmorillonita a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} para una pulpa compuesta por 65% de sólidos, a pH 9. .	36
Figura 25: Reograma de pulpas compuestas por 100% caolinita a un 30% de sólidos, diferentes concentraciones de goma guar y pH 9.	37
Figura 26: Relación entre viscosidad aparente y concentración de goma guar a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} , para pulpa de caolinita a 30% de sólidos y pH 9.....	37

Figura 27: Reograma de pulpas compuestas por 100% montmorillonita a un 30% de sólidos, diferentes concentraciones de goma guar y pH 9.	38
Figura 28: Relación entre viscosidad aparente y concentración de goma guar a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} , para pulpa de montmorillonita a 30% de sólidos y pH 9..	39
Figura 29: Reogramas de pulpa compuesta por cuarzo y 10% de caolinita, a 65% de sólido.	48
Figura 30: Reogramas de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de caolinita y cuarzo, a 65% de sólido y pH.....	49
Figura 31: Reograma de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de montmorillonita y cuarzo, a 65% de sólido y pH.....	50
Figura 32: Reogramas de pulpas compuestas por 100% caolinita bajo la influencia de goma guar a pH 9.	51
Figura 33: Reogramas de pulpas compuestas por 100% caolinita bajo la influencia de goma guar a pH 9.	52



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes concentraciones de caolinita	43
Tabla 2: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes concentraciones de montmorillonita, en agua convencional	44
Tabla 3: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes concentraciones de montmorillonita, en agua de mar	44
Tabla 4: Pruebas de microflotación de calcopirita con presencia de caolinita a diferentes dosis de goma guar, en agua convencional	45
Tabla 5: Pruebas de microflotación de calcopirita con presencia de caolinita a diferentes dosis de goma guar, en agua de mar	46
Tabla 6: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes dosis de goma guar	47



NOMENCLATURA Y ABREVIASIONES

g: Gramos.

mm: Milímetro.

mL: Mililitro.

t: Tonelada métrica.

cm³: Centímetros cúbicos.

cte: Constante

s: Segundos.

min: Minutos.

ppm: Partes por millón (mg por litro de solución).

PAX: Amil Xantato de Potasio

IPXS: isopropil Xantato de sodio.

MIBC: Metil isobutil carbinol.

Cpy: Calcopirita.

pH: Potencial de hidrógeno.

% p/p: Porcentaje peso-pes



1 INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos más importantes en la concentración de minerales de cobre es la flotación, la cual consiste en aprovechar las diferencias de humectabilidad en la superficie de las partículas minerales y mediante la inyección de aire, adherir selectivamente las burbujas generadas a las partículas minerales hidrofóbicas, siendo colectadas como concentrado rico en el elemento de interés. Sin embargo, este proceso cada vez se vuelve más complejo debido al agotamiento de minerales de alta ley y al aumento de la presencia de arcillas.

El tratamiento de minerales de arcillas presenta grandes dificultades debido a las propiedades únicas que éstas poseen en su cristalografía y granulometría, cuyas características provocan que las partículas de arcillas generen modificaciones en la reología de la pulpa, junto a otros efectos que impiden una buena recuperación y ley de cobre en el concentrado, como lo son el efecto coating y la flotación de impurezas mediante arrastre mecánico.

Si bien la industria del procesamiento de minerales es consciente de la dificultad del tratamiento de minerales con altas cantidades de arcillas, actualmente no se dispone de medios eficaces para reducir los efectos perjudiciales de éstas. Sin embargo, en la minería no metálica se ha incorporado el uso de polisacáridos como depresantes de arcillas, como en el caso de la flotación de sales solubles, donde se ha recurrido al uso de goma guar como adsorbente de arcillas, cuyo método de acción es formar un revestimiento protector alrededor de estas partículas, evitando así el efecto 'coating' y el consumo excesivo de reactivo. Además, la goma guar es fundamental en la flotación de minerales metálicos del grupo del platino, actuando como depresante de minerales de desecho, naturalmente hidrofóbicos, como el talco. Donde el papel fundamental del polisacárido es adsorber la superficie del talco y hacerla hidrofílica para impedir su flotación.

En la industria del cobre no se ha evaluado de gran manera el uso de polímeros para solucionar las dificultades debido a la presencia de arcillas. Es por esto que esta investigación se centra en analizar el comportamiento de la goma guar en la flotación de cobre en presencia de mineral arcilloso, utilizando para aquello caolinita y montmorillonita.

1.1 Objetivos generales

Analizar los efectos de un reactivo orgánico de bajo peso molecular sobre la recuperación de cobre en presencia de minerales de arcillas.

1.2 Objetivos específicos

1. Mediante pruebas de microflotación, evaluar el efecto de la presencia de arcillas en la recuperación de calcopirita.
2. Determinar el efecto de la goma guar en la recuperación de calcopirita en presencia de arcillas, en agua convencional y agua de mar.
3. Evaluar la influencia de arcillas en la reología de la pulpa y determinar el comportamiento de la goma guar sobre ésta.
4. Relacionar el comportamiento que presentan las arcillas en la flotación de calcopirita con la reología de la pulpa, con y sin goma guar.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico que tiene por objetivo la separación de partículas minerales valiosas de aquellas de bajo interés. Este proceso consiste en adherir selectivamente burbujas de gas (aire o nitrógeno) a las partículas valiosas hidrofóbicas, siendo colectadas como un concentrado rico en el elemento de interés. Mientras que las partículas de baja hidrofobicidad conforman la cola y son eliminadas de la flotación (Figura 1).

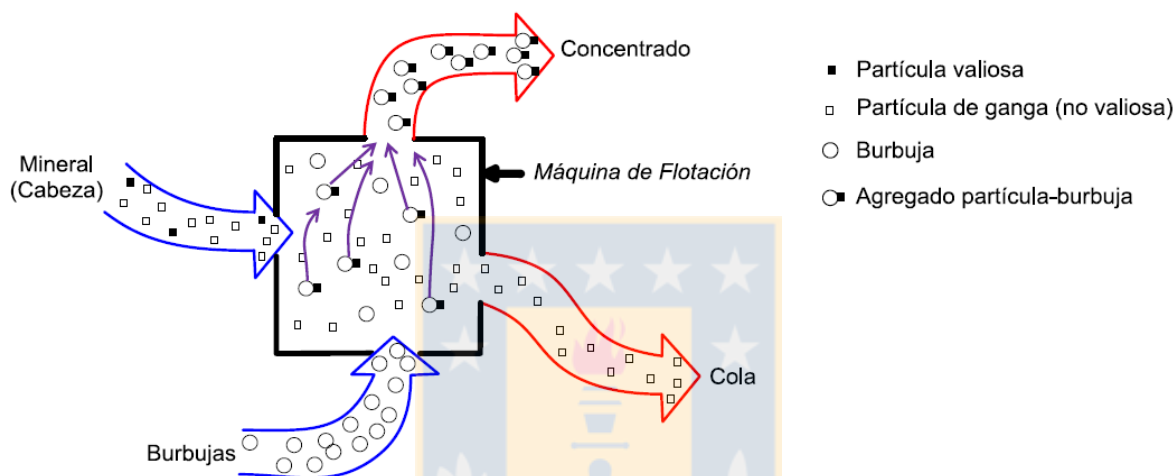


Figura 1: Máquina de flotación (Gutiérrez, 2015)

2.1.1 Hidrofobicidad

La fuerza impulsora del proceso de flotación es la hidrofobicidad. La hidrofobicidad es una propiedad de un material que impide la interacción de éste con las moléculas de agua, por lo tanto, una partícula hidrofóbica es repelida por el agua y no se moja con ella. Una forma de medir el grado de hidrofobicidad es a través del ángulo de contacto formado desde la tangente a una gota de líquido en su punto de confluencia entre las fases sólida, líquida y gaseosa (punto triple) y la interfase sólido-líquido (Figura 2). En equilibrio, este ángulo está gobernado por las leyes de la termodinámica y depende del equilibrio de energías superficiales entre las distintas fases.

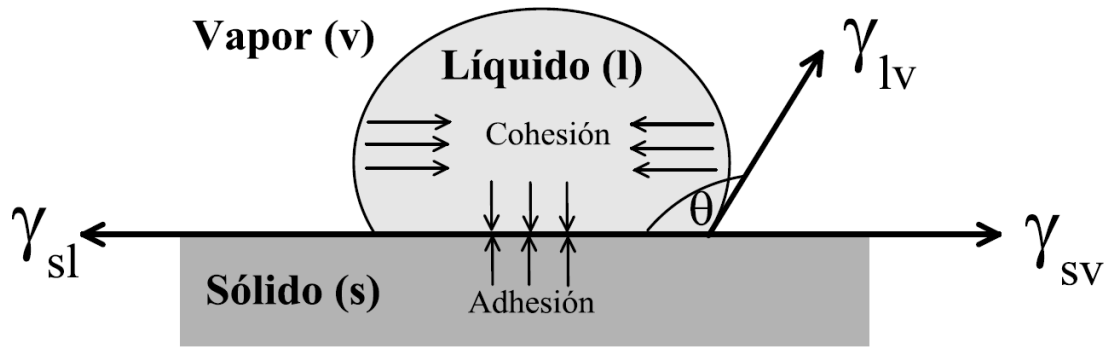


Figura 2: Equilibrio de fuerzas en el punto triple entre las fases sólido, líquido y gas (Gutiérrez, 2015).

Young (1805), propuso la existencia de un equilibrio de fuerzas en el punto triple, entre las fases sólido, líquido y gas, estableciendo una relación entre las tensiones superficiales sólido-gas, sólido-líquido, líquido-gas y el ángulo de contacto, dada por la ecuación (1)

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (1)$$

Donde:

γ_{sv} : tensión interfacial sólido-gas.

γ_{sl} : tensión interfacial sólido-líquido.

γ_{lv} : tensión interfacial líquido-gas.

θ : ángulo de contacto.

Si $\gamma_{sv} > \gamma_{sl}$ el ángulo θ de contacto será menor ($<$) que 90° y por lo tanto el líquido moja al sólido y la superficie es hidrofílica.

Si $\gamma_{sv} < \gamma_{sl}$, el ángulo θ de contacto será mayor ($>$) que 90° , por lo tanto la superficie es hidrofóbica y el agua no moja la superficie del sólido.

2.1.2 Modelo de doble capa eléctrica

En la flotación, para definir el tipo de reactivo a utilizar (catiónico o aniónico), es importante considerar la carga eléctrica superficial de las partículas en suspensión. En la etapa de

reducción de tamaño se produce una polarización superficial de las partículas. Las cargas superficiales de estas partículas hacen que algunos iones de carga opuesta se adsorban sobre éstas, formando una capa rígida adyacente a ella, llamada capa de Stern. Si bien, otros iones adicionales aún son atraídos por la superficie cargada, éstos son repelidos por la capa de Stern, generando un equilibrio dinámico que da origen a la formación de una capa difusa de contra-iones. La concentración de contra-iones es máxima cerca de la superficie y disminuye a medida que se aleja de ésta, hasta lograr un equilibrio con la concentración de contra-iones en el seno de la solución (Figura 3). Estas partículas con carga superficial y su entorno de carga opuesta generan un potencial eléctrico relativo a la solución, alcanzando un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente a medida que se aleja de ésta, tomando un valor cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial con la distancia desde la partícula es un indicador de la fuerza repulsiva entre ellas en función de la distancia, a las cuales, estas fuerzas entran en juego (Cervantes, 2011).

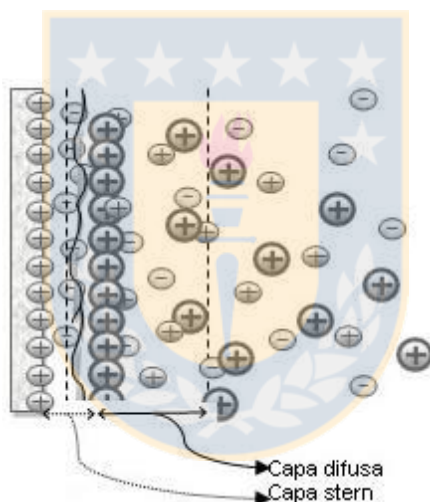


Figura 3: Distribución de cargas en solución en entorno de partícula cargada eléctricamente (De Hoyos, Martínez, & Farías, 2014).

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern (Figura 4). Este potencial es conocido como potencial zeta y puede ser positivo o negativo, el que puede ser medido fácilmente, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. El potencial zeta indica el signo de la carga superficial, el cual determina el tipo de colector necesario (catiónico o aniónico) para la flotación de estas partículas. El potencial zeta depende de la partícula y del medio en el que se encuentra, pudiendo ser modificado por los iones en solución y la adición de reactivos como activadores, colectores, depresores, etc.

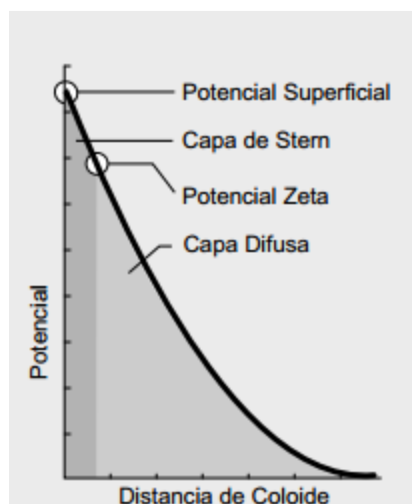


Figura 4: Punto de medición de potencial zeta (Cervantes, 2011).

2.1.3 Reactivos de flotación

Para poder realizar el proceso de flotación, se requiere del uso de reactivos químicos, tales como colectores, espumantes y modificadores. Dentro de la última categoría, se encuentran los activadores, depresores y modificadores de pH.

Colectores

Los colectores son sustancias químicas orgánicas que permiten inducir hidrofobicidad a las partículas. Están compuestos por una parte polar, la cual se adsorbe sobre la superficie del mineral, y una parte apolar, que corresponde a un radical hidrocarbonato que no reacciona con el agua (Bulatovic, 2007).

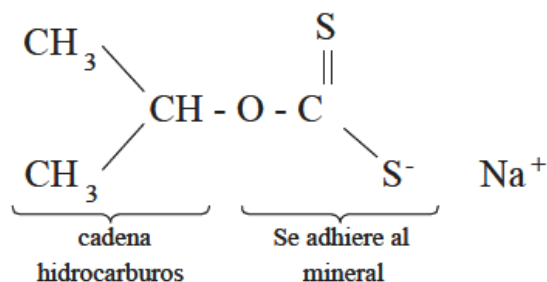


Figura 5: Isopropil xantato de sodio (Yianatos, 2005).

El ángulo de contacto formado entre las superficies del mineral y de la burbuja depende de la parte apolar del colector, es decir, mientras más larga sea la cadena del hidrocarburo, mayor será el ángulo de contacto y por lo tanto mayor será la hidrofobicidad adquirida por el mineral (Gutiérrez, 2015).

Los colectores se dividen en dos grandes categorías, los no ionizables y los ionizables. Estos últimos se dividen en dos grandes grupos (Gutiérrez, 2015), los cuales son:

i) Colectores aniónicos: Son el grupo más usado en la flotación. Se caracterizan porque su parte polar posee una carga negativa la cual se absorbe sobre una carga positiva. Entre los colectores más conocidos se encuentran los xantatos (ver Figura 5).

ii) Colectores catiónicos: Se caracterizan porque su parte polar posee una carga positiva, la cual se absorbe a una superficie con carga negativa. Entre los colectores más conocidos se tiene las aminas y sales cuaternarias de amonio. Estos colectores son menos selectivos que los aniónicos y rara vez quedan adsorbidos de manera absolutamente específica a un mineral determinado. Por ello es necesario potenciar su selectividad mediante reactivos reguladores (activadores, depresantes), variando el pH o dosificando correctamente.

Espumantes

Los espumantes son compuestos tensioactivos heteropolares que contienen un grupo polar y un radical hidrocarbonado, capaz de absorberse en la interfaz agua-burbuja (Figura 6).



Figura 6: Representación adhesión del espumante a una burbuja de aire (Yianatos, 2005).

En la flotación es necesario incorporar burbujas de aire, las cuales, se adhieren a las partículas hidrofóbicas y las separan de la ganga. La estabilidad de esta adherencia dependerá de la eficacia del espumante. El espumante además modifica las propiedades superficiales de la burbuja para reducir la coalescencia y evitar su crecimiento. Además, disminuye la tensión superficial del agua, lo cual ayuda a mantener la estabilidad del colchón de espuma formado en la superficie, evitando así el rompimiento de las burbujas. Los espumantes más comunes son los que contienen el grupo hidroxilo (OH^-) como por ejemplo el aceite de pino ($\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{OH}$), cresoles ($\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$) y el metilisobutil carbinol ($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{OH}$), más conocido como MIBC (Yianatos, 2005).

Modificadores

Son reactivos que nos permiten manejar las condiciones fisicoquímicas del sistema para mejorar la eficiencia del proceso de flotación (Gutiérrez, 2015). Dentro de esta categoría existen:

Reguladores de pH: Dentro de esta categoría se encuentra la cal (CaO), hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y ácidos fuertes como el ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Dispersantes: Son reactivos que permiten dispersar partículas finas y ultra finas de lamas y mejorar el proceso de flotación. Existen del tipo inorgánico como los poli fosfatos y poli silicatos, se hidrolizan y aumentan el pH. También existen del tipo orgánico como los polisacáridos (dextrina, almidones, etc.), polifenoles y poliacrilato.

Depresantes: Existen del tipo inorgánico como lo son los cianuros, silicatos, iones polivalentes (Ca y Mg) y el NaSH que previenen la interacción entre el colector y los minerales, y del tipo orgánico como lo son los polisacáridos, ácido húmicos, etc. Estos inducen hidrofiliidad en partículas hidrofóbicas.

Activadores: Dentro de esta categoría encontramos surfactantes catiónicos, cationes polivalentes y aniones polivalentes.

2.2 Reología de suspensiones

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia y describe la relación entre fuerza aplicada, deformación y tiempo. Cada vez que un cuerpo está sujeto a esfuerzo, sus partículas se desplazarán una con respecto de otra, lo cual es conocido como deformación. Basados en las características de la deformación, se pueden distinguir dos tipos de materiales, los fluidos y los materiales sólidos.

Un fluido se puede definir como un material que exhibe una deformación irreversible cuando es sometido a una fuerza externa, mientras que, un material sólido-elástico se deforma una vez que se le aplica esta fuerza, sin embargo, recuperan su forma original una vez que la fuerza cesa.

Nuestro estudio se enfoca en el comportamiento de pulpas arcillosas, por lo que a continuación nos centraremos en la reología de los fluidos o cuerpos deformables. La Figura 7 muestra una situación en la que un fluido dado se deforma bajo condiciones simples de esfuerzo de cizalle. Este tipo de deformación se caracteriza por un movimiento sucesivo de capas de fluido en planos paralelos con respecto a un plano de referencia, de tal manera que el desplazamiento de una capa es proporcional a la distancia de la capa de referencia (Whorlow, 1980). La capa de referencia de la Figura 7 se encuentra en el plano a velocidad cero y la relación dl/l se llama deformación de cizalle. La velocidad de cizalle es la tasa de cambio de la deformación de cizalle ($dl/l/dt$) resultante de un esfuerzo de cizalle, y se expresa en unidades de segundos recíprocos (s^{-1}). El esfuerzo de cizalle se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (Pa-Pascal).

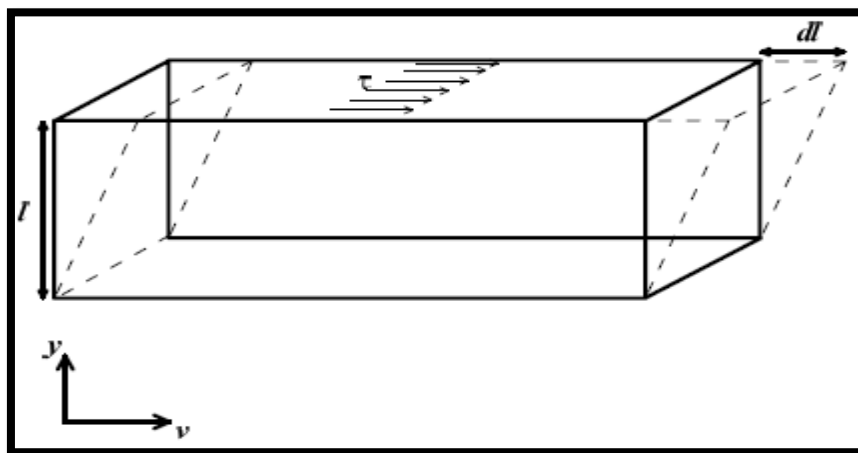


Figura 7: Esquema de una deformación de cizalle simple

- v = velocidad (m/s)
- y = posición vertical (m)
- l = distancia entre placas paralelas (m)
- τ = esfuerzo de cizalle (Pa).

2.2.1 Curvas de flujo

Una manera ampliamente usada para representar el comportamiento reológico de fluidos es mediante curvas de flujo o reogramas (Figura 8), el cual muestra la relación entre el esfuerzo de cizalle y la velocidad de cizalle (Whorlow, 1980; Krieger & Maron, 1951).

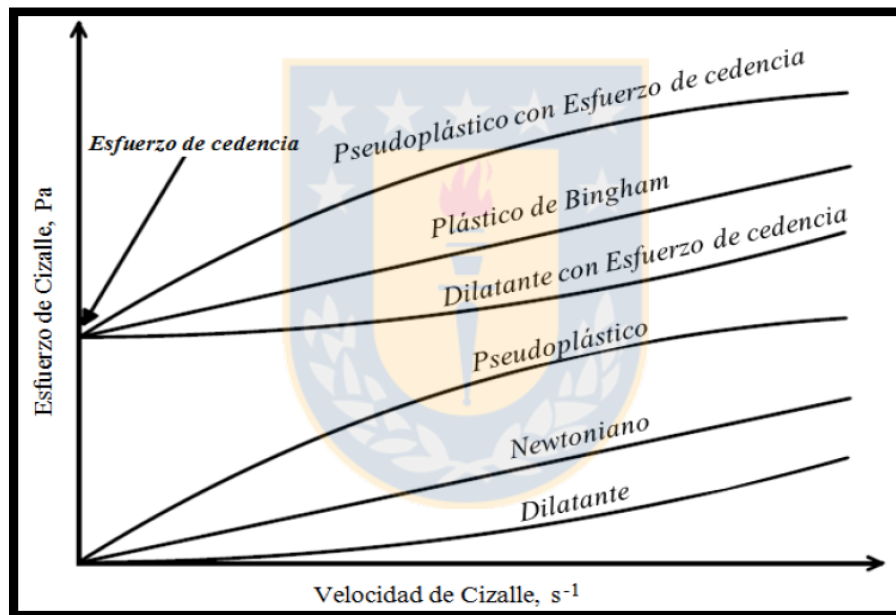


Figura 8: Relaciones comunes entre esfuerzo de corte y velocidad de cizalle.

El tipo de comportamiento más simple se denomina comportamiento newtoniano. En este caso la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de cizallamiento es una línea recta a partir de cero (Ej. suspensiones diluidas de partículas esféricas que no interaccionan). A los fluidos que muestran una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de cizallamiento, se les llama fluidos no newtonianos. Un ejemplo común de estos fluidos son los fluidos pseudoplásticos, en los que se observa una disminución en la viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de cizallamiento. Otro caso, pero menos

común, son los fluidos con un comportamiento dilatante, los cuales se caracterizan por un aumento de viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de cizalle. En el caso de las suspensiones que muestran un comportamiento en el cual existe esfuerzo de cedencia, uno de los casos más típicos es el comportamiento del tipo Bingham. Este comportamiento se caracteriza por la aparición de una curva de flujo lineal observada después del esfuerzo de cedencia. En contraste, dentro de los fluidos que muestran una curva de flujo no lineal después que el límite elástico se supera están los pseudoplásticos con esfuerzo de cedencia y los dilatantes con esfuerzo de cedencia (Van Wazer, Lyons, Kim, & Colwell, 1963).

Viscosidad

En el caso de los fluidos Newtonianos, donde la relación entre esfuerzo de cizalle y velocidad de cizalle es lineal, la viscosidad corresponde a la pendiente de esta recta, cuyo comportamiento es descrito por la Ley de viscosidad de Newton:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = cte. \quad (2)$$

Para los fluidos no Newtonianos la relación es no lineal. La “viscosidad aparente” se define como la razón entre el esfuerzo de cizalle y la velocidad de cizalle con unidades de Pascal-segundo (Pa-s). La viscosidad aparente en general se especifica a una velocidad de cizalle dada y se expresa como:

$$\eta_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

2.3 Arcillas

Las arcillas son minerales filosilicatos, cuya estructura se encuentra principalmente compuesta de minerales de grano fino, de tamaños coloidales y comprenden capas de sílice tetraédrica (T) y capas de alúmina octaédricas (O) que se unen en ciertas proporciones: 1:1 (T-O) y 2:1 (T-O-T) (Theng, 2012). Además, exponen dos superficies cristalográficamente diferentes: las caras, que tienden a cargarse negativamente y los bordes, que llevan una carga que cambia de positivo a negativo en función del pH (Van Olphen, 1977).

Cuando las partículas coloidales se dispersan en agua pueden no ser afectadas por la gravedad y las interacciones con otras partículas, de tamaño similar o mayor, son controladas por fuerzas atractivas o repulsivas. Las fuerzas entre partículas incluyen típicamente van der Waals y fuerzas repulsivas de doble capa como se describe por la teoría de DLVO (Derjaguin & Landau, 1941; Verwey & Overbeek, 1948).

Debido a las características anisotrópicas de las arcillas y a las interacciones que presentan al suspenderse en agua, éstas pueden formar tres diferentes modos de agregación: borde-cara (EF), cara-cara (FF) y borde-borde (EE) (Gungor, 2000; Schoonheydt & Johnston, 2006). Los del tipo FF conduce a la formación de agregados estructurados laminares de bajo volumen aparente por placa y se caracteriza por presentar bajos niveles de tensión en la suspensión. Las asociaciones EF y EE, por otra parte, conducen a estructuras tridimensionales de "casa de tarjetas" donde el volumen ocupado o barrido por una partícula individual es maximizado, y la fracción de volumen aparente de la suspensión es también un máximo.

2.3.1 Clasificación de arcillas

Las arcillas se pueden clasificar de acuerdo a sus características y comportamientos al dispersarlas en agua. Una de sus características más importantes es su hinchabilidad, cualidad fundamental en la reología de la pulpa. La caolinita (no hinchable), con una estructura 1: 1, y la montmorillonita (hinchable), con una estructura 2:1, se eligieron en este estudio para representar dos tipos de arcillas típicos en la industria de depósito de mineral.

Caolinita

Mineral de arcilla no hinchable, cuya estructura $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8]$ está compuesta por una lámina octaédrica de gibbsita $Al(OH)_3$ unida a una lámina tetraédrica de sílice, como se aprecia en la Figura 9. Al romperse, se forman dos superficies diferentes, la superficie plana basal resulta de la escisión de una capa de otra, mientras que los bordes surgen debido a la ruptura de los enlaces iónicos o covalentes dentro de las capas. La caolinita consiste en una capa "T" y "O" en una proporción de 1:1. Las capas sucesivas T-O se superponen y se mantienen unidas por fuerzas débiles de van der Waals, formando láminas extendidas. Además, tiene baja reactividad química y su capacidad de intercambio aniónico es típicamente más alta que su capacidad de intercambio catiónico.

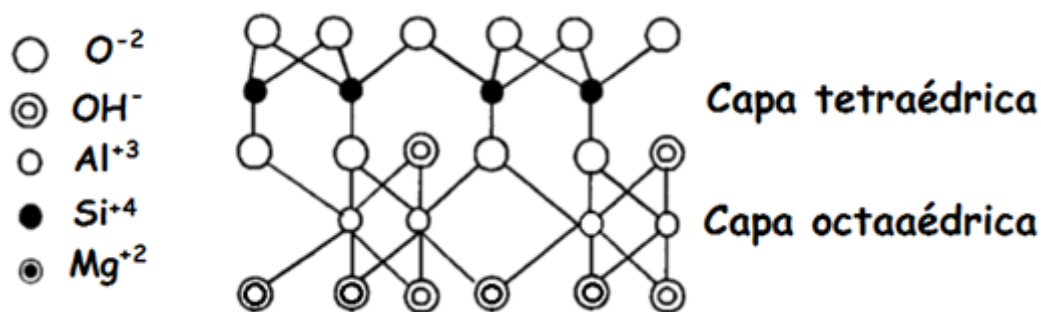


Figura 9: Estructura cristalinoquímica de la caolinita, adaptada de Flegman y George(1975)

Montmorillonita

La montmorillonita es un mineral de arcilla hinchable y es el miembro más conocido del grupo de la esmectita. La estructura de la montmorillonita cuenta con dos tercios de los sitios octaédricos ocupados por cationes trivalentes. La montmorillonita dioctaédrica tiene su carga estructural originada por la sustitución de Mg^{+2} por Al^{+3} en la lámina octaédrica. La fórmula estructural idealizada para la montmorillonita es $(Na,Ca)_0,3(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ (ver Figura 10) (Lagaly & Ziesmer, 2003). La carga negativa se equilibra con cationes intercalados entre las unidades estructurales y estos cationes pueden ser iones de tierra alcalina Ca^{+2} y Mg^{+2} o el metal alcalino Na^{+} . Cuando los cationes Na^{+} están exclusivamente en intercambio con la superficie de la montmorillonita, la arcilla se conoce como Na^{+} -montmorillonita o Bentonita (especialmente en la literatura de fluidos de perforación). La red en expansión puede proporcionar a la arcilla un área específica de hasta $800 \text{ m}^2/\text{g}$.

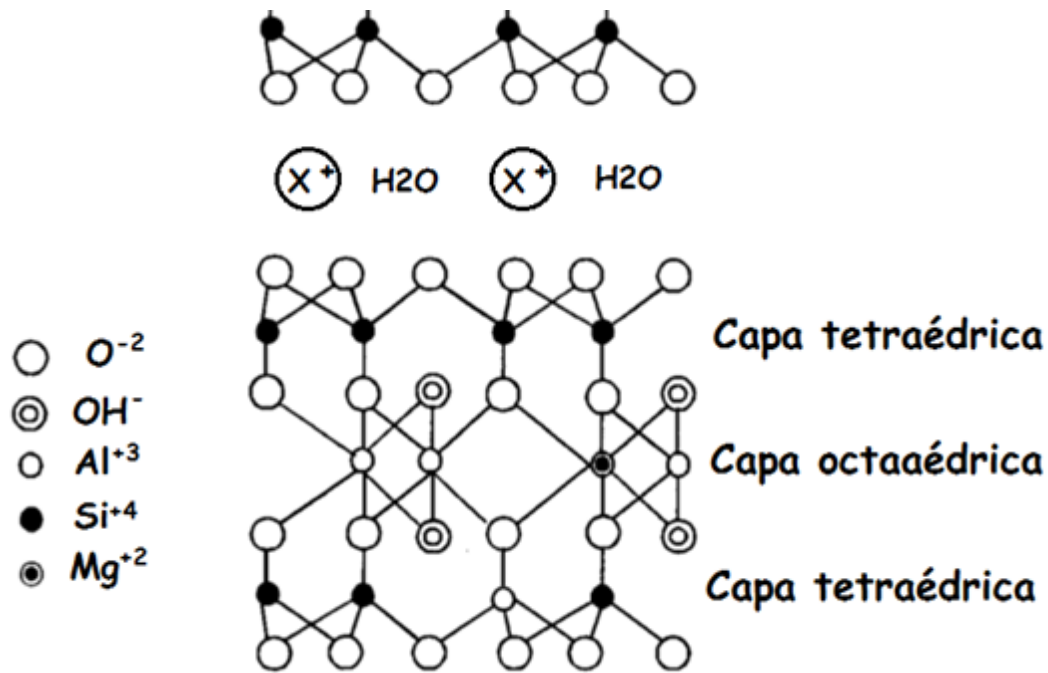


Figura 10: Estructura de la montmorillonita de acuerdo a Hofmann, Endell, Wilm, Marshall, Maegdefrau and Hendricks

2.3.2 Efecto de arcillas en flotación

Efecto recubrimiento: El efecto de recubrimiento es producido cuando las arcillas se adhieren sobre la superficie de las partículas y el mineral valioso, lo cual conduce a una disminución en la ley del concentrado en operaciones de flotación. Este efecto es usualmente causado por atracciones electrostáticas entre superficies del mineral y las partículas que componen la ganga. En este sentido, el pH, potencial zeta, y tamaño de partículas son 'variables clave' para controlar este fenómeno. También se ha observado que el uso de agua salinas podría mitigar el 'efecto de recubrimiento' de algunas arcillas. (Wang, Peng, Nicholson, & Lauten, 2015).

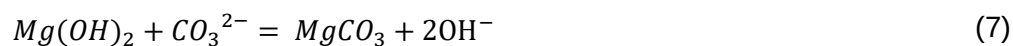
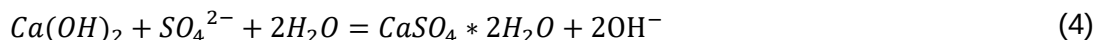
Consumo de reactivos: La presencia de arcillas puede incrementar significativamente la cantidad requerida de reactivos en etapas de flotación. Este problema puede ser reducido con reactivos que puedan adherirse selectivamente a las arcillas que perjudican el proceso, promoviendo una depresión. En este sentido, parte de la solución corresponde a seleccionar reactivos 'a la medida', de acuerdo a la mineralogía de las arcillas. (Liu & Peng, 2015).

Reología: La viscosidad y el esfuerzo de cedencia determinan la movilidad de partículas y burbujas en la suspensión; dispersión del gas; y adhesión partícula-burbuja. La vía más simple de controlar las propiedades reológicas de las pulpas es a través de su concentración de sólidos, que puede ser fácilmente manipulada. Sin embargo, la viscosidad y el esfuerzo de cedencia son fuertemente influenciadas por la presencia de arcillas y distribución de tamaño de las partículas (Forbes, Davey, & Smith, 2014; Zhang & Peng, 2015), por lo tanto, para lograr un adecuado control es necesario realizar una correcta caracterización mineralógica. Además, se debe tener presente que tanto el pH y del tipo de reactivos impactan considerablemente en la fluidez de las suspensiones.

2.4 Agua de mar

2.4.1 Precipitación coloidal de iones secundarios

El agua de mar contiene iones secundarios como los iones calcio, magnesio sulfato, bicarbonato, borato, etc. Este contenido de iones puede intervenir en la química de superficie, trayendo como consecuencia un cambio en la flotabilidad de alrededor de 26 minerales. Es posible que a pH mayores a 10 algunos iones secundarios puedan producir precipitados coloidales, que al adsorberse sobre la superficie de partículas hidrofílicas, promuevan la depresión de éstas. Las principales reacciones de precipitación entre el agua de mar y cal bajo condiciones de flotación son:



2.4.2 Efecto buffer y consumo de cal

La cal se utiliza generalmente en la industria minera del cobre para ajustar el pH de la pulpa de flotación a aproximadamente 11 con el fin de depresar la pirita. Sin embargo, el efecto inmediato de realizar flotación en agua de mar es el aumento dramático de la cal necesaria para obtener el régimen convencional de pH de flotación. Esto se debe a que el contenido iónico del agua de mar le da fuertes propiedades de amortiguación, que surge de la presencia de iones pares bicarbonato/carbonato (HCO_3^- / CO_3^{2-}). (Castro, Ramos, Cancino, & and Laskowski, 2012)

La alcalinidad del agua de mar y de la mayoría de las aguas subterráneas es causada por iones bicarbonatos disueltos (HCO_3^-). Las reacciones más importantes para mantener el balance ácido-base en el agua de mar son el ión bicarbonato/ácido carbónico. Las ecuaciones 8, 9 y 10 son las reacciones que describen este fenómeno.



En este sistema, adiciones ácidas son neutralizadas por el carbonato para dar una solución de bicarbonato. Si la concentración de ácido disminuye, por el contrario, el ion bicarbonato se disociará para formar carbonato controlando el pH.

Estudios realizados para distintas proporciones de agua de mar (Landeros, 2010) arrojaron comportamientos esperados de una solución buffer, efecto que se explica fundamentalmente por la relación entre los iones carbonato y bicarbonato. Landeros mostró que la presencia de agua de mar en el sistema amortigua la variación de pH. El pH máximo que alcanza el sistema disminuye cuando aumenta la proporción de agua de mar. Los resultados cinéticos mostraron que la tasa de crecimiento del pH disminuye por la acción del agua de mar en el sistema (ver Figura 11).

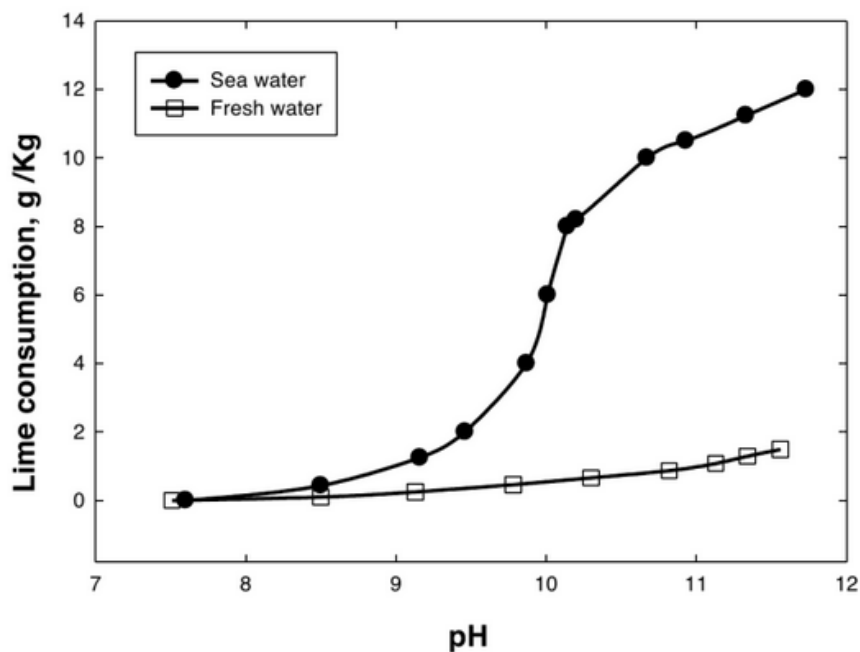


Figura 11: Consumo de cal (Castro, 2012)

2.5 Goma guar

2.5.1 Estructura

La goma guar es un polisacárido de reserva extraído de la semilla del arbusto leguminoso *Cyamopsis tetragonoloba*, donde actúa como almacén de alimentos y agua. Está formada por polímeros polidispersos no iónicos en forma de varilla formados por moléculas constituidas por unos 10.000 residuos (ver Figura 12). La goma guar es una galactomannana similar a la goma de algarroba que consiste en una cadena principal de β -D-manopiránina unida a 1-4 con puntos de ramificación desde sus posiciones 6 ligadas a α -D-galactosa (es decir, 1-6 \ Alpha - D - galactopiranos). Hay entre 1,5 y 2 residuos de manosa por cada residuo de galactosa.

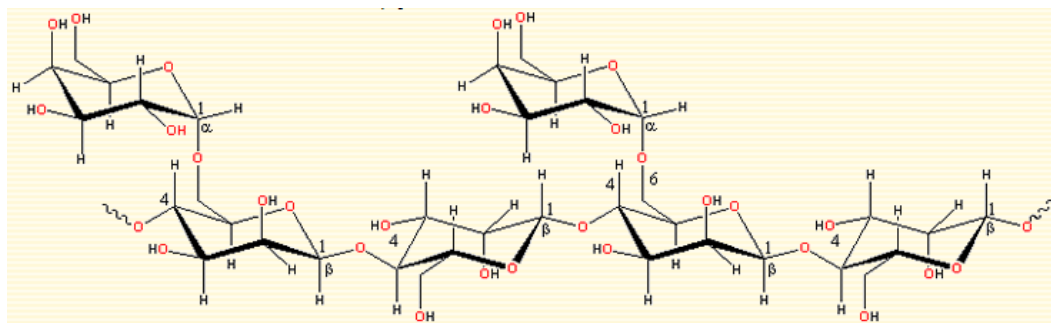


Figura 12: Estructura goma guar

2.5.2 Aplicaciones de la goma guar en minería no metálica

La goma de guar tiene una serie de aplicaciones en la minería y la industria de procesamiento de minerales. En la flotación de espuma de minerales metálicos de metales comunes y de platino, la goma guar es utilizada como un depresante de minerales de desecho naturalmente hidrófobos, como el talco. El papel del polisacárido es adsorberse sobre la superficie del talco, hacerla hidrófila e impedir su flotación. Una amplia variedad de gomas guar modificadas están disponibles para esta aplicación. (Harris, Mapasa, Canham, & Bradshaw, 1999).

En otra importante aplicación, la goma guar se emplea como un "blinder" de minerales ultrafinos insolubles en agua, en la flotación de los minerales de potash. Los minerales de potash normalmente contienen más del 90% de los minerales de silvita (KCl) y halita (NaCl) con un pequeño porcentaje de sedimentos insolubles en agua, representados principalmente por arcillas y minerales de carbonato. El objetivo del proceso es separar selectivamente la silvita de la halita, rechazando completamente los slimes. Ya que tanto la silvita y la halita son muy solubles en agua, toda la flotación de potasa se lleva a cabo en una salmuera saturada de KCl-NaCl. La silvita se flota de la halita con el uso de una amina que también muestra una alta afinidad hacia los lodos no deseados. Por lo tanto, el método de acción de la goma guar en este sistema de alta fuerza iónica es adsorberse sobre los minerales ultrafinos, formando así un revestimiento protector alrededor de estas partículas, y permitiendo al colector interactuar selectivamente con la silvita (KCl). En ausencia de goma de guar, el consumo de amina sería muy alto y la selectividad del colector del tipo de amina hacia el KCl sería drásticamente reducido.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Minerales

3.1.1 Muestra de calcopirita

Como la calcopirita se encontraba en rocas de gran tamaño, ésta se debió reducir para obtener finalmente una muestra inferior a 100# y superior a 200#. Para esto, se utilizó un mortero de acero, donde fue molida hasta que el tamaño fuera adecuado para seguir moliendo en un mortero de porcelana. Después, la muestra fue sometida a un proceso de tamizaje, en el cual se utilizó un tamiz de 100# y otro de 200#. La muestra de tamaño superior a 100# (150 micrones) fue sometida nuevamente a reducción de tamaño, mientras que la de tamaño inferior a 200# (75 micrones) fue rechazada. Una vez que la muestra ya se encontró con su tamaño óptimo de trabajo (-150+75 micrones), fue sometida a una etapa de flotación de limpieza con el fin de eliminar las impurezas presentes como cuarzo y pirita, la cual se realizó en una celda EDEMET bajo las siguientes condiciones:

- 30% sólidos
- 15 g/t espumante (MIBC)
- 25 g/t Isopropil xantato de sodio (ISPX)
- pH 11,5
- Tiempo de acondicionamiento: 2 min
- Tiempo de flotación: 10 min
- Paleteo cada 5 segundos.

Posteriormente tanto la cola como el concentrado fueron filtrados y sometidos a una etapa de lavado con NASH para remover los reactivos residuales de la flotación.

Lavado con NaSH

Inicialmente se preparó una solución de NaSH con una concentración de 1×10^{-3} M. para ello se extrajo 1 mL de NaSH al 42,95% v/v y se diluyó en 12 mL de agua destilada, agitándose por 5 minutos. Luego, de esta mezcla se extrajeron 2 mL y se volvió a diluir en 2 L de agua destilada; agitándose nuevamente durante 5 minutos. Una vez preparada la solución de lavado, el mineral se depositó en un vaso precipitado de 700 mL y se le agregó aproximadamente 400 mL de la solución de lavado y se sometió a agitación mecánica durante 15 min. Pasado este tiempo, se dejó reposar esta mezcla durante 24 horas para

luego ser filtrado en un tamiz de 400# y lavada con abundante agua destilada para remover los iones sulfhidratos que pudieran encontrarse aún sobre las partículas de mineral. Una vez finalizado el proceso de lavado, el mineral húmedo fue rociado con acetona para secar la muestra de manera rápida. Se evitó secar la muestra en estufa con el fin de evitar una posible oxidación de la superficie del mineral. La muestra ya seca, se selló al vacío y se guardó en refrigerador para evitar una oxidación en la superficie del mineral.

3.1.2 Muestra de arcillas

Tanto la montmorillonita, como la caolinita ya se encontraban con granulometría fina, por lo tanto, solamente se sometió a un proceso de tamizaje, utilizando un tamiz de 300# para su posterior uso.

3.1.3 Cuarzo

La muestra de cuarzo se obtuvo de 'donde capo'. Este se encontraba a un tamaño menor a 1,1 mm y mayor a 0,6 mm, a un 98% de pureza. Como se necesitaba una granulometría fina para su uso en las pruebas de reología, se sometió a un proceso de reducción de tamaño mediante un mortero de acero.

3.2 Reactivos

Los reactivos utilizados para el trabajo fueron colectores, espumantes y modificadores de pH, cuya descripción se realiza a continuación:

Colectores

Isopropil xantato de sodio (ISPX)

Amil xantato de potasio (PAX)

Espumantes

Metil Isobutil Carbinol (MIBC) como único espumante

Modificadores de pH

HCl

Cal (CaO)

Depresante

Goma guar

3.3 Equipos y procedimientos

Para poder tener control de los diferentes factores que influyen en la efectividad y eficiencia de los reactivos, se realizó la preparación de éstos el mismo día en el que se utilizaron, y de esta forma poder tener resultados más confiables y obtener una buena reproducibilidad de los experimentos.

3.3.1 Solución madre de goma guar

La goma guar utilizada para este trabajo se obtuvo de Nutrigood a la forma de polvo. Para las pruebas realizadas se preparó una solución madre de 750 ppm, mezclando 0,1875 g de goma guar con 250 mL de agua destilada en un vaso precipitado y posteriormente se dejó agitando intensamente por 5 horas con un agitador magnético, de manera tal que la goma guar se disolviera completamente.

3.3.2 Purificación de PAX

La purificación de amilxantato de potasio (PAX) se realizó siguiendo el método propuesto por Rao (1971) que consiste en la disolución y re-cristalización del xantato usando éter etílico y acetona.

Los materiales para realizar este procedimiento fueron los siguientes:

- Amilxantato de potasio
- Balanza analítica
- Mortero de porcelana

- Crisol
- Embudo
- 100 ml de acetona
- Placa calefactora con agitación magnética
- Agitador magnético
- Tubo refrigerante de espiral
- Matraz esférico de 250 ml
- 1 L de éter etílico
- Matraz Kitasato
- Embudo Büchner
- Papel filtro
- Bolsa de plástico

El procedimiento para la purificación de PAX consistió en:

1. Montar el tubo refrigerante en el matraz que contiene 100 ml de acetona y el agitador magnético, posándolo sobre la placa calefactora.
2. Moler en el mortero 5 g de PAX.
3. Iniciar la agitación y calentamiento de la acetona hasta 55°C, una vez alcanzada esta temperatura se agregan los 5 g de PAX.
4. Mantener la temperatura constante de 55°C por 20 min, se debe observar un precipitado en el fondo del matraz de color blanco-amarillo.
5. En paralelo, montar el sistema de filtración, compuesto por el embudo y matraz kitasato.
6. Pasado 20 min, filtrar la solución en caliente y dejar enfriar bajo campana hasta temperatura ambiente.
7. Agregar 600 ml de éter etílico, donde se observa la precipitación del PAX purificado.
8. Filtrar y lavar el precipitado formado con éter etílico para remover algún residuo de la solución con acetona.
9. Envasar en una bolsa de plástico al vacío y refrigerar para evitar cualquier contaminación, descomposición u oxidación.

3.3.3 Solución de PAX y MIBC

Se preparó una solución madre de PAX y MIBC, en un matraz de 100 mL con agua convencional o agua de mar, según correspondiera. El procedimiento de preparación de esta solución se detalla a continuación:

1. Agregar 50 mL de solvente en un matraz de 100 mL.
2. Adicionar 60 mg de MIBC y 75 mg de PAX al matraz y se afora con el mismo solvente.
3. Agitar la solución durante 15 min en la placa con agitador magnético.

3.3.4 Pruebas de Microflotación

Las pruebas de microflotación se llevaron a cabo en una celda Patridge-Smith de 150 cm³, utilizando aire comprimido como fase gaseosa a un caudal de 80 cm³/min. El tiempo de flotación fijado para todas las pruebas de microflotación fue de 2 min. Para la alimentación de la celda se preparó una solución de 150 mL en un vaso de precipitado con agua potable o agua de mar, según correspondiera la prueba. En las pruebas de microflotación se ajustó el pH usando cal (CaO) o ácido clorhídrico (HCl), según correspondiera, homogeneizando con agitación magnética hasta estabilizar el pH antes de adicionar la mezcla calcopirita – arcilla. Para cada ensayo se adicionó 1 gramo de muestra sólida y se acondicionó durante 3 min, posteriormente se dosificó la goma guar a la solución hasta obtener la concentración correspondiente (0, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 g/t), posteriormente se dosificaron los reactivos MIBC y PAX para obtener concentraciones de 20 y 25 ppm respectivamente y se dejaron acondicionando durante 2 minutos. Finalmente, la solución de 150 mL se traspasó a la celda de microflotación para llevar a cabo la flotación durante 2 min.

En las pruebas de microflotación, el concentrado se colectó por la parte superior con una remoción de espuma cada 5 segundos, mientras que la cola que se depositaba en el fondo de la celda era vaciada en un vaso de precipitado. Posteriormente, tanto el concentrado como la cola fueron llevados a un proceso de tamizaje con un tamiz 270# para separar la calcopirita de la arcilla debido a la diferencia de sus granulometrías. Todo el mineral pasante correspondió a la arcilla, mientras que el mineral que quedó correspondió a la calcopirita pura, la cual fue filtrada al vacío en un matraz Kitasato, con un embudo Büchner, y llevados

al horno de secado para obtener la recuperación en masa de calcopirita en la flotación según la ecuación:

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{Masa Calcopirita Concentrado}}{(\text{Masa Calcopirita Concentrado} + \text{Masa Calcopirita Cola})} * 100 \quad (11)$$

3.3.5 Pruebas de reología

Las mediciones reológicas se llevaron a cabo utilizando un viscosímetro Haake RV-20 conectado a un sensor MV2-P (ver Figura 13). Este sensor estaba compuesto por dos cilindros concéntricos, de diámetro interior 40.08 mm y diámetro exterior de 41.04 mm (gap 0.96 mm). Las superficies de los cilindros utilizados eran rugosas con la finalidad de reducir al mínimo el fenómeno de deslizamiento. Las mediciones se realizaron con diferentes mezclas de mineral y reactivos, para estudiar el efecto que éstos tienen en la reología de la pulpa.

Para evaluar la influencia de arcillas en la reología de pulpa minerales, se realizaron pruebas reológicas utilizando mezclas de cuarzo y caolinita/montmorillonita. Estas pruebas se realizaron considerando un porcentaje de sólidos constante de 65%, y variando la concentración de arcilla desde 0 hasta 20 % respecto a la masa total de sólido. El rango de pH estudiado fue de 7 a 11.

Para evaluar la influencia de la goma guar en la reología de pulpa minerales con altos contenidos de arcillas, se realizaron pruebas utilizando suspensiones de caolinita o montmorillonita puras. Estas pruebas se realizaron considerando un porcentaje de sólidos constante de 30%, variando la concentración de goma guar entre 0 y 500 g/t y a pH 9.

Los reogramas fueron obtenidos aumentando la velocidad de cizalle entre 0 y 350 s⁻¹ en 30 s. En las mediciones de parámetros reológicos de debió procurar que la pulpa presentara homogeneidad, por lo tanto, era importante evitar la sedimentación de sólidos mientras se ejecutaba la prueba. Para esto, la pulpa se debió agitar manualmente en el cilindro y en el menor tiempo posible traspasarlo al sensor MV2-P.

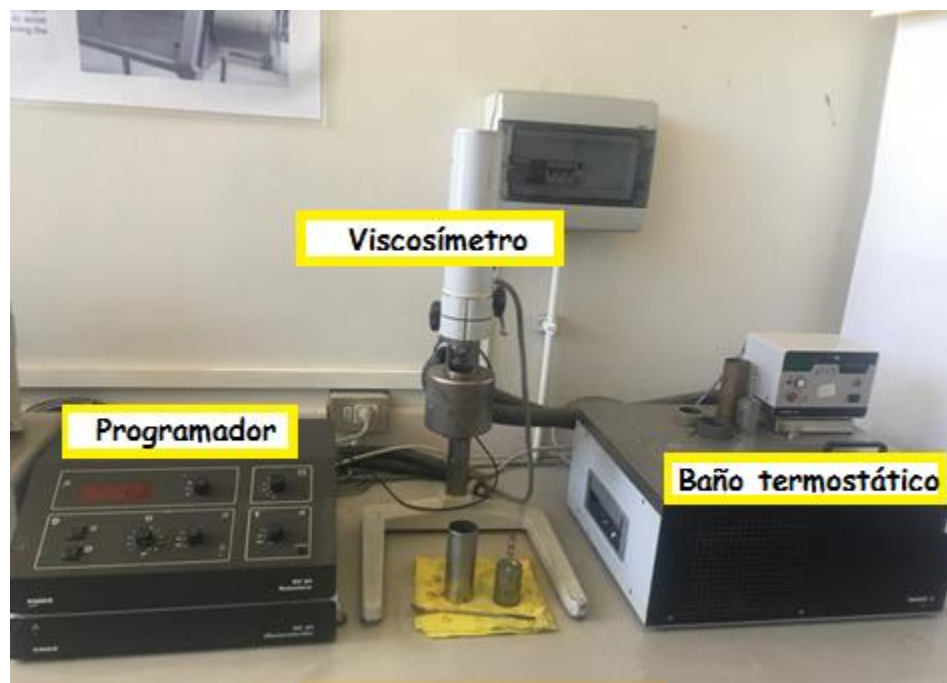


Figura 13: Reómetro Haake RV-20 y sensor MV2-P



4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Pruebas de microflotación

En esta sección se muestran los resultados de microflotaciones de calcopirita en presencia de dos tipos de arcillas: caolinita y montmorillonita. Consecuentemente, se evalúa la acción del polímero orgánico Goma Guar como agente depresor de arcillas, tanto en agua dulce como en agua de mar.

4.1.1 Impacto de caolinita en la recuperación de calcopirita

En la Figura 14 se observa claramente el efecto perjudicial que provoca la presencia de caolinita sobre la recuperación de calcopirita. Independiente del pH, la recuperación de cobre disminuye mientras aumenta la proporción de la caolinita. Este comportamiento se puede explicar por dos motivos: i) las arcillas tienen la capacidad de consumir parte del reactivo empleado como colector, por lo tanto, la eficacia del proceso de hidrofobizar la superficie del mineral de cobre disminuye, perdiendo parte de su flotabilidad; ii) las arcillas generan el efecto 'coating', es decir, recubren a la superficie de la calcopirita, generando agregados que inducen su depresión.

Dada la compleja estructura anisotrópica de las partículas arcillosas, en donde las caras presentan cargas diferentes a los bordes, que a su vez dependen del pH, es lógico suponer que variaciones en el pH de las pulpas tienen consecuencias significativas en flotación. Cabe destacar que normalmente en suspensiones minerales libres de arcilla, la flotabilidad de calcopirita tiene poca sensibilidad al pH. Sin embargo, esto no se manifiesta en ambientes arcillosos y es a condiciones altamente alcalinas, que comúnmente se efectúan las operaciones industriales, en donde la recuperación de cobre se ve más afectada.

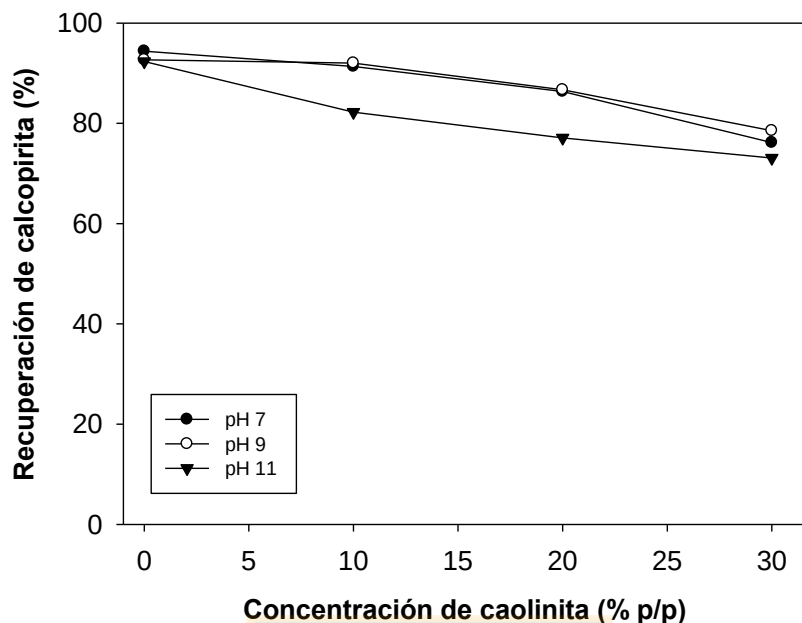


Figura 14: Efecto de la concentración de caolinita sobre la recuperación de calcopirita a diferentes condiciones de pH. Colector: 25 ppm de PAX, Espumante: 20 ppm de MIBC.

4.1.2 Impacto de montmorillonita en la recuperación de calcopirita en agua convencional y agua de mar.

En la Figura 15 se muestra el efecto de la presencia de montmorillonita sobre la recuperación de calcopirita en agua convencional y agua de mar. Extrañamente no se aprecia un impacto de esta arcilla, sugiriendo que tanto su interacción con el colector, como el efecto de recubrimiento sobre el mineral son despreciables. No obstante, una de las características fundamentales de la montmorillonita es modificar la reología del sistema debido a su hinchabilidad, sin embargo, la concentración de sólido empleada en esta investigación es menor al 1% p/p, generando un régimen de flujo Newtoniano, lo cual libera el efecto de la reología sobre la flotabilidad del mineral valioso. En este sentido, se debe tener precaución al desear extrapolar estos resultados a condiciones reales, en donde las altas concentraciones de sólido (superior al 30%) con elevada presencia de arcillas provocan comportamientos de flujo que son no newtonianos. Esto eventualmente generaría impactos significativos en el proceso e intensificaría el efecto perjudicial de este tipo de arcillas.

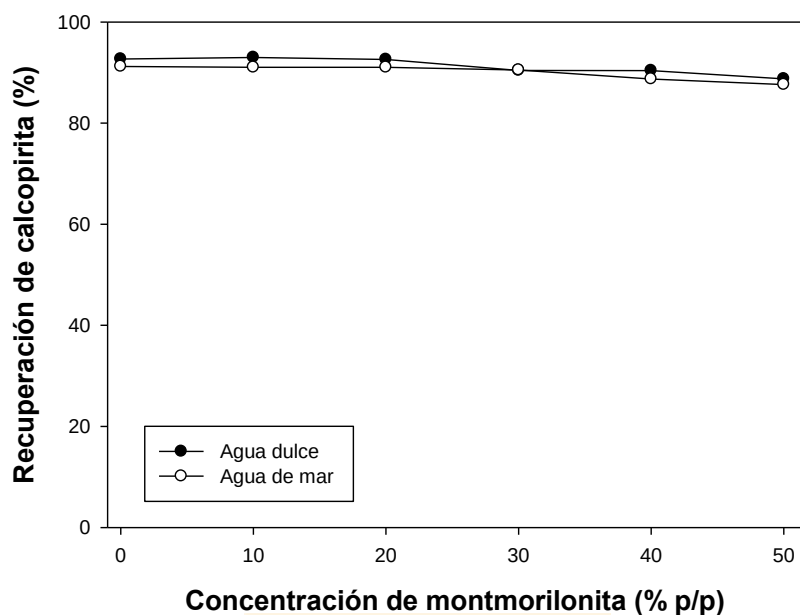


Figura 15: Efecto de la concentración de montmorillonita sobre la recuperación de calcopirita tanto en agua dulce como en agua de mar. Colector: 25 ppm de PAX, Espumante: 20 ppm de MIBC.

4.1.3 Goma guar como agente depresante de caolinita

A modo de contrarrestar los efectos perjudiciales de las arcillas se utilizó un polímero orgánico de bajo peso molecular. En este sentido, los resultados que aparecen en la Figura 16 son bastante promisorios dado que independiente del pH, la goma guar actúa como un reactivo eficaz para mejorar la recuperación de cobre. Interesante es el hecho de que su funcionamiento es más eficiente a condiciones altamente alcalinas (pH 11), en donde las arcillas muestran su efecto más perjudicial, y a su vez es el rango de pH más común en que se efectúan las etapas de flotación rougher.

La explicación se fundamenta debido a la capacidad que tiene el floculante para adherirse sobre las partículas de caolinita, promoviendo su aglomeración. Esto reduce la superficie expuesta de las arcillas, disminuyendo su adhesión al mineral valioso y a los colectores de cobre. La influencia del pH es notoria, ya que mientras éste aumenta, la recuperación de calcopirita también aumenta.

A pH 7, no existe una tendencia clara en la recuperación de cobre al trabajar a concentraciones inferiores a 500 g/ton, sin embargo, a concentraciones superiores se

aprecia un claro aumento en la recuperación. Por otra parte, a pH 11 se observa que el efecto de la goma guar se activa incluso desde concentraciones inferiores a 50 g/ton.

Si bien se observa grandes diferencias en la recuperación de cobre respecto al pH, al trabajar a concentraciones muy altas de goma guar (superiores a 2000 g/ton), los valores de las recuperaciones de calcopirita comienzan a asemejarse para todos los casos.

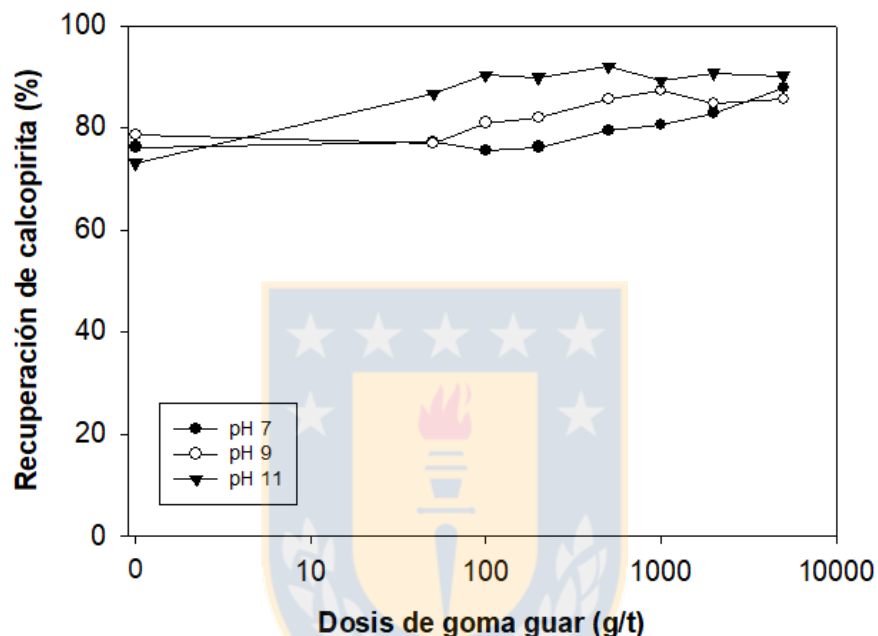


Figura 16: Recuperación de calcopirita a diferentes concentraciones de goma guar, 30 % de caolinita, diferentes pH, 25 ppm de PAX, 20 ppm de MIBC, en agua dulce.

4.1.4 Efectos de goma guar sobre flotación de cobre (calcopirita pura).

Como se mostró anteriormente, la recuperación de calcopirita en presencia de arcillas se ve favorecida en presencia de goma guar, la cual provoca la floculación de arcillas, evitando el efecto coating y el consumo excesivo de colector. Sin embargo, es interesante conocer la interacción de goma guar frente a minerales de cobre. Por este motivo se evaluó el efecto del polímero sobre la flotabilidad de calcopirita en un ambiente libre de arcillas.

Como se puede observar en la Figura 17, la recuperación de calcopirita no se ve afectada bajo la presencia de goma guar, manteniéndola siempre en valores superiores al 90%, independiente del pH de trabajo.

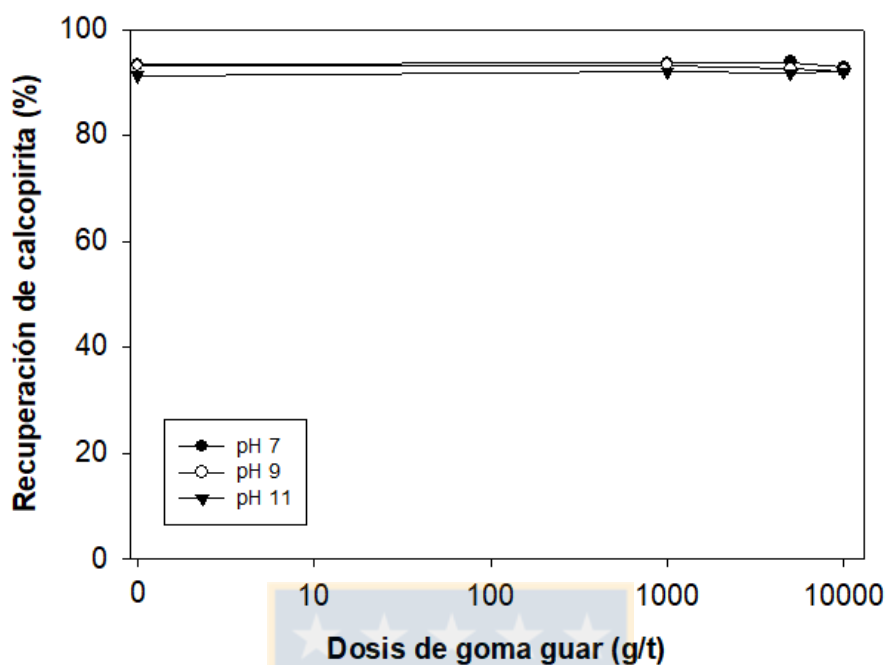


Figura 17: Recuperación de calcopirita a diferentes concentraciones de goma guar, diferentes pH, 25 ppm de PAX, 20 ppm de MIBC, en agua dulce.

4.1.5 Comportamiento de goma guar en presencia de agua de mar

En agua de mar, el comportamiento de la goma guar se ve afectado respecto al agua convencional (ver Figura 18). En el caso del pH 11 la flotabilidad de la calcopirita es muy baja (4,92%) en ausencia de goma guar, sin embargo, ésta aumenta con la presencia del floculante, alcanzando una recuperación máxima de 36,99% a una concentración de 100 g/ton de goma guar. A concentraciones mayores de goma guar la flotabilidad comienza a disminuir.

La recuperación a pH 7 y 9 posee valores similares, los cuales oscilan entre 76 y 86% de recuperación con la presencia de goma guar, sin observarse una tendencia clara como en el caso del trabajo en agua convencional, donde se aprecia claramente un aumento en la recuperación de calcopirita en presencia de goma guar.

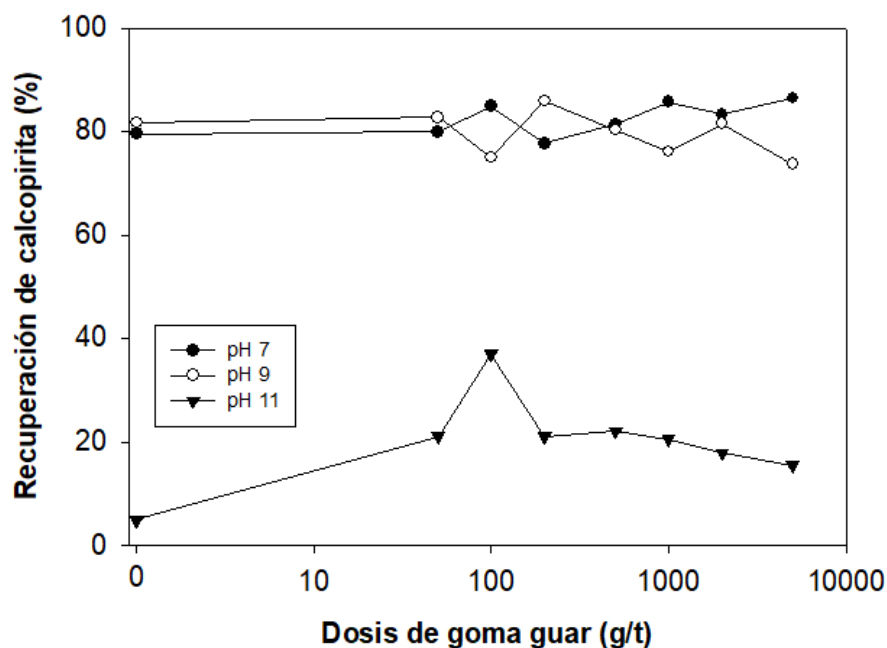


Figura 18: Recuperación de calcopirita a diferentes concentraciones de goma guar, 30 % de caolinita, diferentes pH, 25 ppm de PAX, 20 ppm de MIBC, en agua de mar.

4.2 Pruebas de reología

La reología es uno de los factores más importantes en el comportamiento de la flotación de partículas. En esta sección se analizan los efectos que presentan diferentes minerales arcillosos en el comportamiento reológico de la pulpa, en presencia y ausencia de goma guar.

4.2.1 Impacto del pH sobre reología de pulpas minerales arcillosas

El mineral analizado está conformado por 10% de caolinita y un 90% de cuarzo. Los resultados arrojados por el reómetro se muestran en las Figuras 19 y 20, donde se puede observar la influencia del pH en la reología de la pulpa.

Si bien, a medida que aumenta el pH las propiedades reológicas de la caolinita tienden a disminuir, este comportamiento cambia al mezclarlo con otros minerales. Como se aprecia en la Figura 20, el esfuerzo de cizalle presenta un comportamiento creciente entre pH 7 y 11, alcanzando un máximo de 8,31 Pa. Sin embargo, se observa que a pH 9 éste presenta una disminución en su valor, el cual se asemeja al arrojado a pH 7 (6,5 Pa), provocando una alteración en la tendencia de la curva.

Estas alteraciones en la reología de la pulpa se deben principalmente a la estructura anisotrópica de la caolinita y a la variación de sus cargas superficiales respecto al pH, permitiendo interactuar con el cuarzo de forma cambiante.

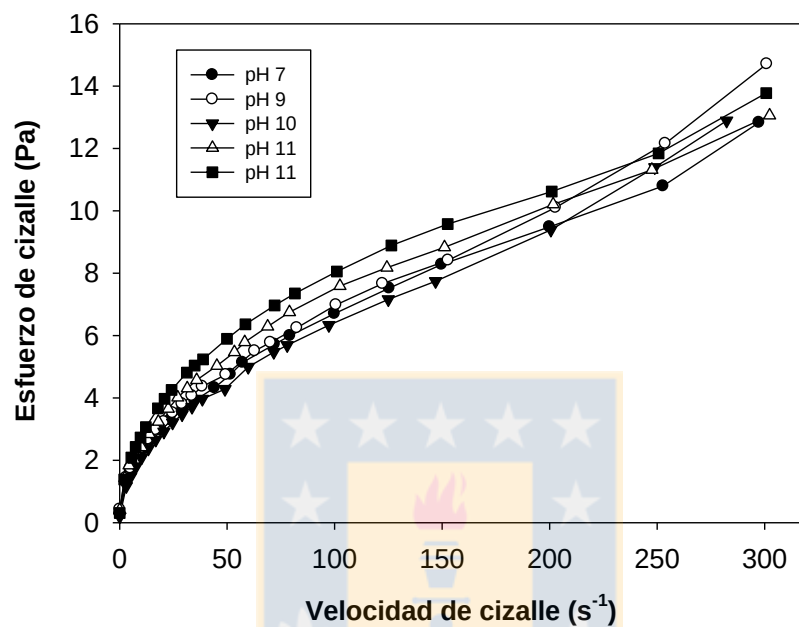


Figura 19: Reograma de pulpa compuesta por cuarzo y 10% de caolinita, a 65% de sólido y diferentes pH.

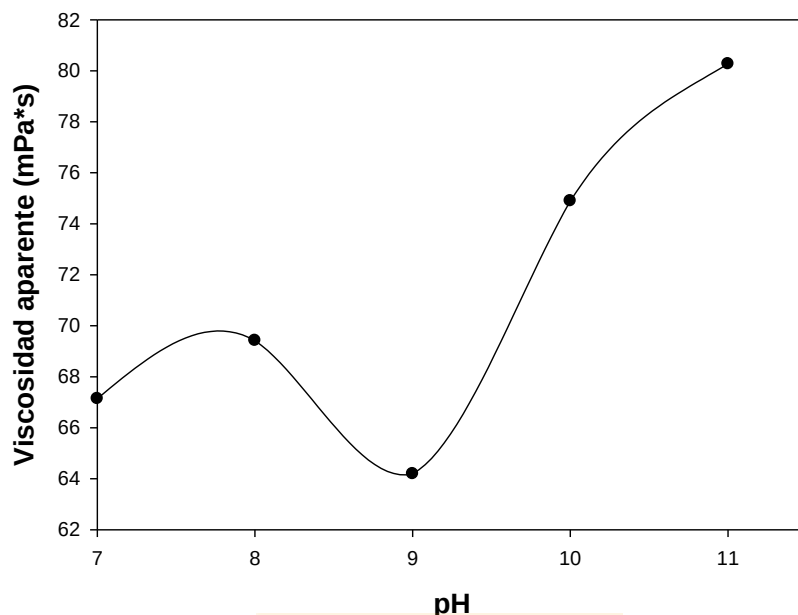


Figura 20: Relación entre viscosidad aparente y pH a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} para una pulpa compuesta por cuarzo y 10% de caolinita, 65% de sólido y a diferentes pH.

4.2.2 Efecto de la concentración de arcillas en la reología de la pulpa

Efecto de la caolinita

En la Figura 21 se aprecia que el aumento del esfuerzo de cizalle está notoriamente relacionado con el aumento de la concentración de caolinita. Si bien, a medida que incrementa la concentración de caolinita, la reología de la pulpa se ve afectada, es a concentraciones superiores a 10% de la arcilla donde se logra un mayor ascenso en el esfuerzo de cizalle, llegando a valores de 12 Pa. Prácticamente duplicando su valor respecto al trabajo con 10% de caolinita. La viscosidad aparente presenta una tendencia similar, la cual aumenta claramente respecto a la concentración de caolinita (ver Figura 22).

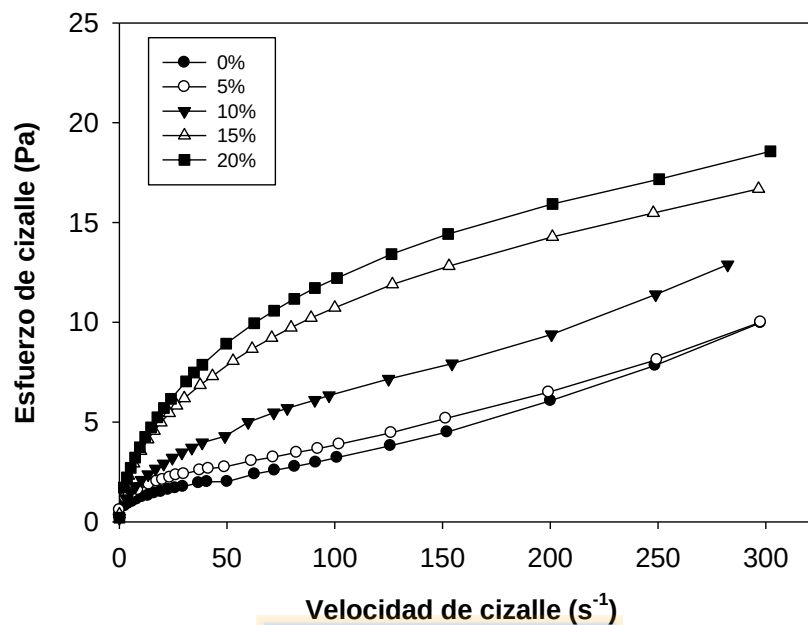


Figura 21: Reograma de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de caolinita y cuarzo, a 65% de sólido y pH 9.

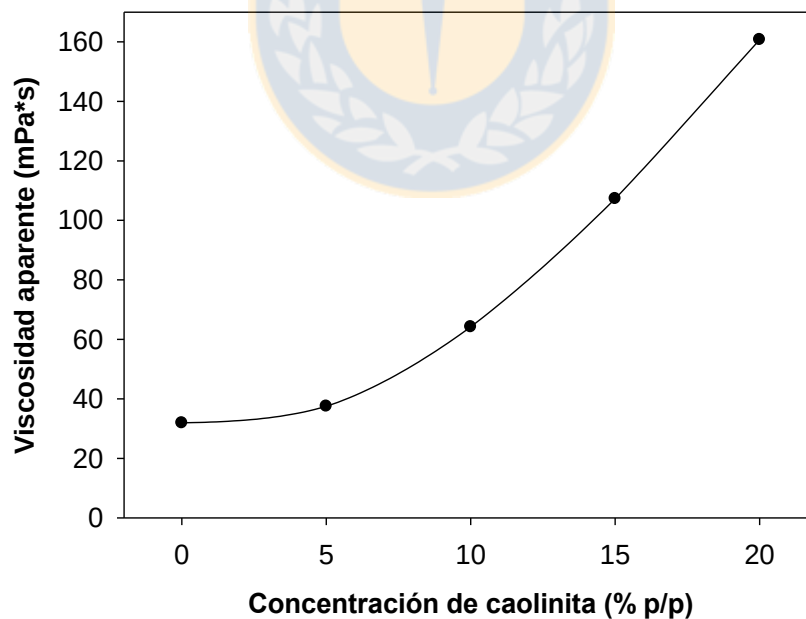


Figura 22: Relación entre viscosidad aparente y concentración de caolinita a una velocidad de cizalle de $100 s^{-1}$ para una pulpa compuesta por 65% de sólidos, a pH 9.

Efecto de la montmorillonita

El efecto de la montmorillonita en la reología de la pulpa se aprecia claramente en la Figura 23, cuyo aumento del esfuerzo de cizalle se hace más notorio en cantidades superiores al 10% de montmorillonita. Si bien, a valores inferiores al 10% de montmorillonita el esfuerzo de cizalle no sobrepasa los 10 Pa, a una mayor cantidad de la arcilla aumenta considerablemente, cuyos valores sobrepasan los 40 Pa al trabajar con una concentración de 20% de montmorillonita.

El impacto de la montmorillonita en la reología de la pulpa es mucho más influyente que el de la caolinita. Comparando ambos efectos a una concentración de 20% de cada arcilla, se aprecia que la presencia de montmorillonita prácticamente cuadriplica el valor del esfuerzo de cizalle (bajo una velocidad de cizalle de 100 s^{-1}) respecto al obtenido por la pulpa que contiene caolinita. Esta conducta se debe principalmente a la capacidad que tiene la montmorillonita de hincharse, lo que conlleva a un considerable aumento de la viscosidad (ver Figura 24).

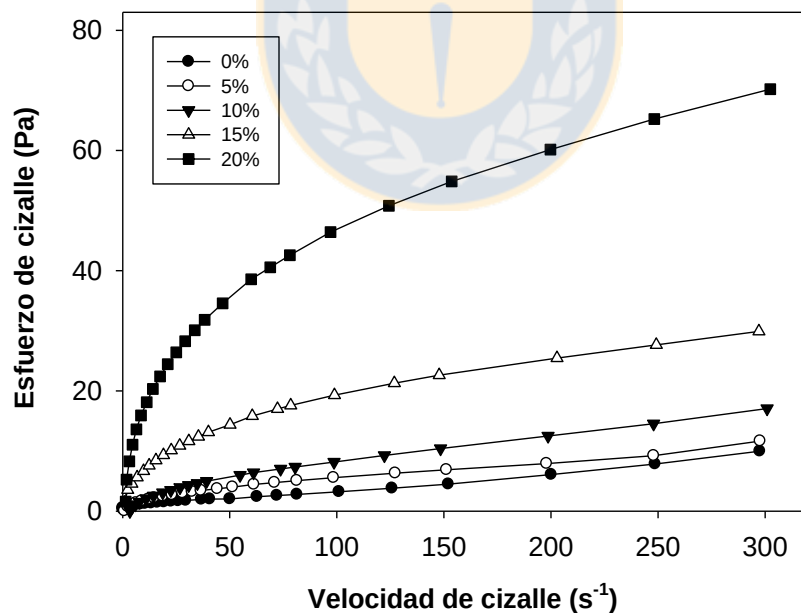


Figura 23: Reograma de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de montmorillonita y cuarzo, a 65% de sólido y pH 9.

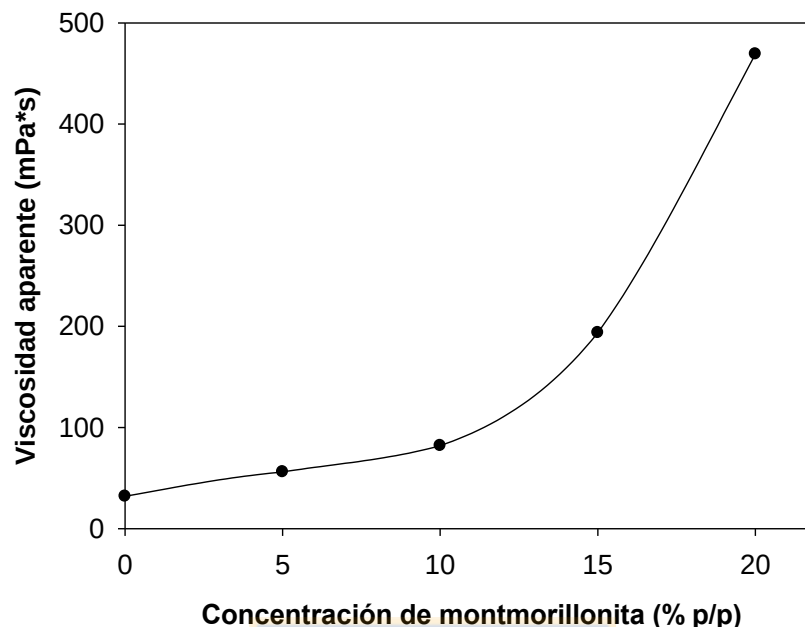


Figura 24: Relación entre viscosidad aparente y concentración de montmorillonita a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} para una pulpa compuesta por 65% de sólidos, a pH 9.

4.2.3 Efecto de goma guar sobre reología de pulpas arcillosas

Efecto sobre la caolinita

En la Figura 25 se puede observar que el esfuerzo de cizalle presenta un leve descenso a medida que aumentamos la dosis de goma guar, alcanzando un mínimo (4,98 Pa) a una dosis de 50 g/t. A concentraciones mayores de goma guar, el esfuerzo de cizalle aumenta claramente debido a la formación de agregados.

El comportamiento de la goma guar en la reología de la pulpa arcillosa, se puede relacionar con el presentado en la flotación de calcopirita bajo la presencia de caolinita (ver Figura 16), donde, la viscosidad aparente (ver Figura 26) junto con la recuperación de calcopirita presentan una tendencia similar respecto a la concentración de goma guar.

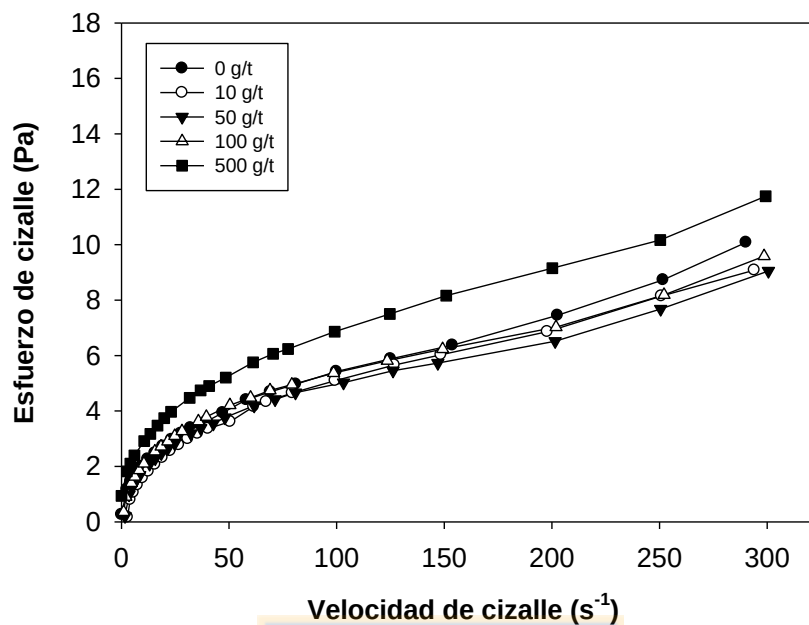


Figura 25: Reograma de pulpas compuestas por 100% caolinita a un 30% de sólidos, diferentes concentraciones de goma guar y pH 9.

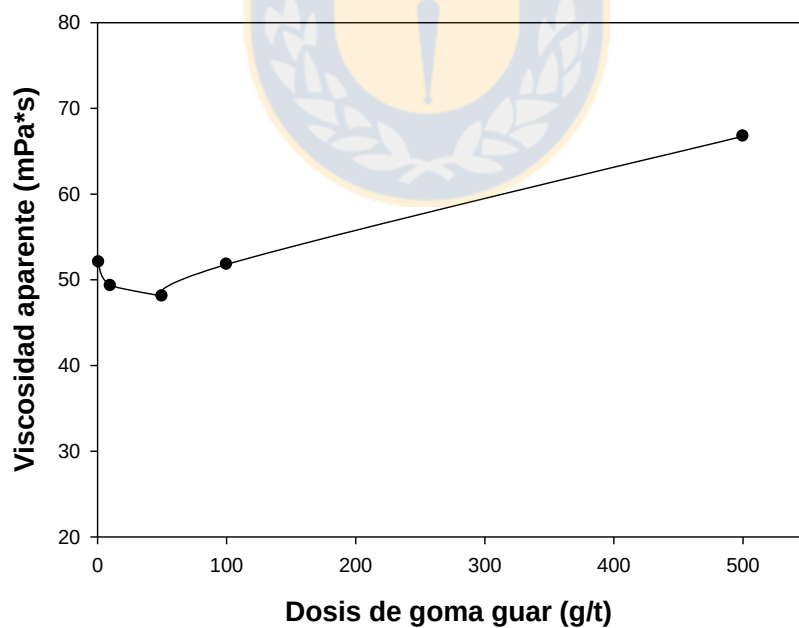


Figura 26: Relación entre viscosidad aparente y concentración de goma guar a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} , para pulpa de caolinita a 30% de sólidos y pH 9.

Efecto sobre la montmorillonita

En la Figura 27 se observa que al trabajar a bajas dosis de goma guar, el esfuerzo de cizalle disminuye. Sin embargo, a una mayor cantidad de goma guar, las propiedades reológicas comienzan a aumentar gradualmente, logrando valores de 9 Pa, a una concentración de 500 g/t del polisacárido. Este fenómeno se debe principalmente a que la goma guar se puede comportar como dispersante o como floculante, dependiendo de la concentración en la cual está presente en la solución.

Un factor que llama profundamente la atención es que en ausencia de goma guar, la pulpa compuesta por caolinita presenta una mayor viscosidad aparente (ver Figura 28) que la pulpa compuesta por montmorillonita, al trabajar a un 30% de sólidos. Sin embargo, al trabajar a un 65% de sólido, la viscosidad aparente se ve mucho más afectada por la presencia de montmorillonita que de caolinita.

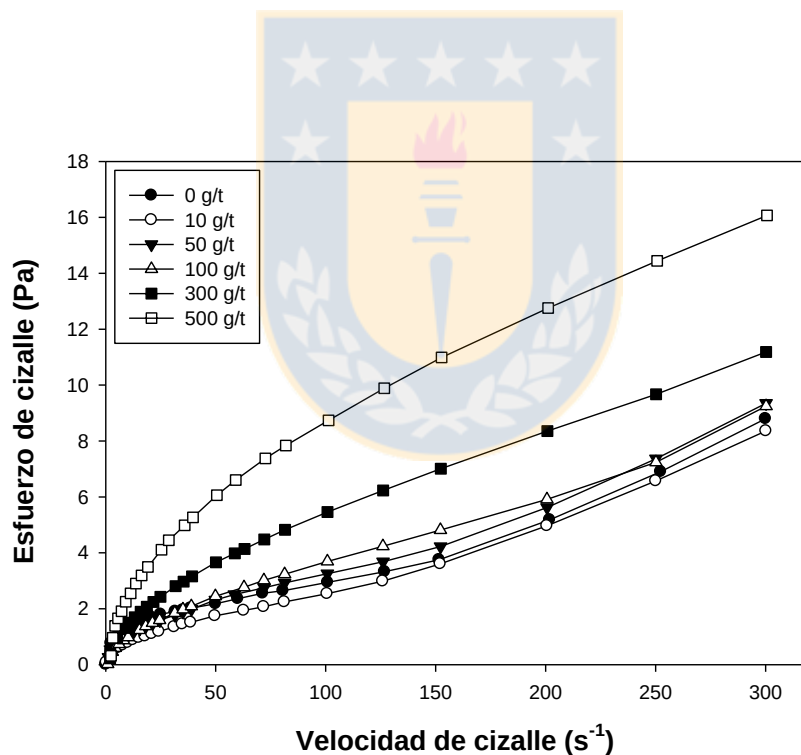


Figura 27: Reograma de pulpas compuestas por 100% montmorillonita a un 30% de sólidos, diferentes concentraciones de goma guar y pH 9.

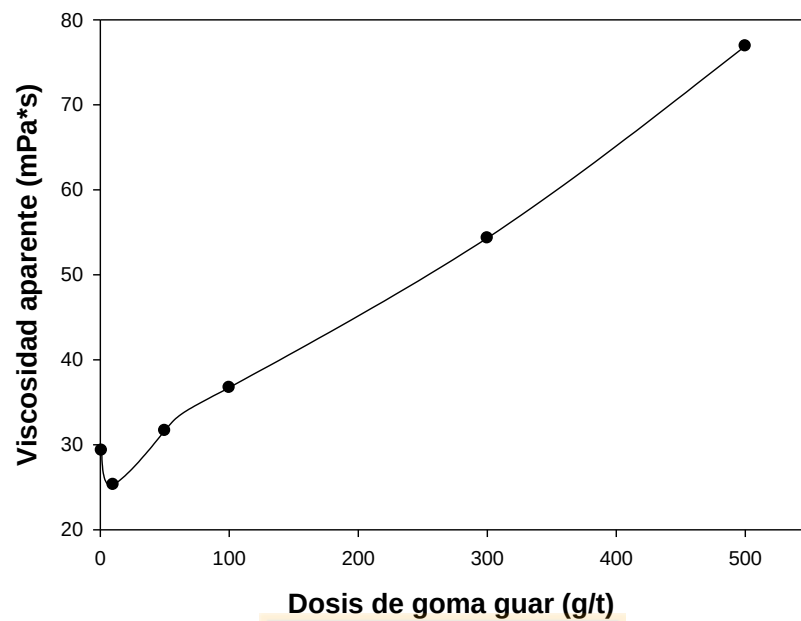


Figura 28: Relación entre viscosidad aparente y concentración de goma guar a una velocidad de cizalle de 100 s^{-1} , para pulpa de montmorillonita a 30% de sólidos y pH 9.



5 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de micro-flotación se puede obtener las siguientes conclusiones:

La flotabilidad de calcopirita se ve muy afectada con la presencia de caolinita, incluso a bajas concentraciones. A medida que aumenta la concentración de la arcilla, la recuperación de cobre decae gradualmente. Sin embargo, en presencia de montmorillonita, la recuperación no presenta grandes cambios.

El comportamiento de la caolinita cambia considerablemente cuando se utiliza goma guar como reactivo dispersante/floculante. A medida que aumenta la concentración del polímero, el efecto perjudicial de la caolinita disminuye y la recuperación de calcopirita mejora.

El pH juega un rol de gran importancia y medida que éste aumenta, el comportamiento de la goma guar se ve favorecido. Los mejores resultados en la recuperación (>90%) se observan a pH 11, lo cual es muy interesante ya que es a esta condición donde la caolinita presenta su efecto más perjudicial.

Otro efecto positivo de la goma guar es que no presenta un efecto depresivo en la calcopirita. Esto se puede observar en la flotación de calcopirita pura, donde incluso a altas concentraciones de goma guar su recuperación no se ve afectada, independiente del pH.

Del análisis de resultados obtenidos en las pruebas de reología se puede obtener las siguientes conclusiones:

El esfuerzo de cizalle aumenta considerablemente bajo la presencia de arcillas, siendo la montmorillonita la que logra un mayor efecto sobre éste. A una concentración de 20% de montmorillonita y una tasa de cizalle de 100 s^{-1} , el reómetro arroja un esfuerzo de cizalle de 43 Pa. Si bien la caolinita genera modificaciones en la reología, su influencia es mucho menor que la montmorillonita y bajo las mismas condiciones de trabajo, arroja un esfuerzo de cizalle de 13 Pa.

La goma guar al interactuar con arcillas se comporta como un dispersante o floculante, dependiendo de la concentración en que se trabaje, provocando alteraciones en la reología del sistema. Este fenómeno se observó debido a que a bajas dosis de goma guar, las propiedades reológicas presentaban una leve disminución, sin embargo, éstas aumentaban considerablemente a dosis mayores de goma guar.

6 BIBLIOGRAFIA

Bulatovic, M. (2007). *Handbook of flotation reagents*. Ontario: Elsevier science and technology books.

Castro, S., Ramos, O., Cancino, J. P., & Laskowski, J. (2012). *Frothing in the flotation of copper sulphide ores in sea water*. *Water in Mineral Processing: Proceedings of the First International*. Englewood: SME.

Cervantes, A. (2011). Obtenido de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/2009-2-Potencialzeta-AlexCervantes_7040.pdf

De Hoyos, M., Martínez, A., & Farías, L. (2014). *Comportamiento de partículas coloidales en pinturas base agua*. Obtenido de <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/CienciaCierta/CC38/3.html#.WZuBoCjyIV>

Derjaguin, B., & Landau, L. D. (1941). Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 14, 633-662.

Forbes, E., Davey, K. J., & Smith, L. (2014). Decoupling rheology and slime coating effect on the natural floatability of chalcopyrite in a clay-rich flotation pulp. *Minerals Engineering*, 56, 136-144.

Gungor, N. (2000). Effect of the adsorption of surfactants on the rheology of Na-bentonite slurries. *Journal of Applied Polymer Science*, 75, 107–110.

Gutiérrez, L. (2015). *Fundamentos fisicoquímicos y reactivos de flotación*. curso flotación de minerales, Universidad de Concepción.

Harris, P. J., Mapasa, K., Canham, A., & Bradshaw, D. (1999). The effects of power input on the efficiency of guar depressants in flotation. En J. S. Laskowski (Ed.), *Polymers in mineral processing – proceedings of third UBC-McGill International Symposium* (págs. 51–61). Montreal: Metallurgical Society of CIM.

Krieger, I., & Maron, S. (1951). Rheology of synthetic latex. I. Test of some flow equations. *Journal of Colloid Science*, 6, 528-538.

Lagaly, G., & Ziesmer, S. (2003). Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions. *Adv. Colloid Interf. Sci.*, 100, 105–128.

Landeros, A. (2010). *Efecto del agua de mar sobre la flotación de minerales sulfurados de cobre*. Memoria de Título (Ingeniería civil metalúrgica). Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica Concepción, Chile.

Liu, D., & Peng, Y. (2015). Understanding different roles of lignosulfonate in dispersing clay minerals in coal flotation using deionised water and saline water. *Fuel*, 142, 235-242.

Schoonheydt, R., & Johnston, C. (2006). *Surface and interface chemistry of clay minerals*. In: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*. Amsterdam: Elsevier Science.

Theng, B. (2012). *Formation and Properties of Clay-Polymer Complexes* (Vol. 4). Palmerston North, New Zealand: Elsevier Science.

Van Olphen, H. (1977). *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. New York: Wiley Interscience.

Van Wazer, J., Lyons, J., Kim, K., & Colwell, R. (1963). *Viscosity and Flow Measurement*. New York: John Wiley and Sons.

Verwey, E. J., & Overbeek, J. T. (1948). *Theory of Stability of Lyophobic Colloids*. Amsterdam: Elsevier.

Wang, Y., Peng, Y., Nicholson, T., & Lauten, R. A. (2015). The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation. *Applied Clay Science*, 114, 48-52.

Whorlow, R. (1980). *Rheological Techniques*. New York: Ellis Horwood Limited, Chichester Eng.

Yianatos, B. (2005). *Flotación de minerales*. Universidad Técnico Federico Santa María.

Zhang, M., & Peng, Y. (2015). Effect of clays minerals on pulp rheology and the flotation of copper and gold minerals. *Minerals Engineering*, 70, 8-13.



7 ANEXOS

7.1 Anexo de pruebas de microflotación

7.1.1 Microflotación de calcopirita con presencia de caolinita

Tabla 1: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes concentraciones de caolinita

pH	Concentración Caolinita [%]	Masa Concentrado [g]	Masa Cola [g]	Recuperación [%]	Recuperación Promedio [%]
7	0	0.916	0.051	94.64	94.39
		0.901	0.055	94.15	
	10	0.800	0.076	91.28	91.35
		0.786	0.073	91.43	
	20	0.695	0.099	87.47	86.35
		0.671	0.116	85.24	
	30	0.537	0.144	78.80	79.17
		0.505	0.129	79.55	
9	0	0.917	0.068	93.08	91.67
		0.916	0.035	90.26	
	10	0.810	0.063	92.78	92.04
		0.780	0.074	91.31	
	20	0.675	0.108	86.20	86.68
		0.669	0.098	87.17	
	30	0.543	0.115	82.42	80.90
		0.519	0.134	79.38	
11	0	0.935	0.075	92.52	92.35
		0.936	0.079	92.18	
	10	0.723	0.168	81.11	82.22
		0.723	0.144	83.34	
	20	0.605	0.172	77.80	77.09
		0.601	0.185	76.39	
	30	0.498	0.170	74.50	73.20
		0.471	0.184	71.90	

7.1.2 Microflotación de calcopirita con presencia de montmorillonita

Tabla 2: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes concentraciones de montmorillonita, en agua convencional

Concentración montmorillonita	Masa Concentrado [g]	Masa Cola [g]	Recuperación [%]	Recuperación Promedio [%]
0	0.917	0.068	93.08	92.67
	0.916	0.035	92.26	
10	0.836	0.062	93.03	93.00
	0.802	0.060	92.97	
20	0.757	0.060	92.64	92.59
	0.755	0.060	92.54	
30	0.614	0.065	90.41	90.41
	0.613	0.064	90.42	
40	0.546	0.057	90.55	90.39
	0.537	0.058	90.23	
50	0.456	0.056	88.93	88.74
	0.431	0.055	88.56	

7.1.3 Microflotación de calcopirita con presencia de montmorillonita en agua de mar

Tabla 3: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes concentraciones de montmorillonita, en agua de mar

Concentración montmorillonita	Masa Concentrado	Masa Cola	Recuperación	Recuperación Promedio
0	0.907	0.087	91.24	91.20
	0.867	0.084	91.16	
10	0.823	0.079	91.23	91.05
	0.809	0.081	90.87	
20	0.723	0.070	91.10	91.04
	0.705	0.069	90.99	
30	0.631	0.066	90.46	90.49
	0.594	0.062	90.52	
40	0.551	0.066	89.29	88.72
	0.499	0.067	88.15	
50	0.443	0.060	87.98	87.62
	0.403	0.058	87.27	

7.1.4 Efecto de goma guar en microflotación de calcopirita con presencia de caolinita

Tabla 4: Pruebas de microflotación de calcopirita con presencia de caolinita a diferentes dosis de goma guar, en agua convencional

pH	Concentración Goma guar	Masa Concentrado [g]	Masa Cola [g]	Recuperación [%]
7	0	0.507	0.186	76.17
	50	0.389	0.189	77.25
	100	0.512	0.165	75.54
	200	0.488	0.169	76.23
	500	0.464	0.204	79.43
	1000	0.475	0.198	80.53
	2000	0.549	0.113	82.85
	5000	0.604	0.083	87.85
9	0	0.532	0.145	78.54
	50	0.545	0.163	76.91
	100	0.565	0.133	80.96
	200	0.565	0.124	81.90
	500	0.544	0.091	85.57
	1000	0.587	0.085	87.30
	2000	0.560	0.101	84.72
	5000	0.535	0.090	85.57
11	0	0.507	0.186	73.08
	50	0.572	0.088	86.64
	100	0.601	0.064	90.33
	200	0.569	0.063	89.91
	500	0.615	0.053	92.01
	1000	0.572	0.069	89.14
	2000	0.602	0.061	90.68
	5000	0.594	0.064	90.20

7.1.5 Efecto de goma guar en microflotación de calcopirita con presencia de caolinita en agua de mar

Tabla 5: Pruebas de microflotación de calcopirita con presencia de caolinita a diferentes dosis de goma guar, en agua de mar.

pH	Concentracion Goma guar	Masa Concentrado [g]	Masa Cola [g]	Recuperación [%]
7	1	0.505	0.129	79.55
	50	0.526	0.132	79.91
	100	0.551	0.098	84.80
	200	0.507	0.145	77.69
	500	0.573	0.131	81.38
	1000	0.600	0.100	85.67
	2000	0.582	0.117	83.27
	5000	0.602	0.094	86.42
9	0	0.569	0.128	81.63
	50	0.565	0.118	82.72
	100	0.532	0.177	74.99
	200	0.583	0.096	85.81
	500	0.526	0.165	80.32
	1000	0.566	0.138	76.12
	2000	0.548	0.124	81.46
	5000	0.522	0.187	73.61
11	0	0.034	0.668	4.92
	50	0.543	0.145	21.08
	100	0.257	0.439	36.99
	200	0.144	0.542	21.05
	500	0.536	0.138	20.47
	1000	0.543	0.118	17.87
	5000	0.100	0.549	15.50

7.1.6 Efecto de Goma guar en flotación de calcopirita pura

Tabla 6: Pruebas de microflotación de calcopirita a diferentes dosis de goma guar

pH	Concentración Goma guar	Masa Concentrado [g]	Masa Cola [g]	Recuperación [%]	Recuperación Promedio [%]
7	0	0.916	0.051	94.64	93.33
		0.914	0.062	93.65	
	1000	0.907	0.068	93.01	93.58
		0.890	0.063	93.34	
	5000	0.915	0.06	93.82	93.75
		0.923	0.061	93.78	
	10000	0.925	0.061	93.72	92.81
		0.912	0.062	93.54	
9	0	0.907	0.078	92.08	93.13
		0.932	0.076	92.45	
	1000	0.927	0.061	93.81	93.26
		0.892	0.066	93.10	
	5000	0.906	0.063	93.42	92.53
		0.916	0.069	92.98	
	10000	0.898	0.077	92.09	92.12
		0.991	0.073	93.12	
11	0	0.899	0.087	91.13	91.30
		0.877	0.084	91.17	
	1000	0.904	0.084	91.43	92.01
		0.917	0.079	92.00	
	5000	0.891	0.077	92.03	91.65
		0.902	0.081	91.75	
	10000	0.897	0.082	91.56	91.98
		0.905	0.078	91.98	

7.2 Anexo pruebas de reología

7.2.1 Impacto del pH sobre recuperación de Cu en presencia de arcillas

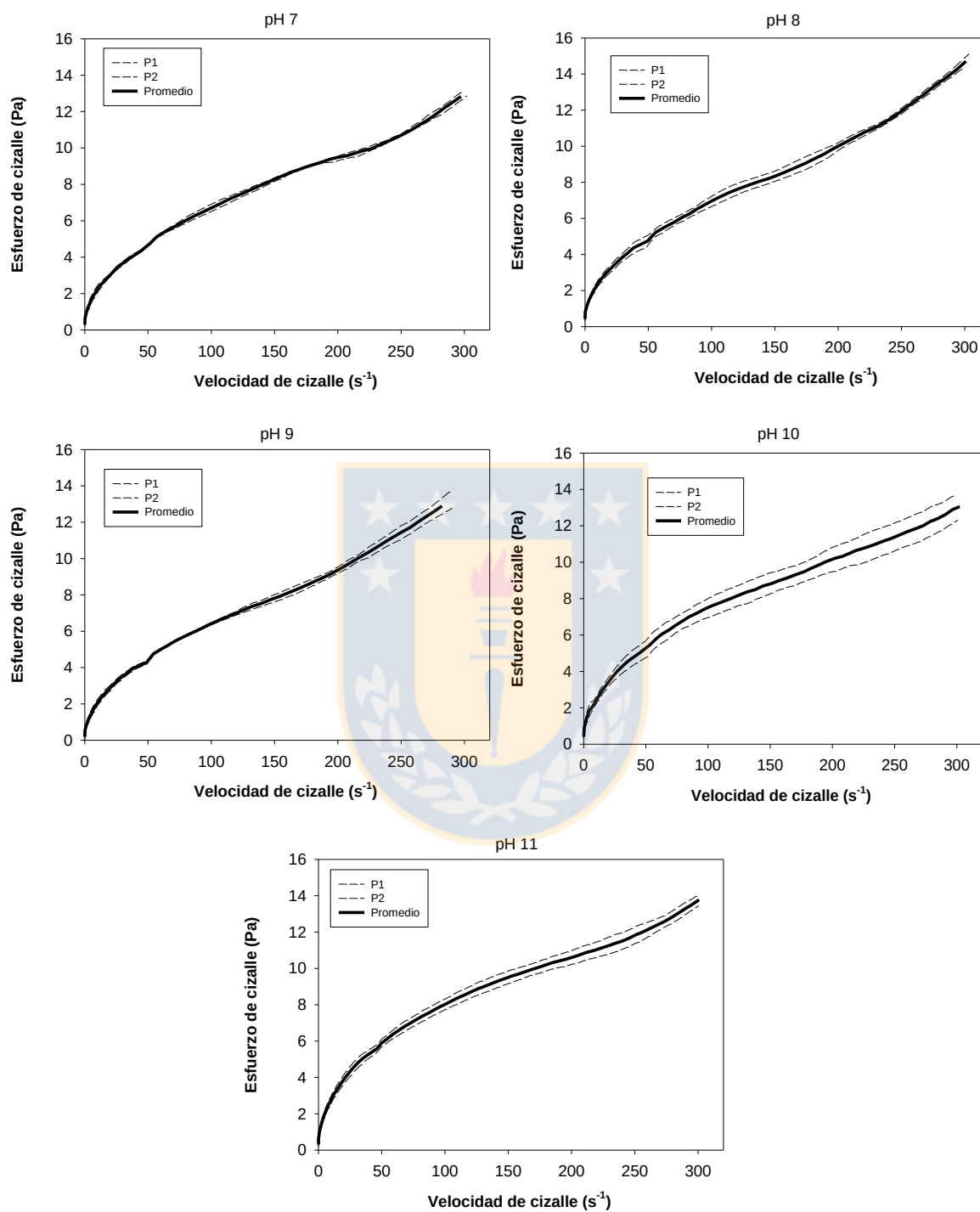


Figura 29: Reogramas de pulpa compuesta por cuarzo y 10% de caolinita, a 65% de sólido.

7.2.2 Efecto de la concentración de arcillas en la reología de la pulpa

Efecto de la caolinita

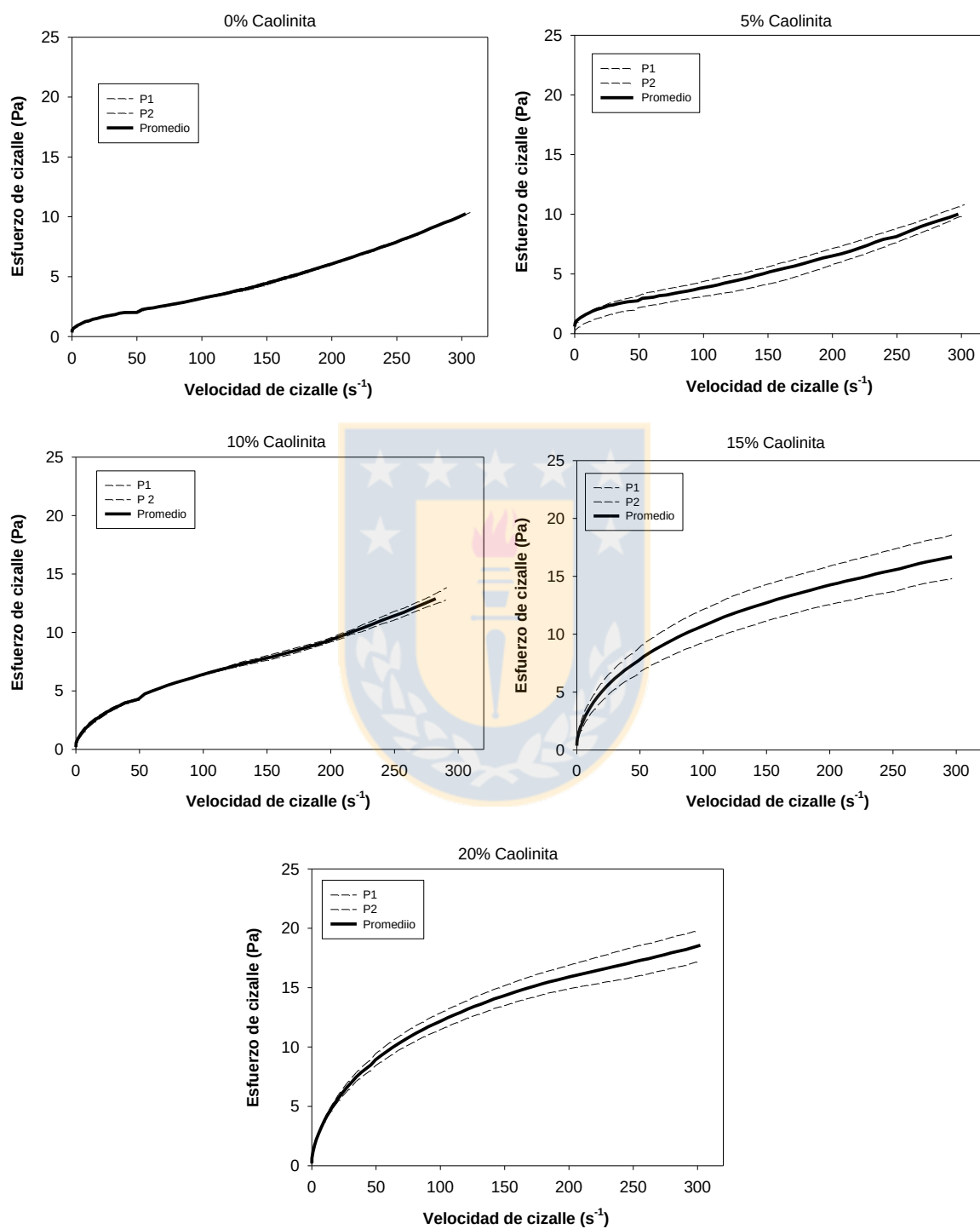


Figura 30: Reogramas de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de caolinita y cuarzo, a 65% de sólido y pH.

Efecto de la montmorillonita

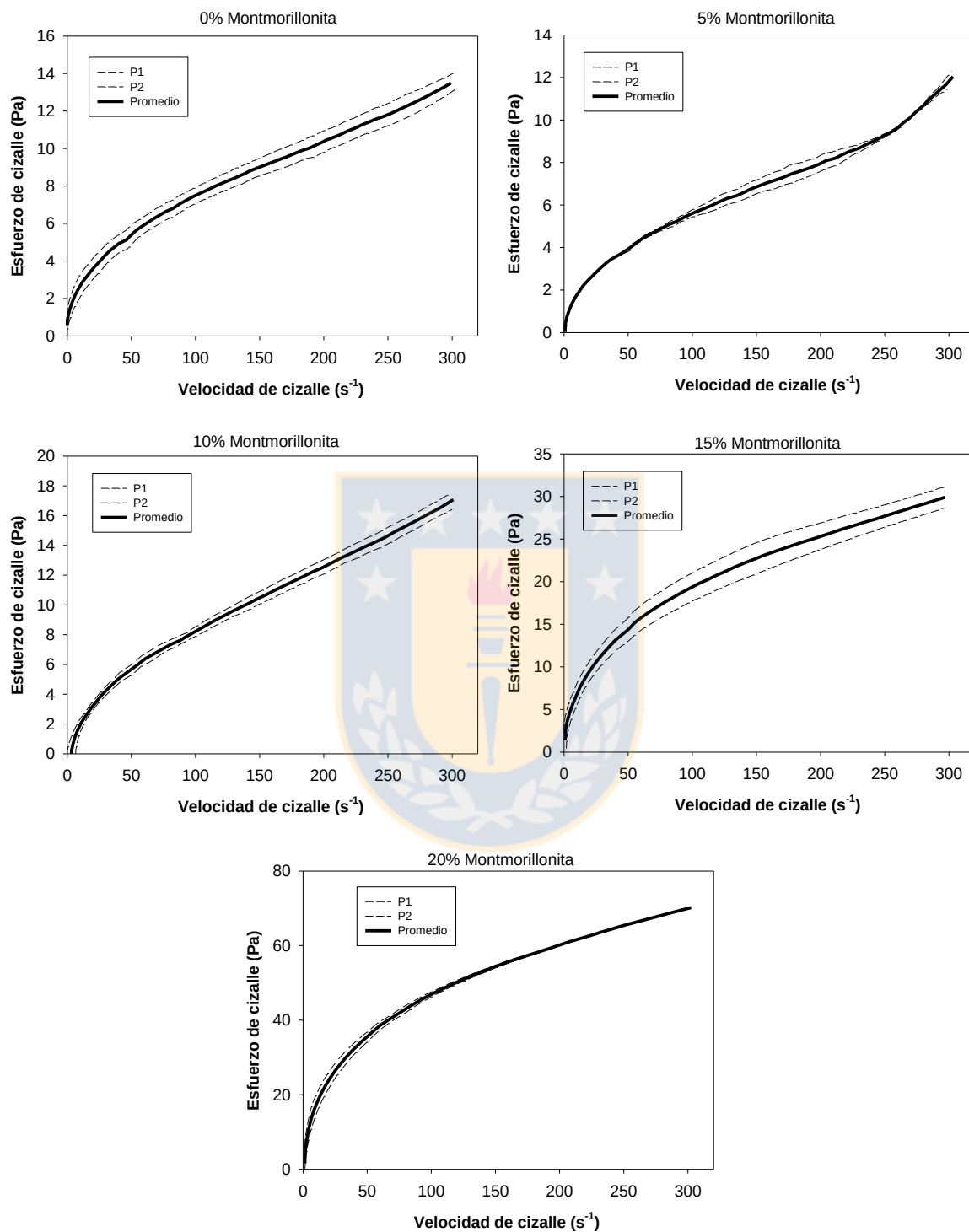


Figura 31: Reograma de pulpas compuestas por diferentes concentraciones de montmorillonita y cuarzo, a 65% de sólido y pH.

7.2.3 Efecto de la goma guar sobre la reología de pulpas arcillosas

Efecto sobre la caolinita

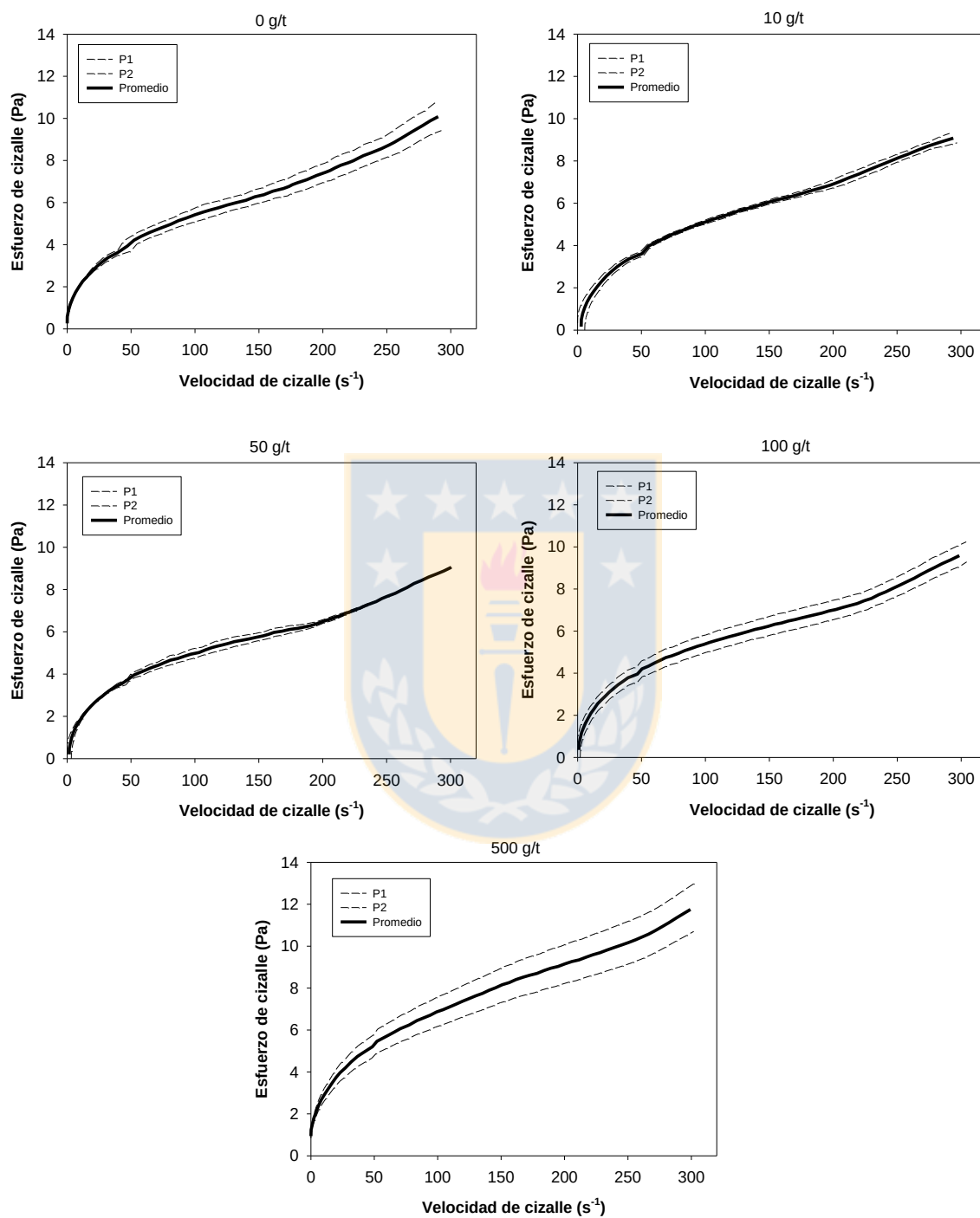


Figura 32: Reogramas de pulpas compuestas por 100% caolinita bajo la influencia de goma guar a pH 9.

Efecto sobre la montmorillonita

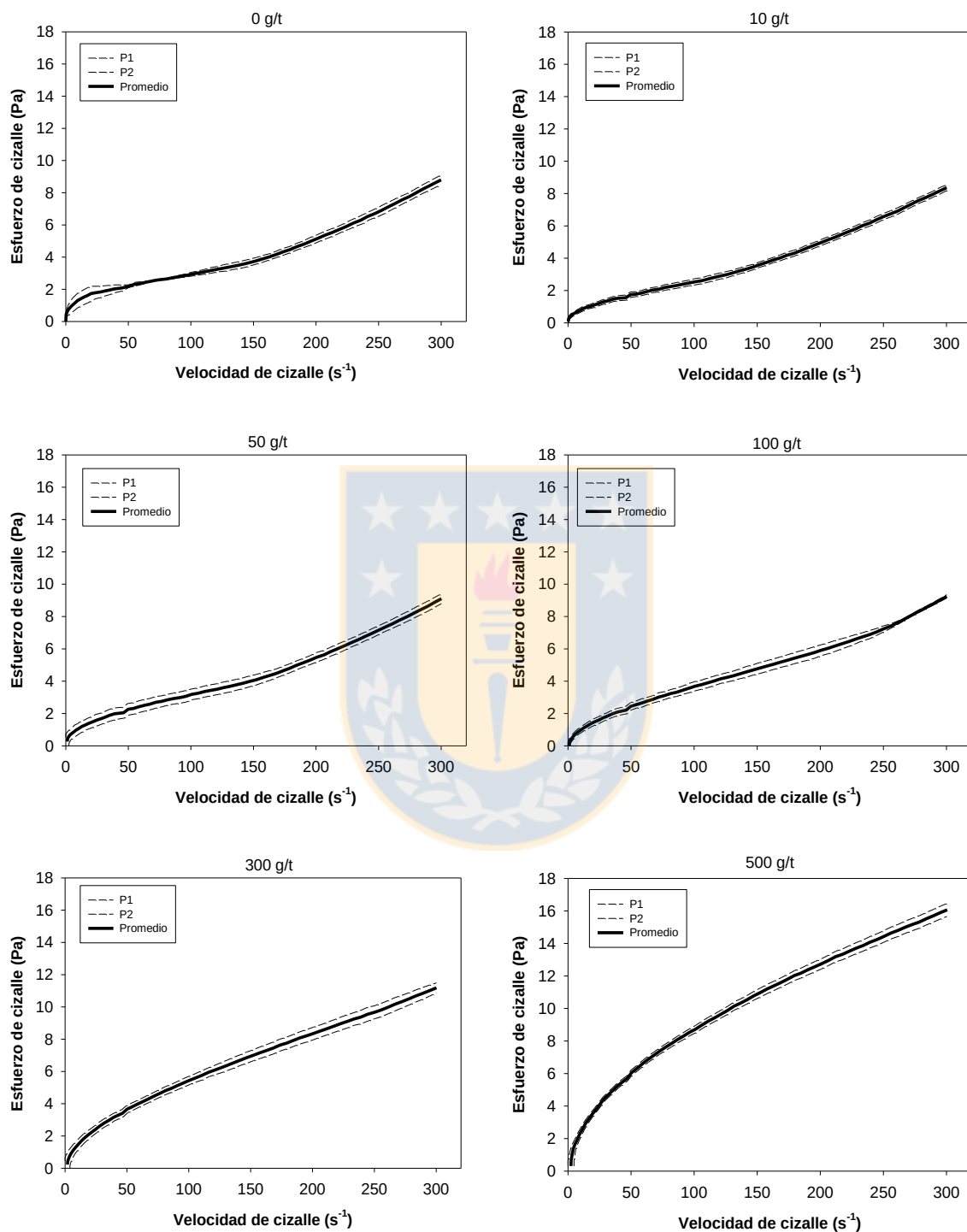


Figura 33: Reogramas de pulpas compuestas por 100% caolinita bajo la influencia de goma guar a pH 9

