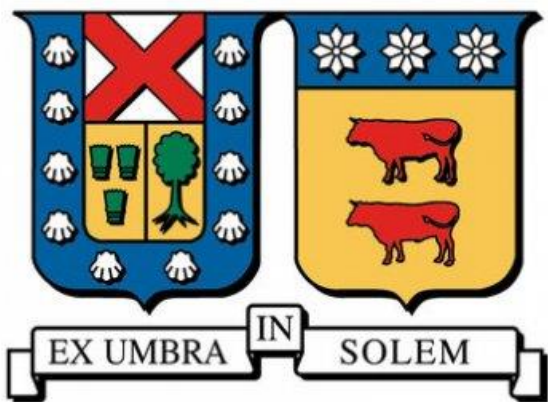


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES



**IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE GANGAS QUE
MODIFICAN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y
SEDIMENTOLÓGICAS DE LOS RELAVES COMPLEJOS**

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico

Memorista : Nathalia Arismendi
Profesor Guía: Dr. Jorge Ipinza Abarca
Co-Referente : Dra. Pamela Garrido

Valparaíso, Julio de 2018

TABLA DE CONTENIDOS

CAPITULO 1. GENERALIDADES..... 13

 1.1 Introducción..... 13

 1.2 Hipótesis..... 14

 1.3 Objetivos..... 14

 1.3.1 Objetivo general..... 14

 1.3.2 Objetivos específicos..... 14

CAPITULO 2. ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE 15

 2.1 Efecto de las arcillas en la flotación..... 16

 2.2 Minerales de arcilla..... 30

 2.3 Conceptos y fundamentos..... 40

 2.3.1 Principios de sedimentación..... 40

 2.3.2 Sedimentación de partículas floculadas..... 43

 2.3.3 Coagulación y floculación..... 44

 2.3.4 Reología de pulpas minerales..... 46

CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL..... 49

 3.1 Recepción y preparación de muestras de mineral..... 49

 3.2 Preparación de muestras representativas de mineral..... 49

 3.3 Gravedad específica..... 50

 3.4 Distribución granulométrica..... 50

 3.5 Cinética de molienda..... 51

 3.6 Flotación rougher..... 52

 3.7 Caracterización por sedimentación de los relaves de flotación rougher..... 53

 3.8 Caracterización reológica de las colas de flotación rougher..... 54

 3.9 Caracterización mineralógica de las colas de flotación rougher..... 55

 3.10 Equipos y materiales..... 56

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES 58

 4.1 Gravedad específica por picnometría..... 58

 4.2 Análisis granulométrico..... 59

 4.3 Composición mineralógica..... 60

 4.4 Cinética de molienda..... 64

 4.5 Caracterización sedimentológica de la cola rougher..... 68



4.6 Tensión de fluencia y viscosidad Bingham	72
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	77
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES	78
CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	79



INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Problemas presentes en la planta concentradora	15
Tabla 2.2. Valores de CIC para varios tipos de arcilla	39
Tabla 3.1 Cantidad de mineral por muestra	49
Tabla 3.2 Set de tamices usados en el análisis granulométrico.	50
Tabla 3.3 Configuración del collar de bolas.....	51
Tabla 3.4 Tiempos de molienda	51
Tabla 3.5 Condiciones experimentales de los ensayos de flotación.	52
Tabla 3.6 Puntos de adición de reactivos.	53
Tabla 3.7 Listado de equipos y materiales	56
Tabla 4.1 Densidad de sólidos.	58
Tabla 4.2 Diámetros característicos de partículas de mineral.....	59
Tabla 4.3 Caracterización mineralógica de las muestras estudiadas en porcentaje en peso respecto del total de especies componentes de arcilla.	63
Tabla 4.4 Tiempos de molienda	64
Tabla 4.5 Contenido de silicatos [%] y tiempo de molienda para cada muestra estudiada	65
Tabla 4.6 Resultados de velocidad de sedimentación de la cola rougher	68
Tabla 4.7 Resultados de la tensión de fluencia Bingham en función del porcentaje de sólidos en peso y pH para las distintas muestras en estudio.	73



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Efecto de la aglomeración de arcillas sobre la conducta en flotación desde la superficie de partículas y burbujas de aire.	18
Figura 2.2 Efecto de los distintos filosilicatos en la recuperación y ley de cobre	19
Figura 2.3 Efecto de la adición de serpentina sobre la recuperación de cobre	19
Figura 2.4 Efecto de los distintos filosilicatos en la estabilidad de la espuma.	21
Figura 2.5 Consumo total de reactivos en plantas concentradoras chilenas.	22
Figura 2.6 Ensayos de sedimentación con los métodos Coe Clevenge y Talmage Fitch con diferentes unidades geológicas de arcillas.	23
Figura 2.7 Viscosidad aparente de la bentonita y la caolinita en función de la concentración a una velocidad de corte de 100 s^{-1}	24
Figura 2.8 Reograma para concentraciones en sólido de caolinita de a) 10%, b) 20% y c) 30% en peso con la presencia de modificadores de pH.	25
Figura 2.9 Reograma para concentraciones en sólido de bentonita de a) 2%, b) 5% y c) 10% con la presencia de modificadores de pH.	26
Figura 2.10 Reograma para caolinita 20%, a) adición de colector y b) espumante.	28
Figura 2.11 Reograma para bentonita al 8% de sólidos en peso: a) adición de colector y b) espumante	29
Figura 2.12 Clasificación de filosilicatos. Modificado de (Brindley, 1952)	31
Figura 2.13 a) Estructura tetraédrica con capas T, b) Estructura octaédrica con capas O (Ndlovu, Farrokpay, & Bradshaw, 2013).	31
Figura 2.14. Formas morfológicas comunes de partículas de esmectita primaria	32
Figura 2.15. Partículas de arcillas observadas al microscopio	32
Figura 2.16. Formación de agregados de caolinita y esmectita.	33
Figura 2.17(a) esquema mostrando un agregado de arcilla consistente de varias partículas de arcillas y el desarrollo de porosidad intra-agregados. (b) esquema mostrando el desarrollo de porosidad interagregados e intra-agregados (modificado desde Güven, 1992a).	33
Figura 2.18. Ejemplos de construcciones aleatorias y laminares de arcillas observadas con microscopio electrónico de barrido.	34
Figura 2.19 Ley de arcilla de diferentes minerales de alimentación a plantas concentradoras chilenas.	35



Figura 2.20. Variaciones en la viscosidad aparente de suspensiones de esmectitas de acuerdo con a) concentración en sólidos (izq) y b) tamaño de partícula (der).....	38
Figura 2.21. Eficiencia de floculación de cationes intercambiables	39
Figura 2.22 Flujo turbulento (arriba) y laminar (abajo).....	41
Figura 2.23 Curva de sedimentación mostrando las interfaces. (a) agua suspensión (b) suspensión-sedimento (c) agua-sedimento.....	42
Figura 2.24 Principales zonas vistas durante la sedimentación de partículas	42
Figura 2.25 Efecto del floculante en las partículas durante la sedimentación, a) Adición de floculante, b) acción de atrapamiento del floculante, c) formación de flóculos	43
Figura 2.26 Coagulación de coloides.	45
Figura 2.27 Sedimentación sin floculación (izquierda) y con floculación (derecha).	45
Figura 2.28 Esfuerzo de corte entre dos planos paralelos	46
Figura 2.29 Clasificación de los fluidos (Concha, 1982)	47
Figura 3.1 Gráfica de altura versus sedimentación obtenidas en ensayos de sedimentación.....	54
Figura 3.2 Reograma tipo obtenido por la metodología del cilindro helicoidal y copa	55
Figura 4.1 Análisis granulométrico del mineral de cabeza para la flotación rougher.	59
Figura 4.2 Caracterización mineralógica de 5 muestras de relaves.	61
Figura 4.3 Relación no lineal entre tiempo de molienda y composición de silicatos	66
Figura 4.4 Efecto del contenido de distintas especies de filosilicatos sobre el tiempo de molienda.	67
Figura 4.5 Efecto de los silicatos duros sobre el tiempo de molienda	67
Figura 4.6 Velocidad de sedimentación para muestras de relave rougher estudiadas a 9% y 12% de porcentaje de sólidos de pulpa mineral.	69
Figura 4.7 Efecto del contenido de filosilicatos sobre la velocidad de sedimentación a un Cp de 9%.....	71
Figura 4.8. Efecto de parámetro D10 sobre la velocidad de sedimentación a un Cp 9%.	72
Figura 4.9 Tensión de fluencia Bingham a 71 y 73% de sólidos en peso.	73
Figura 4.10 Efecto de distintas especies de arcilla sobre la tensión de fluencia de Bingham a un Cp de 73%.....	75
Figura 4.11 Efecto del parámetro D10 sobre la tensión de fluencia a un Cp de 73%	76



NOMENCLATURA

O	: Capa Octaédrica.
T	: Capa Tetraédrica.
cm	: Centímetro.
Cp	: Concentración en peso de sólidos [%].
Cv	: Concentración volumétrica de sólidos [%].
N	: Exponente del factor de corrección ecuación [-].
FC	: Factor de corrección Richardson y Zaki [-].
F _A	: Fuerza aplicada [N].
g	: Gramo.
<i>n</i>	: Índice de comportamiento [-].
<i>k</i>	: Índice de consistencia [-].
L	: Litro.
μm	: Micra.
min	: Minuto.
Pa	: Pascal.
τ ₀	: Parámetro de ajuste de modelo de Heymann [-]
φ _m	: Parámetro de ajuste de modelo de Heymann y Krieger & Dougherty [-]
μ ₀	: Parámetro de ajuste de modelo de Krieger & Dougherty [-]
Re	: Reynolds.
D ₁₀	: Tamaño de partícula por el que pasa el 10% de una muestra [μm].
D ₅₀	: Tamaño de partícula por el que pasa el 50% de una muestra [μm].
D ₈₀	: Tamaño de partícula por el que pasa el 80% de una muestra [μm].



T	:	Tonelada.
τ	:	Esfuerzo de corte [Pa].
$\dot{\gamma}$:	Tasa de corte [1/s].
τ_f	:	Tensión de fluencia [Pa].
UG _s	:	Unidades Geológicas
v_s	:	Velocidad de sedimentación [cm/min].
v_{stokes}	:	Velocidad de Stokes [cm/min].
M	:	Viscosidad [mPas].



RESUMEN

La presencia de minerales ultrafinos, que incluyen arcillas y filosilicatos, en los minerales chilenos fluctúa entre 5 y 25%, afectando la reología de las pulpas minerales, lo que modifica significativamente su conducta en las diferentes operaciones unitarias de la planta concentradora, particularmente en el espesamiento de relaves, donde se afecta la recuperación de agua clara, contenidos de sólidos suspendidos en esta agua y el porcentaje de sólidos requeridos en la descarga del espesador. Estudios previos indican que la velocidad de sedimentación de las distribuciones granulométricas de relave que alimentan a un espesador son altamente variables, principalmente a nivel de D_{50} , observándose que la conducta desmejorada del espesador se debe en gran medida a la contribución de la distribución granulométrica de las fracciones por debajo del D_{50} , más que al efecto de la existencia de un componente mineralógico de ganga particular.

Sin embargo, otros estudios indican que la presencia de ciertos componentes de ganga y particularmente de tipo de arcilla, pueden afectar negativamente las propiedades reológicas de una pulpa mineral, la que no se encuentra exenta de controversias en cuanto a que algunos componentes de esta ganga actúan muy negativamente en las propiedades reológicas para algunos autores y su efecto es menor o totalmente ausente, para otros.

El presente proyecto de título, corresponde a un estudio teórico y experimental, que tiene por objetivo general determinar el efecto de diferentes contenidos y tipos de arcillas en unidades geológicas sobre la conducta reológica y de sedimentación de sus relaves.

Se analizaron 5 muestras con diferentes especies de filosilicatos del grupo de las arcillas (caolinita, montmorillonita), talco (pirofilita) y micas (muscovita). El estudio consideró la búsqueda de relaciones entre especies mineralógicas asociadas a los filosilicatos y variables reológicas (tensión de fluencia) y sedimentológicas (velocidad de sedimentación). Además, establecer si existe alguna relación entre su mineralogía y la cinética de molienda.



Los resultados obtenidos establecen la influencia del contenido de filosilicatos en las propiedades reológicas y sedimentológicas en los relaves de cobre, reduciendo la velocidad de sedimentación y aumentando los valores de tensión de fluencia y viscosidad.

Además, se valida la hipótesis. El reconocimiento y cuantificación de las especies mineralógicas son determinantes para predecir la conducta del relave y su nivel de dureza. Sin embargo, las propiedades reológicas y sedimentológicas dependen de la cantidad de partículas que estén por debajo del valor de D_{10} .



ABSTRACT

The presence of ultrafine minerals, including clays and phyllosilicates, in Chilean minerals fluctuates between 5 and 25%, affecting the rheology of mineral pulps, which significantly modifies their behavior in the different unit operations of the concentrator plant, particularly in the tailings thickening, where the recovery of clear water is affected, suspended solids contents in this water and the percentage of solids required in the thickener discharge.

Previous studies indicate that the sedimentation velocity of tailings granulometric distributions that feed a thickener are highly variable, mainly at the D_{50} level, observing that the thickened behavior of the thickener is largely due to the contribution of the granulometric distribution of the thickeners. fractions below D_{50} , rather than the effect of the existence of a particular gangue mineralogical component

However, other studies indicate that the presence of certain components of gangue and particularly of clay type, can negatively affect the rheological properties of a mineral pupa, which is not exempt from controversies in that some components of this gangue act very negatively in the rheological properties for some authors and its effect is less or totally absent, for others.

The present project of title, corresponds to a theoretical and experimental study, whose general objective is to determine the effect of different contents and types of clays in geological units on the rheological behavior and sedimentation of their tailings

Five samples were analyzed with different species of phyllosilicates from the group of clays (kaolinite, montmorillonite), talc (pyrophyllite) and micas (muscovite). The study considered the search for relationships between mineralogical species associated with phyllosilicates and rheological variables (yield stress) and sedimentological variables (sedimentation velocity). Also, establish if there is any relationship between your mineralogy and the grinding kinetics.



The results obtained establish the influence of the content of phyllosilicates on the rheological and sedimentological properties in copper tailings, reducing the sedimentation rate and increasing the values of yield stress and viscosity.

In addition, the hypothesis is validated. The recognition and quantification of mineralogical species are determinants for predicting the behavior of the tailings and their level of hardness. However, the rheological and sedimentological properties depend on the amount of particles that are below the D10 value.



CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

La presencia de minerales ultrafinos, que incluyen arcillas, en los minerales chilenos fluctúa entre 5 y 20%, afectando la reología de la pulpa, lo que modifica significativamente su conducta en las diferentes operaciones unitarias de la planta concentradora. En particular, es ampliamente conocido su efecto en el incremento de la viscosidad de la pulpa durante la flotación y el secado de la espuma, lo que obliga a disminuir el porcentaje de sólidos y con ello reducir la capacidad de tratamiento. También, destacan su participación directa en los eventos de embancamiento de celdas de flotación y espesadores de relaves que indirectamente afectan la recuperación de agua. La falta de agua recuperada en CODELCO-DMH, impone una pérdida operacional de 300 millones de dólares al año, lo que hace imperativo encontrar una nueva solución tecnológica.

Estudios previos realizados en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la UTFSM, muestra que la flotación inversa de relaves, antes del espesamiento, produce una cola de flotación con propiedades reológicas mejoradas, para alimentar el espesador de relaves, con un incremento superior al 55% de agua recuperada, debido a que prácticamente se triplica la velocidad de sedimentación por una distribución granulométrica más gruesa. La flotación inversa se realiza con una fórmula ajustada de colector para óxidos, floculante y coagulante.

Considerando tanto las líneas de investigación abiertas en torno al mejoramiento en el comportamiento de relaves complejos, como la realidad actual de la industria se ha desarrollado este proyecto de tesis, para estudiar el efecto teórico y experimental, que tiene por objetivo general determinar el efecto de diferentes contenidos y tipos de arcillas en unidades geológicas sobre la conducta reológica y de sedimentación de sus relaves.



1.2 Hipótesis

Es posible predecir anticipadamente la conducta reológica y sedimentológica de un relave, si se conoce la composición de arcillas y filosilicatos de la unidad geológica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el efecto de diferentes contenidos y tipos de arcillas en unidades geológicas sobre la conducta reológica y de sedimentación de sus relaves.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales componentes de la ganga que podrían afectar las propiedades reológicas de una pulpa.
- Determinar la relación entre velocidad de sedimentación, propiedades reológicas con la composición mineralógica de las diferentes unidades geológicas.
- Determinar el efecto de la distribución granulométrica del producto de la molienda respecto a la liberación de las especies de ganga identificadas previamente sobre las propiedades reológicas y sedimentológicas.



CAPITULO 2. ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE

Las arcillas corresponden a partículas proveniente de roca sedimentaria (principalmente filosilicatos) de tamaño muy fino, menor a 2 μm (Laskowski & Ralston, 1992). Se originan a partir de la meteorización o alteración hidrotermal de feldespatos, piroxenos y micas.

Las arcillas, por su elevada área superficial, estabilidad química y mecánica, estructura laminar y alta capacidad de intercambio catiónico, son un excelente material absorbente, pero por estas características, producen graves problemas en las distintas etapas del proceso de concentración de minerales, esto es, molienda, flotación, espesado y filtración del mineral, afectando su eficiencia e impactando negativamente en la recuperación y en la ley del concentrado resultante.

En general, los problemas asociados a minerales ricos en arcillas y filosilicatos finos son fisicoquímicos, impactando todas las etapas del circuito de procesamiento de minerales, con las mayores ineficiencias en el transporte de pulpas y concentración a través de secado y disposición de relaves.

La capacidad de las arcillas de capturar agua por sobre el 100% de su peso, alta relación superficie de contacto versus peso de partículas, comportamiento reológico plástico e impermeabilidad de los estratos que se generan son algunas de las propiedades que causan problemas en la planta concentradora (Véase Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Problemas presentes en la planta concentradora
ref. (Ipinza, Cruz, Petkovic, & Miles, 2016).

Operación Unitaria	Problema
Chancador primario	Atollo y perdidas de eficiencia.
Molienda SAG	Fenómenos de retromezcla que afectan la capacidad de tratamiento.
Molienda de bolas	Alta viscosidad afecta la descarga del molino aun con bajos porcentajes de sólidos. Disminuye la eficiencia de molienda.
Ciclones de molienda	Disminuye la eficiencia de separación afectando el tamaño de corte.

Flotación	El consumo de reactivos es mayor y la selectividad se ve afectada negativamente, así como también la recuperación metalúrgica.
Espesamiento	La sedimentación es muy difícil debido a las partículas finas, menores a 2 μm , que se encuentran cargadas superficialmente. Esto requiere la selección de un floculante y optimización del pH para alcanzar tasas de sedimentación aceptables. Disminución de los niveles de agua clara y altos niveles de sólidos suspendidos en ella.
Transporte de pulpas	Se requieren bombas de desplazamiento positivo en vez de bombas centrifugas.
Filtración	Filtros de presión siempre proporcionarán un rendimiento mayor que filtros de vacío. La naturaleza de la arcilla y el porcentaje en volumen en la alimentación incide negativamente en las tasas de filtración, claridad del filtrado, derrames y problemas de mantenimiento. Ayuda filtrantes aumentará las tasas de filtración, incluyendo un alto pH, coagulantes, guar y sus mezclas. La presencia de arcillas genera adherencia a los paños que requieran lavado y excesos de mantenimiento.
Relaves	Requieren grandes tranques de relave, con baja recuperación de agua y geotécnicamente menos estable. La situación económica y los posibles problemas ambientales son graves cuando el tratamiento de minerales es alto en arcilla.

2.1 Efecto de las arcillas en la flotación

Específicamente, en la flotación las arcillas al mantenerse en suspensión, afectan la estabilidad de la espuma que concentra las menas de interés adquiriendo una textura fina, pobremente mineralizada e incapaz de transportar partículas gruesas (Briseño & Rubio, 2013). Además, las arcillas se mantienen en suspensión en vez de sedimentar y ser retiradas en el relave junto con las otras gangas siendo arrastradas al concentrado



en las etapas de recuperación (rougher y scavenger). Los filosilicatos recubren la superficie del mineral ("*slime coating*"), aumentan la viscosidad de la pulpa y el consumo de reactivos.

Recubrimiento arcilloso: Si bien no se conoce el mecanismo exacto por el cual las arcillas interactúan con los demás minerales en el proceso de flotación, se acepta que se debe a propiedades de carga superficial anisotrópicas, gran área superficial, reología compleja en suspensiones y su hidrofobicidad (Ndlovu, Farrokpay, & Bradshaw, 2013).

Las partículas de mineral valioso relativamente gruesas resultan completa o parcialmente cubiertas por una capa de arcillas hidrofílicas, inhibiendo la acción del colector. Se sabe que un revestimiento de arcillas, ocurre sobre las superficies de galena y carbón por atracción electrostática (Fuerstenau, 1958; Gaudin, Fuerstenau, & Miaw, 1960; Arnold & Aplan, 1986; Liu, Xu, & Masliyah, 2005; Quast, Ding, & Fornaciero, 2008; Tao, Dopico, Hines, & Kennedy, 2010). Sin embargo, otros investigadores han demostrado que los recubrimientos pueden ser el resultado de una interacción química (Bankoff, 1943; Dovenfeld, 1953). Por otra parte, la formación de recubrimientos arcillosos sobre la superficie de las burbujas evita la unión entre las burbujas y partículas del mineral de interés (Wen & Sun, 1977). Estudios han demostrado que las burbujas (en agua y sin reactivos), presentan una carga negativa a cualquier pH (Alty, 1926) y que con la adición de espumantes a dosis típicas de planta no influyen en la carga de estas (Elmahdy, Mirnezami, & Finch, 2008). Bajo estas condiciones se podría pensar que existe un recubrimiento arcilloso sobre las burbujas ya que sus bordes están cargados positivamente, pero esta interacción sería inestable por un tema de forma y por el rechazo que generan las cargas negativas (Véase Figura 2.1).



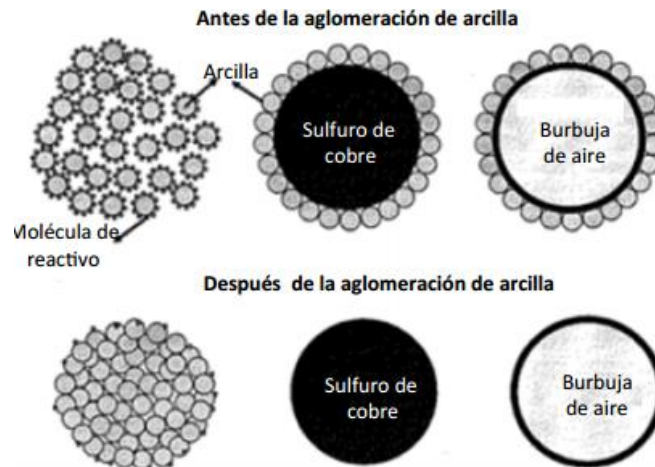


Figura 2.1 Efecto de la aglomeración de arcillas sobre la conducta en flotación desde la superficie de partículas y burbujas de aire.

Efecto en recuperación y ley de cobre: En el caso de la flotación de cobre, proveniente de yacimientos porfíricos se ha identificado que el proceso se ve limitado por la presencia de aluminosilicatos como la caolinita, vermiculita y moscovita, produciendo concentrados con bajas leyes y recuperación de cobre, y con alto contenido de alúmina (Al_2O_3) y cuarzo (SiO_2).

Un estudio de flotación (Farrokhpay, Ndlovu, & Bradshaw, 2014) con mineral sulfurado de cobre ($P_{80}=90\mu m$) y la adición de distintas arcillas y filosilicatos problemáticos, a distintas concentraciones. Las pruebas de flotación se realizaron en columnas a un pH igual a 8, agregando 40 ppm de espumante MIBC y 100 gt^{-1} de PAX, como colector, con un J_g de 1 cms^{-1} .

Los resultados presentados en la Figura 2.2 muestran una brusca disminución de la ley de concentrado para todos los filosilicatos usados y una disminución menos pronunciada para la recuperación de cobre. Ordenando el efecto de los filosilicatos, se consigue la siguiente tendencia de más a menos perjudicial: talco > montmorillonita >> caolinita > illita = moscovita.

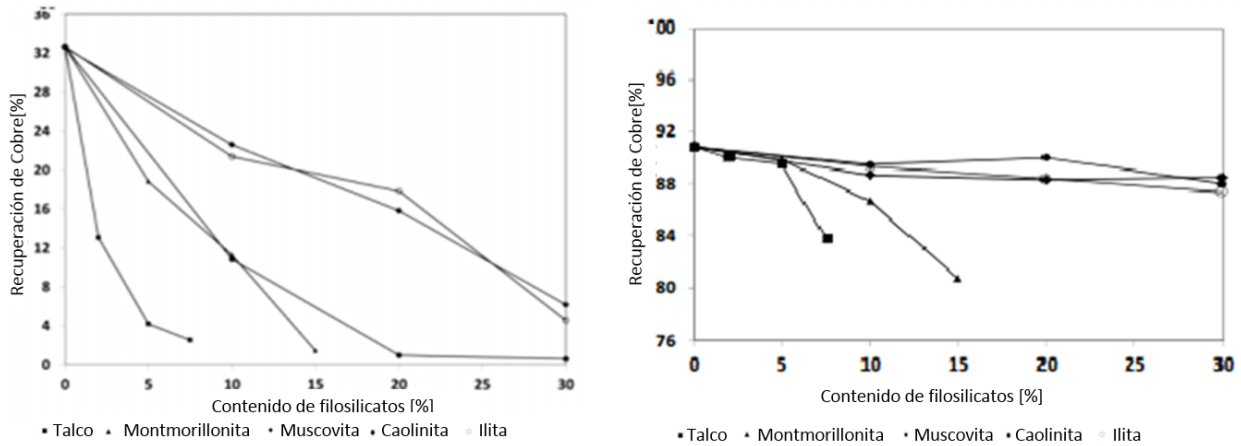


Figura 2.2 Efecto de los distintos filosilicatos en la recuperación y ley de cobre ref. (Farrokhpay, Ndlovu, & Bradshaw, 2014).

Otro estudio (Patra, Nagaraj, & Somasundaran, 2010) muestra el efecto de la adición de serpentina en la recuperación de cobre ($P_{80}=100 \mu\text{m}$) usando una pulpa entre un 22-23% de sólidos en peso, colector de 40gt^{-1} y espumante MIBC con dosis de 50gt^{-1} y un flujo de aire de $3,5 \text{L min}^{-1}$ usando un pH entre 10,0 a 10,5. Como se observa en la Figura 2.3 la recuperación de cobre disminuye lentamente, a medida que aumenta la concentración de serpentina, hasta llegar a una concentración de aproximadamente 7% en peso, donde disminuye bruscamente.

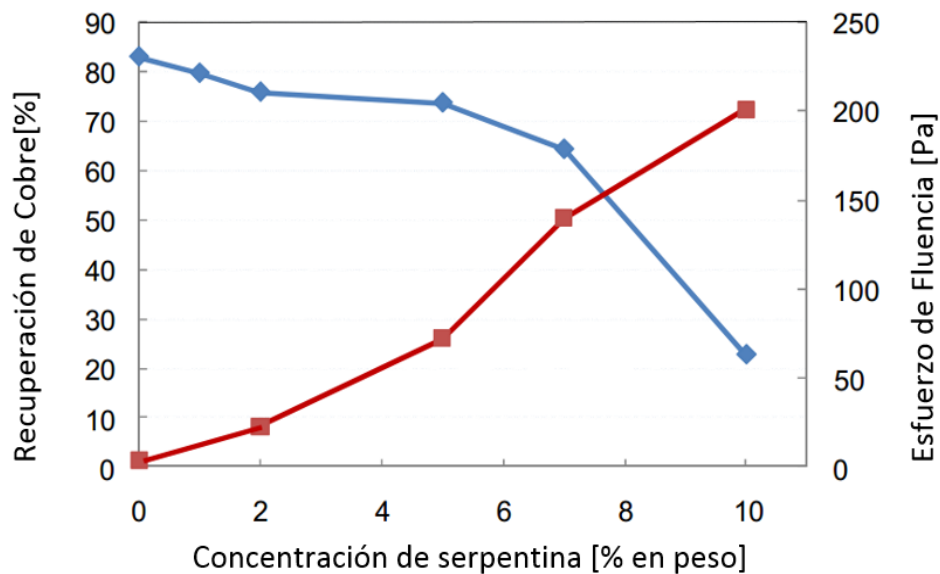


Figura 2.3 Efecto de la adición de serpentina sobre la recuperación de cobre ref. (Patra, Nagaraj, & Somasundaran, 2010).

Un efecto importante que afecta la recuperación y ley de cobre estaría relacionado con la morfología. Este fenómeno se analiza en un estudio realizado con moscovita y cuarzo (Bhambhani, Patra, Nagaraj, & Somasundaran, 2014), donde se indica que a tamaños entre 25-50 μm el mecanismo predominante es por arrastre de agua y que para tamaños entre 50-100 μm , no se observa un arrastre considerable, existiendo un límite superior de tamaño de partícula sobre el cual no existe arrastre. Sin embargo, para partículas entre 100-150 μm , existe un aumento en la recuperación de moscovita con respecto al cuarzo, como la muscovita es hidrofílica no pudo haber flotado de forma natural, además, se debe descartar el arrastre por agua debido a su tamaño. En el estudio se señala que el mecanismo propuesto sería una especie de arrastre por soporte, donde la muscovita al tener una relación de aspecto mayor al cuarzo, tiene una mayor superficie, lo que aumenta la probabilidad de que estas partículas sean arrastradas hasta la espuma por el enjambre de burbujas. Este efecto, también permite a los minerales con esta morfología, a persistir por más tiempo en la fase espuma y no ser sujeto de fenómenos de drenaje. Si bien, la relación del factor forma con respecto al drenaje no ha sido discutida en la literatura, existen estudios en torno a las diferencias de sedimentación de partículas con distintas formas que apoyan lo anterior (Hazzab, Terfous, & Ghenaim, 2008).

Efecto en la estabilidad de la espuma: La estabilidad de la espuma es un parámetro clave para controlar y optimizar la recuperación durante la flotación y su comportamiento no se debe solamente al tipo y concentración de espumante, también influyen otros parámetros como la naturaleza de las partículas en suspensión (hidrofobicidad y tamaño), calidad del agua, ángulo de contacto, reactivos, altura de la zona de espuma, dispersión de aire, temperatura, presencia de sales y tiempo de retención de espuma (Farrokhpay, 2011).

El estudio mencionado anteriormente (Farrokhpay, Ndlovu, & Bradshaw, 2014) analiza el efecto de los diversos filosilicatos en la estabilidad de la espuma, analizando su altura y vida media. En la Figura 2.4, se puede observar que en términos de estabilidad de espuma, es posible ordenar los filosilicatos de la siguiente forma: talco>> montmorillonita>moscovita>caolinita> illita.

Finalmente, las cinéticas lentas de flotación influye sobre la estabilidad y movilidad de la espuma (Farrokhpay, 2012) lo que se manifiesta en fenómenos de floculación en la zona



de espuma (Bulatovic, Wyslouzil, & Kant, 1999) . Esta condición se conoce en la planta como formación de espuma seca.

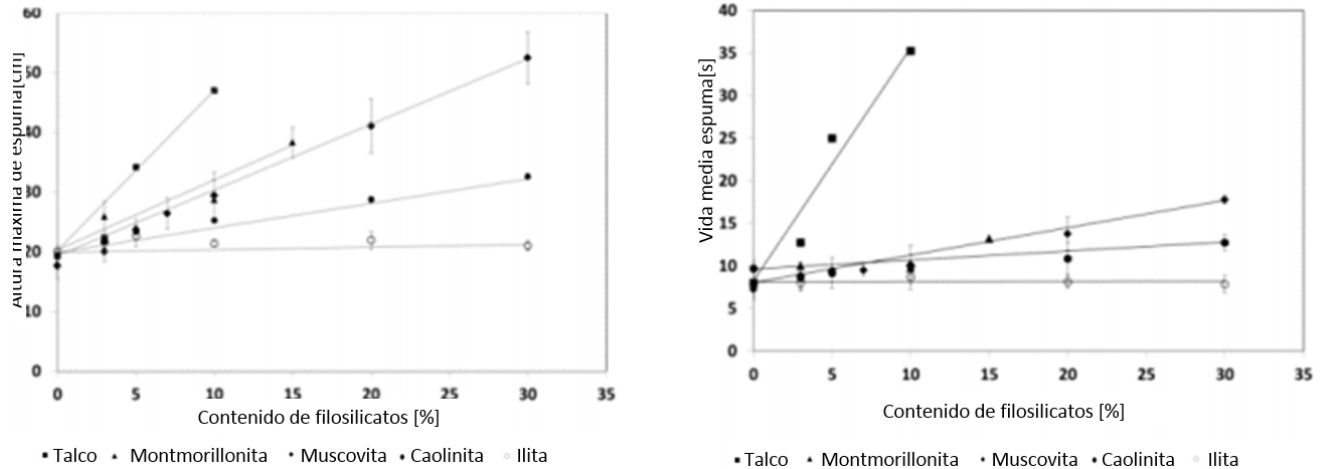


Figura 2.4 Efecto de los distintos filosilicatos en la estabilidad de la espuma.

Consumo de reactivos: Las arcillas pueden absorber los reactivos disueltos en fase acuosa lo que aumenta de forma significativa su consumo. El mecanismo por el cual disminuye su capacidad de adsorción es el recubrimiento de la burbuja presentado anteriormente. En la Figura 2.5 se observa el consumo total de reactivos de algunas plantas concentradoras chilenas que tratan sulfuros de cobre, destacándose en aquellas donde sus minerales se asocian a un alto contenido de arcillas, como es el caso de Collahuasi, Esperanza (actualmente Centinela), Codelco Norte, por citar algunas.

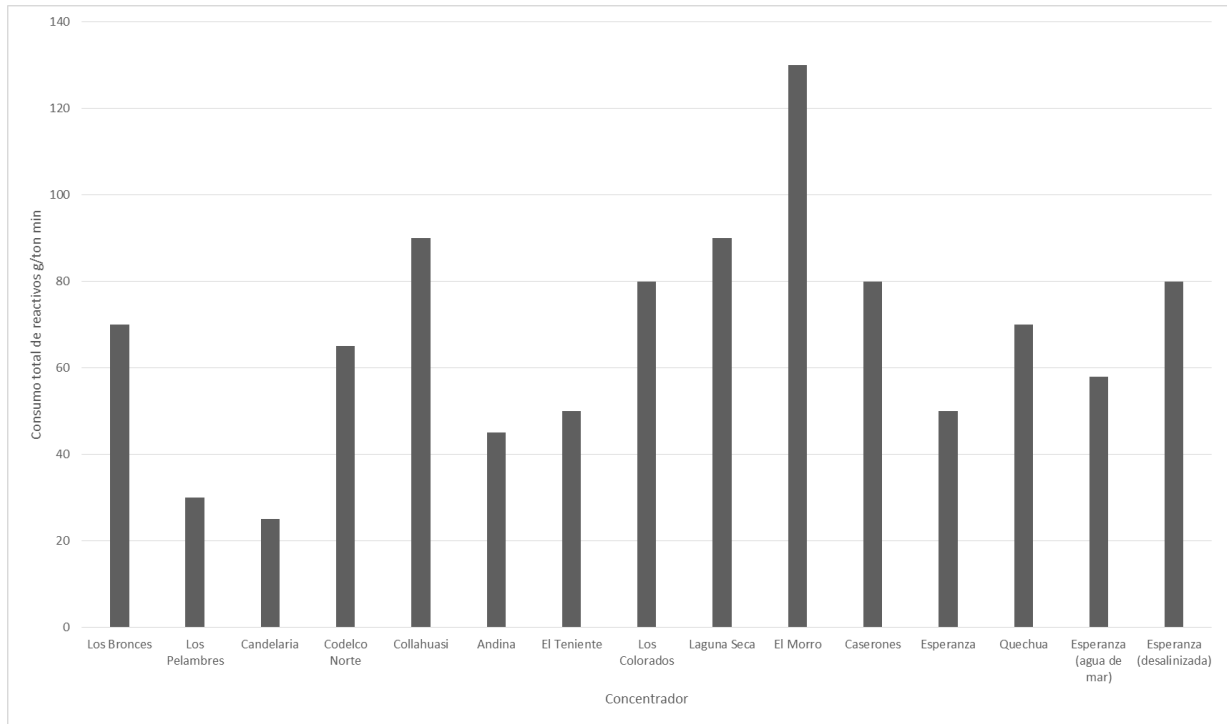


Figura 2.5 Consumo total de reactivos en plantas concentradoras chilenas. ref. (Ipinza, 2013).

En el caso de los colectores del tipo xantato, se puede observar una espuma seca y con alta dificultad para rebosar la celda. Por lo tanto, con la presencia de arcillas se recomienda un colector que exhiba propiedades espumantes, dispersante y reductor de viscosidad. Además, se debe considerar el tipo y calidad del agua en relación con el elemento que se desea recuperar. Una alternativa al problema para la flotación de arcillas es la selección de un colector para la flotación de minerales oxidados.

Cambios en la viscosidad y reología de la pulpa: La presencia negativa de las arcillas sobre la reología de cualquier pulpa mineral, ha sido reportado en numerosas publicaciones, concluyendo que genera un producto muy difícil de manejar siendo causantes de dificultades tecnológicas, debido a las altas viscosidades que generan en las pastas y a la consecuente necesidad de incrementar de modo notable el contenido de agua para favorecer su transporte mediante bombas.

Un estudio (Briseño & Rubio, 2013) realizado en Codelco División Radomiro Tomic, a 70 muestras de sulfuro con arcillas del grupo de caolín y esmectitas sometidas a ensayos

de sedimentación, muestra que a mayor contenido de arcillas menor es la velocidad de sedimentación (Véase Figura 2.6), hasta alcanzar un cierto punto de velocidad en la que se hace independiente de la cantidad de arcilla. Este resultado podría ser no del todo verdadero, si se considera que algunos componentes o especies de arcillas podrían afectar en forma más significativa la velocidad de sedimentación. En este sentido los totales de arcilla no son del todo determinantes de la conducta de sedimentación.

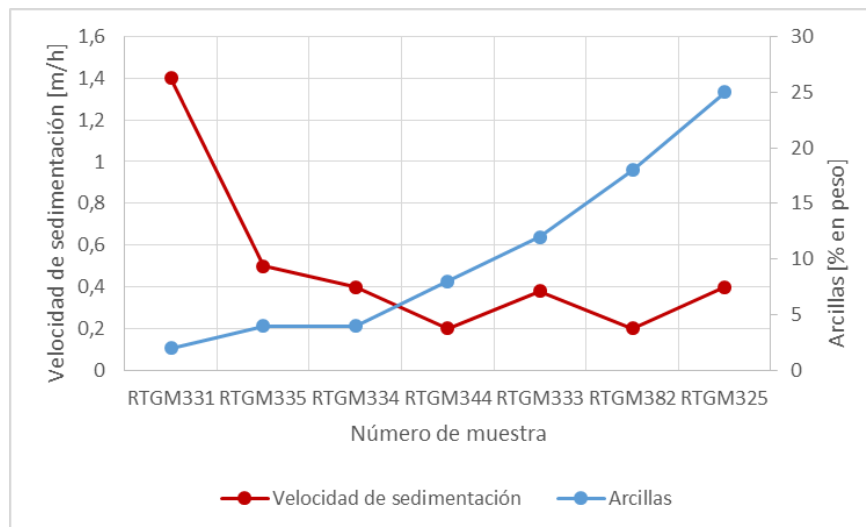


Figura 2.6 Ensayos de sedimentación con los métodos Coe Clevenge y Talmage Fitch con diferentes unidades geológicas de arcillas.
Ref. (Briseño & Rubio, 2013)

Otro estudio sobre la flotación de arcillas (Cruz, Peng, Farrokhpay, & Bradshaw, 2013) analiza el comportamiento reológico de una muestra de caolinita con 85% de pureza y otra de bentonita con un 63% en peso de montmorillonita. A pH natural de 8, con una concentración de sólidos en peso de 10 %, la bentonita presenta casi 4 veces mayor viscosidad que el caolín. Este fenómeno se debe a la alta reactividad de la bentonita lo que la hace altamente hinchable a bajas concentraciones de sólidos (Véase Figura 2.7).

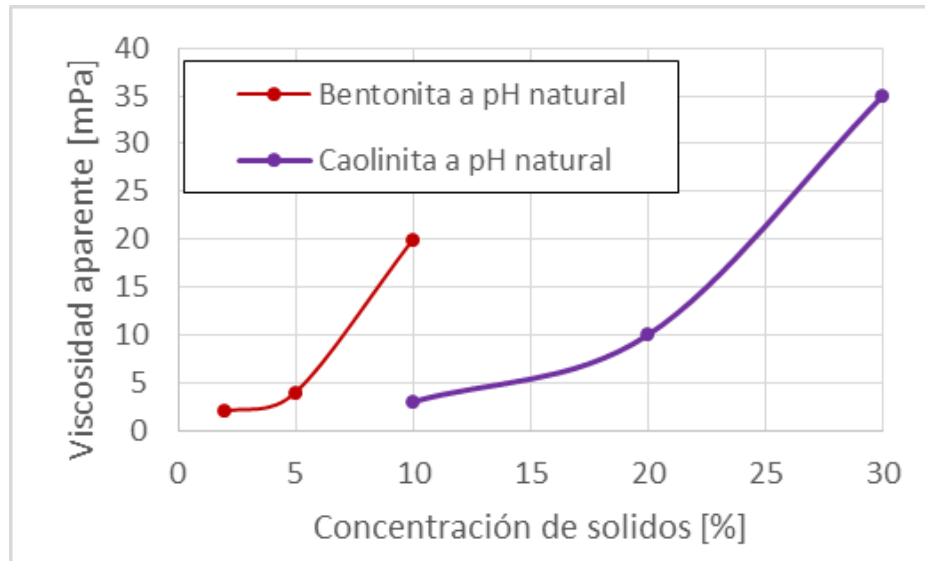


Figura 2.7 Viscosidad aparente de la bentonita y la caolinita en función de la concentración a una velocidad de corte de 100 s^{-1}
ref. (Cruz, Peng, Farrokhpay, & Bradshaw, 2013)

Luego, se usaron 3 modificadores de pH (hidróxido de sodio, cal y carbonato sódico) para ajustar el pH natural de las suspensiones a 10 y se realizaron los reogramas para concentraciones de sólido en peso de bentonita de 2, 5 y 10% y de caolinita 10, 20 y 30%. Los resultados se presentan en la Figura 2.8 y Figura 2.9. Para el caso de la caolinita a 10% en sólidos no se observa un cambio en el comportamiento reológico newtoniano, siendo las viscosidades similares con el uso de cualquiera de los 3 modificadores usados, pero para concentraciones de 20 y 30% los modificadores de cal y carbonato sódico presentan un efecto significativo sobre el comportamiento reológico de la caolinita, aumentando la viscosidad con el uso de cal y disminuyéndola con carbonato sódico, siendo el hidróxido de sodio el que menor efecto presenta. Para el caso de la bentonita se presenta un comportamiento newtoniano para porcentajes de sólidos en peso del 2%, para porcentajes mayores de 5% y 10%, el comportamiento cambia a no-newtoniano usando cualquiera de los modificadores. Pero, a diferencia de lo que ocurre con la caolinita, el carbonato sódico actúa de forma diferente a un dispersante, siendo el que aumenta en mayor medida la respuesta reológica de la pulpa.

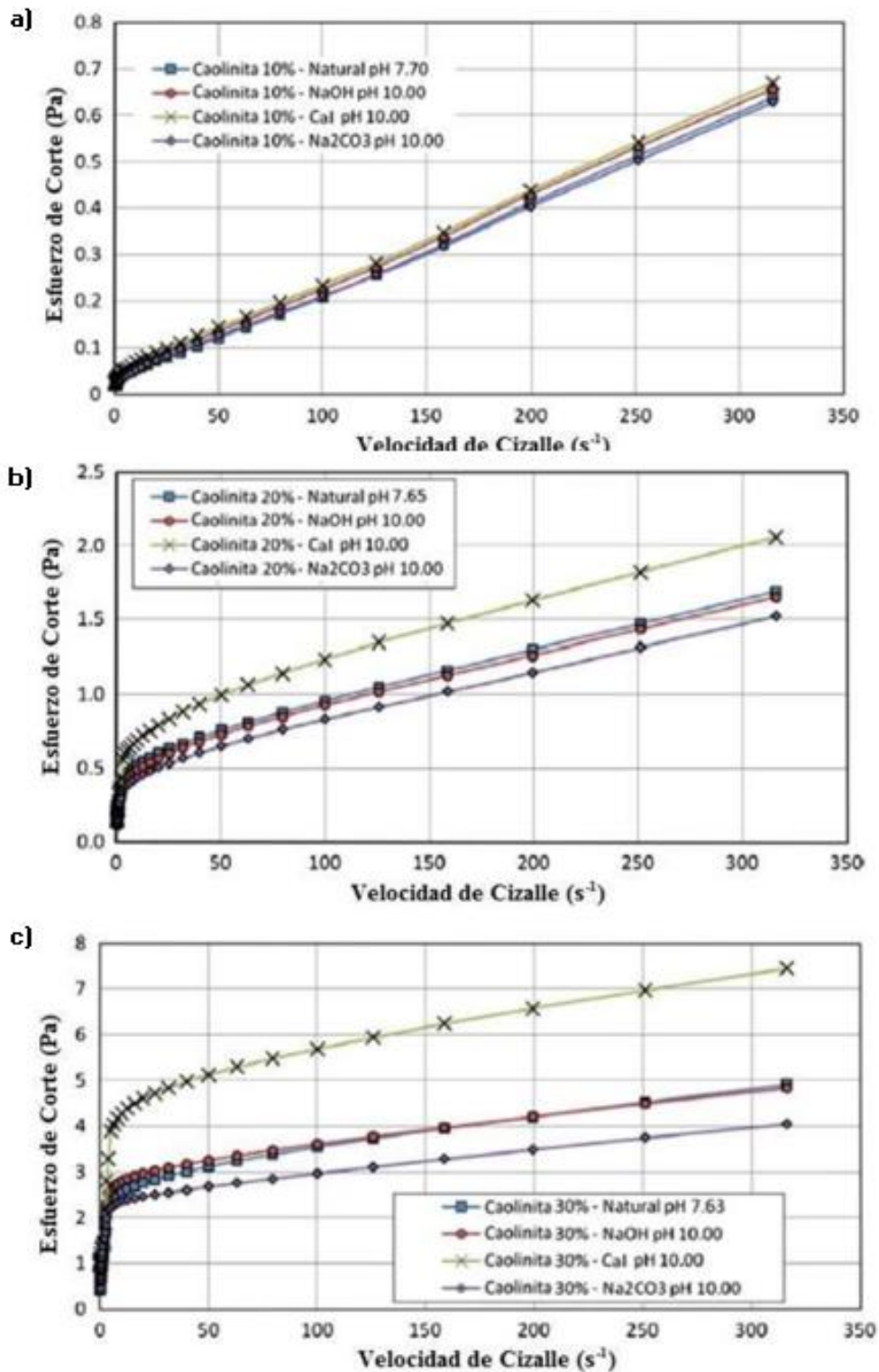


Figura 2.8 Reograma para concentraciones en sólido de caolinita de a) 10%, b) 20% y c) 30% en peso con la presencia de modificadores de pH.

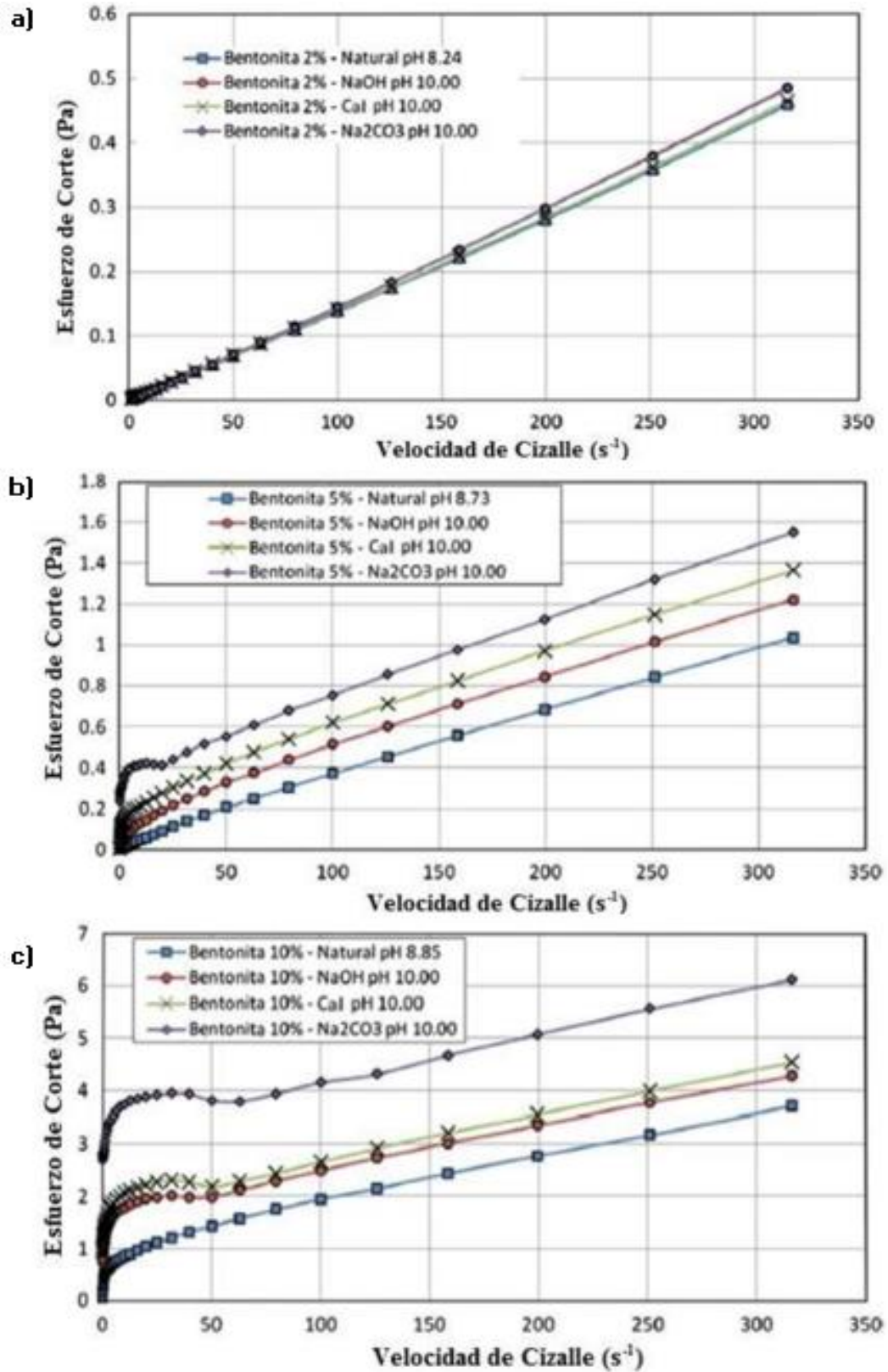


Figura 2.9 Reograma para concentraciones en sólido de bentonita de a) 2%, b) 5% y c) 10% con la presencia de modificadores de pH.

Finalmente, se estudió el efecto del colector PAX y el espumante Cytec Interfroth 6500 sobre la reología de la pulpa de caolinita al 20% y bentonita a un 8% como porcentajes de sólidos en peso.

Para el caso de la caolinita, sin la presencia de colector, presenta un comportamiento pseudo-plástico aumentando considerablemente con las adiciones de 100 y 150 gt^{-1} . Lo mismo ocurre con la adición de espumante, donde las propiedades plásticas aumentan al incrementar la dosis de reactivo (Véase Figura 2.10). Para el caso de la bentonita se presenta un comportamiento similar que con la caolinita (Véase Figura 2.11).



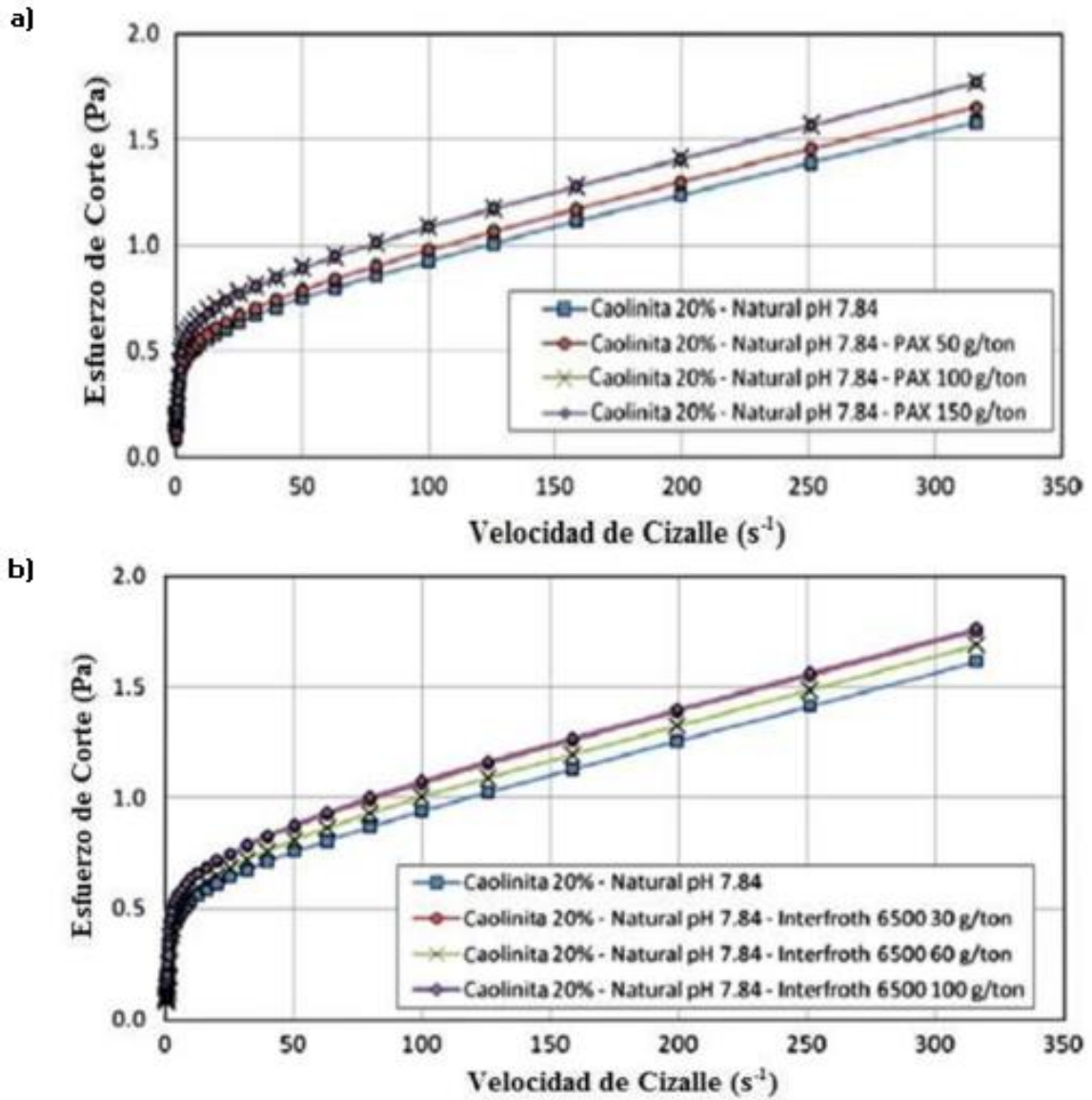


Figura 2.10 Reograma para caolinita 20%, a) adición de colector y b) espumante.

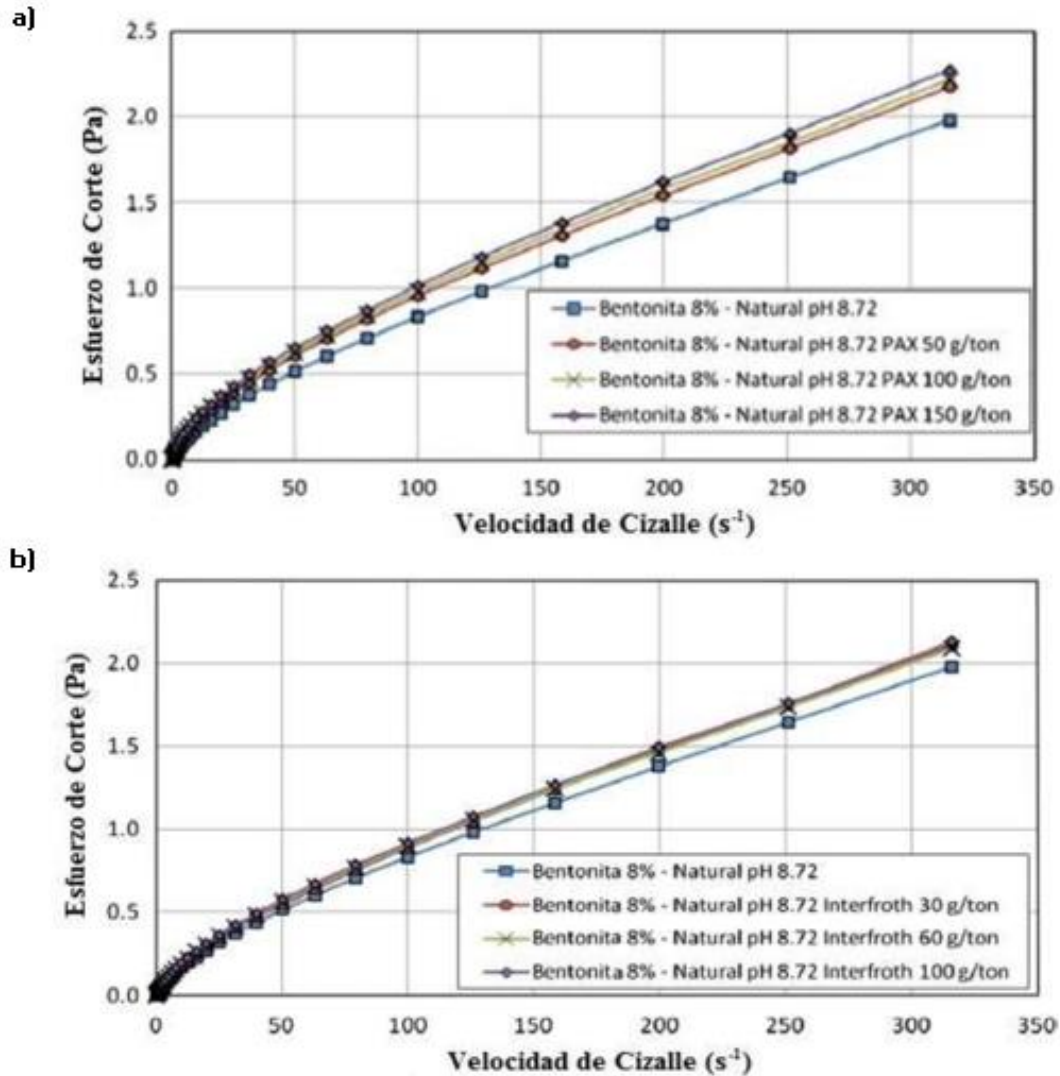


Figura 2.11 Reograma para bentonita al 8% de sólidos en peso: a) adición de colector y b) espumante.

Se ha demostrado que las suspensiones ricas en filosilicatos y arcillas, presentan un comportamiento reológico más complejo que otros minerales (Ndlovu, Forbes, Farrokhpay, Becker, & Deglon, 2014) generando una alta viscosidad de pulpa, lo que resulta en una mala dispersión del aire. Una baja viscosidad de pulpa genera una disminución del amortiguamiento de la turbulencia, lo que aumenta la probabilidad de encuentro y apego del agregado partícula burbuja, mientras que una alta viscosidad aumenta la probabilidad de desapego (Xu, Ametov, & Grano, 2011).

Los problemas de recubrimiento arcilloso y cambios reológicos en la pulpa están intrínsecamente relacionados, y su efecto negativo en la flotación es de magnitudes similares, por lo que ambos fenómenos son importantes de estudiar (Forbes, Davey, & Smith, 2014).

2.2 Minerales de arcilla

Los minerales de arcilla están compuestos por laminas bidimensionales cuyos vértices comparten láminas tetraédricas (T) y/o octaédricas (O). Las variaciones en las configuraciones de las capas T y O resultan en minerales con estructura relativamente similar, pero que difiere en sus propiedades físicas y químicas, siendo la cantidad de sílice en la formula un determinante clave en su clasificación en el grupo de la caolinita, esmecita, illita, clorita, etc (Pavez, 2002). Si solo hay una capa tetraédrica y una octaédrica en cada lámina, la arcilla es conocida como 1:1, pero si la arcilla presenta 2 láminas tetraédricas con los vértices sin compartir apuntando uno al otro y formando a cada lado una lámina octaédrica entonces se conoce como 2:1. (Véase Figura 2.12 y Figura 2.13).



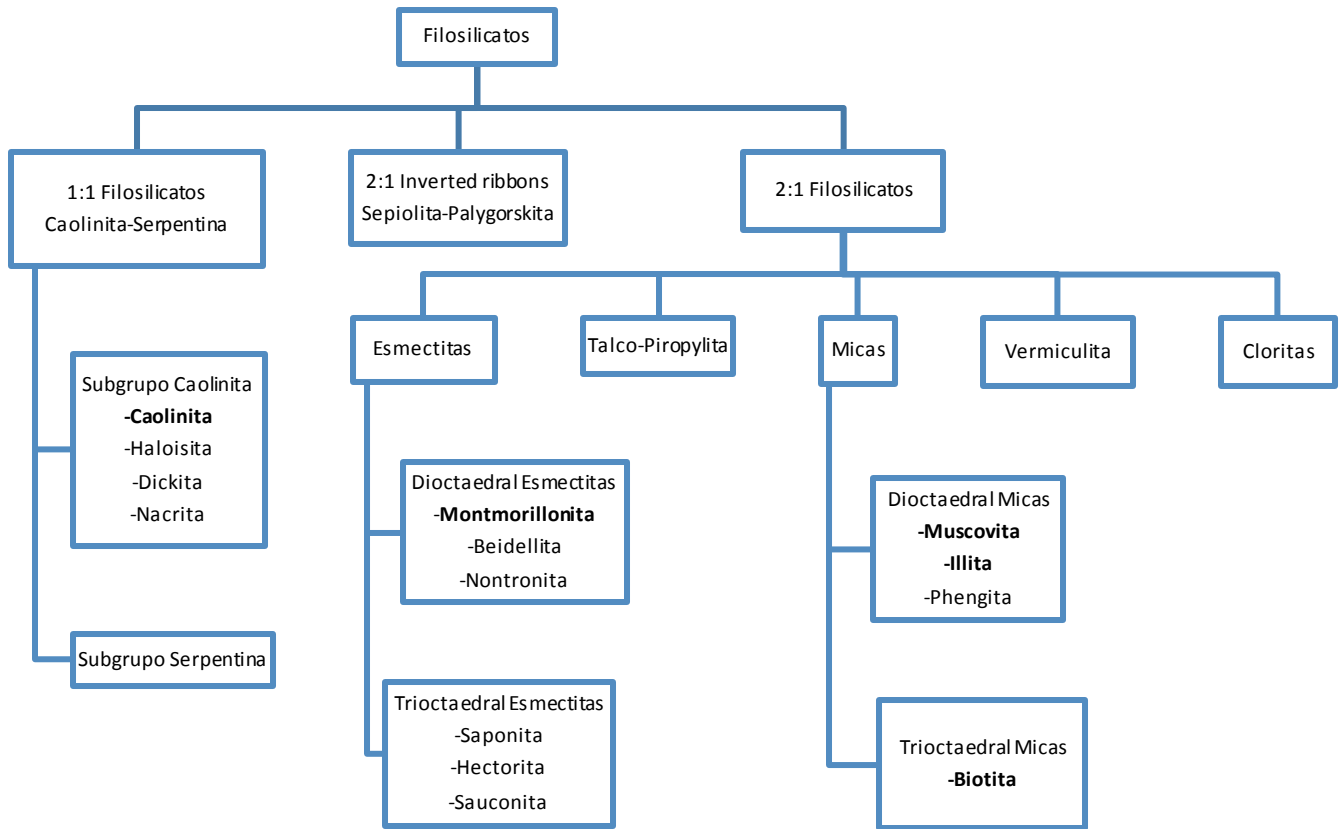


Figura 2.12 Clasificación de filosilicatos. Modificado de (Brindley, 1952)

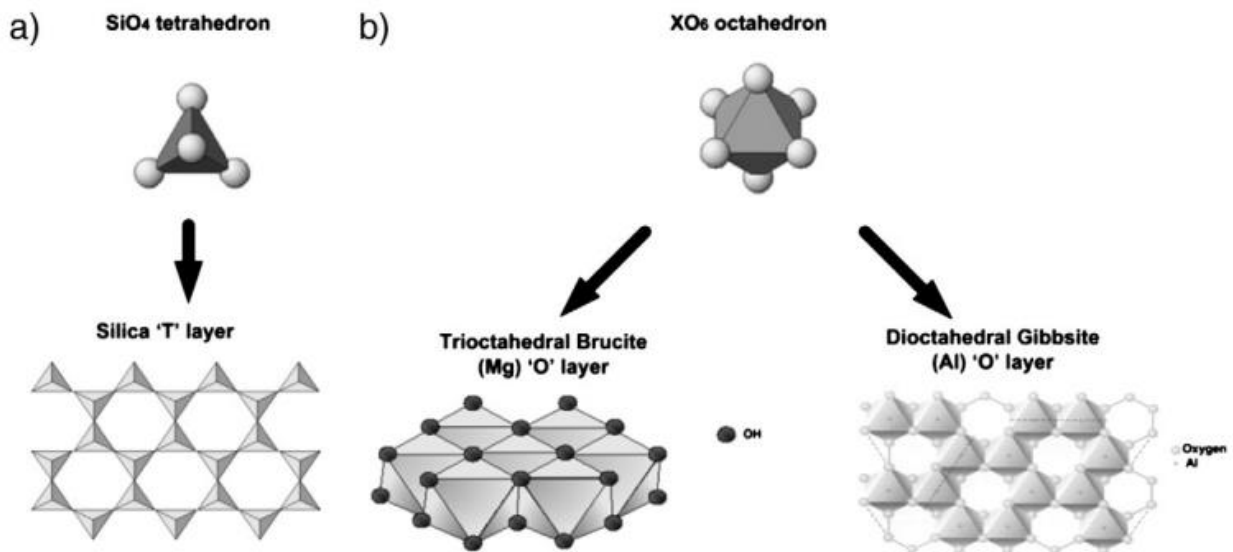


Figura 2.13 a) Estructura tetraédrica con capas T, b) Estructura octaédrica con capas O (Ndlovu, Farrokpay, & Bradshaw, 2013).

Algunas investigaciones han estudiado la morfología de las partículas, siendo el efecto de la relación de aspecto (diámetro/largo) el más relevante (Patra, Bhambhani, Vasudevan, Nagaraj, & Somasundaran, 2012). Buena parte de los cambios reológicos de las pulpas estarían asociados a la relación de aspecto de las partículas que los componen.

En las arcillas es importante el tamaño y la morfología. En general se encuentran por debajo de los 2 μm , pero existen de mayor tamaño como es el caso del caolín. Las esmectitas se encuentran en tamaños menores a 0,5 μm . (Grim & Christidis, 1978; 1995). Las fibras de paligorskita y sapiolita, poseen largos mayores a 2 μm . El tamaño cristalino pequeño implica una alta área de superficie (interna y externa) y una alta reactividad de superficie (aumentable con activación ácida). La morfología mineral es variable en un mismo grupo mineral, como se puede observar en la Figura 2.14.

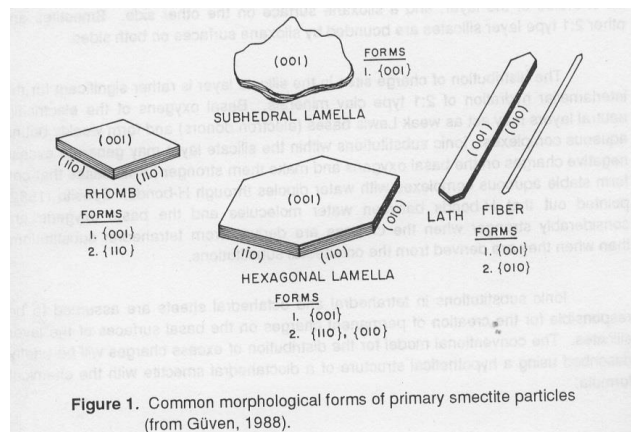


Figura 2.14. Formas morfológicas comunes de partículas de esmectita primaria (tomado de Güven, 1988).

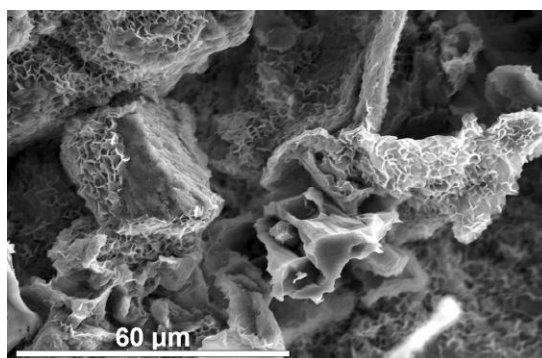


Figura 2.15. Partículas de arcillas observadas al microscopio

(O, Garcia Romero, Cuevas-Gonzalez, & López-Martinez, 2007)

Los minerales de arcillas forman agregados (libros – caolín; nidos de abeja– esmectitas), como se muestra en la Figura 2.16. Agregados afectan las calidades físicas y químicas. Por ejemplo, para mejorar las calidades reológicas de esmectita, se debe separar las láminas mediante fuerzas de cizalle. La formación de agregados también afecta la CIC (capacidad de intercambio catiónico) de las esmectitas.

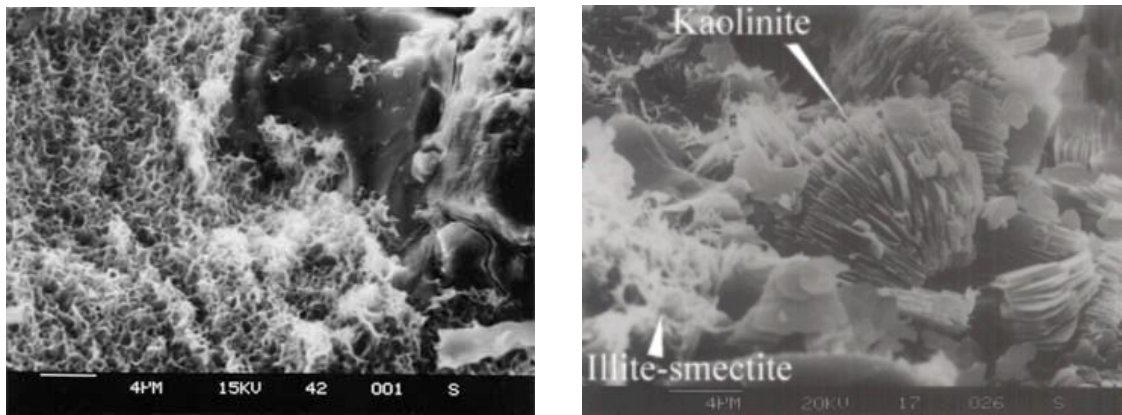


Figura 2.16. Formación de agregados de caolinita y esmectita.

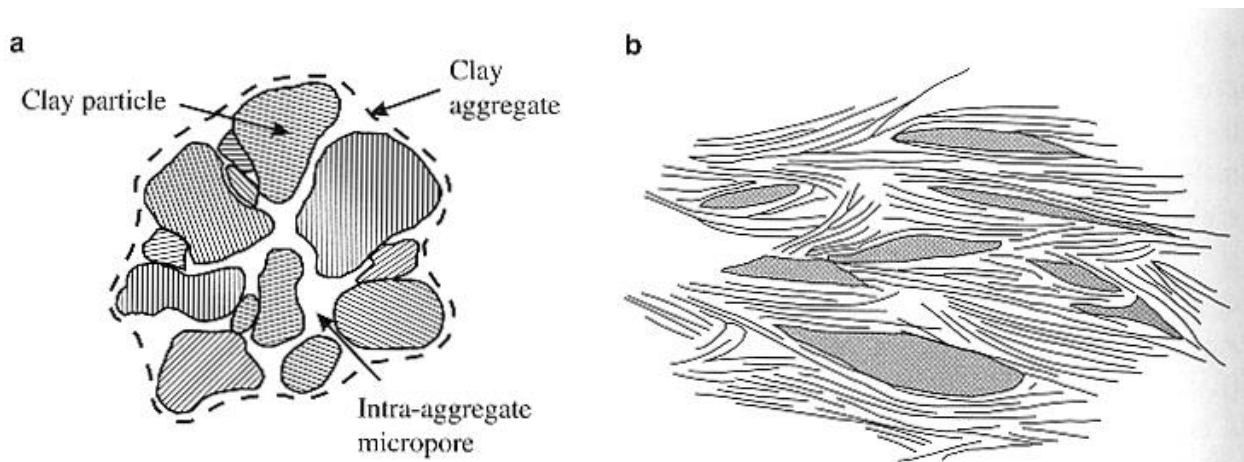


Figura 2.17(a) esquema mostrando un agregado de arcilla consistente de varias partículas de arcillas y el desarrollo de porosidad intra-agregados. **(b)** esquema mostrando el desarrollo de porosidad interagregados e intra-agregados (modificado desde Güven, 1992a).

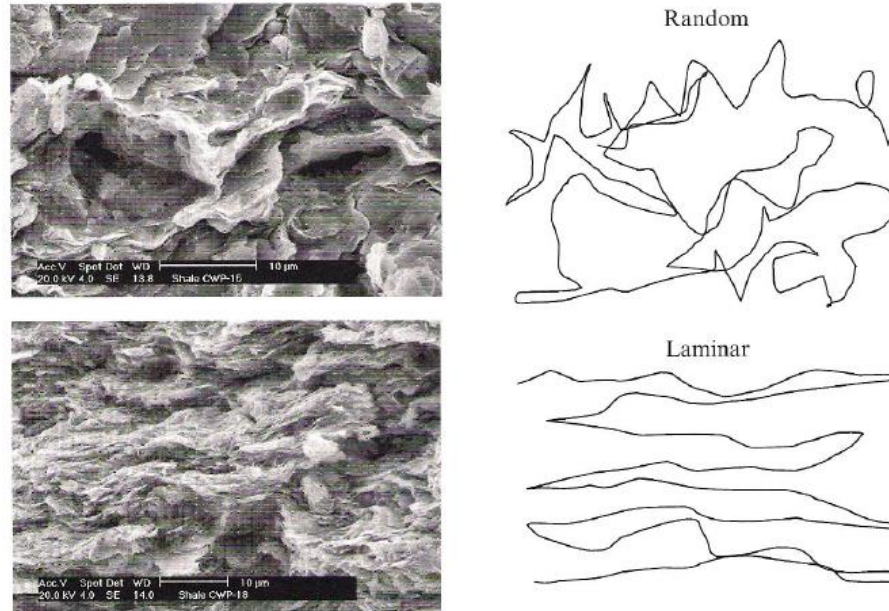


Figura 2.18. Ejemplos de construcciones aleatorias y laminares de arcillas observadas con microscopio electrónico de barrido.

Dentro de sus propiedades, las arcillas presentan una alta superficie específica, con capacidad de absorber agua e hincharse, lo que se conoce como expansión higroscópica. Una suspensión con arcillas expansivas puede aumentar drásticamente su viscosidad y límite de fluencia, sin embargo el efecto dependerá de la arcilla presente, por ejemplo las arcillas del grupo de la caolinita presentan una menor expansión que las del grupo de la esmectita (McFarlane, Bremmell, & Addai-Mensah, 2005). Además, tienen propiedades de cohesión que les da un comportamiento reológico plástico. Su capacidad de intercambio catiónico, combinado con condiciones de pH con el medio de contacto, impacta en la tensión superficial con otros materiales, favoreciendo la adherencia. Las arcillas con una estructura de 2:1, como la montmorillonita son más reactivas que las que tienen estructura 1:1 como el caolín; esto se traduce en una mayor hinchazón por el intercambio de cationes inorgánicos como Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} que están fuertemente hidratados en presencia de agua y que cuando son tratados con algunos productos químicos desarrollan diferentes propiedades superficiales y reológicas (Yildiz & Calimli, 2002).

Dentro del proceso extractivo del cobre las arcillas se presentan en los minerales chilenos en un 5 a 25% (Ipinza, 2011). El tipo de arcilla y su ley presente en el mineral varía por

yacimiento. Mientras que Distrito Ministro Hale identifica dificultades con la presencia de arcillas como la limonita y la sercita, en Minera Centinela, el foco está puesto sobre la caolinita, clorita, illita y montmorillonita. La Figura 2.19 muestra la presencia de arcillas en el material que alimenta a diferentes plantas concentradoras chilenas (Ipíñza, 2013).

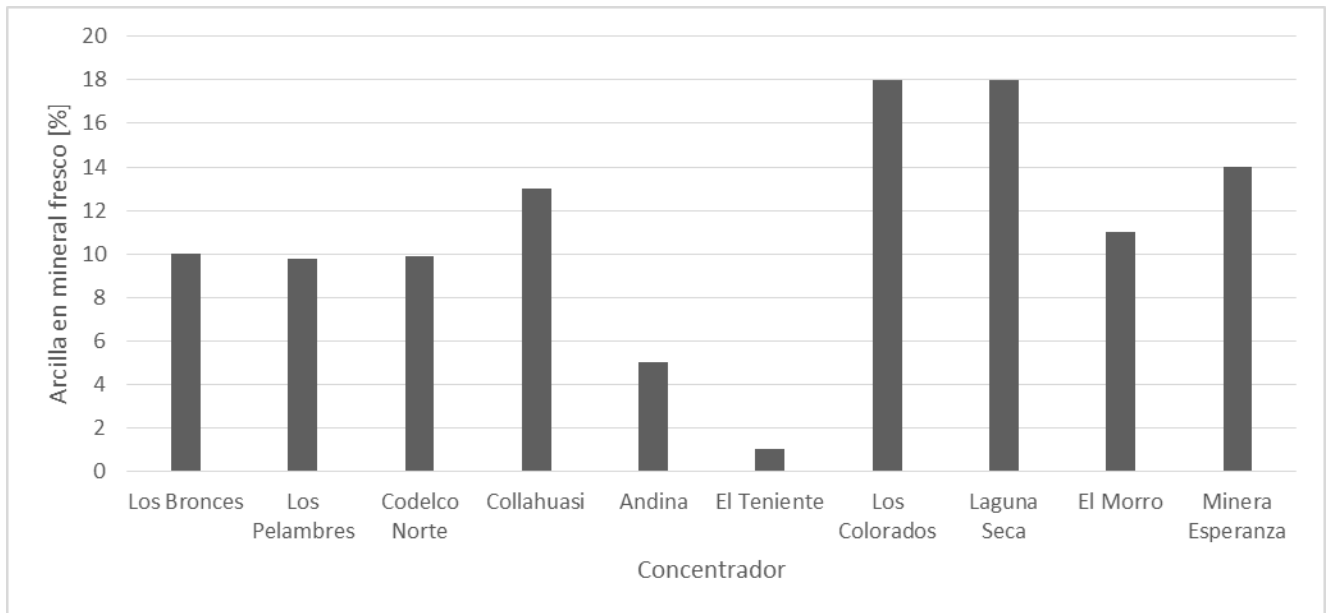


Figura 2.19 Ley de arcilla de diferentes minerales de alimentación a plantas concentradoras chilenas.

La presencia de estos minerales ha desbalanceado los estándares operacionales que se habían definido en el diseño, aumentando el consumo de agua o “make-up”, o en ausencia de este insumo, disminuyendo la producción horaria de la planta concentradora, generando variabilidad en sus procesos. Efecto que también se observa en la operación de la planta de flotación, dado que una mayor presencia de arcilla requiere más etapas de limpiezas. En el caso del Distrito Ministro Hales, la variabilidad de la fracción de arcilla en el mineral de alimentación implica problemas operacionales en las etapas de lavado, lo que impacta la recuperación y calidad del cobre final.

Soluciones tradicionales para la industria implican hoy una menor tasa de tratamiento de minerales a igual uso de recursos hídricos, limitación de capacidades de procesamiento y transporte de materiales de las unidades instaladas e incumplimiento de objetivos de recuperación y producción con respecto al negocio de la compañía.

Existen diferentes alternativas tecnológicas basadas en la concentración física de minerales, como las mesas vibratorias, espirales, jigs que se utilizan ampliamente para la separación de materiales que presentan diferencias significativas en su gravedad específica. Sin embargo, los materiales arcillosos se distribuyen a tamaños granulométricos extremadamente finos, haciendo difícil la separación entre este material y el mineral fino que contiene la especie de valor. Otra alternativa que ha sido declarada con estos fines es la generación de un lecho fluidizado mineral-aire, para la separación de la fracción fina, teniendo el mismo problema señalado previamente, en que la corriente de fino arrastra una fracción significativa del metal de valor.

Por otro lado, existe evidencia en publicaciones técnicas sobre el uso de la flotación en la recuperación de arcillas con fines comerciales, como es el caso del caolín para la fabricación de cerámicos. Asimismo, también se ha utilizado con éxito en la flotación de arcillas asociadas con especies de tierras raras, como etapa de concentración colectiva.

En relación con estos usos, existen una serie de reactivos químicos competentes para la flotación de minerales no metálicos y en particular de arcillas (básicamente silicatos de hierro, aluminio y otros metales), que por su naturaleza química no se afectarían con los reactivos utilizados para la flotación de minerales metálicos.

Un reciente estudio de memoria de título (Ravanal, 2017), empleando el equipo sedirack midió velocidades de sedimentación de pulpas de cuarzo al 28 %w/w, a las cuales se les añadió caolinita en porcentajes desde 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 %w/w, y se evaluó el efecto del pH a valores de 9 y 11; Además, se evaluó el tipo de floculante: Rheomax DR 1050 (Aniónico) en dosis de 15, 25 y 35 g t⁻¹, y SNF 4096 (Catiónico) en dosis de 60, 100 y 130 g t⁻¹. Finalmente, midió el “yield stress” para observar el efecto de las variables estudiadas. Los resultados obtenidos con el floculante Rheomax DR 1050 indican un aumento de la velocidad de sedimentación a pH 11 comparados con las pruebas realizadas a pH 9. Se observó que la velocidad de sedimentación no varió significativamente con los contenidos de caolinita ensayados. Por otra parte, la turbidez para todos los casos es mayor cuando se trabajó a pH 11 que a pH 9. Con respecto a las medidas de “yield stress”, no presentó cambios significativos para la variación de contenidos de caolinita. La relación entre el porcentaje de sólidos del sedimento y el yield



stress para cada contenido de caolinita, resultó en una clara tendencia a segregarse en dos zonas, la primera de valores de “yield stress” entre 45 y 65 Pa y porcentajes de sólidos entre 59 y 60.5 %w/w para pH 9, y la segunda a valores de “yield stress” entre 25 y 40 Pa y porcentajes de sólidos entre 60.5 y 62 %w/w para pH 11.

Los resultados obtenidos con el floculante SNF 4096 indican una disminución de la velocidad de sedimentación a medida que se aumentó el contenido de caolinita para los dos valores de pH. Para pH 11, a medida que se incrementó la dosis de 100 a 130 g t⁻¹ de floculante se vio un aumento del 60% en la velocidad de sedimentación. Por otra parte, la turbidez mantuvo valores por debajo de 1350 NTU para todos los casos ensayados, a excepción de la prueba realizada a pH 11 y 60 g t⁻¹ de floculante que estuvo cercano a los 3300 NTU; también destaca que el total de pruebas realizadas a valores de pH 9, mantuvieron una turbidez menor a 70 NTU. Con respecto a las medidas de “yield stress”, éstas se encuentran en rangos de 10 y 22 Pa para pH 9, mientras que para pH 11 entre 11 y 15 Pa; respecto del contenido de caolinita no se presentó cambios significativos en el mismo. Para los resultados del análisis del carbono total se observó un máximo en la eficiencia de adsorción de carbono en el sedimento siendo de un 67% en las pruebas realizadas a pH 9 y 130 g t⁻¹ de floculante. También (Ravanal, 2017) se evidenció que a valores de pH 11 la eficiencia de adsorción de carbono disminuyó en un 50% respecto de las pruebas realizadas a valores de pH 9. De los resultados obtenidos se observa que la variable que tiene mayor efecto tanto en la velocidad de sedimentación, como en los valores de “yield stress” es el pH, esto se explica por la fisicoquímica de superficie a través del potencial zeta, que indica que para el cuarzo a medida que se incrementa el pH, adquiere un valor más negativo de potencial zeta, es decir, una carga eléctrica superficial de las partículas más negativa, lo cual se traduce en sistemas más dispersos. Comparando los floculantes utilizados, se observó que los resultados de “yield stress”, turbidez, velocidad de sedimentación y porcentaje de sólidos del sedimento, fueron menores empleando el floculante SNF 4096. Así también, el floculante catiónico evidenció un efecto positivo en los valores de “yield stress” y turbidez, incidiendo directamente en el transporte del sedimento del “underflow” del espesador y en la calidad del agua clara recuperada; y un efecto negativo por la baja velocidad de sedimentación y bajos porcentajes de sólidos del sedimento, incrementando los tiempos de residencia



en el espesador, perdiendo capacidad de tratamiento y disminuyendo la recuperación de agua.

El porcentaje de sólidos en peso y el tamaño de partícula de suspensiones de esmectitas, afectan la viscosidad aparente, como se puede ver en la Figura 2.20.

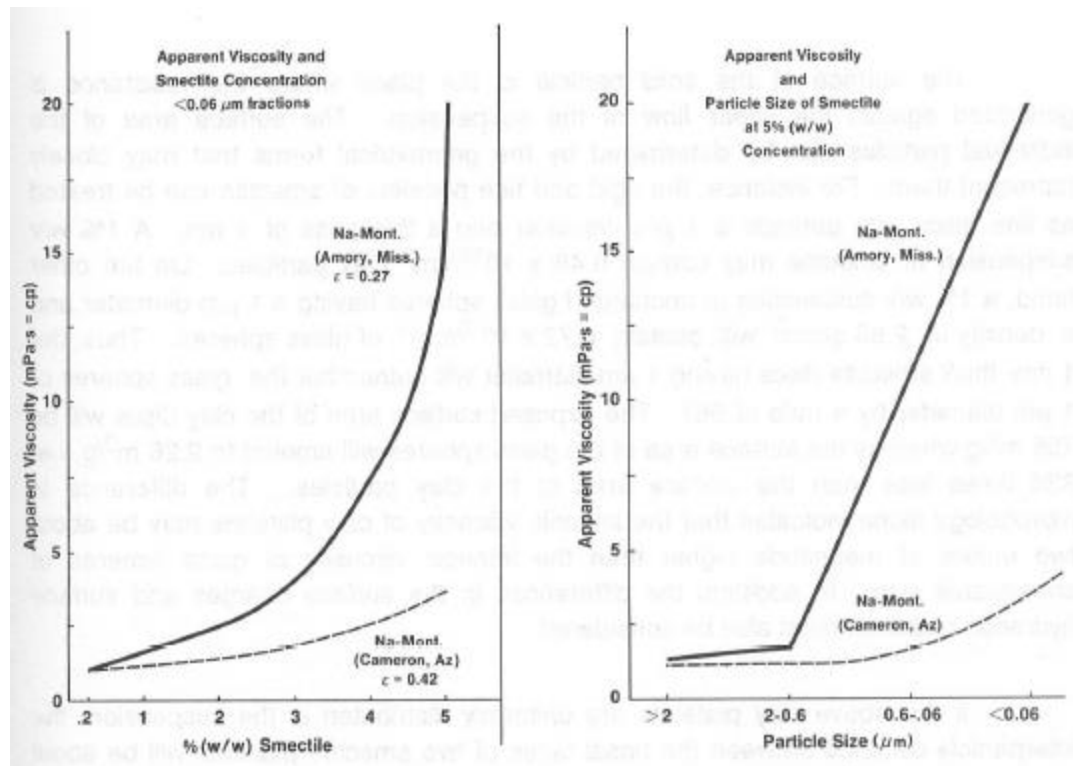


Figura 2.20. Variaciones en la viscosidad aparente de suspensiones de esmectitas de acuerdo con a) concentración en sólidos (izq) y b) tamaño de partícula (der). (Ref. Brandenburg and Lagaly, 1988).

El área de superficie y capacidad de intercambio catiónico (CIC) juegan un rol relevante en el proceso de floculación. La Tabla 2.2, muestra los valores de CIC de varias especies de arcilla.

Tabla 2.2. Valores de CIC para varios tipos de arcilla.

Especie de arcilla	CIC (cmol kg ⁻¹)	Área de superficie específica (m ² g ⁻¹)
Caolín	1-15	10-30
Illita	10-40	50-100
Clorita	10-40	10-20
Esmectita	70-150	10-800
Vermiculita	130-210	150-800
Sepiolita	10-45	150-900
Paligorskita	5-30	150-900

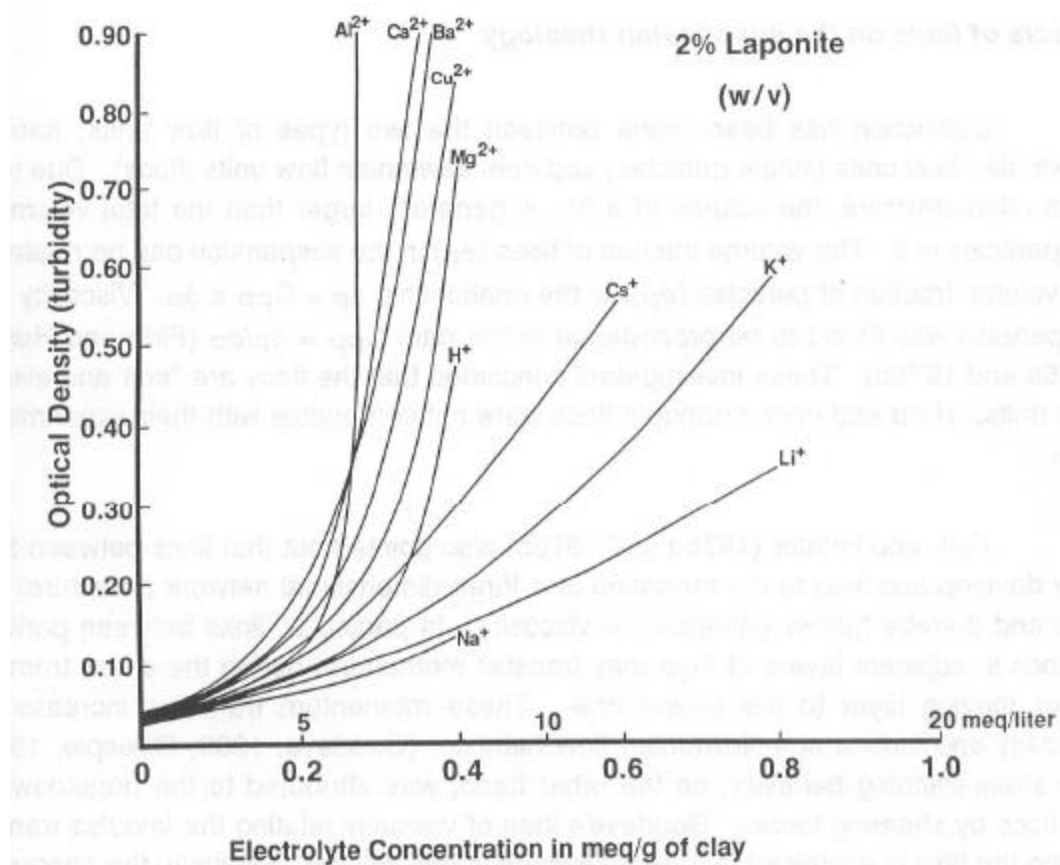


Figura 2.21. Eficiencia de floculación de cationes intercambiables (tomado de Neumann and Sansom, 1970)

2.3 Conceptos y fundamentos

2.3.1 Principios de sedimentación

Los métodos más utilizados para procesar minerales, tales como la flotación requieren que el mineral se encuentre mezclado con agua. Una vez obtenido el concentrado y el relave, es necesario separar los sólidos del fluido. Especialmente, el relave final de una planta de flotación no se debe disponer sin antes recuperar el agua y para esto se aplican los principios de sedimentación.

La sedimentación es la remoción de partículas sólidas que se encuentran suspendidas en un líquido mediante decantación gravitacional, por lo cual las partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido que las contiene.

Una partícula sólida, aislada, en un fluido de menor densidad, tiende a caer aumentando su velocidad hasta llegar a una velocidad de equilibrio entre las fuerzas de gravedad y las fuerzas de resistencia del fluido llamada velocidad de sedimentación. La velocidad de sedimentación depende del diámetro de la partícula que sedimenta, peso específico relativo entre el sólido y el líquido y la viscosidad del fluido. La ecuación característica es la siguiente:

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d}{C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}$$

Ecuación 2.1 Velocidad de sedimentación

Dependiendo de las características del fluido y de la velocidad de sedimentación, es posible que las partículas sólidas decanten en régimen laminar o estratificado o en régimen turbulento o con estelas de remolinos. Gráficamente, estos fenómenos físicos se presentan en la Figura 2.22.



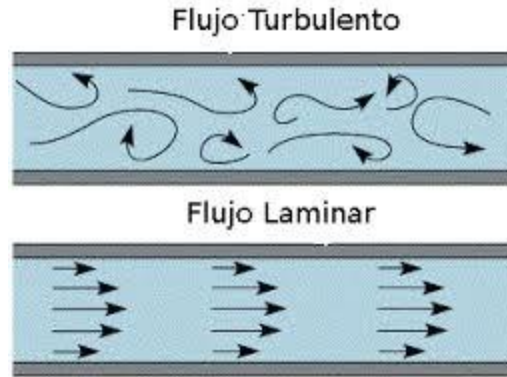


Figura 2.22 Flujo turbulento (arriba) y laminar (abajo)

Cuando una suspensión ideal sedimenta bajo el efecto de la gravedad en una columna de sedimentación se pueden distinguir las siguientes etapas del proceso.

Antes de comenzar la sedimentación la suspensión se homogeniza por agitación, de manera que su concentración es constante. Cuando la sedimentación comienza todas las partículas caen a la misma velocidad, de manera que se forma una interfaz agua-suspensión en la parte superior de la columna, la que desciende a la misma velocidad que lo hacen las partículas. Las partículas que llegan al fondo de la columna se acumulan haciendo que la concentración aumente rápidamente hasta ocupar toda la superficie disponible. La superficie del sedimento o interfaz se mueve hacia arriba a medida que más partículas se le incorporan. Finalmente, en un determinado instante y a una cierta altura la interfaz agua-suspensión se encontrara con la interfaz suspensión-sedimento denominando a ese punto altura crítica y tiempo crítico y ellas definen el punto crítico en el cual termina la sedimentación (Concha, 1982). En la Figura 2.23 se muestra un gráfico de las interfaces agua-suspensión y suspensión-sedimento en función del tiempo y en la Figura 2.24 se observan las zonas durante la sedimentación.

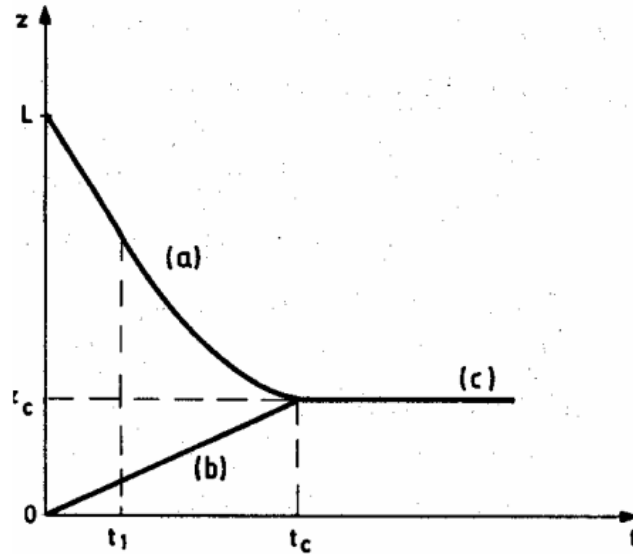


Figura 2.23 Curva de sedimentación mostrando las interfaces. (a) agua suspensión (b) suspensión-sedimento (c) agua-sedimento
Ref. (Concha, 1982).

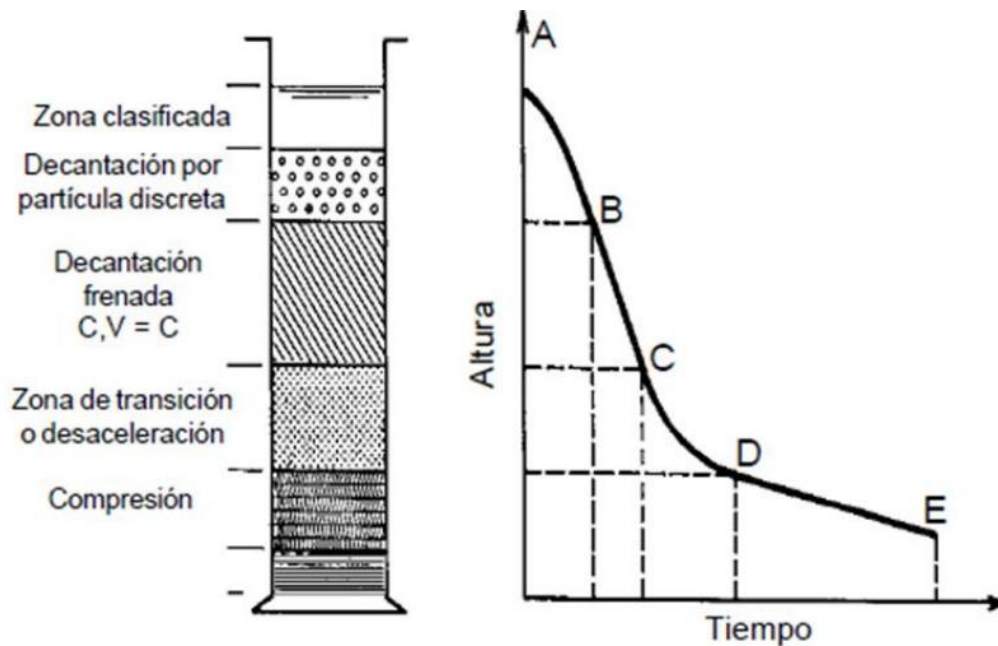


Figura 2.24 Principales zonas vistas durante la sedimentación de partículas
ref. (CEIM , 2013)

La sedimentación se utiliza en el proceso de espesamiento donde se separa parte del agua, de modo de obtener por una parte, un pulpa de mayor concentración de sólidos (underflow) y por la otra (overflow) un flujo de agua clara.

2.3.2 Sedimentación de partículas floculadas

Durante la sedimentación de las partículas floculadas las características de forma, tamaño y densidad cambian durante la caída. Las partículas floculadas son aquellas que se producen por la aglomeración de partículas coloidales desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos (Véase Figura 2.25). Debido a que las partículas se presentan en modo coloidal es necesario añadirles coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación, para incrementar su tamaño y densidad antes del proceso de sedimentación, de esta forma se evita que se forme la turbiedad consistente principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo. En bajas concentraciones de partículas, estas sedimentan o decantan libremente, en cambio con altas concentraciones de partículas floculadas (superior 500 mg L^{-1}), las partículas se encuentran a distancias tan reducidas que se adhieren entre si y sedimentan masivamente. Así, se crea una clara superficie de separación entre flóculos y el líquido que sobrenada (sedimentación interferida).

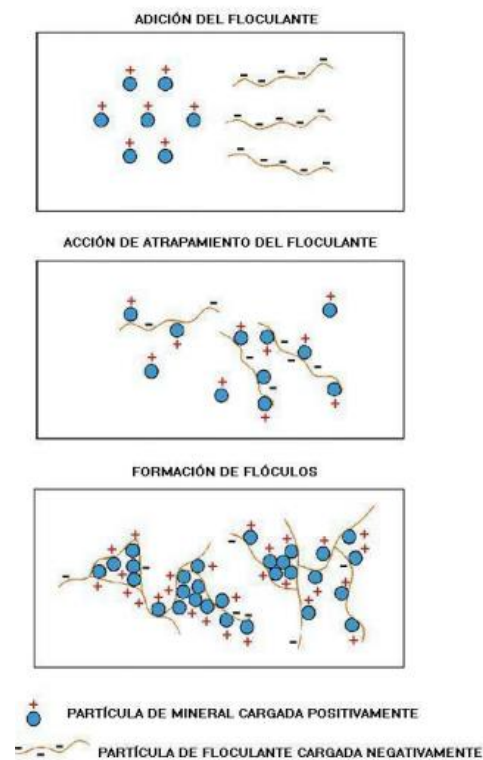


Figura 2.25 Efecto del floculante en las partículas durante la sedimentación, a) Adición de floculante, b) acción de atrapamiento del floculante, c) formación de flóculos ref. (CEIM , 2013)

2.3.3 Coagulación y floculación

Las aguas potables o residuales, en distintas cantidades, contienen material suspendido, sólidos que pueden sedimentar en reposo, ó sólidos dispersados que no sedimentan con facilidad. Una parte considerable de estos sólidos que no sedimentan pueden ser coloides. En los coloides, cada partícula se encuentra estabilizada por una serie de cargas de igual signo sobre su superficie, haciendo que se repelan dos partículas vecinas como se repelen dos polos magnéticos.

Puesto que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamadas flóculos, las partículas no sedimentan. Las operaciones de coagulación y floculación desestabilizan los coloides y consiguen su sedimentación. Esto se logra por lo general con la adición de agentes químicos y aplicando energía de mezclado.

Así, la coagulación es la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos (Véase Figura 2.26), mientras que la floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microflóculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos (Véase Figura 2.27).

El tamaño de los coloides se puede cuantificar mediante técnicas instrumentales. Una de las más usadas es la dispersión de luz dinámica (DLS) que usa tecnología no invasiva y permite detectar tamaños inferiores a 1 nm (las dispersiones coloidales tienen tamaños entre 10^2 - 10^5 nm) (Whitten, 1999). La medición se realiza mediante el análisis de las fluctuaciones en la intensidad de la dispersión de la luz que ocurre en las dispersiones coloidales. Obteniendo la velocidad del movimiento Browniano, y por lo tanto del tamaño de partícula mediante la relación Stokes-Einstein.



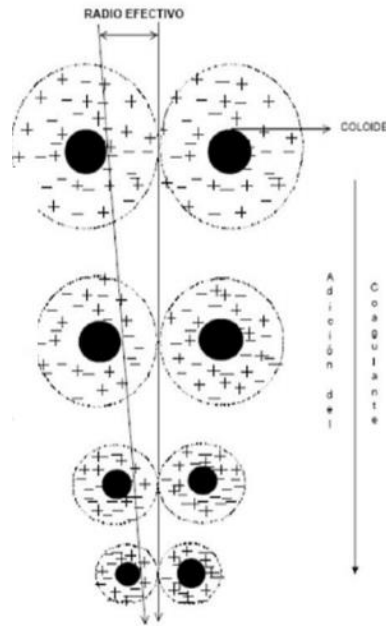


Figura 2.26 Coagulación de coloides.

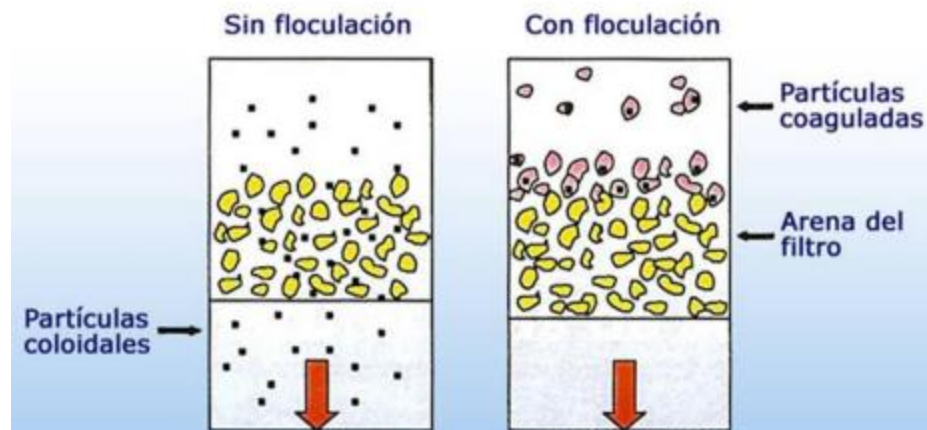


Figura 2.27 Sedimentación sin floculación (izquierda) y con floculación (derecha).

La coagulación permite disminuir el potencial Z, para que las partículas puedan aproximarse, aumentando la posibilidad de colisión. La coagulación se puede presentar a un potencial pequeño, sin la necesidad de neutralizarlo por completo. Si se añade demasiado coagulante, las partículas pueden cargarse con el signo contrario, volviendo a dispersarse.

Un floculante reúne partículas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. La floculación debe hacerse con un mezclado lento, que junte poco a poco los flóculos. Un mezclado intenso, rompe los flóculos e impide que se vuelvan a formar en su tamaño y fuerza óptimos.

2.3.4 Reología de pulpas minerales

La reología es el estudio de la deformación y la fluencia de la materia de cuerpos continuos bajo la influencia de esfuerzos, estudiando la relación entre estas variables en los materiales. Cuando se aplica una fuerza a un líquido, el líquido fluye para aliviar la tensión de esta fuerza. Los diferentes sistemas tienen diferente resistencia a este flujo y la medición de esta es una medida de la viscosidad del sistema.

El esfuerzo de corte es la fuerza aplicada a la superficie cuando esta es deformada por esfuerzo cortante (Véase Figura 2.28). Cuando el esfuerzo de corte es cero, esta se denomina tensión de fluencia. El esfuerzo de corte se define de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{\vec{F}_t}{A_t}$$

Ecuación 2.2 Esfuerzo de corte

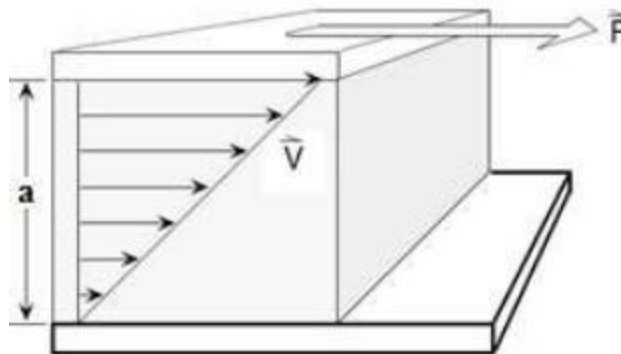


Figura 2.28 Esfuerzo de corte entre dos planos paralelos

La velocidad de corte de un fluido que fluye entre dos placas paralelas, una que se mueve a una velocidad constante y otra que permanece inmóvil, está definida por la velocidad y la distancia. A una velocidad dada, se requiere un mayor esfuerzo por unidad de área cuando las placas están más cercanas. La velocidad de corte se define de la siguiente manera:

$$\dot{\gamma} = \frac{\vec{v}}{a}$$

Ecuación 2.3 Velocidad de corte

Existen diferentes clasificaciones de acuerdo a los modelos de comportamiento, encontrando el comportamiento newtoniano y no newtoniano. Este último incluye el dilatante, plástico, pseudo-plástico y comportamiento Bingham. Las principales propiedades que se estudian dentro de la reología se pueden determinar mediante equipos llamados reómetros, lo que permiten someter el material a diferentes tipos de deformaciones controladas o medir los esfuerzos o viceversa, generando reogramas.

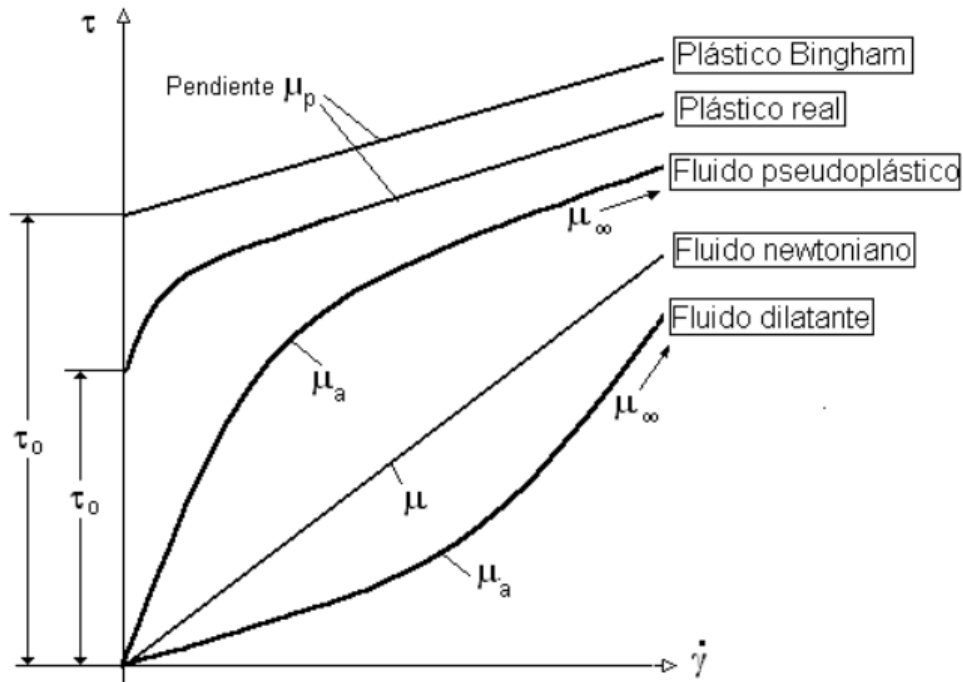


Figura 2.29 Clasificación de los fluidos (Concha, 1982)

Los fluidos con dilatación no tienen tensión de fluencia inicial y el coeficiente η disminuye al aumentar el gradiente de velocidad.

Los fluidos newtonianos, establece que existe una relación lineal entre las tensiones tangenciales y los gradientes de velocidad, siendo la constante de proporcionalidad la viscosidad.

Los fluidos pseudoplásticos no tienen una tensión de fluencia inicial a la cual comienzan a deformarse, pero la viscosidad medida por la pendiente de la curva es alta para bajas deformaciones y decrece con el incremento de la velocidad de deformación hasta lograr un valor asintótico. La relación que describe el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos es la de Ostwald, que se representa por la Ecuación 2.4.

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$$

Ecuación 2.4 Relación de Ostwald

Los fluidos plásticos reales son sustancias que no fluyen hasta la tensión de fluencia τ_0 , y luego presentan una zona de viscosidad variable que disminuye con el incremento de la velocidad de deformación hasta alcanzar un valor asintótico.

Los fluidos plásticos de Bingham son aquellos que para tensiones tangenciales inferiores a un valor τ_0 se comportan elásticamente, y superando ese valor muestran un comportamiento similar a un fluido newtoniano. A este tipo de fluido lo caracterizan dos constantes, la tensión tangencial de fluencia que es el valor de τ_0 para que se inicie el flujo, y el coeficiente de viscosidad plástica μ_p dado por la pendiente en la Figura 2.29. El modelo de plástico de Bingham es aplicable a muchos fluidos de la vida real como plásticos, emulsiones, pinturas, lodos de perforación y sólidos en suspensión en líquidos o agua. La relación que siguen los plásticos de Bingham se indica en la Ecuación 2.5.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$$

Ecuación 2.5 Ecuación de Bingham



CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el procedimiento experimental utilizado para la caracterización inicial de las muestras de mineral recibidos y de los ensayos experimentales utilizados para la obtención de relaves para su caracterización reológica y sedimentológica.

3.1 Recepción y preparación de muestras de mineral

Las muestras de mineral que provienen del chancado terciario, bajo malla 10 (2 mm) fueron homogenizadas usando técnicas de muestreo para obtener bolsas de aproximadamente 1 kg. La cantidad exacta de mineral presente en cada bolsa, se detalla en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Cantidad de mineral por muestra

Muestra	Contenido
M1	9 bolsas de 1 kg y 1 bolsa de 315 g
M2	10 bolsas de 1 kg y 1 bolsa de 925 g
M3	13 bolsas de 1 kg y 1 bolsa de 595 g
M4	10 bolsas de 1 kg
M5	13 bolsas de 1 kg y 1 bolsa de 80 g

3.2 Preparación de muestras representativas de mineral

Para la homogenización de muestras se usó la técnica de cono y cuarteo, según el protocolo mostrado en el **ANEXO A**, para generar sub-muestras de 1370 [g], 400 [g] y 25 [g] que serán ocupadas en los ensayos de molienda-flotación, análisis granulométrico y gravedad específica, respectivamente.



3.3 Gravedad específica

La gravedad específica se determina usando el método del picnómetro de Gay- Lusacc. El detalle del procedimiento se encuentra en el **Anexo B**. La determinación de esta propiedad física se realiza por cuadruplicado, para disminuir el error de medición.

3.4 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica de las muestras, se realizó con el set de tamices certificados bajo la norma ASTM-E11 presente en la Tabla 3.2. Cada tamiz tiene un diámetro de 8" y altura 2" con marco de bronce y malla de acero inoxidable.

Tabla 3.2 Set de tamices usados en el análisis granulométrico.

Malla tamiz	Abertura [μm]
30	600
40	425
60	250
70	210
80	180
100	150
200	75

El material fino, bajo malla 200, se analiza mediante la técnica de granulometría láser. Los ensayos se realizan por cuadruplicado y se considera finalizado dicho ensayo, cuando los diámetros característicos entre muestras original y duplicado, presentan un coeficiente de variación (CV) menor a 5% para el D10, un 3% para el D50 y un 5% para el D80.



3.5 Cinética de molienda

Los experimentos de cinética de molienda para cada muestra estudiada, se realizaron con una carga de 1370 [g] de mineral, con un porcentaje de sólidos de 74% y una velocidad de giro del molino de 70 rpm, para obtener un P₈₀ objetivo de 230 µm. Las características de la carga de bolas alimentadas al molino, se presentan en la Tabla 3.3. Para lograr el P₈₀ objetivo se usó la #70 (210 µm), como malla de control y se consideró que cuando se logra un 75% acumulado pasante en la #70, se estima que se tendrá un 80% acumulado pasante en torno a los 230 µm.

Los tiempos de molienda usados durante las pruebas se detallan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Configuración del collar de bolas

Diámetro [mm]	N° de bolas [-]	Masa [g]	Aporte [%]
25	34	2259	20
21	76	3389	30
16	69	1130	10
12	502	4518	40

Tabla 3.4 Tiempos de molienda

Muestra	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3
M1	8	12	*
M2	2	5	8
M3	5	11	13
M4	5	10	13
M5	6	9	13

(*) Ensayo no realizado por falta de material

3.6 Flotación rougher

Las condiciones experimentales utilizadas para los experimentos de flotación rougher, se presentan en la Tabla 3.5 y los puntos de adición para cada reactivo en la

Tabla 3.6.

La mezcla de colectores usados en estos experimentos es la tradicional usada en la concentradora de donde provienen las muestras. Colector no polar diésel para la flotación de la molibdenita. Mezcla de colectores sulfhídricos (isopropil xantato de sodio, ditiocarbamato, butil ditiofosfato de sodio) para la flotación de minerales de cobre. Como espumante se usó una mezcla de alquil mercaptano, naftaleno y nafta aromática (espumante Nalco DVS4UO14).

Esta mezcla de reactivos y su cantidad corresponden a la utilizada en la concentradora donde se obtuvieron las muestras analizadas. Por esta razón las proporciones y reactivos no fueron modificadas.

Para los experimentos de molienda y flotación se hicieron mediciones de pH al inicio y final del ensayo. La masa obtenida de concentrado y relave también fue pesada, así como también la alimentación a la celda.

Tabla 3.5 Condiciones experimentales de los ensayos de flotación.

Parámetro	Unidad	Valor
Tamaño granulométrico (25%+70# ASTM)	µm	210
pH	-	9,1
Colector ditiocarbamato	g t ⁻¹	10
Colector isopropil xantato de sodio	g t ⁻¹	6
diesel	g t ⁻¹	9
Colector butil ditiofosfato de sodio	g t ⁻¹	1,5
Espumante alquil mercaptano	g t ⁻¹	10
Tiempo colección concentrado	Min	20



Frecuencia de paleteo	S	10
-----------------------	---	----

Tabla 3.6 Puntos de adición de reactivos.

Reactivo	Punto de adición
Colector ditiocambamato	Molino
Colector isopropil xantato de sodio	Molino
Diésel	Molino
Colector butil ditiofosfato de sodio	Molino
Espumante Alquil mercaptano	Celda

Al término de cada experimento de flotación rougher, el concentrado y el relave filtrado se secó en estufa a 105 °C, durante 20 h. Enseguida, fueron enfriados en la estufa y pesados en balanza analítica digital, para determinar la recuperación en peso. La recuperación en peso tiene un valor promedio de 7,58%, variando desde 7,34 hasta 8%.

3.7 Caracterización por sedimentación de los relaves de flotación rougher

Para este ensayo se utilizan los relaves obtenidos durante la flotación rougher. Los experimentos de sedimentación se realizan en probetas de 1 L. En estos experimentos se registra la variación de la altura con el tiempo, y a partir de la zona lineal de las curvas obtenidas, se determina la pendiente de la línea recta que mejor ajusta el conjunto de puntos. La velocidad de sedimentación se determina a través de la pendiente de la línea que se muestra en la Figura 3.1.



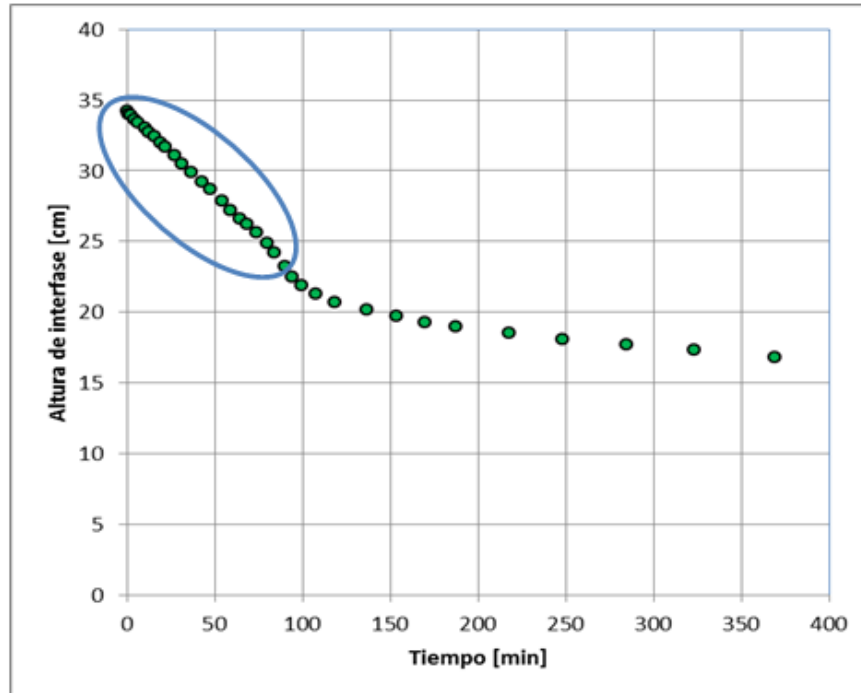


Figura 3.1 Gráfica de altura versus sedimentación obtenidas en ensayos de sedimentación

Las condiciones experimentales de los ensayos desarrollados mediante esta técnica son:

- Pulpas minerales de 9% y 12% de sólidos en peso
- Adición de floculante SNFB 2350 con dosis de 6 g t^{-1}
- Todas las mediciones consideran original y duplicado, informándose en este estudio, el promedio de ambos valores (el resultado se acepta, siempre que el coeficiente de variación CV sea menor a 5%)

3.8 Caracterización reológica de las colas de flotación rougher

La caracterización reológica de los relaves de la flotación rougher, se realiza con la metodología del cilindro helicoidal. Todas las mediciones se realizaron en duplicado, informándose el promedio de ambos para cada metodología. A continuación se describe en que consiste esta metodología.

El método del cilindro helicoidal y copa, considera mediciones en reómetro rotacional marca Haake, modelo RS6000, utilizando sensor cilíndrico, de superficie helicoidal y copa. Los resultados obtenidos a través de este tipo de mediciones, corresponden a

gráficos de esfuerzo de fluencia versus viscosidad dinámica, más conocidos como reogramas.

Del análisis de los reogramas es posible obtener valores de tensión de fluencia y viscosidad. La interpretación realizada considera el ajuste del modelo de Bingham, el cual se ha demostrado que es adecuado para este tipo de pulpas.

En la Figura 3.2, se muestra en forma esquemática la forma de un reograma. La zona lineal de la curva se ajusta al modelo de Bingham, el cual entrega la tensión de fluencia, donde intersecta el eje de las ordenadas (punto A), mientras que la pendiente de la recta representa la viscosidad de Bingham (punto B).

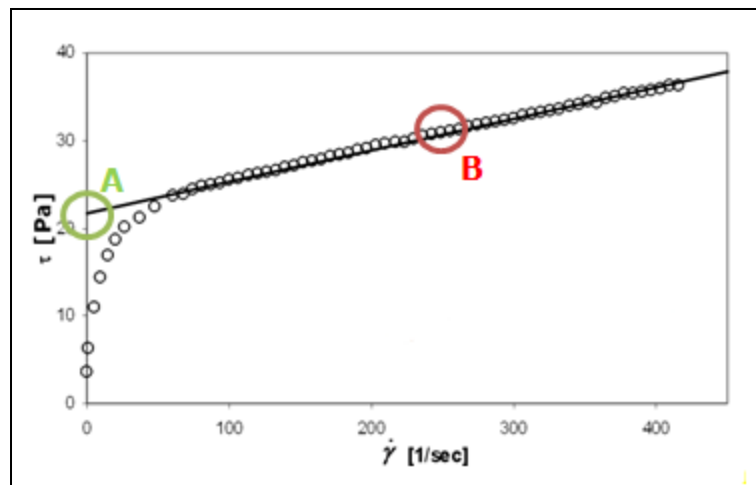


Figura 3.2 Reograma tipo obtenido por la metodología del cilindro helicoidal y copa

3.9 Caracterización mineralógica de las colas de flotación rougher

Las muestras de sondaje fueron inspeccionadas de manera visual y los relaves obtenidos a partir de estas muestras fueron enviados a SGS para su análisis por QEMSCAN (microscopía electrónica por **Q**uantitative **E**valuation of **M**inerals by **S**CANning).

La técnica SEM se basa en el principio de la microscopía óptica, en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. La evaluación cuantitativa de materiales mediante microscopio electrónico de barrido (SEM), muestra que los sistemas de análisis de

imágenes en que están configurados estos instrumentos, permiten medir la variabilidad mineralógica basándose en la química a escala micrométrica.

El QEMSCAN consta de un microscopio electrónico de barrido básico, equipado con cuatro detectores de rayo X de dispersión de energía con elementos ligeros y una unidad de procesamiento electrónico diseñado por la empresa Intellection.

Normalmente se analizan 4-5 secciones pulidas (que representan 4-5 fracciones de tamaño partícula) por muestra. El conjunto de datos resultante incluye información acerca de entre 12.000 y 50.000 granos.

En consecuencia, si la muestra contiene sólo un 1% de calcopirita, el análisis incluirá información acerca de entre 120 y 500 granos de calcopirita en la muestra, además de información acerca de la mineralogía de sulfuros y no sulfuros, que a menudo puede ser igualmente importante.

3.10 Equipos y materiales

La Tabla 3.7 detalla los principales equipos utilizados en este estudio destinados a la preparación de muestras, caracterización física, sedimentológica y reológica.

Tabla 3.7 Listado de equipos y materiales

Ensayo	Equipos	Materiales
Preparación de muestras en laboratorio	- No aplica	- Paño de roleo - Cuarteador - Puruña
Determinación de densidad de sólidos	- Bomba de vacío Dosivac DVR280. - Desecador Arquimed - Balanza semianalítica	- Picnómetro - Termómetro Digital - Embudo
Análisis granulométrico en ROTAP y láser	- Agitador de tamices ROTAP - Balanza semianalítica - Limpiador de tamices ultrasónico	- Tamices certificados Norma ASTM-E11 - Brocha - Espátula

	<ul style="list-style-type: none"> - Analizador de tamaño de partículas láser 	
Cinética de molienda	<ul style="list-style-type: none"> - Molino de bolas - Sistema de rodillos motrices - Filtro a presión - Horno de secado - Agitador de tamices ROTAP. - Balanza semianalítica - Limpiador de tamices ultrasónico 	<ul style="list-style-type: none"> - Collar de bolas - Sistema de descarga molino - Tamices certificados Norma ASTM-E11 - Brocha -
Flotación Rougher	<ul style="list-style-type: none"> - Molino de bolas - Sistema de rodillos motrices - Máquina de flotación Denver - Medidor de pH - Agitador magnético - Compresor de aire - Horno de secado 	<ul style="list-style-type: none"> - Collar de bolas - Sistema de descarga molino - Celda de acrílico - Electrodo - Gotario - Cronómetro - Micropipeta
Caracterización Reológica	<ul style="list-style-type: none"> - Reómetro RS6000 (Haake). - Baño Termoestático. - Compresor. - Sensor helicoidal. - Copa. - Sensor FL22. - pH – metro. - Agitador magnético 	<ul style="list-style-type: none"> - Vaso Precipitado - Espátula - Bandejas metálicas - Piseta -
Caracterización Sedimentológica	<ul style="list-style-type: none"> - Agitador Mecánico. - Micropipeta de 5 [mL]. 	<ul style="list-style-type: none"> - Probeta de 1 [L] - Huincha de papel blanca - Cronómetro

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se indican los principales resultados experimentales utilizando las técnicas previamente descritas en la metodología de trabajo. Además, se discuten los resultados obtenidos y soportados sobre la teoría descrita en el correspondiente Capítulo 2.

4.1 Gravedad específica por picnometría

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos en el ensayo para la determinación de la gravedad específica por el método del picnómetro, junto con el error esperado de la medición y el coeficiente de variación para cada resultado.

Tabla 4.1 Densidad de sólidos.

Muestra	Densidad promedio [g cm ⁻³]	Gravedad específica [-]	Coefficiente de variación [%]
M1	2,69 ± 0,02	2,69	0
M2	2,71 ± 0,02	2,71	0,2
M3	2,65 ± 0,02	2,65	1,1
M4	2,65 ± 0,02	2,65	0,4
M5	2,7 ± 0,02	2,7	0,2

Como se puede observar en la Tabla 4.1 no existe una diferencia significativa en las densidades de los minerales, obteniéndose valores similares a los observados en los minerales de cobre. Además, este valor se encuentra muy cerca del promedio observado en las concentradoras chilenas con un valor de 2,7 g cm⁻³, en un rango de 2,6 a 2,8.

4.2 Análisis granulométrico

La Figura 4.1 muestra la curva de distribución granulométrica inicial realizada para las 5 muestras estudiadas. La curva representa el porcentaje pasante acumulado versus la abertura de la malla en micrones.

En la Tabla 4.2 se presentan los diámetros característicos D_{10} , D_{50} y D_{80} para cada una de las muestras de mineral, que se emplean en la flotación rougher.

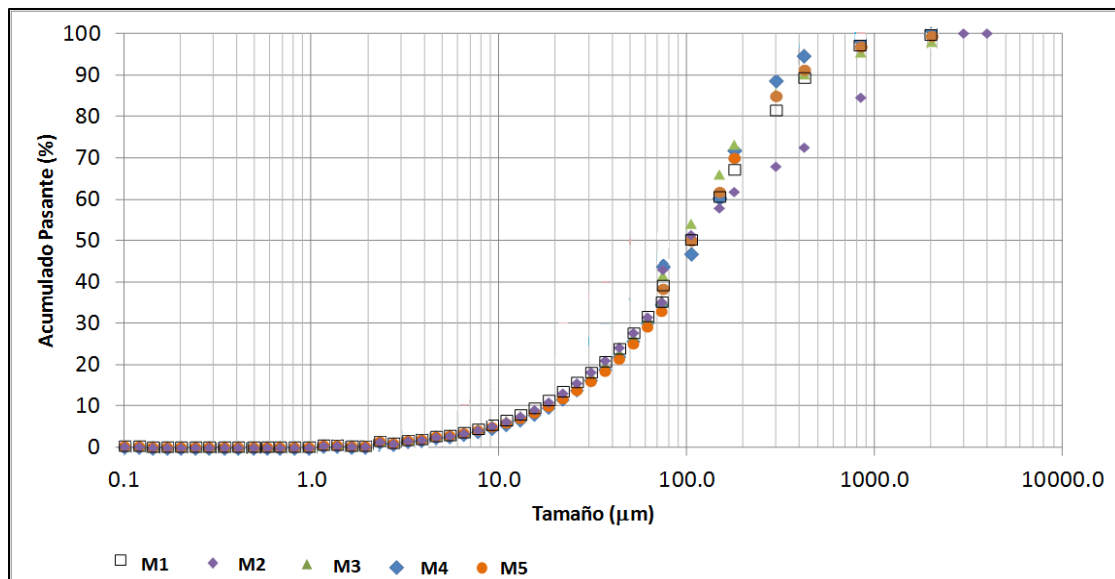


Figura 4.1 Análisis granulométrico del mineral de cabeza para la flotación rougher.

Tabla 4.2 Diámetros característicos de partículas de mineral

Identificación	D_{10} [μm]	D_{50} [μm]	D_{80} [μm]
M1	16,2	105,3	287,1
M2	17,2	101,4	292,0
M3	17,2	96	246,9
M4	19,4	116,5	238,3
M5	18,9	106	260,7

Como se observa en la Figura 4.1 todas las muestras presentan una granulometría bastante similar, siendo la variación de diámetros característicos muy pequeña. Si se ordenan las muestras en orden decreciente de tamaño: $M2 > M3 > M5 > M1 > M4$, (M2 es la muestra más gruesa y M4 la más fina). Se esperaría que M2 tome un mayor tiempo en llegar al P_{80} objetivo de $230 \mu\text{m}$ por tener una mayor cantidad de mineral grueso.

Con esta información es posible estimar los tiempos de molienda que se deben utilizar durante los ensayos de cinética de molienda. Es importante no olvidar que durante el proceso de molienda, no solo afecta la granulometría del mineral sino que también lo hace la dureza de este, por ello los tiempos escogidos no siempre serán los correctos ya que, dependen de sus características granulométricas y mineralógicas. Es así como se tiene que el orden de tiempos de molienda de menor a mayor para las muestras M1 a M5 deberían ser: $M4 < M1 < M5 < M2 < M3$.

Sin embargo, en la Tabla 4.2, entrega información del contenido de partículas más finas, lo que resulta extremadamente relevante para estudios de sedimentación. En particular, para tamaños de partícula por debajo del D_{10} , se pueden encontrar conductas coloidales de las partículas en un medio acuoso. Los coloides se diferencian de las suspensiones químicas, principalmente en el tamaño de las partículas de la fase dispersa. Las partículas en los coloides no son visibles directamente, son visibles a nivel microscópico (entre 1 nm y $1 \mu\text{m}$), y en las suspensiones químicas sí son visibles a nivel macroscópico (mayores de $1 \mu\text{m}$). Además, al reposar, las fases de una suspensión química se separan, mientras que las de un coloide no lo hacen. La suspensión química es filtrable, mientras que el coloide no es filtrable. Con estos antecedentes, se puede inferir que las muestras M1 y M2, con tamaños de partículas más pequeños a nivel del D_{10} , serán las que presenten condiciones reológicas y sedimentológicas, desmejoradas respecto a las otras muestras.

4.3 Composición mineralógica

La Figura 4.2 muestra las principales especies mineralógicas identificadas en cada muestra generada de relave rougher. Estos datos fueron obtenidos a partir de un análisis mineralógico usando la técnica Qemscan, realizada por la empresa SGS. En todas las



muestra se observa un porcentaje alto de cuarzo, seguidos de plagioclasa, albita y feldespato potásico.

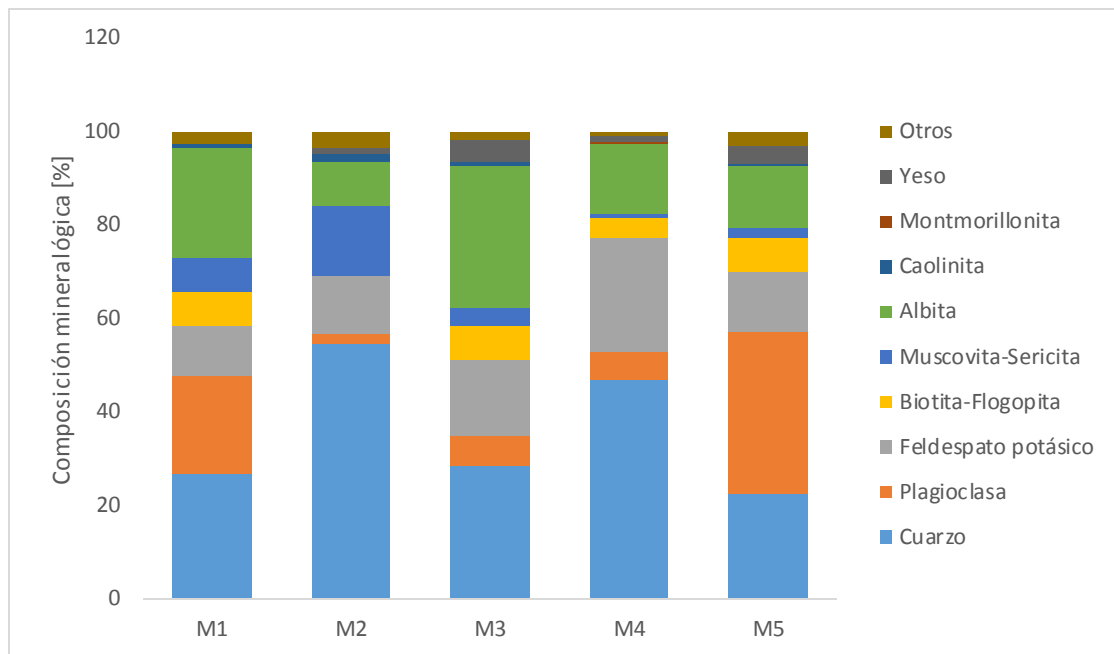


Figura 4.2 Caracterización mineralógica de 5 muestras de relaves.

En la Tabla 4.3, se presenta la caracterización mineralógica, indicada en porcentaje en peso, para cada una de las muestras estudiadas. Esta información será utilizada a lo largo de esta memoria, para realizar las relaciones y tendencias para cada mineralogía con las propiedades de cinética de molienda, sedimentación y reología.

Algunos antecedentes relevantes de estas especies normalmente conformadora de la ganga y que reporta en el relave, en cuanto a su fórmula química y dureza en la escala de Mohs, se indica a continuación:

El cuarzo es un mineral compuesto de sílice (SiO_2). Tras el feldespato es el mineral más común de la corteza terrestre estando presente en una gran cantidad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Destaca por su dureza y resistencia a la meteorización en la superficie terrestre, dándosele un valor de 7,0 en la escala de Mohs.

La plagioclasa, $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$, posee un sistema de cristalización monoclinico con una dureza entre 6,0 y 6,5.

Los feldespatos son un grupo de minerales tecto y aluminosilicatos que corresponden en volumen a tanto como el 60 % de la corteza terrestre. La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de ortoclasa (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Feldespatos con una composición química entre anortita y albita se llaman plagioclasas, en cambio los feldespatos con una composición entre albita y ortoclasa se llaman feldespatos alcalinos. Los feldespatos potásicos, que son monoclinicos, entre los que están: ortosa, hialofano y anortoclasa, con una dureza entre 6,0 y 6,5.

La flogopita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las micas. Es frecuente encontrarlo en paquetes de láminas de color castaño, a veces de grandes dimensiones. Su fórmula química es $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$, con una dureza en la escala de Mohs de 2,0 a 2,5.

La biotita químicamente es un filosilicato de hierro y aluminio, del grupo de las micas, dando lugar a distintos minerales de este grupo por sustituciones en la fórmula: Lepidomelana (FeO), Manganofilita (Mn), Wodanita (Ti), Natrobiotita (Na), Hendricksita (Zn). Su fórmula química más aceptada es $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$. Su dureza es de 2,5 a 3,0.

La moscovita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las micas alumínicas. Químicamente es un aluminosilicato de potasio y aluminio, que puede llevar magnesio, cromo y una gran variedad de otros elementos en sus numerosas variedades. Su fórmula química es $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ y su dureza es de 2,0 a 2,5.

La albita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo tectosilicatos y dentro de ellos pertenece a los feldespatos denominados plagioclasas. Es un aluminosilicato de sodio, que puede llevar calcio o potasio sustituyendo al sodio en la red cristalina, pero por definición de albita debe tener mucho más sodio (más de 90%) que calcio y potasio juntos (menos de 10%). Su fórmula química es $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, y su dureza es de 6,0 a 6,5.

La caolinita es un mineral de arcilla, forma parte del grupo de minerales industriales, con la composición química $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Se trata de un mineral tipo silicato estratificado,



con una lámina de tetraedros unida a través de átomos de oxígeno en una lámina de octaedros de alúmina. Las rocas que son ricas en caolinita son conocidas como caolín o arcilla de China. Su dureza es 2,0.

La montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos. Su fórmula química es $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 n\text{H}_2\text{O}$. Su dureza es de 1,0 a 2,0.

El yeso es un mineral compuesto de sulfato de calcio hidratado; también, una roca sedimentaria de origen químico. Son minerales muy comunes y pueden formar rocas sedimentarias monominerales. Su fórmula química es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y su dureza es de 1,5 a 2,0.

Si se tienen en cuenta estos valores de durezas referidos a la escala de Mohs, podemos separarlos entre especies duras y blandas, y más aún obtener una razón entre los contenidos de especies duras/especies blandas en cada una de las muestras. De acuerdo con este análisis, el dominio de dureza de las muestras, de mayor a menor, es $M4 > M5 > M1 > M3 > M2$.

Tabla 4.3 Caracterización mineralógica de las muestras estudiadas en porcentaje en peso respecto del total de especies componentes de arcilla.

Contenido	M1	M2	M3	M4	M5
Cuarzo	26,5	54,5	28,3	46,6	22,1
Plagioclasa	21,1	2,3	6,5	6,1	34,9
Feldespatos potásico	10,6	12,5	16,2	24,5	13,0
Biotita-Flogopita	7,5	*	7,4	4,5	7,0
Muscovita- Sericita	7,10	14,80	3,87	0,79	2,25
Albita	23,7	9,6	30,2	14,8	13,3
Caolinita	0,58	1,57	0,76	0,22	0,36
Montmorillonita	0,29	0,06	0,17	0,06	0,12
Yeso/Anhidrita	*	1,1	4,7	1,4	3,9
Otros	2,63	3,57	1,9	1,03	3,07

Especies duras	81,9	78,9	81,2	92,0	83,3
Especies blandas	18,1	21,1	18,8	8,0	16,7
Razón duras/blandas	4,5	3,7	4,3	11,5	5,0

(*) Muestra no presenta contenido de esta especie en particular

4.4 Cinética de molienda

Para la muestra M1 se realizaron dos ensayos de cinética de molienda a distintos tiempos y para las muestras M2, M3, M4 y M5 se realizaron 3 ensayos a distintos tiempo.

En el **ANEXO C** se presenta el perfil granulométrico para las muestras M1 a M5 y las curvas de moliendabilidad utilizadas para calcular el tiempo de molienda necesario para un P_{80} de 230 μm .

Los tiempos de molienda se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Tiempos de molienda

Muestra	Tiempo
M1	8 min 57 s
M2	4 min 39 s
M3	11 min 52 s
M4	11 min 21 s
M5	10 min 57 s

Como se observa en la Tabla 4.4 al ordenar los tiempos de molienda de menor a mayor, las muestras quedan con el siguiente orden: $M2 < M1 < M5 < M4 < M3$. Se puede ver claramente que este orden difiere con el mencionado en el sub-capítulo anterior.

Esta diferencia es muy probable que se deba a la composición mineralógica de cada una de las muestras. La cantidad de silicatos duros en estas pruebas nos podrían dar un indicio de su dureza relacionada con el mayor tiempo de molienda requerido en los ensayos. La determinación de los silicatos duros presentes en las muestras M1 a M5 se tomó en relación al Bond Work Index (WI) de cada una de estas especies el cual varía entre 13,8 a 15,2 kWh t^{-1} (Robles, 2013). Estas especies corresponden a cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y albita.



Nótese que salvo por la muestra M3, existe una relación entre la razón de especies duras/blandas y el tiempo requerido de molienda (ver tabla 4.5), así como también con su valor de “work index”. Es interesante destacar que las muestras con tamaño menor de partícula a nivel del D_{10} , son las que resultan ser las más blandas. Este resultado corrobora lo indicado en un estudio de flotación inversa selectiva para arcillas y filosilicatos (Cruz M. , 2017).

En la Tabla 4.5, se muestra la composición de diferentes silicatos presentes en cada muestra, junto al tiempo de molienda requerido para lograr un P_{80} definido. Como se puede observar aquellas muestras que presentan mayor contenido de silicatos duros (sobre un 80%) son las que requieren mayor tiempo de molienda para lograr el P_{80} objetivo. Aunque, el contenido de silicatos contra el tiempo de molienda no sigue un comportamiento lineal (Véase Figura 4.3) es posible ver una tendencia de aumento de tiempo de molienda con el aumento del contenido de silicatos.

Tabla 4.5 Contenido de silicatos [%] y tiempo de molienda para cada muestra estudiada

Mineral	Fórmula	M1	M2	M3	M4	M5
Cuarzo [%]	SiO_2	26,5	54,5	28,3	46,6	22,1
Plagioclasa [%]	$(Na,Ca)(Si,Al)_3O_8$	21,1	2,3	6,5	6,1	34,9
Feldespato potásico [%]	$(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$	10,6	12,5	16,2	24,5	13
Albita [%]	$NaAlSi_3O_8$	23,7	9,6	30,2	14,8	13,3
Total silicatos [%]	-	81,9	78,8	81,3	92,0	84,4
Tiempo molienda [min]		9,0	4,7	11,9	11,4	11,0

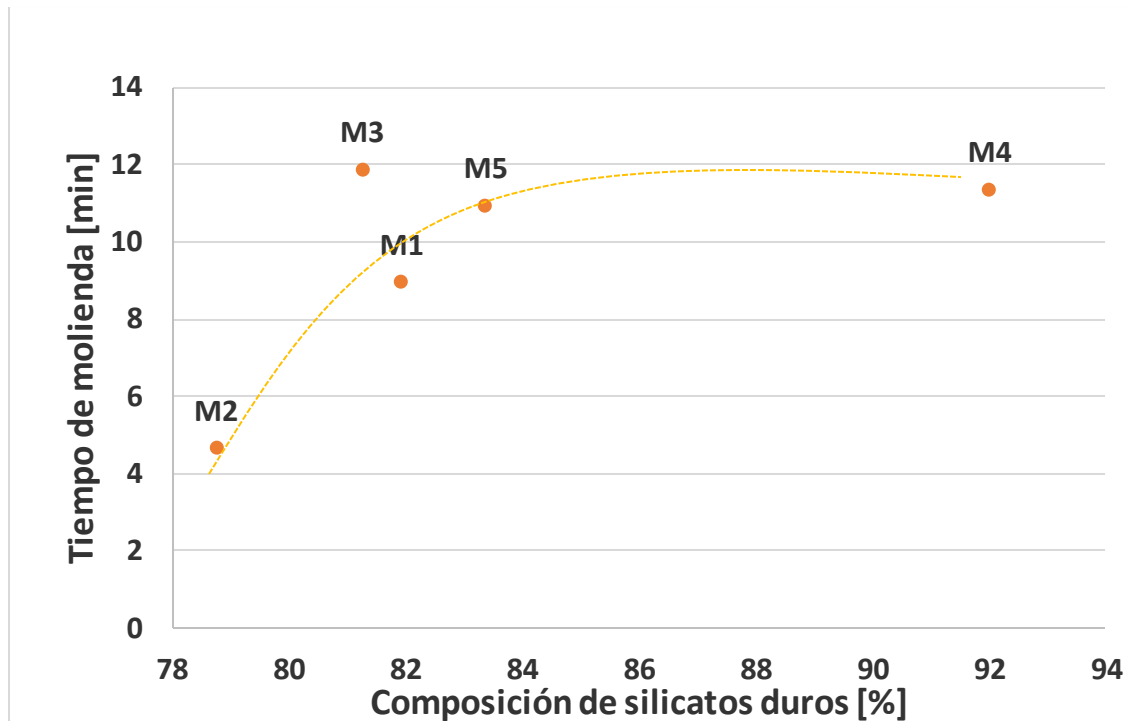


Figura 4.3 Relación no lineal entre tiempo de molienda y composición de silicatos

En la Figura 4.4 se presenta el efecto de las distintas especies de arcilla sobre el tiempo de molienda, encontrándonos que el aumento en el contenido de filosilicatos genera una disminución en el tiempo de molienda. La presencia de montmorillonita (0,06%-0,28%) y caolinita (0,22%-1,57%) se encuentra en bajas cantidades para todas las muestras estudiadas siendo su efecto una disminución brusca en el tiempo de molienda. Sin embargo, al ser este porcentaje tan pequeño no es posible concluir que el tiempo de molienda disminuya con la presencia de estas especies. Para el caso particular de la muestra M2, que es la que presenta el mayor contenido de arcilla combinada montmorillonita y caolinita nos encontramos que es la que presenta el menor tiempo de molienda.

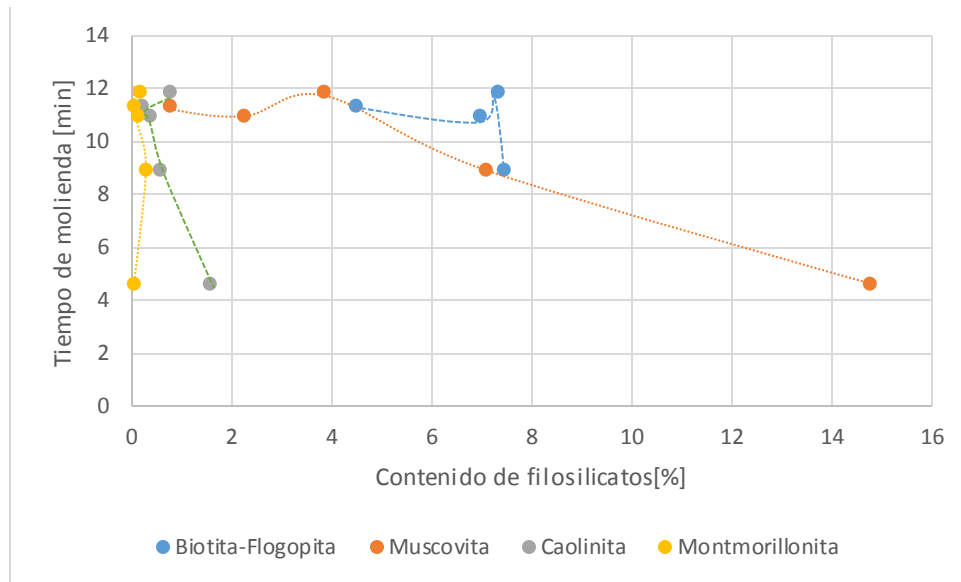


Figura 4.4 Efecto del contenido de distintas especies de filosilicatos sobre el tiempo de molienda.

En la Figura 4.5 se presenta el efecto individual de cada uno de los silicatos duros. Se puede observar que el efecto individual es de carácter no lineal al igual que el presentado en la Figura 4.3. Los resultados presentados no son significativos para poder concluir cuál de todos los presentes silicatos influye de menor o mayor medida sobre el tiempo de molienda de estas muestras.

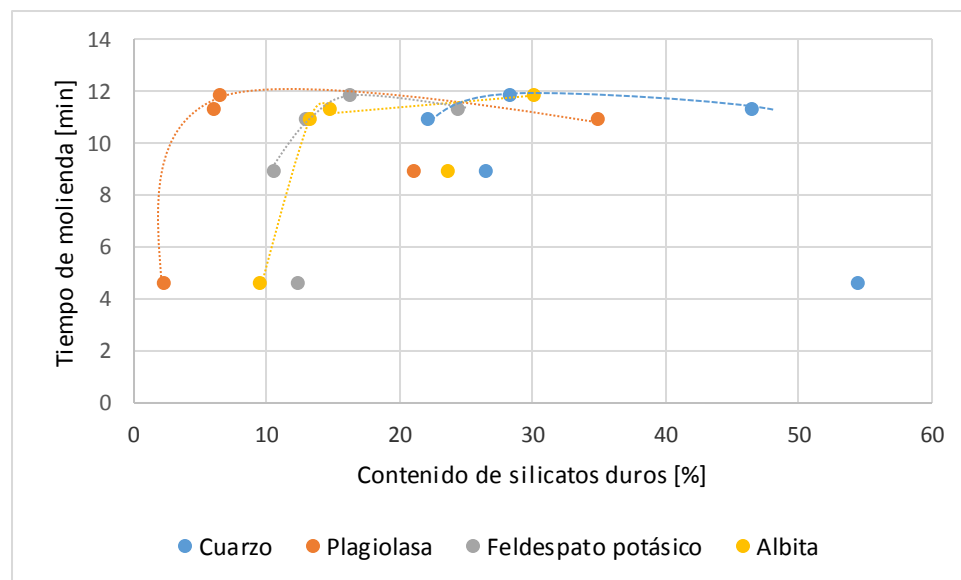


Figura 4.5 Efecto de los silicatos duros sobre el tiempo de molienda

Es necesario realizar nuevos experimentos con un mayor número de muestras cuyo contenido de silicatos sea mucho menor a 78%, y de esta forma conocer la tendencia de



moliendabilidad con la presencia de distintas mineralogías en las muestras de mineral, en especial con la presencia de ciertas arcillas.

4.5 Caracterización sedimentológica de la cola rougher

La Tabla 4.6 presenta los resultados de velocidad de sedimentación con floculante y concentración de sólidos de 9% y 12%. Los ensayos fueron realizados en probetas de 1L, en las que se mide la variación de la altura de la interface agua-sedimento en el tiempo.

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y a pH 9,1. El floculante utilizado es el SNF2350 con dosis de 6 [gt⁻¹]. La Figura 4.6 muestra los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación a las distintas concentraciones de sólido. Se puede notar que existe una relación entre el tiempo de molienda y la velocidad de sedimentación. Los minerales más blandos, respecto a la razón especies duras/especies blandas, dan origen a menores tiempos de sedimentación. Es altamente probable, que el fenómeno de sedimentación esté mayormente influenciado por el grado de cristalinidad de las especies de arcillas que por el contenido másico de estas.

Tabla 4.6 Resultados de velocidad de sedimentación de la cola rougher

Identificación	Cp nominal [%]	Velocidad de sedimentación [cm min ⁻¹]
M1	9	29 ±3
	12	21 ±3
M2	9	29 ±3
	12	22 ±2
M3	9	36 ±4
	12	28 ±2
M4	9	45 ±2
	12	35 ±2
M5	9	43 ±3
	12	31 ±2

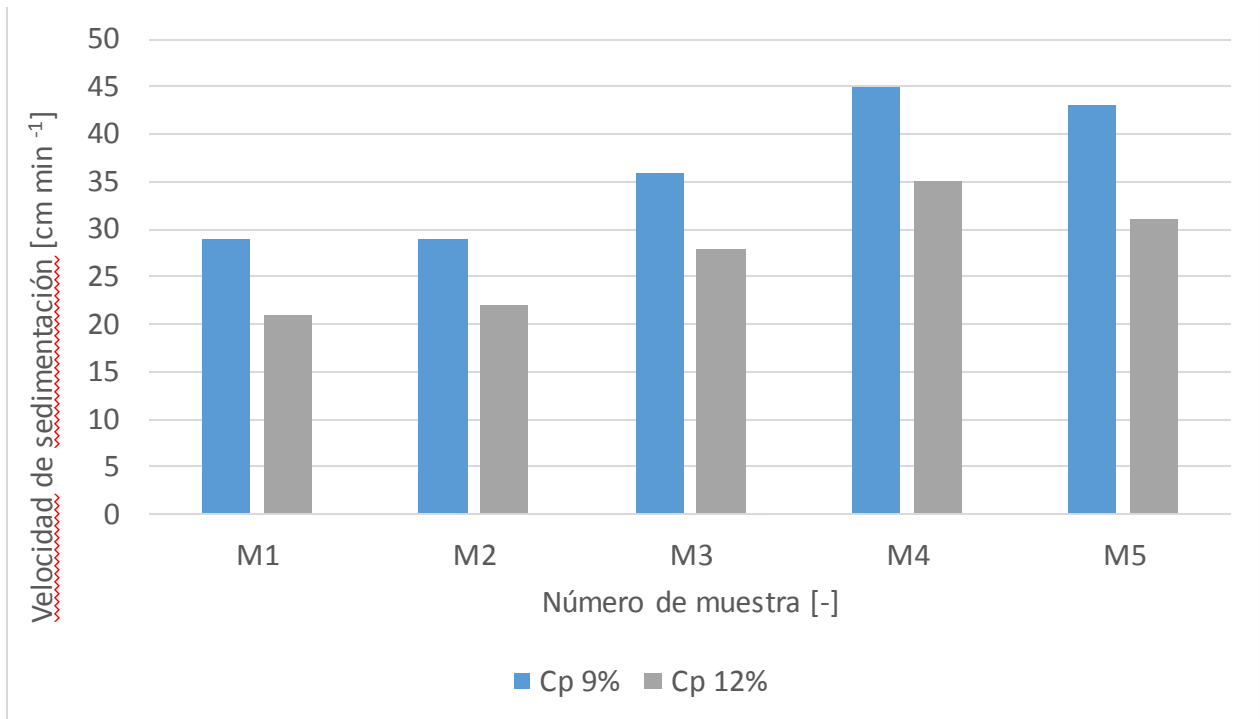


Figura 4.6 Velocidad de sedimentación para muestras de relave rougher estudiadas a 9% y 12% de porcentaje de sólidos de pulpa mineral.

Para una misma muestra, puede observarse que el aumento del porcentaje de sólidos en peso, produce una disminución de la velocidad de sedimentación. Si bien es cierto, se ha señalado en la literatura especializada, que el aumento del porcentaje de sólidos en peso, produce una disminución de la velocidad de sedimentación debido a las interferencias que se producen sobre la trayectoria vertical de las partículas, puede observarse que esto es más vulnerable con minerales blandos, por su impacto en reducir aún más la velocidad de sedimentación, debido a que se favorece la conducta coloidal entre ultrafinos y fluidos.

La diferencia entre la velocidad de sedimentación a 9% y 12% en peso es en promedio de 9 [cm·min⁻¹] variando entre 7 y 12 [cm·min⁻¹] para las muestras M2 y M4, respectivamente. La muestra M2, presenta un contenido de 16% de filosilicatos a diferencia de M4 que presenta un contenido de 5%. Se puede inferir que para este grupo de muestras aquellas que presentan un mayor contenido de filosilicatos presentaran menores diferencias de velocidad de sedimentación a diferentes porcentajes en peso.

Se recomienda analizar este efecto para una mayor cantidad de filosilicatos de esta forma se podría evaluar bajo qué porcentajes de filosilicatos la velocidad de sedimentación se vuelve prácticamente constante sin importar el porcentaje de sólidos que contenga la muestra.

De los resultados generados de velocidad de sedimentación en la Figura 4.6 se analizaron aquellas muestras que presentaban altas velocidades de sedimentación (M4 y M5) con respecto a las que tenían bajas velocidades de sedimentación (M1, M2 y M3). Relacionando el contenido de filosilicatos se puede establecer que a medida que aumenta su contenido disminuye significativamente la velocidad de sedimentación, corroborando lo que se ha observado a nivel industrial. Se tienen muestras (M1 y M2) con contenido de filosilicatos similar que presentan la misma velocidad de sedimentación y muestras con contenido de filosilicato menor que presentan velocidades de sedimentación mucho mayor.

Al evaluar la conducta de los filosilicatos por especie, es posible evidenciar que el aumento en su contenido influye negativamente sobre la velocidad de sedimentación de las muestras. La especie de montmorillonita y caolinita son las que presentan el mayor efecto individual sobre la velocidad de sedimentación disminuyéndola bruscamente. No es posible concluir que este efecto será igual de brusco para contenidos mayores de estos filosilicatos debido a que su presencia en las muestras evaluadas es muy bajo. Por el contrario, la muscovita y biotita-flogopita que se encuentran en porcentajes mayores tienen un efecto negativo notorio sobre la velocidad de sedimentación. (Veáse Figura 4.7).

Para el caso de la especie de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, albita y yeso este no presenta diferencias significativas en la velocidad de sedimentación a diferentes porcentajes en peso.



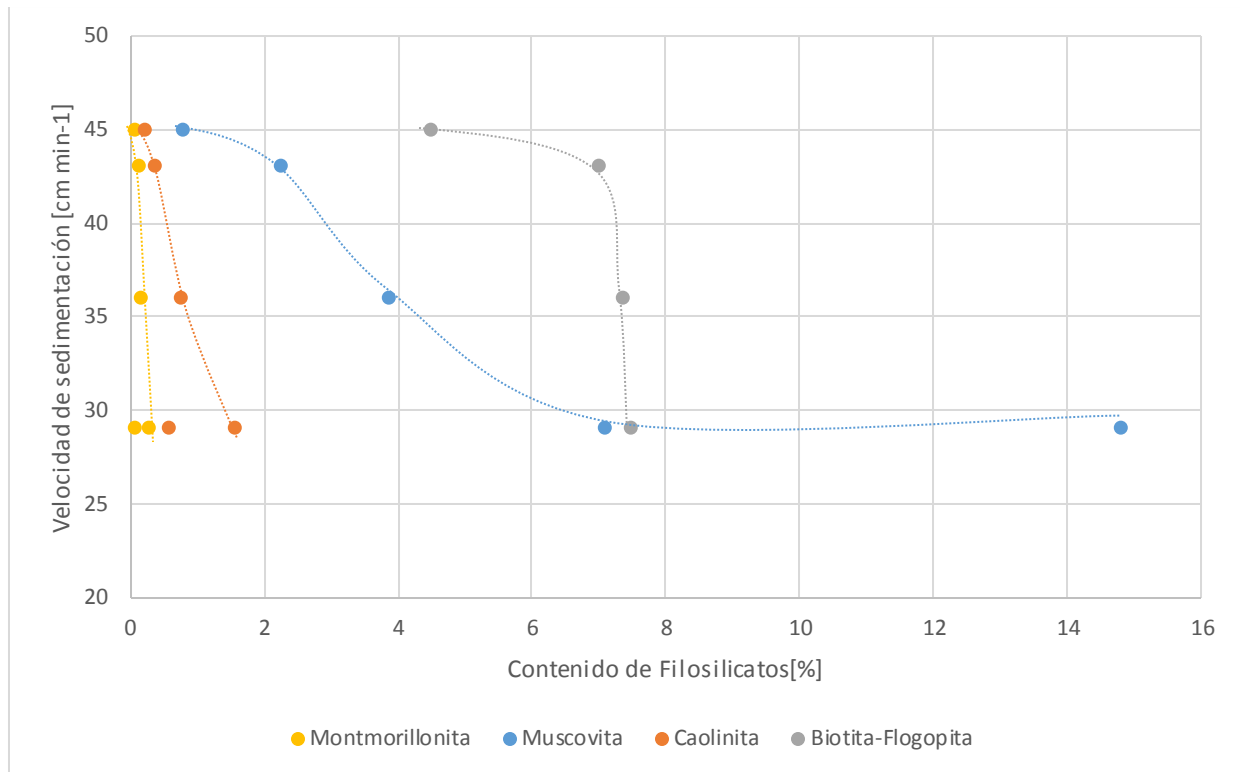


Figura 4.7 Efecto del contenido de filossilicatos sobre la velocidad de sedimentación a un C_p de 9%.

Para tener una tendencia más clara es necesario realizar ensayos de velocidad de sedimentación con muestras que presenten un contenido de filossilicatos superior al expuesto en esta memoria de esta forma se podría evaluar el espectro total de velocidad de sedimentación a distintos porcentajes de filossilicatos y establecer un valor límite sobre el cual el comportamiento de la muestra decaiga bruscamente. Además, el bajo efecto individual de algunas especies puede deberse al bajo porcentaje en el que está presente en las muestras.

Al analizar el efecto del parámetro D_{10} sobre la velocidad de sedimentación (Véase Figura 4.8). Se puede apreciar que a medida que disminuye el D_{10} también lo hace la velocidad de sedimentación efecto que se debe a que mientras menor sea el valor D_{10} las partículas tendrán más probabilidad de comportarse de forma coloidal.

Las tendencias de tensión de fluencia Bingham versus los distintos contenidos de filossilicatos para todas las muestras estudiadas se presentan en el **Anexo D**.

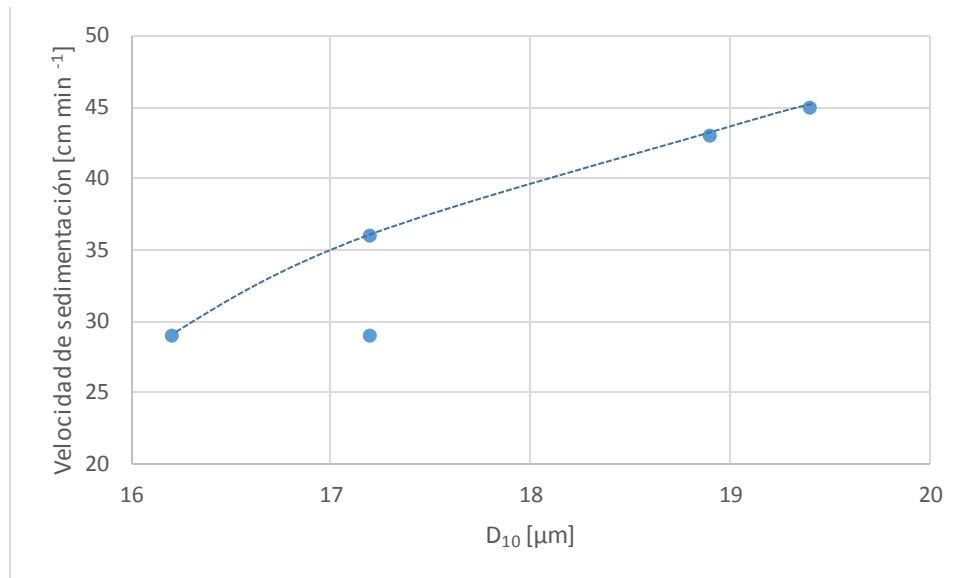


Figura 4.8. Efecto de parámetro D10 sobre la velocidad de sedimentación a un Cp 9%.

4.6 Tensión de fluencia y viscosidad Bingham

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de la tensión de fluencia Bingham para concentraciones de sólidos en peso de 71% y 73%. Los ensayos fueron realizados un reómetro del tipo Haake, modelo RS6000, con sensor helicoidal y a partir de los reogramas obtenidos se determinó la tensión de fluencia. Las altas concentraciones en peso a las que se realizaron los ensayos se deben a que estos resultados serían utilizados para evaluar el comportamiento en espesamiento en columnas de 1 metro (evaluación que está fuera de los alcances de esta memoria).

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y ajustado a un pH de 9,1. El floculante utilizado es el SNF2350 con dosis de 6 [gt^{-1}].

La Figura 4.9 muestra los resultados de tensión de fluencia Bingham en función de a las distintas concentraciones de sólidos.

Tabla 4.7 Resultados de la tensión de fluencia Bingham en función del porcentaje de sólidos en peso y pH para las distintas muestras en estudio.

Identificación	Cp real [%]	pH	Tensión de fluencia [Pa]
M1	72,8	9,2	21±0,1
	70,6	9,1	12±0,2
M2	73,3	9,1	24±0,1
	71,7	9,1	15±0,1
M3	72,5	9,1	22±0,1
	70,4	9,1	12±0,2
M4	72,6	9,2	6±0,0
	70,7	9,1	04±0,0
M5	73,0	9,2	17±0,0
	71,2	9,1	09±0,2

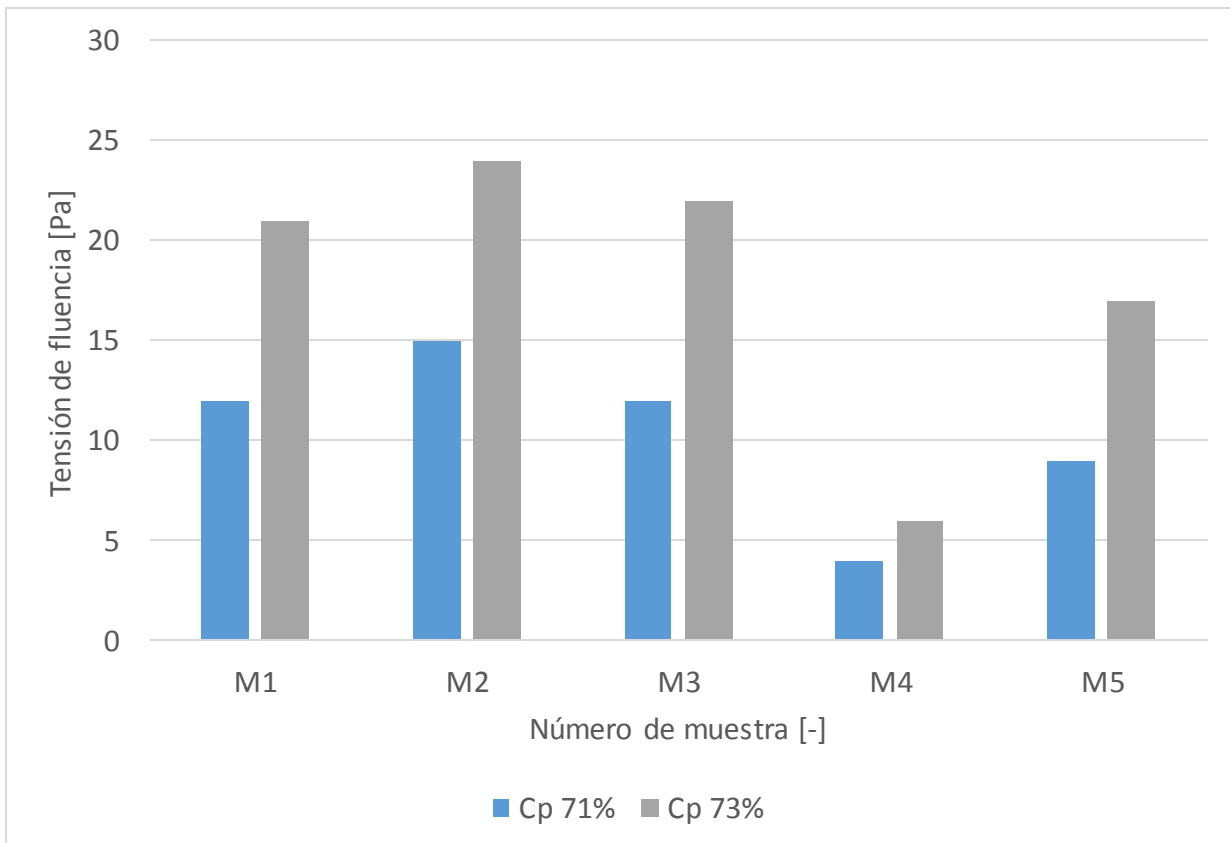


Figura 4.9 Tensión de fluencia Bingham a 71 y 73% de sólidos en peso.

Al observar la Figura 4.9, que muestra la tensión de fluencia Bingham para las distintas muestras de relave rougher, es posible determinar que aquellas muestras con alta tensión de fluencia Bingham, corresponden a M1, M2 y M3, que precisamente son las con mayor porcentaje de filosilicatos blandos (menor tiempo de molienda para la obtención del P_{80} de cabeza) y las que presentan una baja tensión de fluencia Bingham corresponden a las muestras M4 y M5, que corresponden a los con mayor tiempo de molienda para lograr el P_{80} requerido.

La diferencia entre la tensión de fluencia a 71% y 73% de sólidos en peso, es en promedio de 7,6 [Pa] variando entre 2 y 9 [Pa] para las muestras M4 y M2, respectivamente. Esta diferencia se debe a que la presencia de filosilicatos (especies blandas), generan una mayor tensión de fluencia en la muestra y a medida que aumenta el porcentaje de sólidos, se vuelve aún mayor debido a la mayor generación de partículas ultrafinas, por debajo del D_{10} , las que pueden tener un comportamiento coloidal.

Al evaluar la conducta de los filosilicatos por especie, es posible evidenciar que un aumento de estos genera un aumento en la tensión de fluencia. La presencia de muscovita que se encuentra en mayor proporción respecto a los demás filosilicatos, aumenta de forma menos pronunciada la tensión de fluencia no generándose para ninguna muestra en particular un cambio brusco. En el caso de la montmorillonita y caolinita generan un impacto más brusco en la tensión de fluencia pero debido a que se encuentra en bajas proporciones en todas las muestras estudiadas no es posible predecir si este comportamiento se mantiene al aumentar su porcentaje. (Veáse Figura 4.10).

En un estudio realizado por B. Ndlovu (B. Ndlovu, 2013) muestra que el efecto del contenido de la mayoría de los filosilicatos sobre la tensión de fluencia de Bingham es bajo, concordando con los resultados aquí expuestos. Los minerales con mayor efecto sobre la tensión de fluencia corresponden al crisotilo y montmorillonita.



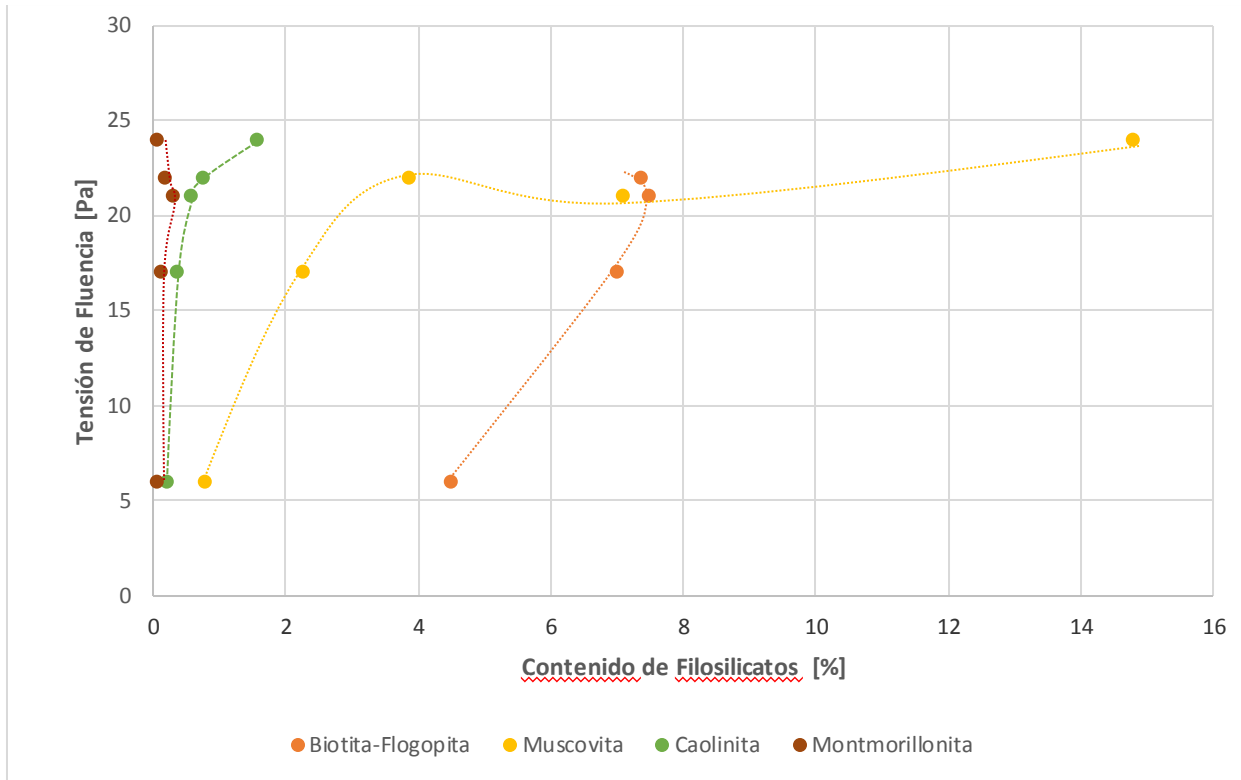


Figura 4.10 Efecto de distintas especies de arcilla sobre la tensión de fluencia de Bingham a un C_p de 73%.

Al analizar el efecto del parámetro D_{10} sobre la tensión de fluencia (Véase Figura 4.11). Se puede apreciar que a medida que disminuye el D_{10} aumenta la tensión de fluencia efecto que se debe a que mientras menor sea el valor D_{10} las partículas tendrán más probabilidad de comportarse de forma coloidal.

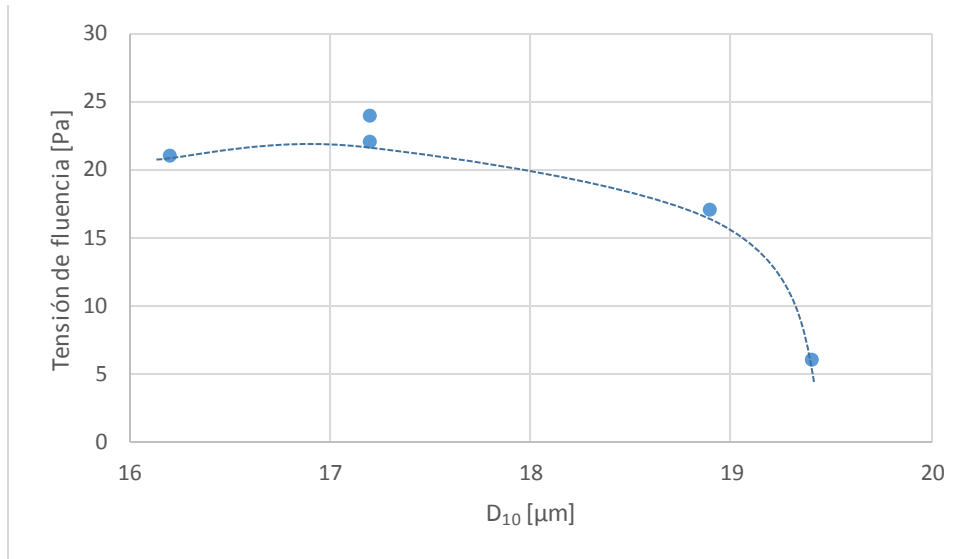


Figura 4.11 Efecto del parámetro D10 sobre la tensión de fluencia a un Cp de 73%

Las tendencias de tensión de fluencia Bingham versus los distintos contenidos de filosilicatos para todas las muestras estudiadas se presentan en el **Anexo E**.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que resultan del análisis de los resultados son:

- El aumento del contenido de arcillas modifica significativamente las conductas reológicas y sedimentológicas de un relave.
- En general, las muestras más blandas (menor WI de molienda), tienen una mayor probabilidad de alcanzar menores valores de velocidad de sedimentación, como ocurre con las muestras M1 y M2.
- Se valida que un buen indicador de la facilidad de sedimentación de un relave se relaciona con el D_{10} . Mientras menor es el tamaño D_{10} , existe una mayor probabilidad de una conducta coloidal de la interacción partícula fluido, disminuyendo la velocidad de sedimentación, aumentando la viscosidad de la pulpa y su tensión de fluencia.
- Se comprueba que más que el efecto particular de una especie de arcilla, la conducta reológica y sedimentológica está influenciada por la cantidad de partículas en una pulpa, que puedan encontrarse por debajo del D_{10} , y su interacción con el fluido.
- Se valida la hipótesis. El reconocimiento y cuantificación de las especies mineralógicas son determinantes para predecir la conducta del relave y su nivel de dureza. Sin embargo, las propiedades reológicas y sedimentológicas dependen de la cantidad de partículas que estén por debajo del valor de D_{10} .



CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

Las principales recomendaciones que surgen del análisis de los resultados de esta memoria de título son:

- Considerando que la sedimentación del relave se realiza con la cola de la flotación rougher, existe una desviación que podría llegar a ser significativa, respecto a la velocidad de sedimentación que pudiera tener un relave real. Esto se debe a que el relave real se obtiene después de operaciones unitarias de remolienda, por lo que se tendrían distribuciones granulométricas significativamente más finas.
- Considerando la relevancia del D_{10} sobre los valores de los parámetros reológicos y sedimentológicos, sería necesario evaluar la conducta de una muestra de mineral sujeta a moliendas sucesivas para generar una relación entre dichos parámetros y la variación de la cantidad de partículas que se encuentran por debajo del D_{10} .
- La calidad del agua recuperada puede tener un rol importante en la formación de un sistema coloidal, afectando negativamente las propiedades reológicas y sedimentológicas por lo que es necesario su estudio.
- Debido a que las muestras presentan bajo contenidos de filosilicatos (inferiores al 20%) es necesario ampliar el rango de estudio para poder visualizar efectos negativos que no se logró abordar.
- Es necesario identificar el comportamiento de las zonas mineralógicas para anticiparse a la respuesta metalúrgica y optimizar la operación de la planta concentradora. De esta forma será posible generar mezclas de distintas zonas mineralógicas, conocer parámetros de operación para cada mezcla y/o zona alimentada (dosificación de reactivos), conocer las recuperación máximas alcanzables (buen control de la planta, buen proceso de estimación y ejecución de la producción). Logrando crecer en capacidad de producción y productividad.



CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, L. (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación* . Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar .
- Alty. (1926). The origin of the electrical charge on the small particles in water . *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* , 235-251.
- Arnold, & Aplan. (1986). The effect of clay slimes on coal flotation, part II: The role of water quality . *International Journal of Mineral Processing*, 243-260.
- B. Ndlovu, E. F. (2013). A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Mineral Engineering* , 2169-2178.
- Bankoff. (1943). Experiments with slime coating in flotation. *Transactions of AIME*, 473-478.
- Bhambhani, Patra, Nagaraj, & Somasundaran. (2014). Plate type gangue minerals and their impact on flotation performance. in *XXVIII International Mineral Processing congress*, 1-10.
- Brindley. (1952). Structural mineralogy of clays. En *clays and clays minerals* (págs. 33-43).
- Briseño, C., & Rubio, X. (2013). Caracterización y Distribución de Arcillas en el yacimiento Radomiro Tomic y sus Implicancias en Procesos Metalúrgicos. *Superintendencia de Geología, Codelco División Radomiro Tomic*, 96-98.
- Briseño, C., & Rubio, X. (2015). Caracterización y Distribución de arcillas en el yacimiento Rodomiro Tomic y sus Implicancias en Procesos Metalúrgicos. *Biblioteca Sernageomin*, 96-98.
- Bulatovic, Wyslouzil, & Kant. (1999). Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from phoropyry ores . *Proceddings of Copper* .



CEIM . (2013). *Operación de espesamiento y filtración*. Antofagasta: Fundación Educacional Escondida Centro de entrenamiento industrial y minero.

Christidis. (1995).

Concha, F. (1982). *Manual de Filtración y Speración*. Concepción: Centro de Tecnología Mineral, CETTEM, Tecnología productiva red CETTEC, Fundación Chile, Universidad de Concepción .

Cruz, M. (2017). *Flotación inversa de arcilla desde un relave de cobre*. Valparaíso, Chile: Memoria de título. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Universidad Técnica Federico Santa María.

Cruz, N., Peng, Y., Farrokhpay, S., & Bradshaw, D. (2013). Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: Part 1-Rheological properties of clay mineral suspensions in the presence of flotation reagents. *Minerals Engineering*, 30-37.

Dovenfeld. (1953). Slime coating: how to explain and control them . *Engineering and mining journal* , 87-91.

Elmahdy, Mirnezami, & Finch. (2008). Zeta potential of air bubbles in presence of frothers . *International Journal of Mineral Processing*, vol 89, 40-43.

Farrokhpay. (2011). The significance of froth stability in mineral flotation-a review . *Advanced in colloid and interface science*, vol 166 , 1-7.

Farrokhpay. (2012). The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, vol 38, 272-278.

Farrokhpay, Ndlovu, & Bradshaw. (2014). Characterising the deleterious effect of phyllosilicate minerals on the copper flotation via froth stability analysis. *XXVII International Mineral Processing Congress*, (págs. 1-8). Santiago, Chile.

Forbes, Davey, & Smith. (2014). Decoupling rheology and slime coatings effect on the natural flotability of chalcopyrite in a clay-rich flotation pulp. *Minerals Processing*, vol. 56, 136-144.

Fuerstenau. (1958). Iron oxide slime coatings in flotation. *Transaction of AIME*, 792-793.



- Gaudin, Fuerstenau, & Miaw. (1960). Slime-coatings in Flotation. *CIM bulletin*, 960-963.
- Grim, G., & Christidis. (1978; 1995).
- Hazzab, Terfous, & Ghenaim. (2008). Measurement and modeling of the settling velocity of isometric particles. *Powder Technology*, vol 184, no. 1 , 105-113.
- Ipinza, J. (2011). V Congreso de flotación: Flotamin 2011. *Revista minera n°364*, 135-141.
- Ipinza, J. (2013). Impacto de las arcillas en la flotación de minerales. *II Seminario sobre Arcillas en los Procesos Metalúrgicos: Impacto y Control*, JRCap, 3-19.
- Ipinza, J., Cruz, M., Petkovic, Z., & Miles, R. (2016). La arcilla una oportunidad de negocio en la concentración de minerales de cobre. *Primero encuentro en Re-valorización de las Impurezas Mineras*, (págs. 1-23). Santiago.
- Laskowski, & Ralston. (1992). Colloid Chemistry in Mineral Processing. *Developments in Mineral Processing*, 225.
- Liu, Xu, & Masliyah. (2005). Interaction forces in bitumen extraction from oil sands . *Journal of Colloid and Interface Science*, 507-520.
- McFarlane, Bremmell, & Addai-Mensah. (2005). Microstructure, rheology and dewatering behaviour of smectite dispersions during ortokinetic flocculation. *Mineral Engineering*, vol.18, no. 12, 1173-1182.
- Ndlovu, D., Farrokpay, S., & Bradshaw, D. (2013). The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 149-156.
- Ndlovu, Forbes, Farrokhpay, Becker, & Deglon, B. (2014). A preliminary rheological classification of phylosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, vol. 55, 120-200.
- O, F., Garcia Romero, E., Cuevas-Gonzalez, J., & López-Martinez, N. (2007). *Clay mineral genesis and chemical evolution in the miocene sediments of Somosaguas*. Madrid Basin, Spain.



- Osorno, R., & Alonso, H. (2009). *Evaluación del Proceso de Coagulación- Floculación de una Planta de tratamiento de Agua Potable*. Sede Medellín : Universidad Nacional de Colombia.
- Patra, Bhambhani, Vasudevan, Nagaraj, & Somasundaran. (2012). Transport of fibrous gangue mineral networks to froth by bubbles in flotation separation. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 104-104, 45-48.
- Patra, Nagaraj, & Somasundaran. (2010). Impact of pulp rheology on selective recovery of value minerals from ores . *Proceedings of the XI International Seminar on Minerals Processing Technology* , 1223-1231.
- Pavez, O. (2002). Apuntes concentración de minerales, Universidad de Atacama Facultad de Ingeniería, Departamento de Metalurgia. 4-65.
- Quast, Ding, & Fornaciero, R. (2008). *Effect of slime clay particles on coal flotation in Proceeding of the Chemeca*.
- Ravanal, J. (2017). *Estudio del efecto de la arcilla Caolinita en la Velocidad de Sedimentación y Yield Stress empleando floculante aniónico y catiónio en pulpas de cuarzo*. Concepción, Chile: Memoria de Título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción .
- Robles, C. D. (2013). *Evaluación de un cambio tecnológico para procesamiento de minerales de alta dureza*. Santiago: Universidad de Chile .
- Tao, Dopico, Hines, & Kennedy. (2010). An experimental study of clay binders in fine coal froth flotation. *Proceedings of the International Coal Preparation Congress* , (págs. 478-487). Lexington, USA.
- Wen, & Sun. (1977). Electrokinetic study on the amine flotation of oxidized coal [for separation from ash and pyrites]. *Trans. Soc. Min. Eng. AIME*, vol 262,no. 2.
- Whitten, D. P. (1999). *Química General*. Mc Graw Hill.

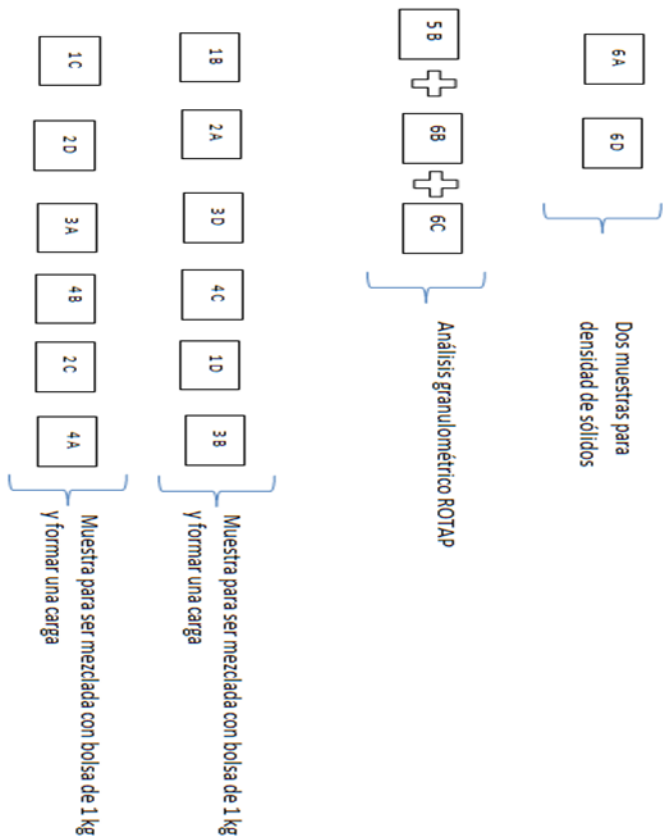
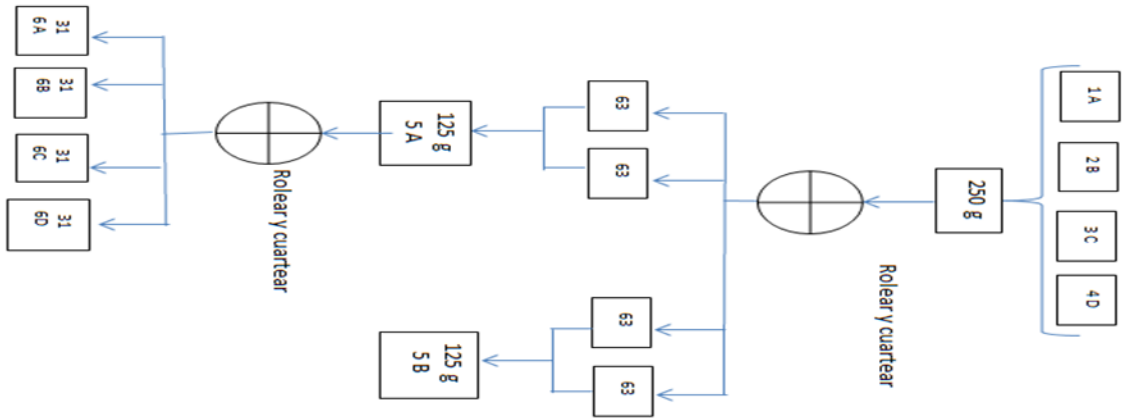


Xu, Ametov, & Grano. (2011). Detachment of coarse particles from oscillating bubbles- the effect particle contact angle, shape and medium viscosity . *Internacional Journal of Mineral Processing*, vol. 101, no. 1, 50-57.

Yildiz, & Calimli. (2002). Alteration of three Turkish bentonites by treatment with Na₂CO₃ and H₂SO₄ . *Turk J. Chem*, 393-401.



ANEXO A: PROCEDIMIENTO DE CONO Y CUARTEO



ANEXO B: Gravedad específica del mineral

La gravedad se obtiene de la siguiente ecuación

$$\rho_{\text{sólido}} = \frac{\rho_{\text{agua}} \cdot (M_{fs} - M_f)}{(M_{fw} + M_{fs}) - (M_f + M_{fws})}$$

Donde,

ρ_{agua} : Densidad del agua a la temperatura del ensayo

M_{fs} : Masa del picnómetro más la muestra seca

M_f : Masa del picnómetro

M_{fw} : Masa del picnómetro más agua

M_{fws} : Masa picnómetro más muestra y agua.

Las masas son registradas en una balanza semi-analítica con precisión obteniendo los siguientes resultados:

Muestra	Masa [g]				ρ agua
	M_{fs}	M_f	M_{fw}	M_{fws}	
M1 Original	75,22	42,79	140,32	160,73	0,99
M1 Duplicado	75,91	42,13	140,62	161,88	0,99
M2 Original	70,81	42,13	140,6	158,69	0,99
M2 Duplicado	79,35	48,21	147,46	167,12	0,99
M3 Original	77,98	48,21	147,44	166,11	0,99
M3 Duplicado	73,52	43,79	143,55	161,969	0,99
M4 Original	73,6	44,02	143,75	162,24	0,99
M4 Duplicado	72	43,81	143,65	161,19	0,99
M5 Original	77,12	44,02	143,77	164,62	0,99
M5 Duplicado	77,47	48,23	147,45	165,91	0,99

ANEXO C: PERFIL GRANULOMÉTRICO Y CURVAS DE MOLIENDABILIDAD

En la Figura 1, Figura 2, Figura 3, Figura 4 y Figura 5 se presenta el perfil granulométrico para las muestras M1 a M5 según los tiempos de molienda mostrados en la Tabla 5.5.

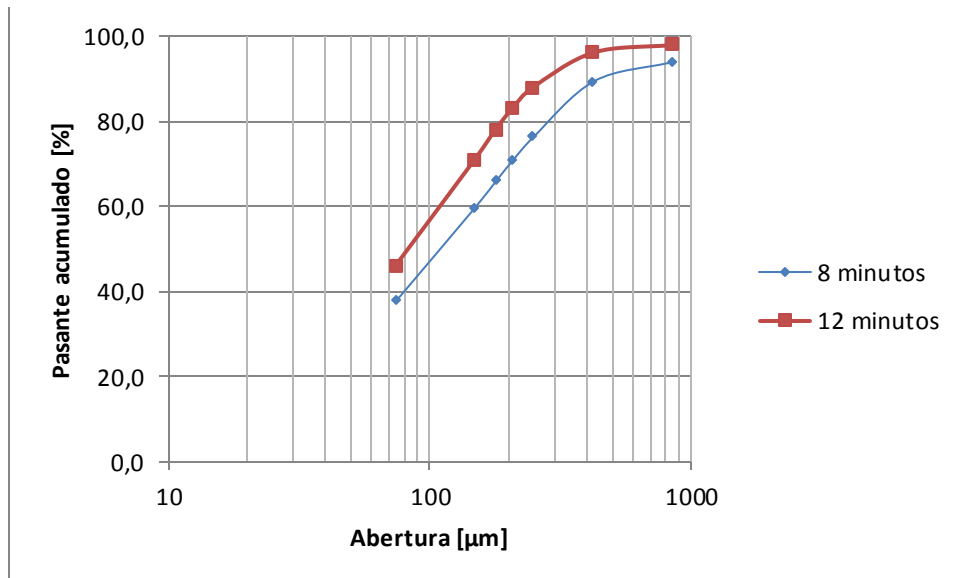


Figura 1. Perfil granulométrico para M1

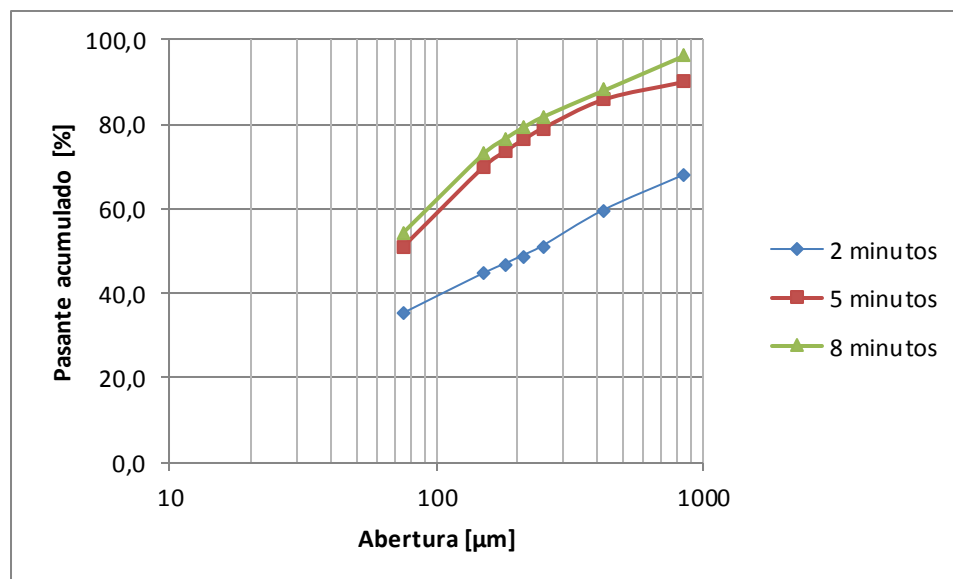


Figura 2. Perfil granulométrico para M2

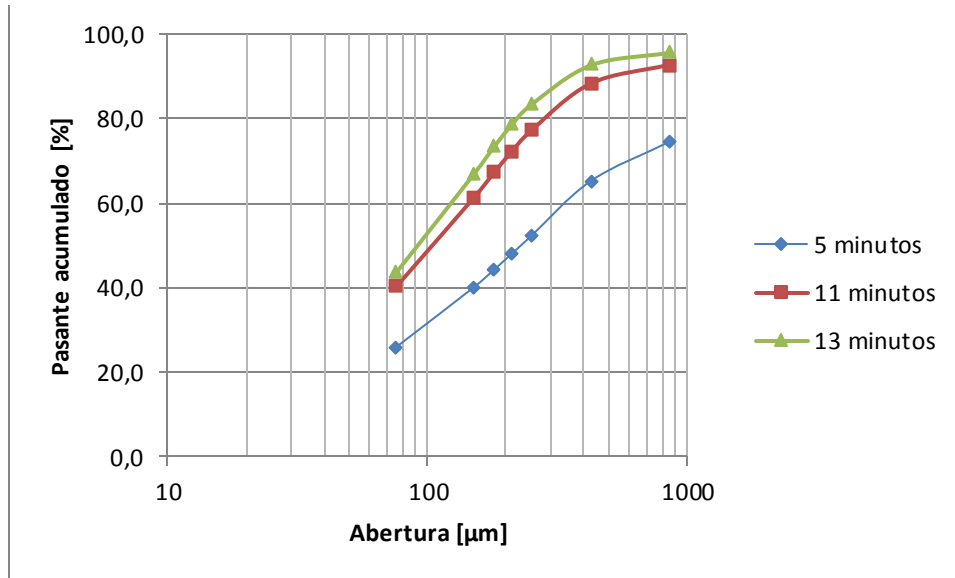


Figura 3 Perfil granulométrico para M3

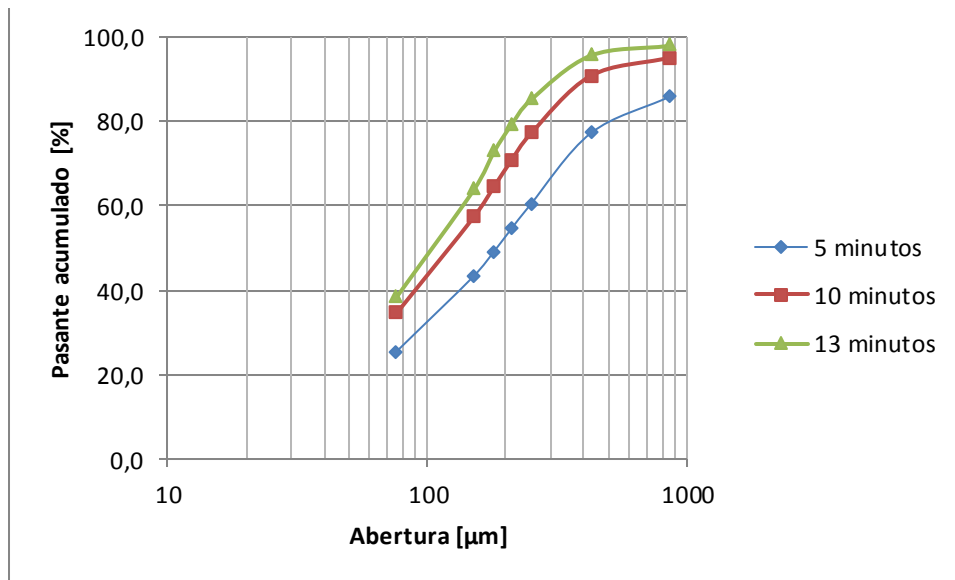


Figura 4 Perfil granulométrico para M4

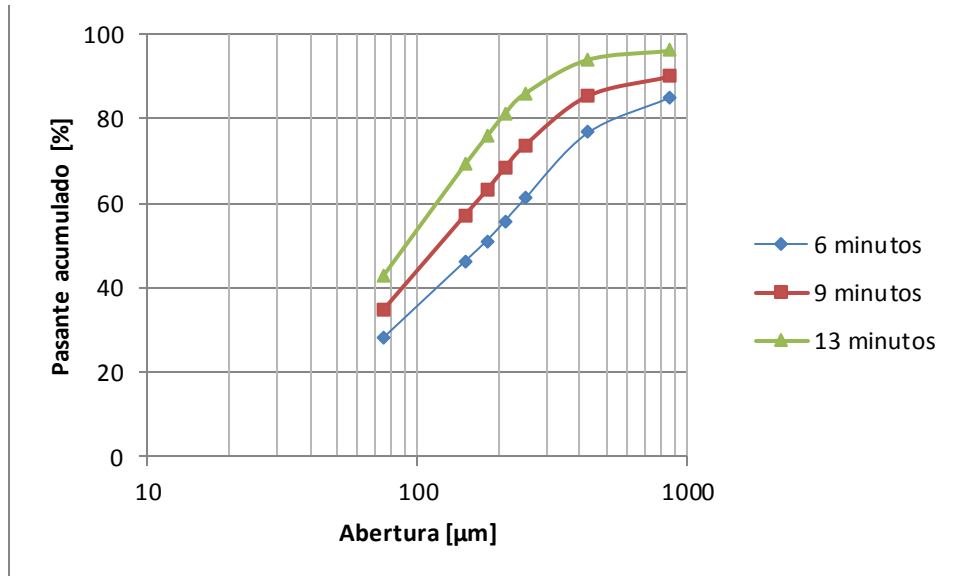


Figura 5. Perfil granulométrico para M5

En la Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10 se presentan las curvas de moliendabilidad de las muestras en estudio.

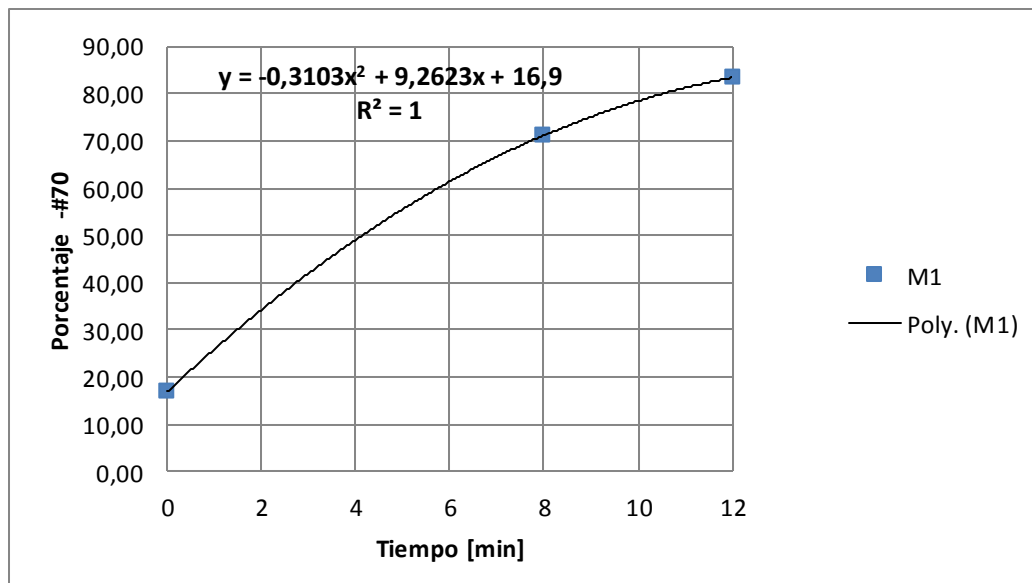


Figura 6. Curva de moliendabilidad para M1

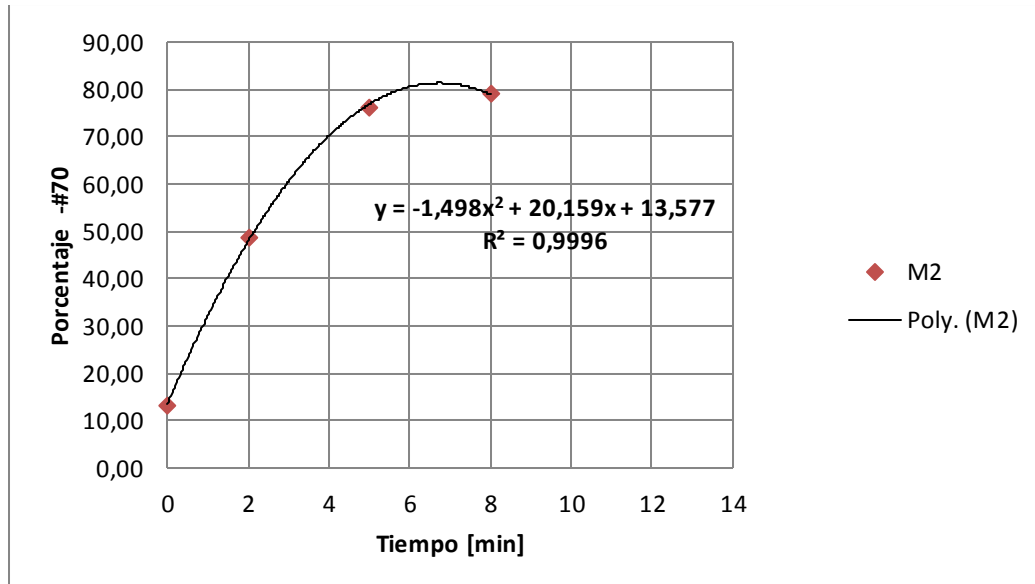


Figura 7. Curva de molindabilidad para M2

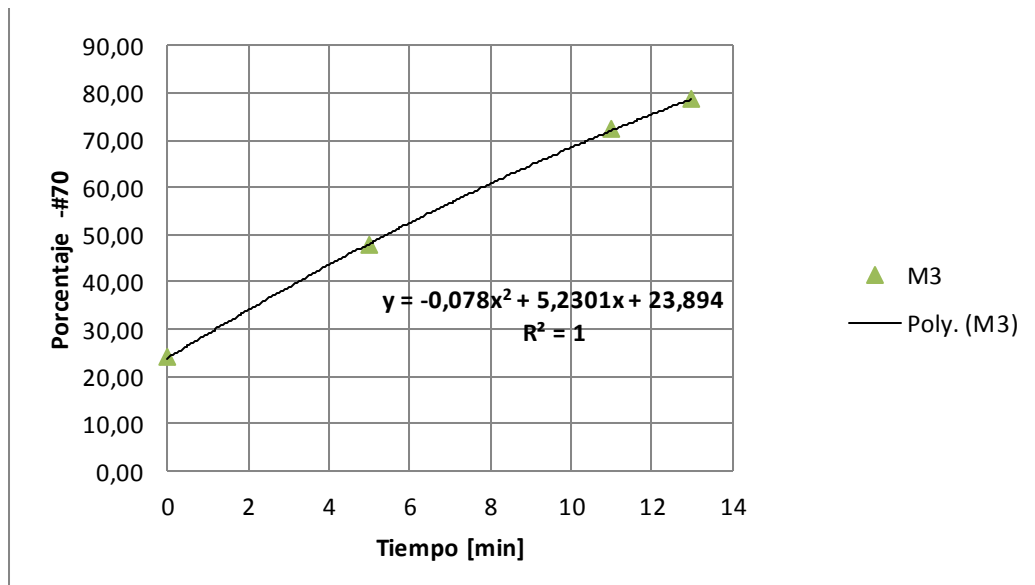


Figura 8. Curva de molindabilidad para M3

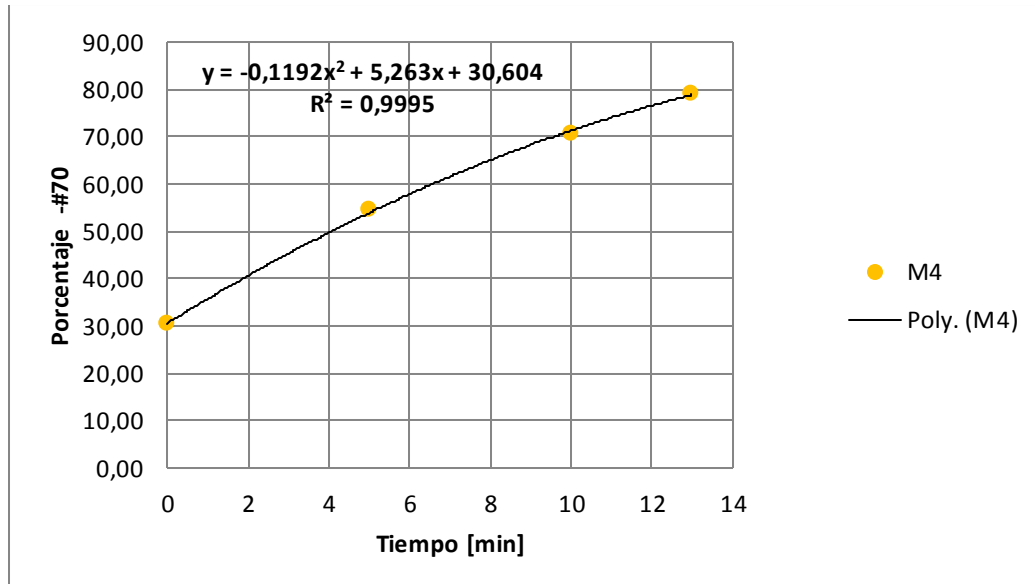


Figura 9. Curva de molindabilidad para M4

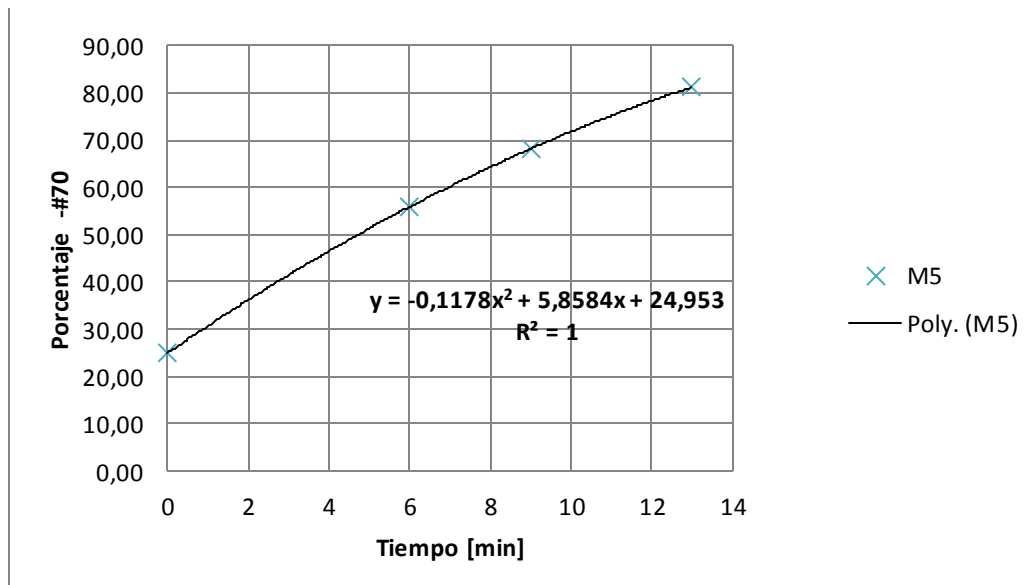


Figura 10 Curva de molindabilidad para M5

ANEXO D: VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN VS CONTENIDO DE ESPECIES DE FILOSILICATOS

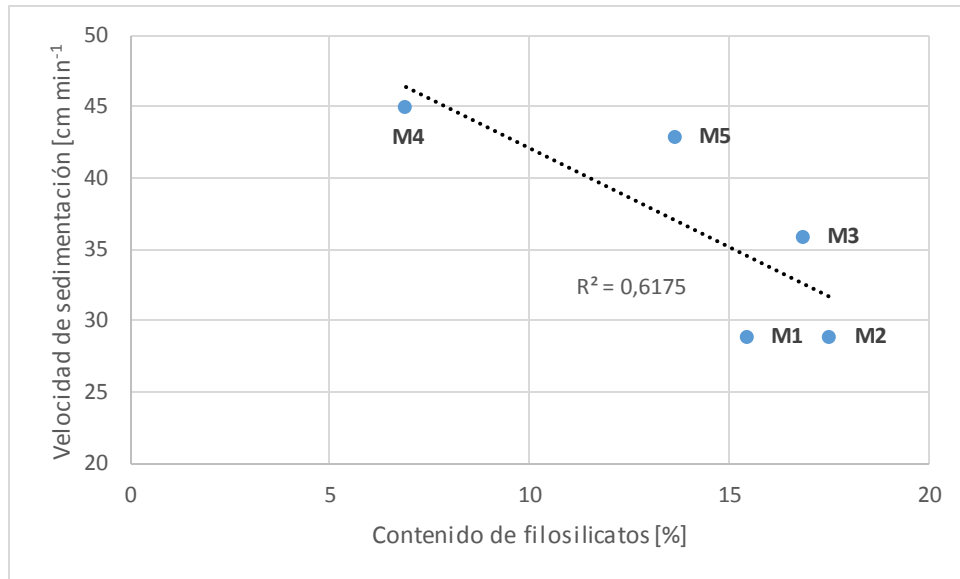


Figura 11. Velocidad de sedimentación a un Cp 9% para distinta composición de filosilicatos.

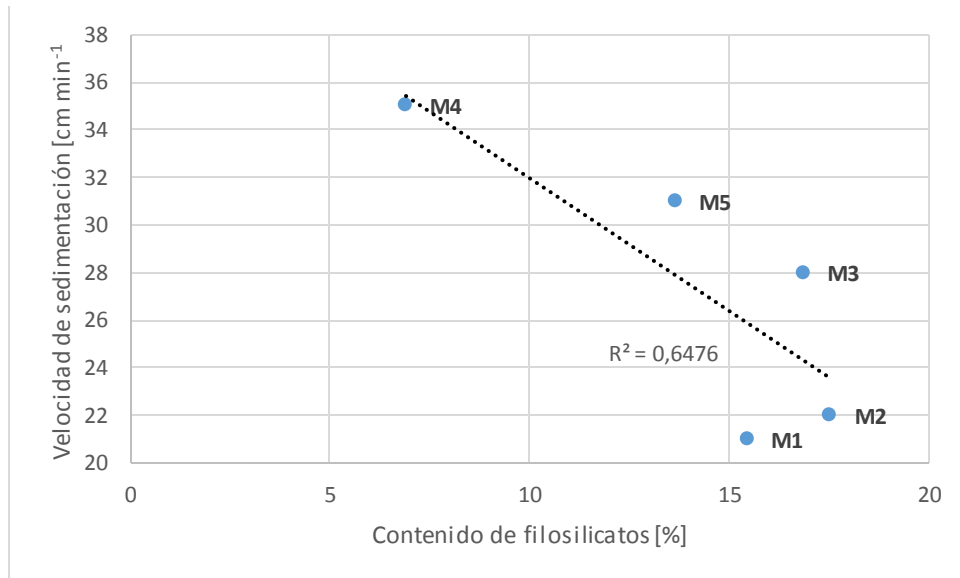


Figura 12. Velocidad de sedimentación a un Cp 12% para distinta composición de filosilicatos.

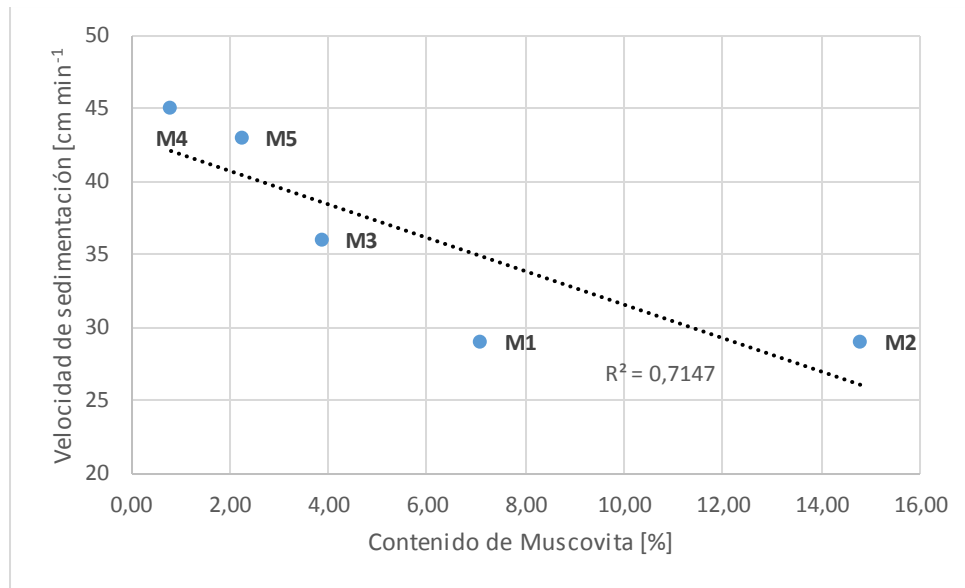


Figura 13. Velocidad de sedimentación a Cp 9% vs contenido de muscovita

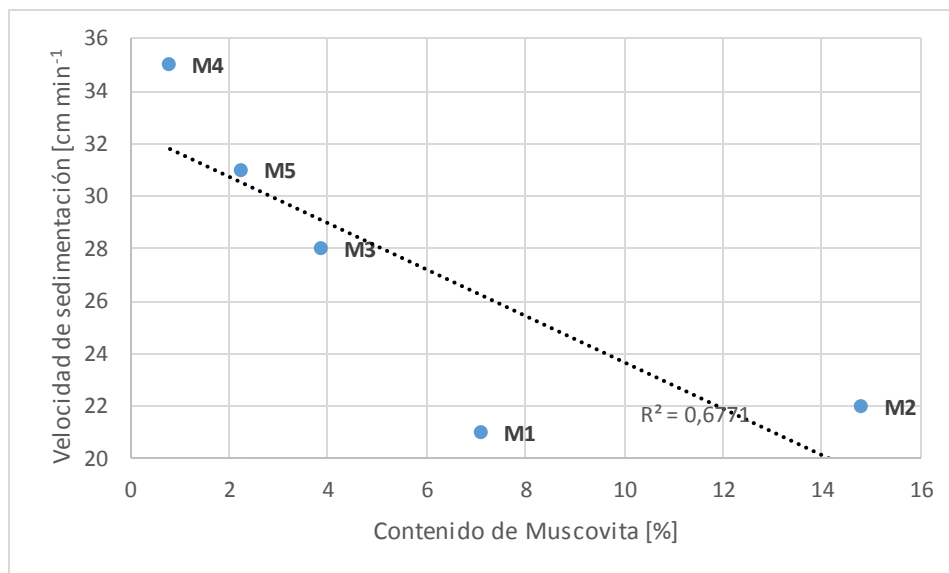


Figura 14. Velocidad de sedimentación a Cp 12% vs contenido de muscovita

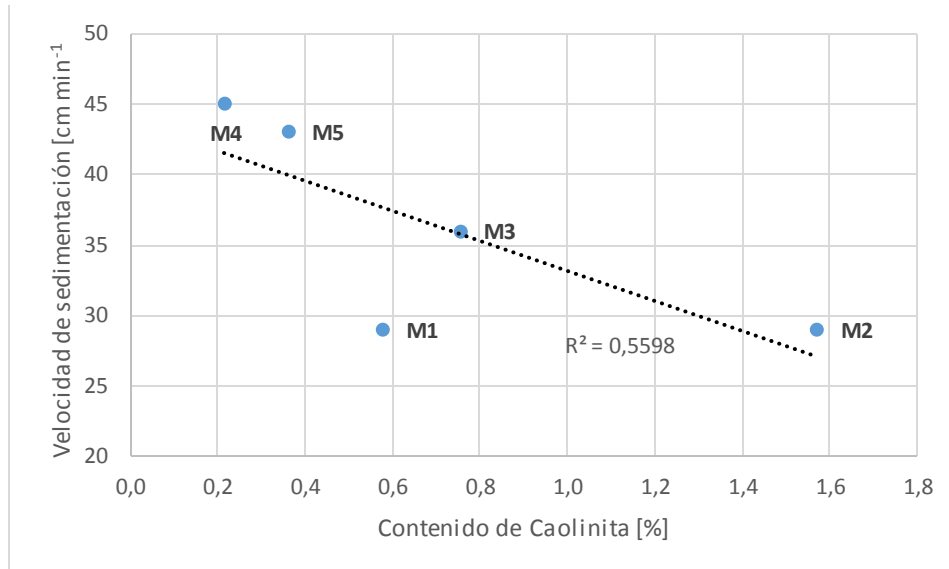


Figura 15. Velocidad de sedimentación a Cp 9% vs contenido de caolinita

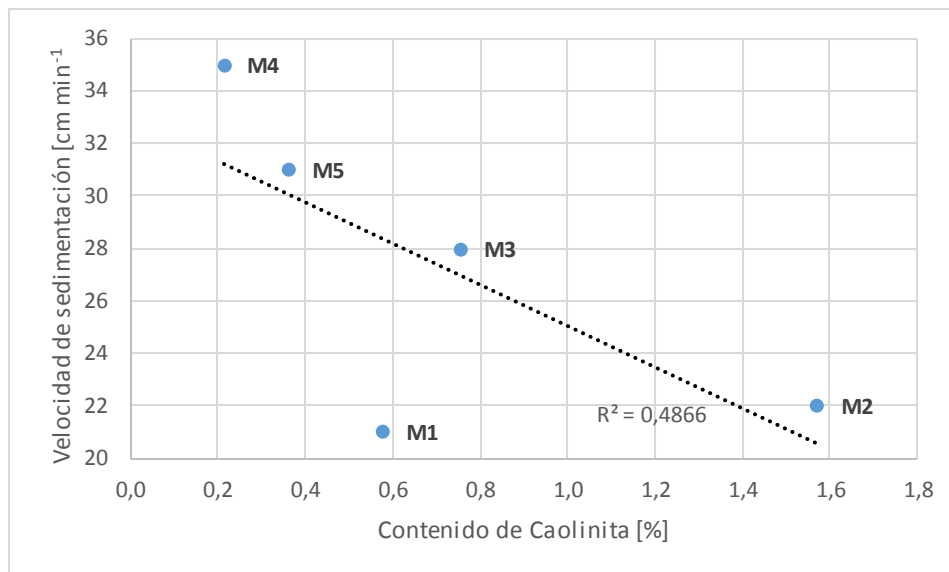


Figura 16. Velocidad de sedimentación a Cp 12% vs contenido de caolinita

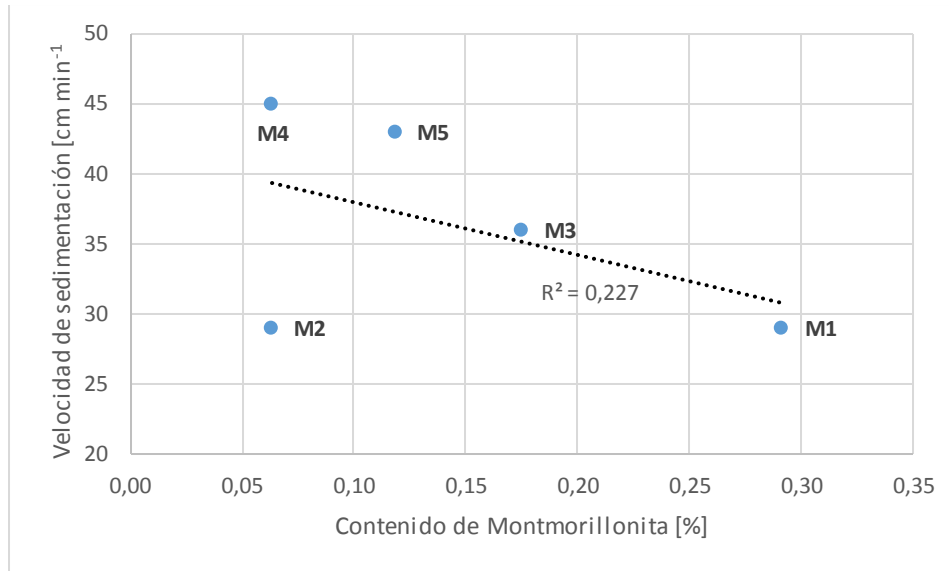


Figura 17. Velocidad de sedimentación a Cp 9% vs contenido de montmorillonita

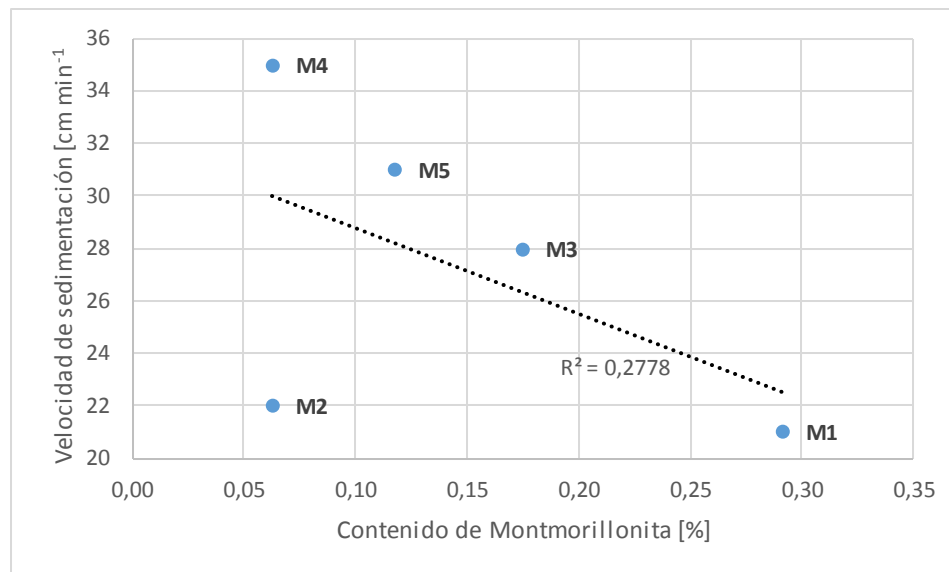


Figura 18. Velocidad de sedimentación a Cp 12% vs contenido de montmorillonita

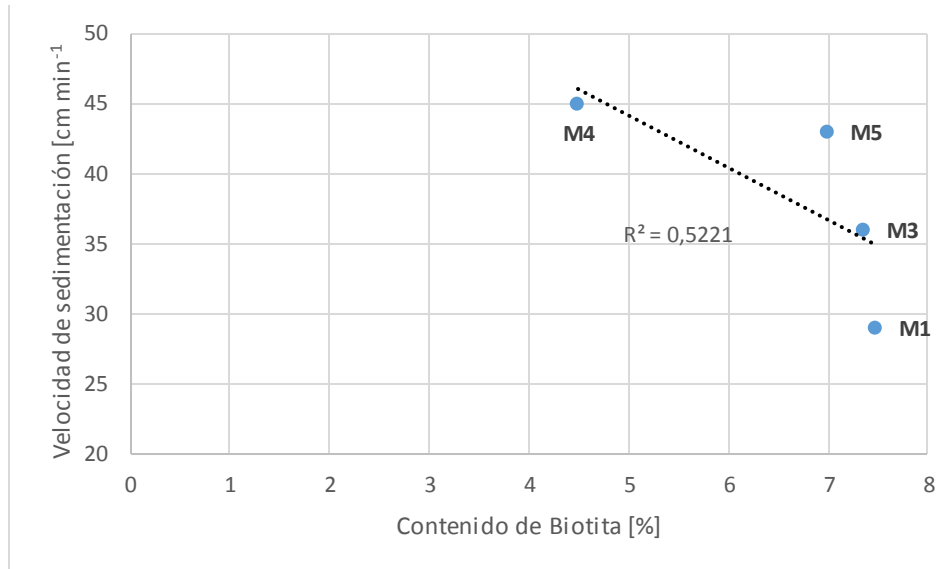


Figura 19. Velocidad de sedimentación a Cp 9% vs contenido de biotita

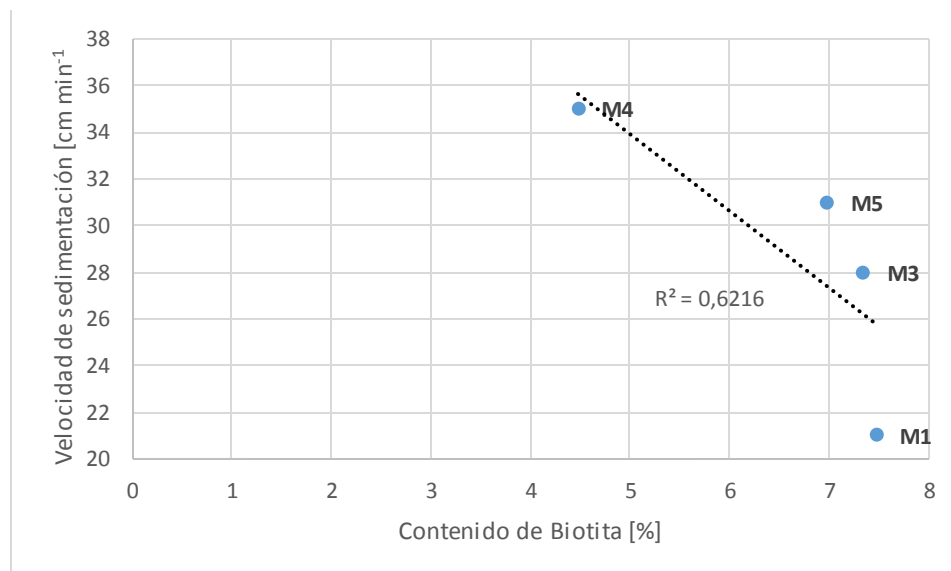


Figura 20. Velocidad de sedimentación a Cp12% vs contenido de biotita

ANEXO E TENSION DE FLUENCIA VS CONTENIDO DE ESPECIES DE FILOSILICATOS

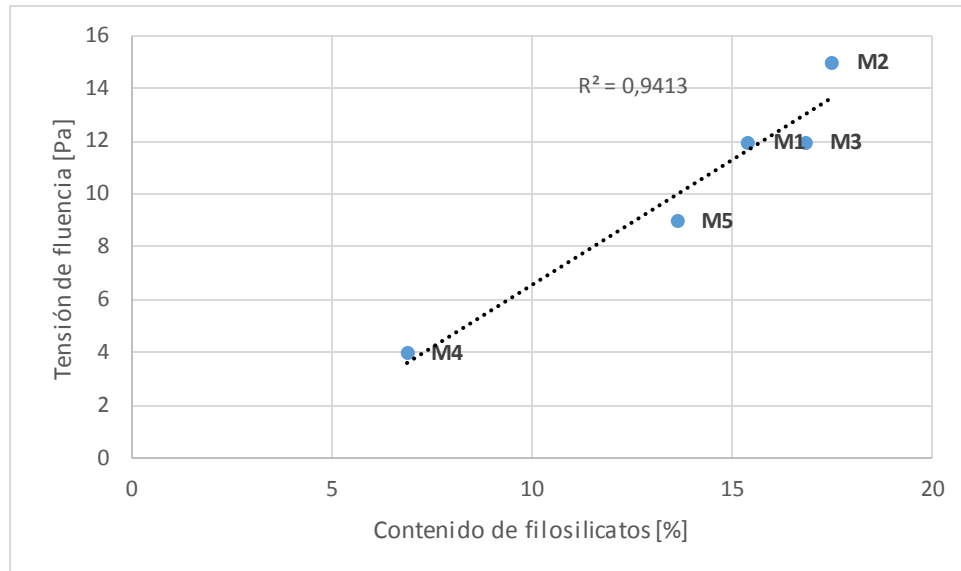


Figura 21. Tensión de fluencia a Cp 71% vs contenido de filosilicatos

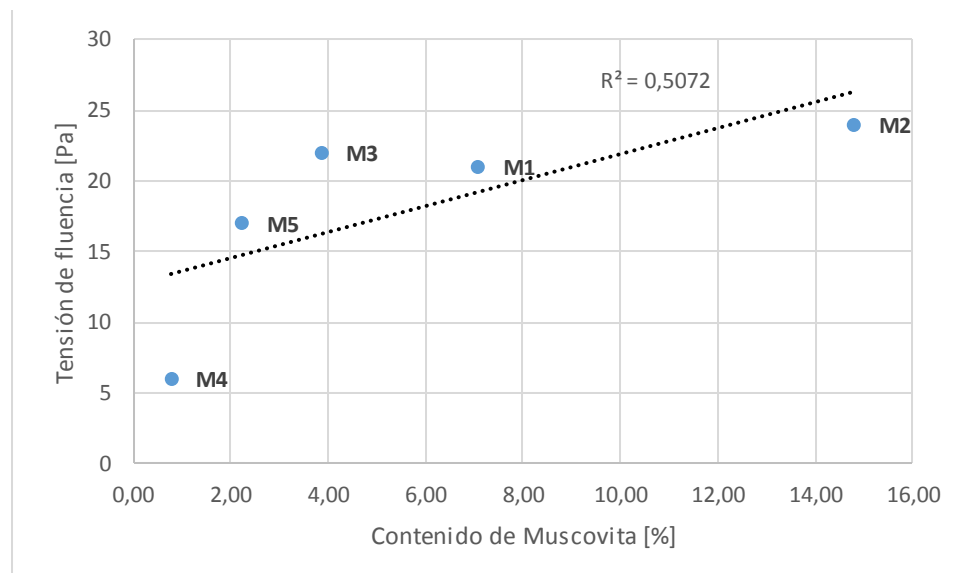


Figura 22. Tensión de fluencia a Cp 73% vs contenido de filosilicatos

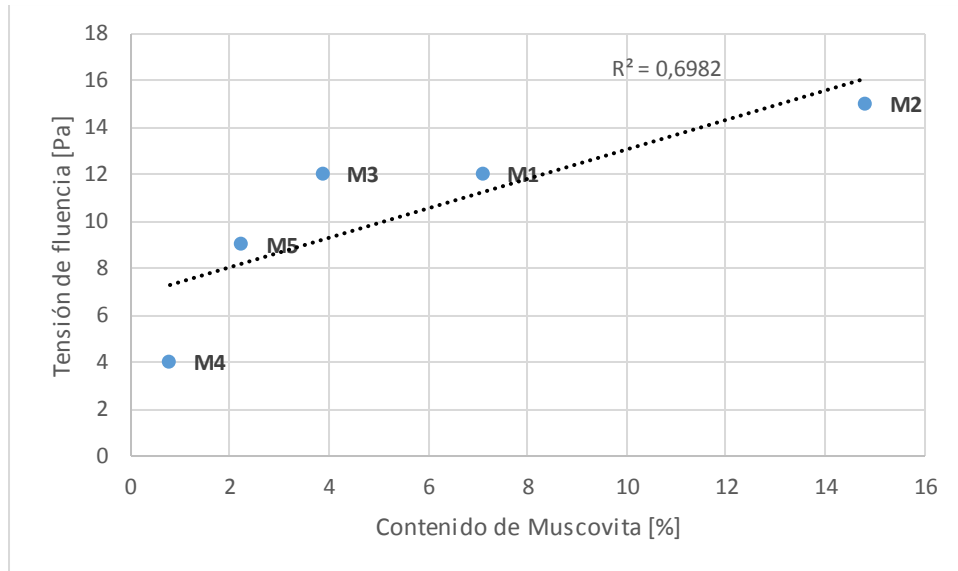


Figura 23. Tensión de fluencia a Cp 71% vs contenido de muscovita

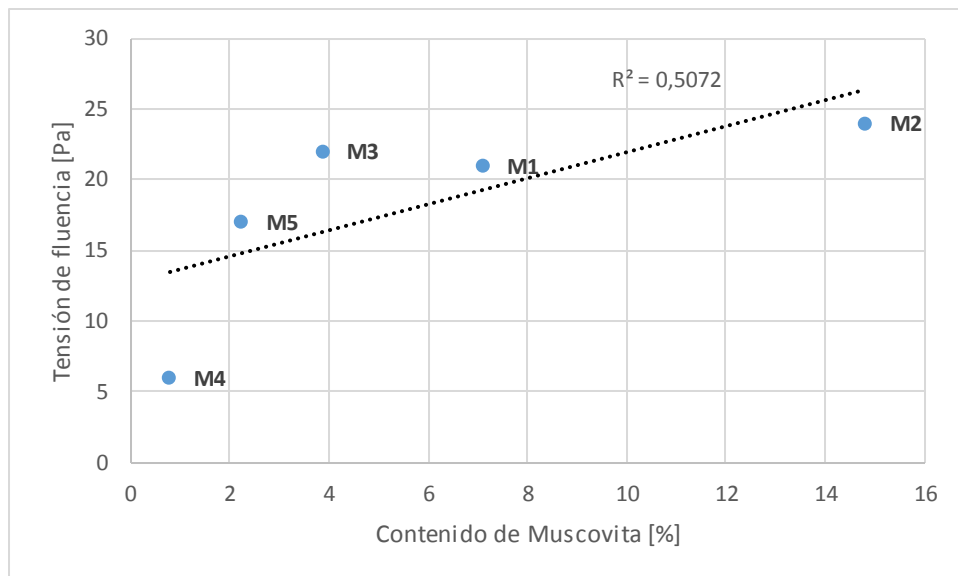


Figura 24. Tensión de fluencia a Cp 73% vs contenido de muscovita

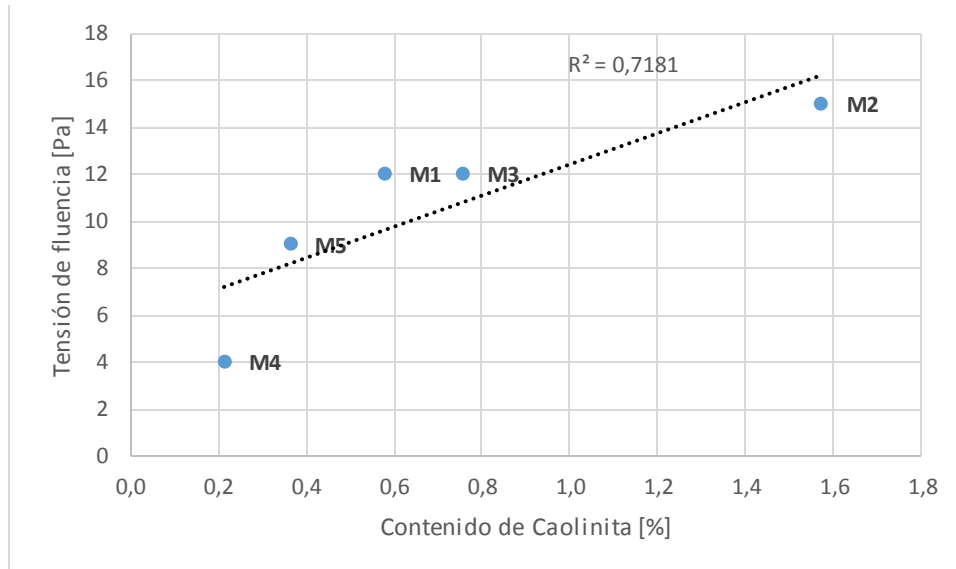


Figura 25. Tensión de fluencia a Cp 71% vs contenido de caolinita

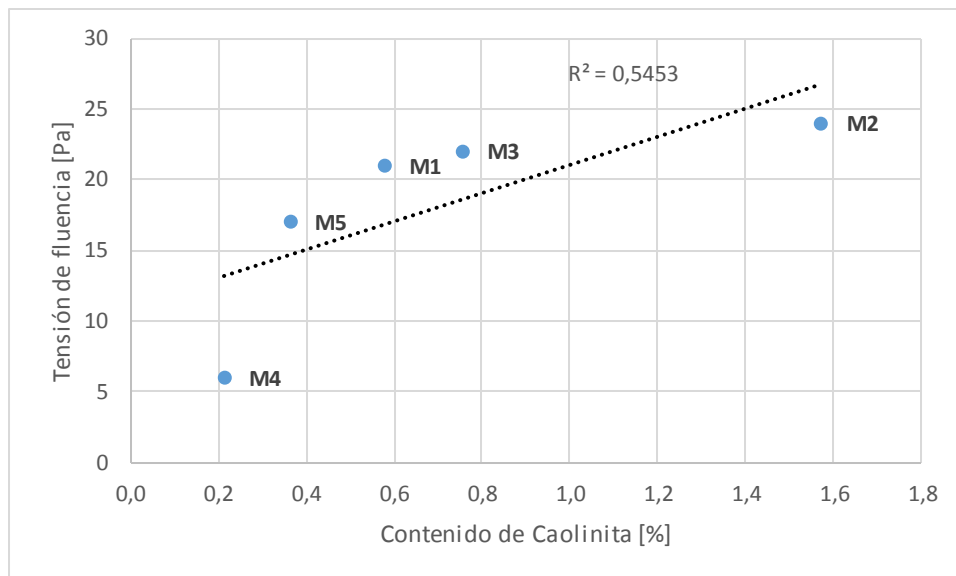


Figura 26. Tensión de fluencia a Cp 73% vs contenido de caolinita

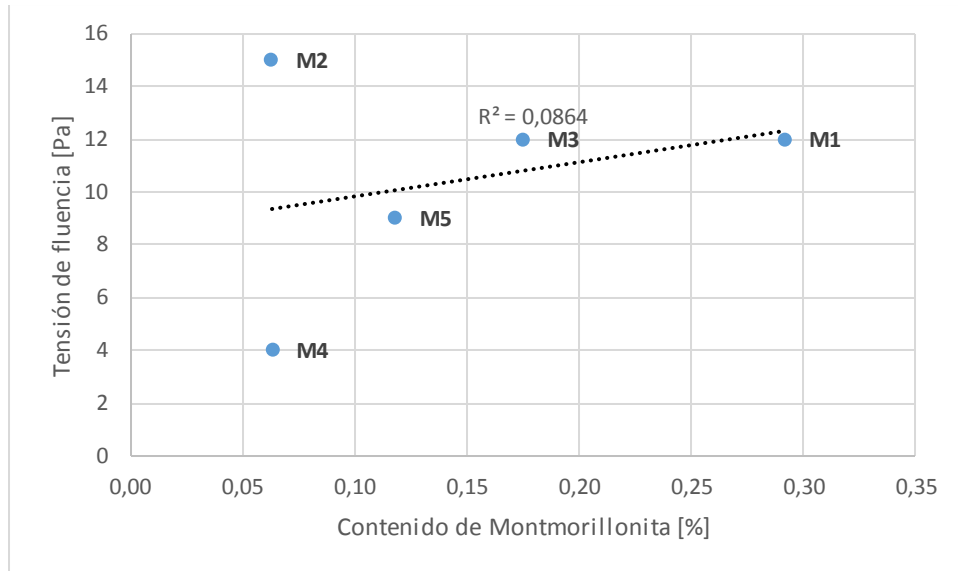


Figura 27. Tensión de fluencia a Cp 71% vs contenido de montmorillonita

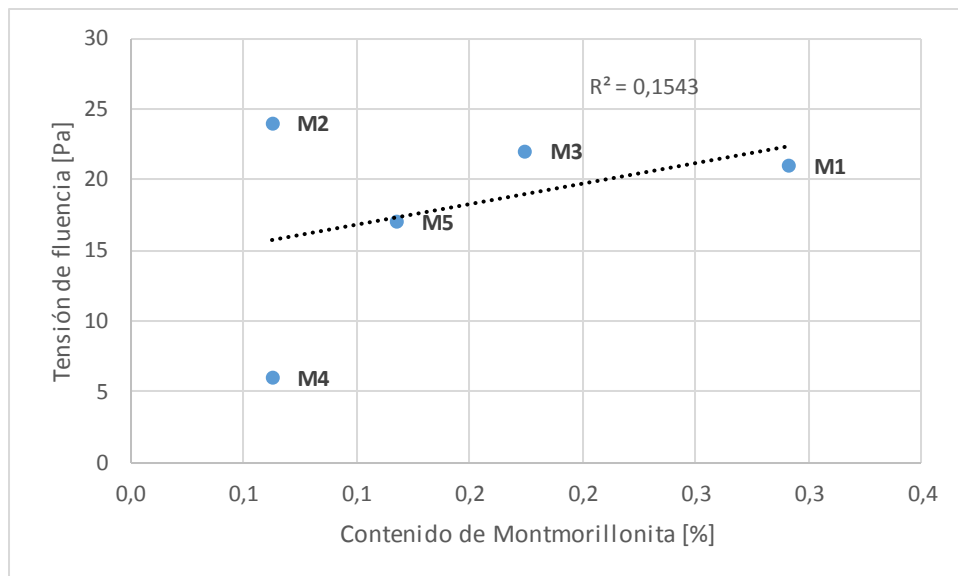


Figura 28. Tensión de fluencia a Cp 73% vs contenido de montmorillonita

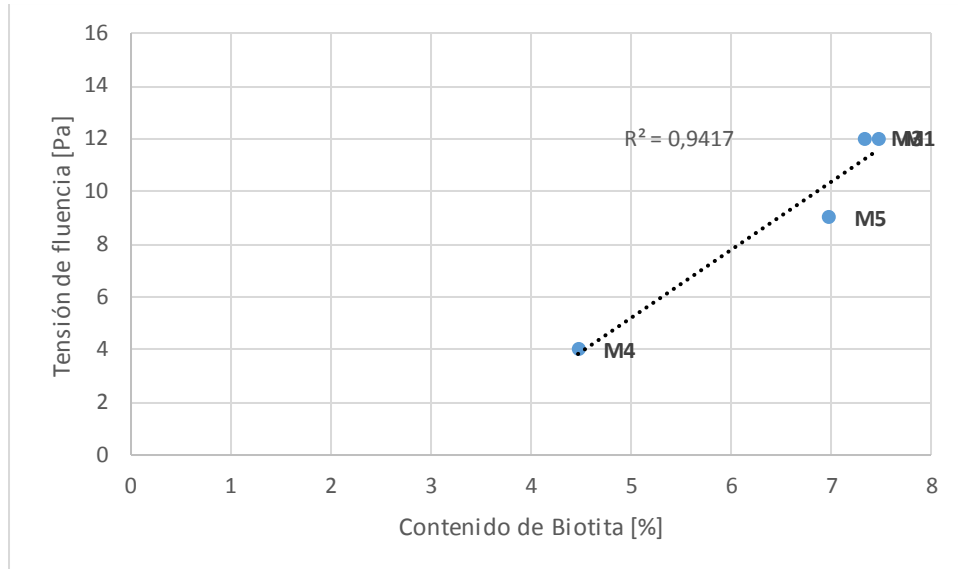


Figura 29. Tensión de fluencia a Cp 71% vs contenido de biotita

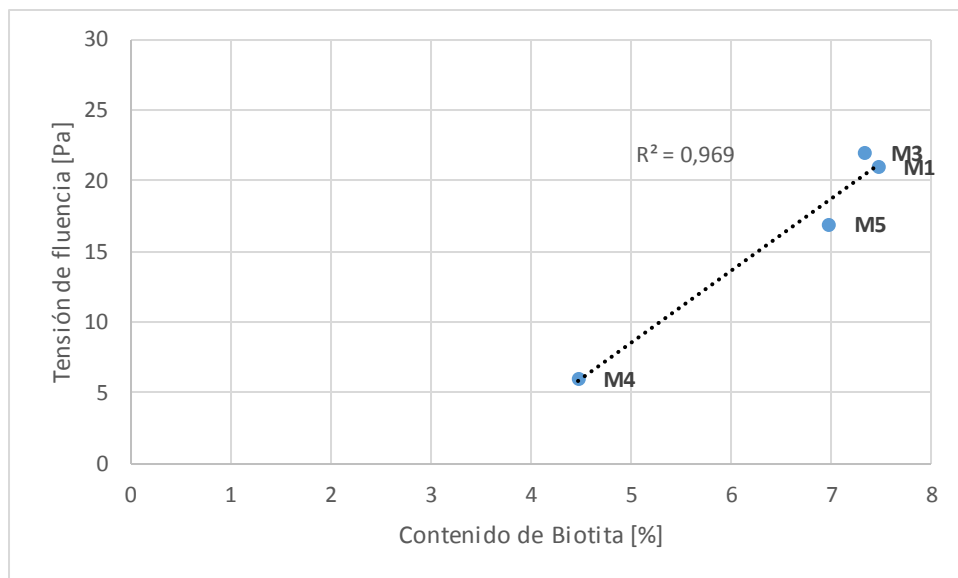


Figura 30. Tensión de fluencia a Cp 73% vs contenido de biotita.