



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de las propiedades fisicoquímicas y reológicas que afectan la sedimentación de suspensiones minerales en espesadores en la industria del cemento

Julieth Alejandra Arenas Gaviria

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2024

Análisis de las propiedades fisicoquímicas y reológicas que afectan la sedimentación de suspensiones minerales en espesadores en la industria del cemento

Julieth Alejandra Arenas Gaviria

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Recursos Minerales

Director (a):

Ph.D., Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Procesamiento de minerales

Grupo de Investigación:

Instituto de Minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2024

*A mis padres Jasmin y Luis Eduardo, y a mis
hermanitos Daniela y Juan Pablo, lo más
importante en mi vida por siempre.*

Agradecimientos

A Dios, por permitirme estar donde estoy. Por concederme la fortaleza para superar los desafíos y darme sabiduría para afrontar todos los retos presentados. Reconozco tu bondad y agradezco por cada paso que he dado con tu bendición.

A mis padres, Luis Eduardo y Claudia Jasmin por su amor y dedicación incondicional, por formarme, impulsarme siempre a ser mejor y permitirme cumplir todos mis sueños y anhelos.

A John, que me ha apoyado a lo largo de esta travesía. Su aliento, comprensión y compañía ha sido invaluable para mí

A mi director de tesis, Moisés Oswaldo Bustamante por todas sus enseñanzas, su confianza y su constante deseo de compartir sus conocimientos.

Al Instituto de Minerales CIMEX y a todos los grandes seres humanos que lo conforman, todos aportadores de grandes enseñanzas y ayuda, no solo en la realización de esta investigación, sino a lo largo de mi vida académica y profesional.

Resumen

Análisis de las propiedades fisicoquímicas y reológicas que afectan la sedimentación de suspensiones minerales en espesadores en la industria del cemento

El presente trabajo de investigación se enfoca en evaluar el efecto que genera el cambio de propiedades fisicoquímicas y reológicas en el desempeño de la sedimentación de minerales. Para ello, se examinó el impacto del tamaño y distribución de partículas, así como el porcentaje de sólidos en la suspensión, variando entre 15%, 25% y 53% de sólidos. También se consideró el potencial z de los minerales presentes (calcita, "bauxita" y "caolín"), junto con el proceso de coagulación-floculación utilizando dosificaciones de 7 y 12 g/t respectivamente.

Los procesos experimentales, realizados mediante el método de Kynch para la sedimentación batch, evidenciaron una marcada influencia de estos parámetros, logrando aumentos significativos en la velocidad de sedimentación, de hasta un 335%. Además, se observó la repercusión de una amplia distribución de tamaño de partícula, donde las partículas finas exhiben el fenómeno de acolchonamiento, afectando a las partículas gruesas.

Por otra parte, se destaca la importancia del proceso de coagulación-floculación en los métodos de separación por gravedad, no solo logrando incrementar la velocidad de sedimentación, sino también reduciendo notablemente la turbidez del agua de rebose.

Palabras clave: (sedimentación de minerales, velocidad de sedimentación, pruebas de sedimentación batch, potencial z, coagulación y floculación, reología de suspensiones).

Abstract

Analysis of the physicochemical and rheological properties that affect the sedimentation of mineral suspensions in thickeners in the cement industry

The present research work focuses on evaluating the effect of changes in physicochemical and rheological properties on mineral sedimentation. To achieve this objective, the impact of particle size and distribution, as well as the percentage of solids in the suspension (ranging from 15% to 53% solids), was examined. The zeta potential of the minerals present (calcite, "bauxite," and "kaolin"), along with the coagulation-flocculation process using dosages of 7 and 12 g/t respectively, was also considered.

The experimental processes, carried out using the Kynch method for batch sedimentation, demonstrated a marked influence of these parameters, achieving significant increases in sedimentation velocity of up to 335%. Additionally, the consequence of having a wide particle size distribution was observed, where fine particles exhibit the phenomenon of cushioning, affecting the coarse particles.

Furthermore, the importance of the coagulation-flocculation process in gravity separation methods is highlighted, not only achieving an increase in sedimentation velocity but also significantly reducing the turbidity of the overflow water.

Keywords: (mineral sedimentation, sedimentation velocity, batch sedimentation tests, z potential, coagulation and flocculation, rheology of suspensions).

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Introducción	1
1. Estado del arte y aspectos teóricos	5
1.1 Sedimentación de minerales	5
1.1.1 Sedimentación por zonas	6
1.1.2 Velocidad de sedimentación y fuerzas que actúan sobre las partículas	8
1.1.3 Proceso de Kynch para la sedimentación batch.....	12
1.1.4 Ensayos de sedimentación batch	14
1.2 Potencial Z	15
1.2.1 Doble capa eléctrica	17
1.3 Coagulación y floculación.....	18
1.3.1 Coagulación.....	19
1.3.2 Floculación	20
1.4 Reología de suspensiones	22
1.4.1 Viscosidad	24
1.4.2 Esfuerzo de cedencia	24
2. Desarrollo experimental	27
2.1 Metodología	27
2.2 Muestreo y preparación de la muestra	28
2.3 Caracterización fisicoquímica	28
2.3.1 Caracterización granulométrica	28
2.3.2 Caracterización química mediante fluorescencia de rayos X	29
2.3.3 Densidad de sólidos por medio de pycnometría	30
2.4 Potencial Z	32
2.5 Pruebas de sedimentación batch	33
2.5.1 Acondicionamiento de las muestras.....	34
2.6 Análisis reológico	35
3. Resultados y discusiones	37
3.1 Distribución de tamaño de partícula	37
3.2 Caracterización química	40
3.3 Potencial Z	41
3.4 Pruebas de sedimentación batch	43

3.4.1	Efecto del tamaño de partícula	43
3.4.2	Efecto del porcentaje de sólidos	45
3.4.3	Efecto de la adición de aditivos en la pulpa	48
3.4.4	Efecto de la adición de aditivos en la fracción gruesos	51
3.4.5	Efecto de la adición de aditivos en la fracción finos	55
3.4.6	Resumen resultados obtenidos en las pruebas de sedimentación	58
3.5	Viscosidad y esfuerzo de cedencia de la pulpa	59
4.	Conclusiones y recomendaciones	63
4.1	Conclusiones	63
4.2	Recomendaciones	65
A.	Datos granulométricos Pulpa	67
	Bibliografía	69

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Sedimentación de esferas en un líquido.	5
Figura 1-2: Sedimentación por zonas de una pulpa según Coe y Clevenger (1916).	7
Figura 1-3: Curva de sedimentación.	8
Figura 1-4: Fuerzas que actúan sobre una partícula inmersa en un fluido viscoso	9
Figura 1-5: Curva de sedimentación mostrando las interfaces (a) agua- suspensión. (b) suspensión- sedimento. (c) agua- sedimento.	13
Figura 1-6: Desplazamiento de capas de sólidos según Kynch, 1972.	14
Figura 1-7: Ensayo de sedimentación en probeta graduada.	15
Figura 1-8: Estabilidad de los coloides en medio acuoso.	16
Figura 1-9: Doble capa eléctrica alrededor de una partícula.	18
Figura 1-10: Efecto al adicionar coagulante.	19
Figura 1-11: Mecanismo de aglomeración de coloides por medio de cadenas de polímeros empleando floculante.	21
Figura 1-12: Proceso de coagulación – floculación.	22
Figura 1-13: Destrucción de una suspensión para iniciar el flujo.	25
Figura 2-1: Mastersizer 2000.	29
Figura 2-2: Epsilon 1.	30
Figura 2-3: Picnómetro Gay-Lussac.	31
Figura 2-4: Zetasizer Nano ZS90.	32
Figura 2-5: Formación de grumos por mala preparación de floculante.	35
Figura 2-6: Reómetro Rheotests RN 5.1.	36
Figura 3-1: Distribución de tamaño de partícula de la pulpa.	38
Figura 3-2: Potencial Z minerales componentes de la pulpa.	41
Figura 3-3: Potencial Z del caolín con y sin coagulante.	42
Figura 3-4: Curvas de sedimentación para las 3 muestras a 53% de sólidos sin aditivos.	43
Figura 3-5: Curvas de sedimentación para las 3 muestras a 25% de sólidos sin aditivos.	44
Figura 3-6: Curvas de sedimentación para las 3 muestras a 15% de sólidos sin aditivos.	44
Figura 3-7: Curvas de sedimentación para las muestras a diferentes porcentajes de sólidos sin aditivos. (a) Pulpa, (b) Gruesos, (c) Finos.	46
Figura 3-8: Curvas de sedimentación para la pulpa a 53% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de aditivos.	48

Figura 3-9: Curvas de sedimentación para la pulpa a 25% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de reactivos.....	50
Figura 3-10: Curvas de sedimentación para la pulpa a 15% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de reactivos.....	50
Figura 3-11: Curva de sedimentación para la fracción Gruesos a 53% de sólidos. (a) Sin aditivos (b) con aditivos.....	51
Figura 3-12: Pruebas de sedimentación a 25% de sólidos. Izq: prueba sin aditivos - Der: prueba con aditivos	52
Figura 3-13: Curvas de sedimentación para la fracción Gruesos a 53% de sólidos....	53
Figura 3-14: Curvas de sedimentación para la fracción Gruesos a 25% de sólidos. (a) Sin ADT (b) Con ADT.....	53
Figura 3-15: Curvas de sedimentación para la fracción Gruesos a 25 % en sólidos...	54
Figura 3-16: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Gruesos a 15% de sólidos.....	55
Figura 3-17: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Finos a 53% de sólidos.....	55
Figura 3-18: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Finos a 25% de sólidos.....	56
Figura 3-19: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Finos a 15% de sólidos.....	57
Figura 3-20: Yield stress en función del porcentaje de sólidos para la pulpa.....	60

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Estabilidad coloidal respecto al potencial zeta.....	16
Tabla 2-1: Parámetros para medición de potencial z.....	33
Tabla 2-2: Esquema pruebas de sedimentación Bach.....	33
Tabla 3-1: Resultados análisis FRX.....	40
Tabla 3-2: Resultados efecto de porcentaje de sólidos en la velocidad de sedimentación.....	47
Tabla 3-3: Resultados velocidad de sedimentación para la pulpa a 53% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de aditivos.....	48
Tabla 3-4: Resultados velocidad de sedimentación para la pulpa a 25 y 15% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de aditivos.....	49
Tabla 3-5: Resumen resultados pruebas de sedimentación.....	59
Tabla 3-6: Resultados pruebas reológicas para la pulpa.....	61

Introducción

El espesamiento es una operación industrial de separación sólido-líquido que a partir de suspensiones diluidas admite la separación de agua clara y un sedimento con alta fracción en peso de sólidos (Coe & Clavenger, 1916; Talmage & Fitch, 1955; Concha, 2001). Los objetivos del proceso se enfocan tanto en la producción de una suspensión en la descarga muy densa con una adecuada fluidez que pueda ser descargada en un tubo en la parte inferior del sedimentador, como en la recuperación de agua clara que forma parte de la fase acuosa de la suspensión que se alimenta al equipo. En el primer caso suele referirse a un espesamiento mientras que en el segundo caso se usa el término de clarificación (Quiero, 2018; Gupta & Yan, 2016).

En los procesos mineros actuales se tiende a considerar la sedimentación o espesamiento como una etapa auxiliar y no fundamental en la planta, pero llega a tomar gran importancia cuando no es posible recuperar el agua o alcanzar diluciones de dispersión específicas de sedimento de manera eficiente, rápida y continua por incremento de la estabilidad, unido a la aparición de materiales suspensionantes (García, 2016) debido a características de tamaño de partículas, química de superficie de las partículas, presencia de iones en soluciones acuosas, entre otras.

La sedimentación de minerales en la industria del cemento es un proceso complejo y crítico que requiere un equilibrio cuidadoso para asegurar la operación óptima del reactor de clinkerización y la eficiencia energética en la producción de cemento en el reactor. Una sedimentación eficiente contribuye a la optimización del uso de energía en la producción de cemento, ya que las reacciones de clinkerización ocurren en estado sólido a alta temperatura, lo cual implica reacciones previas de secado del mineral y calcinación, donde el agua se debe evaporar previamente usando un tiempo de residencia dentro del reactor.

De acuerdo con lo anterior, un control y caracterización adecuada de la suspensión mineral que ingresa al sedimentador y de la velocidad de sedimentación influye directamente en la

fracción de sólidos de la suspensión que ingresa al reactor de clinkerización. Es así como, esta relación líquido/sólido en la descarga del sedimentador, se configura como el alimento al reactor de clinkerización el cual es un proceso pirometalúrgicos a una temperatura aproximada de 1200°C.

Por lo anterior, se puede plantear que la relación líquido/sólido en la descarga del sedimentador afectará directamente el consumo de energía requerido para evaporar toda la masa de agua en la suspensión que se alimenta al reactor y poder dar inicio a las reacciones de calcinación y posterior clinkerización, afectando directamente los tiempos de residencia en el horno, y la cinética de las reacciones heterogéneas en el reactor. El factor que se usa en la industria cementera para la razón sólido/líquido en la descarga de los espesadores es del orden de diluciones de 7/3.

La sedimentación se basa en el principio de que las partículas sólidas más densas tienden a asentarse en el fondo de un líquido más ligero (Svarovsky, 1977). La velocidad de sedimentación de las partículas depende de factores como su tamaño, forma, densidad y la viscosidad del líquido (Nasiha & Shanmugam, 2018). Partículas más grandes y densas tienden a sedimentar más rápido, mientras que las más pequeñas y ligeras pueden permanecer en suspensión durante períodos más prolongados (Barrios, 2017). Varios factores influyen en la sedimentación, y estos incluyen la concentración de sólidos en la suspensión, la viscosidad del medio líquido, la temperatura y la presencia de aditivos como floculantes y coagulantes.

Algunas operaciones de sedimentación usan reactivos para la aglomeración de partículas finas, denominados; floculantes y coagulantes, que son sustancias químicas comúnmente utilizadas para mejorar la eficiencia de la sedimentación usando un concepto de “aumento del tamaño de partículas” mediante la formación de agregados de partículas finas denominada flóculos o coágulos. Los floculantes promueven la formación de flóculos, agregados más grandes de partículas, facilitando su sedimentación. Los coagulantes, por otro lado, que ayudan en la aglomeración inicial de partículas finas como desestabilizante de las partículas.

La optimización de la sedimentación implica ajustar las variables del proceso para lograr una separación eficiente y mejorar la recuperación de los componentes deseados. El

control adecuado de los parámetros del proceso es esencial para garantizar un rendimiento óptimo.

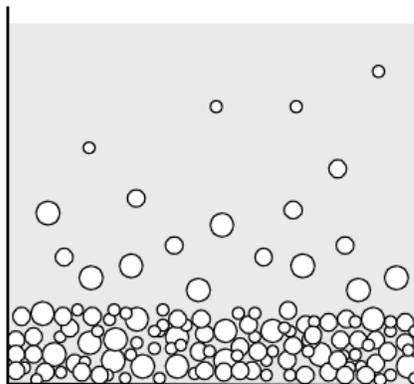
La comprensión detallada de la sedimentación de minerales no solo tiene implicaciones para la optimización de la recuperación de minerales en la minería, sino que también puede influir en la gestión eficiente de recursos hídricos, la reducción de residuos y el avance hacia prácticas más sostenibles en la industria. Es así como, el objetivo principal de esta investigación es explorar cómo estas propiedades fisicoquímicas y reológicas se entrelazan y afectan la sedimentación en espesadores de la industria del cemento. Se analizan los desafíos inherentes, como la aglomeración de partículas, la formación de flóculos y la variabilidad en las condiciones de operación, con el propósito de mejorar la eficiencia del proceso.

1.Estado del arte y aspectos teóricos

1.1 Sedimentación de minerales

La sedimentación de minerales es un proceso de separación físico en el que las partículas minerales sólidas en suspensión en un líquido se asientan y se depositan debido a la fuerza de la gravedad. Este proceso se basa en la diferencia de densidades entre las partículas minerales y el líquido en el que están suspendidas. Las partículas más densas se asientan más rápidamente, mientras que las menos densas y/o muy finas se asientan más lentamente. Los objetivos del proceso se pueden enfocar tanto en la producción de una pulpa en la descarga muy densa o bien en la recuperación de la fase acuosa de la suspensión. En el primer caso suele referirse a un espesamiento mientras que en el segundo caso se usa el termino de clarificación (Quiero, 2018; Gupta & Yan, 2016). La cantidad de líquido de una suspensión que es capaz de separar la sedimentación es toda aquella que no llena los poros del sedimento formado. La Figura 1-1 muestra un esquema de partículas en sedimentación gravitatoria.

Figura 1-1: Sedimentación de esferas en un líquido.



Fuente: Concha, 2001.

En general, las propiedades del componente sólido de un medio particulado dependen fuertemente de la concentración de este componente. Es así como en sistemas diluidos las partículas tienen mayor libertad de movimiento, mientras que en medios concentrados, éstas son obstaculizadas en su movimiento por la presencia de otras partículas. La variable característica que separa estas dos formas de comportamiento es la concentración crítica, que se define como aquella concentración en que las partículas entran en contacto directo unas con otras. A concentraciones menores de la crítica el medio se denomina suspensión, toda fuerza de contacto entre partículas se efectúa por intermedio del fluido y nos encontramos en un régimen de sedimentación obstaculizada. A concentraciones mayores de la crítica el medio recibe el nombre de medio poroso, lecho poroso o sedimento y los esfuerzos en el sólido puede ser transmitidos de partícula a partícula directamente; a estas concentraciones nos encontramos en un régimen de consolidación. En estos casos se forma una especie de esqueleto que transmite el esfuerzo en el sólido. (Concha, 2001).

1.1.1 Sedimentación por zonas

Coe y Clevenger (1916) reconocieron que la sedimentación de una suspensión inicialmente homogénea da lugar a cuatro zonas de sedimentación (ver Figura 1-2) en las cuales aumenta el porcentaje de sólidos mediante aumenta la profundidad:

Zona A: Zona de líquido claro o zona clarificada. Esta es una zona muy definida, donde el líquido claro que ha sido recuperado de la suspensión es recuperado en el rebalse. El área de clarificación se determina a partir de la velocidad de sedimentación.

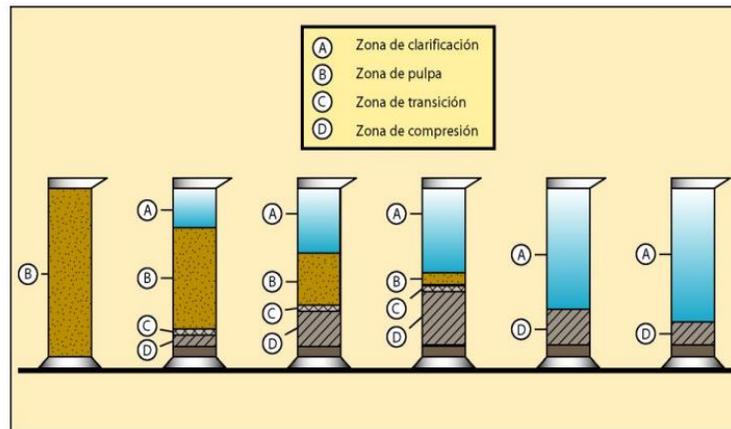
Zona B: Zona interfacial. Esta zona se caracteriza porque la concentración de sólidos es uniforme, sedimentando toda ella con una velocidad constante. Es la zona donde la alimentación se distribuye en forma homogénea dentro del espesador.

Zona C: Zona de transición. En esta zona la velocidad de sedimentación disminuye debido al incremento de la viscosidad. Es un estado intermedio en la cual la

suspensión está en un estado de transición entre la sedimentación libre de obstáculos y la zona de compresión, cambiando la concentración de sólidos gradualmente entre la zona II y IV.

Zona D: Zona de compresión. En esta zona se produce la acumulación y compactación de los sólidos en suspensión. Los sólidos eliminan parte del agua por compresión de las partículas que fuerzan al líquido a salir de los intersticios del lodo espesado. La mayor parte del líquido contenido en la alimentación fluye hacia el rebose. El líquido restante es descargado con los sólidos

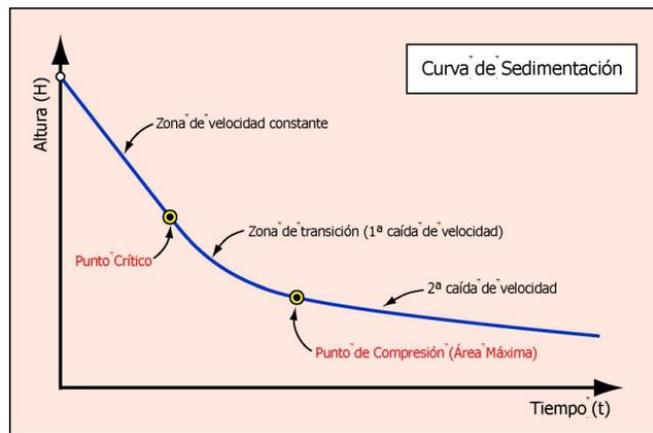
Figura 1-2: Sedimentación por zonas de una pulpa según Coe y Clevenger (1916).



Fuente: Perales, 2011.

Coe y Clevenger (1916) establecen que la concentración dentro del espesador no es la misma de la alimentación y que, en la zona B se establecerá una suspensión de tal concentración que tenga la mínima velocidad de sedimentación. Es así como la concentración de alimentación pasa por distintas concentraciones hasta llegar a la concentración de descarga.

Cuando las fases B y D se unen y desaparece B, el sistema se encuentra en un momento "tc" (ver Figura 1-3) denominado punto crítico en la que la fase de transición desaparece. Después del punto crítico, las partículas descansan una sobre otra produciéndose una compresión final.

Figura 1-3: Curva de sedimentación.

Fuente: Foust, 1997.

De acuerdo con la mayoría de los investigadores, la única interfase nítida es la existente entre el agua clara y la zona interfacial. Además, algunos investigadores como Fitch y Stevensen (1977) y Eklund y Jernqvist (1975) ignoran la zona C por lo cual no es claro si en todos los casos existe. Por otro lado, algunos experimentos prueban que, en una operación normal, la concentración de la zona B no es uniforme y depende del flujo de sólidos en la alimentación más que en su concentración (Coming et al, 1954).

1.1.2 Velocidad de sedimentación y fuerzas que actúan sobre las partículas

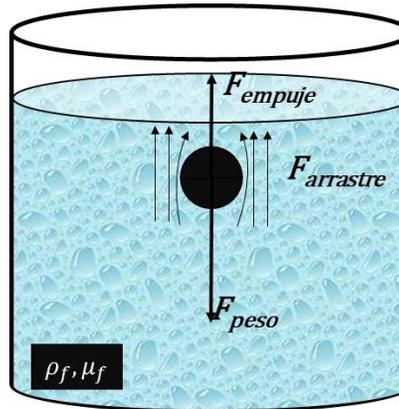
La velocidad de sedimentación se refiere a la velocidad a la cual las partículas suspendidas en un fluido, como agua o un lodo, se asientan hacia el fondo debido a la acción de la gravedad. La velocidad de separación de una suspensión de ambas fases (líquido- sólido) está determinada por las propiedades físicas del sólido, del líquido, de la mezcla, y la concentración de la fase sólida (Portilla y Orduz, 2017). Estas propiedades son:

- Tamaño y forma de las partículas: partículas más grandes y pesadas tienden a sedimentar más rápidamente. La forma de las partículas también puede influir en la velocidad de sedimentación.

- b. Densidad de las partículas: la densidad de las partículas sólidas afecta su capacidad para hundirse en el fluido.
- c. Densidad del fluido: la densidad del fluido influye en la capacidad del fluido para soportar partículas suspendidas.
- d. Viscosidad del fluido: fluidos más viscosos resisten el movimiento de las partículas, afectando la velocidad de sedimentación.

En una partícula rodeada por un líquido las fuerzas que actúan sobre esta son: (a) la fuerza de gravedad (F_p), que atrae la esfera hacia abajo, (b) la fuerza de empuje (F_e), que va en oposición a la fuerza de gravedad y (c) la fuerza de arrastre entre el sólido y fluido (F_d), que se opone al movimiento y que es proporcional a la velocidad relativa entre el sólido y el fluido, y como este último está inmóvil, es la velocidad que adquiere la partícula (ver Figura 1-4) (Concha, 2001).

Figura 1-4: Fuerzas que actúan sobre una partícula inmersa en un fluido viscoso



Fuente: Jiménez, 2017.

$$\text{Fuerza de gravedad } F_p = \rho_s * V_p * g \quad (1.1)$$

$$\text{Fuerza de empuje } F_E = \rho_f * V_p * g \quad (1.2)$$

$$\text{Fuerza de arrastre } F_D = C_D * \rho_f * v_r^2(t) * \frac{S}{2} \quad (1.3)$$

Dónde: v_r : Velocidad relativa de la partícula (v_p) respecto a la velocidad del fluido (v_f), definido como: ($v_p - v_f$)

S es la superficie proyectada de la partícula $S = \pi * d^2/4$

C_D coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre para un régimen de flujo laminar, el sistema descrito en la Figura 1-4, es de la forma:

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} \quad \text{donde} \quad N_{Re} = \frac{\rho_f * v_r * d}{\mu_f} \quad (1.4)$$

Asumiendo que la velocidad del fluido es nula ($v_f = 0$), la fuerza de arrastre se transforma en:

$$\text{Fuerza de arrastre: } F_D = C_D * \rho_f * v_c^2(t) * \frac{S}{2} \quad (1.5)$$

Donde v_c es una velocidad de caída en el seno del fluido tiempo dependiente.

Efectuando el balance de fuerzas:

$$F_P - F_E - F_D = \rho_s * V_P * \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (1.6)$$

Resolviendo la ecuación anterior, con las variables de contorno:

$$\text{para: } \begin{cases} t = 0, & v_c = 0 \\ t = t, & v_c(t) = v_c(t) \end{cases}$$

Se obtiene una expresión para la velocidad de caída de una partícula esférica sólida:

$$v_c(t) = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2g}{18\mu_f} \left[1 - \exp\left(-\frac{18\mu_f}{\rho_s d^2} t\right) \right] \quad (1.7)$$

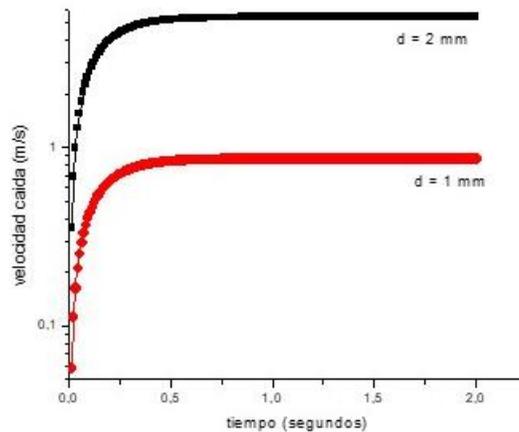
La ecuación anterior, tiene una solución asintótica para cuando $t \rightarrow \infty$, conocida como velocidad de sedimentación de Stokes v_s (Concha, 2001):

$$v_s(t) = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2 g}{18\mu_f} \quad (1.8)$$

Cuando las partículas caen verticalmente en un fluido viscoso debido a su propio peso se puede calcular su velocidad de caída o sedimentación, la cual está regida por la Ley de Stokes (ver Ec. 1.8). Las partículas sólidas que hay en una solución de fluido viscoso, no turbulenta, se mueven hacia abajo bajo la influencia de la gravedad en relación con el fluido. La velocidad de este movimiento se incrementa hasta que la fuerza opuesta de arrastre, generada por la viscosidad del líquido, iguala la fuerza de la gravedad sobre la partícula. Estas partículas, a partir de este momento, caerán a velocidad constante, llamada velocidad de caída o velocidad de sedimentación. La Ec. 1.8 establece que la velocidad de sedimentación es directamente proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula, la fuerza de gravedad y la diferencia de densidad entre la partícula y el fluido, e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido.

En la Figura 1-5 se observa un ejemplo de la influencia del tamaño de partícula respecto a la velocidad de sedimentación.

Figura 1-5: Velocidad de caída en medio acuoso de partículas esféricas de cuarzo.



Mishler (1918) fue el primero en demostrar mediante experimentos que la velocidad de sedimentación de los lodos es diferente para suspensiones diluidas y concentradas. Él concluyó que mientras la velocidad de sedimentación de los lodos diluidos suele ser independiente de la profundidad de la columna de sedimentación, la velocidad de sedimentación de los lodos espesos aumenta con la profundidad de la columna de sedimentación.

Kynch (1952), presentó una teoría cinemática de la sedimentación basada en la propagación de ondas de concentración en la suspensión. La suspensión se considera un continuo, llamada suspensión ideal, y el proceso de sedimentación está representado por la ecuación de continuidad de la fase sólida (ver Ecuación (1.3)). En esta teoría, Kynch concluye que en cualquier punto del flujo campo, la velocidad de sedimentación es función de la concentración local de sólidos.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial f_{bk}}{\partial z} = 0 \quad 0 \leq z \leq L \quad t > 0 \quad (1.9)$$

Donde: φ : fracción volumétrica de sólidos
 $f_{bk}(\varphi) = \varphi v_s$: función densidad del flujo de sólidos
 v_s : velocidad de la fase sólida

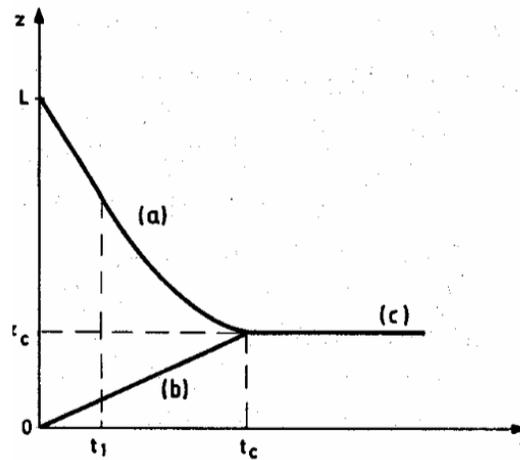
1.1.3 Proceso de Kynch para la sedimentación batch

Según Kynch (1972), Cuando una suspensión ideal sedimenta bajo el efecto de la gravedad en una columna de sedimentación se puede distinguir las siguientes etapas en el proceso:

- a) Antes de comenzar la sedimentación la suspensión se homogeniza por agitación, de manera que su concentración es constante.
- b) 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. Esta etapa se denomina sedimentación dificultada (hindered settling).
- c) Las partículas que llegan al fondo de la columna se acumulan haciendo que la concentración aumente rápidamente hasta ocupar toda la superficie disponible. El material en estas condiciones recibe el nombre de sedimento y su concentración es φ_∞ . La superficie del sedimento, o interfaz suspensión-sedimento, se mueve hacia arriba a medida que nuevas partículas se le incorporan.
- d) En un punto determinado de la columna, pero bajo la interface de agua-suspensión, la concentración de la suspensión permanece fija o aumenta con el tiempo.

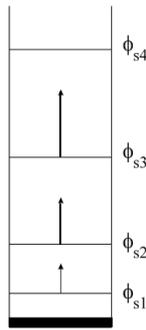
- e) Utilizando un instrumento para medir concentraciones, como el de Been and Sills (1981), se podría seguir el movimiento de una determinada concentración φ en la columna. El movimiento sería necesariamente hacia arriba a una velocidad denominada velocidad de propagación de la onda de concentración φ .

Figura 1-6: Curva de sedimentación mostrando las interfaces (a) agua- suspensión. (b) suspensión- sedimento. (c) agua- sedimento.



Fuente: Concha (2001).

Según Kynch (1972), en el fondo del recipiente se admite que se forman infinitas capas de composición constante cada una de ellas. Para esto, hay que tener en cuenta que si bien los sólidos se desplazan hacia abajo, Kynch supone que el aumento gradual de concentración de los sólidos, es equivalente al desplazamiento hacia arriba de capas ficticias con diferentes concentraciones. Es decir, La superficie del sedimento, o interfaz suspensión-sedimento, se mueve hacia arriba a medida que nuevas partículas se le incorporan. En cada instante las capas se encuentran en posiciones distintas, y están formadas por sólidos diferentes, tal como se indica en la Figura 1-7.

Figura 1-7: Desplazamiento de capas de sólidos según Kynch, 1972.

Fuente: Martin et al, 2011.

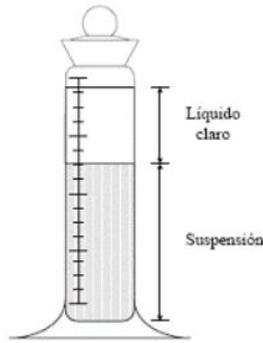
1.1.4 Ensayos de sedimentación batch

Para comprender mejor el proceso de sedimentación que tiene lugar dentro de un espesador nos basamos en el proceso de Kynch para sedimentación batch, donde hay que realizar ensayos de sedimentación llevados a cabo con probetas graduadas (Figura 1-8), donde se observará el descenso de la altura de la interfase que se forma entre el líquido clarificado, normalmente será agua, y la pulpa, que estará formada por el fluido y las partículas finamente divididas; este ensayo se realizará en un ambiente sin perturbación para no crear condiciones turbulentas y nos permitirá obtener los ratios de sedimentación a partir de los cuales se dibujan las curvas de sedimentación que nos aportan la información necesaria para el dimensionamiento de los tanques espesadores o los clarificadores (Perales, 2011). Las pruebas de sedimentación batch se realizan para evaluar la capacidad de un líquido para separar sólidos mediante sedimentación y calcular su velocidad de asentamiento, en un entorno controlado y en un período de tiempo determinado.

Al inicio del ensayo de sedimentación con una probeta, se puede observar que los sólidos están dispersos a través de todo el cilindro y la concentración (Kg de sólido / L de pulpa) es igual en todas las áreas de este. Cuando comienza la sedimentación, las partículas caen a una velocidad que va a depender de las condiciones locales de sedimentación

obstaculizada. El comportamiento exacto de una pulpa dependerá de la granulometría de las partículas, de la relación de dilución y el grado de floculación producida.

Figura 1-8: Ensayo de sedimentación en probeta graduada.



Fuente: Cabrera, 2021.

La interacción entre partículas en una dispersión se debe a dos tipos de fuerzas. Una fuerza atractiva de muy corto alcance, denominada fuerza de Van der Waals, y una fuerza repulsiva, de mucho mayor alcance, debido a la carga eléctrica superficial que poseen las partículas.

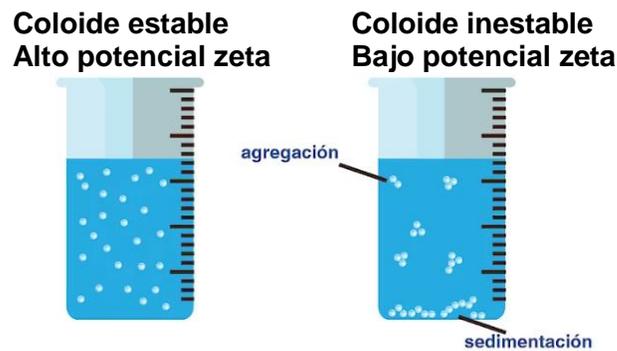
1.2 Potencial Z

Las propiedades físicas de los coloides (nanopartículas) y suspensiones dependen fuertemente de la naturaleza y extensión de la interfaz partícula-líquido. El comportamiento de las dispersiones acuosas entre partículas y líquido es especialmente sensible a la estructura iónica y eléctrica de la interfaz.

El potencial zeta es una propiedad física que tiene cualquier partícula que se encuentra en una suspensión. Es un parámetro que mide el equilibrio electroquímico en la interfaz partícula-líquido. Mide la magnitud de la repulsión/atracción electrostática entre partículas y así, se ha convertido en uno de los parámetros fundamentales conocidos por afectar la estabilidad (resistencia al cambio de la dispersión con el tiempo) de las partículas

coloidales (Raja & Barron, 2022). Como se ilustra en la Figura 1-9 las partículas con un alto potencial zeta, ya sea positivo o negativo, tienden a mantenerse en suspensión debido a la repulsión electrostática entre ellas, por el contrario, un potencial zeta bajo o cercano a cero puede indicar una mayor tendencia a la sedimentación.

Figura 1-9: Estabilidad de los coloides en medio acuoso.



Fuente: Acniti, 2018.

Cabe destacar que el potencial zeta no es una medida directa de la estabilidad de una dispersión, pero proporciona una buena predicción de la estabilidad. En la Tabla 1-1 se resume el comportamiento de estabilidad de las partículas coloidales con respecto al potencial zeta.

Tabla 1-1: Estabilidad coloidal respecto al potencial zeta.

Potencial Zeta (mV)	Comportamiento de estabilidad de las partículas
0 a ± 5	Coagulación rápida o floculación
± 10 a ± 30	Inestabilidad incipiente
± 30 a ± 40	Estabilidad moderada
± 40 a ± 60	Buena Estabilidad
Más de ± 61	Excelente estabilidad

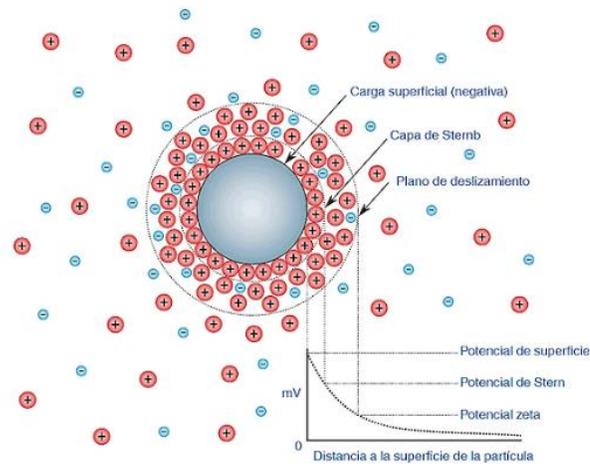
Fuente: Raja y Barron, 2022.

En todos los escenarios las características de las suspensiones se pueden cambiar comprendiendo las interacciones de las partículas entre sí. A veces se desea maximizar la fuerza repulsiva entre ellos para producir una suspensión estable. Por tanto, la fuerza de repulsión entre partículas adyacentes no permite que se produzca la sedimentación. En otros casos, como es el caso de estudio de este trabajo, se deben minimizar las fuerzas repulsivas entre las partículas enturbiadas, para formar grandes grumos que se sedimenten fácilmente. En algunos procesos industriales, se ajusta el potencial zeta de las partículas mediante la adición controlada de aditivos o el control del pH para optimizar la estabilidad de la suspensión.

1.2.1 Doble capa eléctrica

Cuando hay partículas, gotas o coloides en un líquido, suele formarse una doble capa eléctrica formada por iones en el líquido. Esto ocurre porque las superficies de las partículas suelen tener una carga superficial que atrae a estos iones. Si la partícula se mueve en el líquido, la doble capa eléctrica se mueve con ella, a lo largo del llamado plano de deslizamiento, es decir, la interfaz de la doble capa eléctrica con el líquido circundante. El potencial eléctrico en este plano de deslizamiento es el potencial zeta, es decir el potencial eléctrico en la región de traslape entre ambas capas (Microtrac, 2023).

En la Figura 1-10 se representa el modelo de la doble capa para visualizar el entorno en la proximidad de una partícula con carga negativa, el cual atrae las partículas con carga positiva para crear una rígida esfera adyacente conocida como la capa Stern. La influencia de la partícula con carga negativa se extiende más allá de la capa Stern y atrae a más cargas positivas que, sin embargo, son repelidas por el aumento de la densidad de carga positiva hasta que se consigue un equilibrio dinámico que resulta en la formación de una capa difusa donde los iones están menos firmemente unidos (Sabín et al., 2007). Esta región exterior es como una nube mantenida unida por fuerzas electrostáticas; la cual está constituida en varios iones de polaridades opuestas.

Figura 1-10: Doble capa eléctrica alrededor de una partícula.

Fuente: Acniti,2018.

La estabilidad de los coloides, que les permite no sedimentar en un campo gravitacional, se puede explicar por esta fuerza electrostática repulsiva que constituye una verdadera barrera para que las partículas se acerquen lo suficiente como para que actúen las fuerzas atractivas de Van der Waals (Concha, 2001).

1.3 Coagulación y floculación

Cuando un proceso de sedimentación presenta partículas sólidas extremadamente pequeñas, del orden de las micras, este asentamiento se ralentiza demasiado empleando únicamente la acción de la gravedad; por ello habrá que acudir a equipos de separación sólido-líquido centrífugos o bien aglomerar las partículas finas con el empleo de floculantes, a través de fenómenos de coagulación, o ambos.

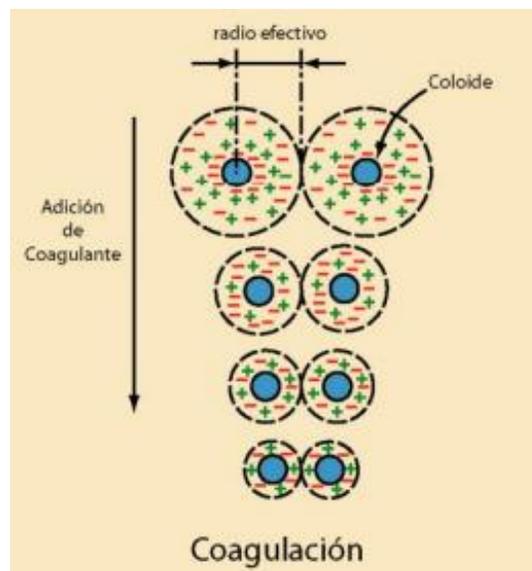
El proceso de coagulación-floculación se utiliza comúnmente en la industria minera para separar los minerales de las aguas residuales. Este proceso implica la adición de productos químicos que aglutinan y floculan las partículas de mineral, haciendo que se asienten en el fondo del tanque y permitiendo que el agua limpia se filtre y se recolecte en la parte superior.

1.3.1 Coagulación

La coagulación consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, eliminando la doble capa eléctrica haciendo que las partículas micrométricas se adhieran al coagulante o entre ellas (ver Figura 1-11). La coagulación de las partículas coloidales se consigue añadiéndose al agua un producto químico (electrolito, capaces de aportar cationes trivalentes) llamado coagulante. Los coagulantes son generalmente compuestos minerales: Sulfato de Alúmina, Cloruro Férrico, Cal, Sulfato Ferroso, Cloruro Magnésico que en suspensión acuosa ayudan a la disminución del potencial Zeta.

Un agregado coagulado se volverá a formar después de que haya sido destruido, como puede suceder durante operaciones de transporte por medio de bombas.

Figura 1-11: Efecto al adicionar coagulante.



Fuente: ocw.bib.upct.es

La dosis de coagulante se determina realizando ensayos de tratamiento con el agua o pulpa considerada. Las condiciones óptimas de funcionamiento para la coagulación se determinan con tanta frecuencia como sea posible utilizando un sencillo procedimiento denominado el test de la probeta o "jar-test" (Solt & Shirley, 1991). El test de la probeta permite una comparación bajo condiciones estandarizadas, de las diferentes combinaciones de dosis de coagulante y pH, después de las cuales se mide la turbidez del

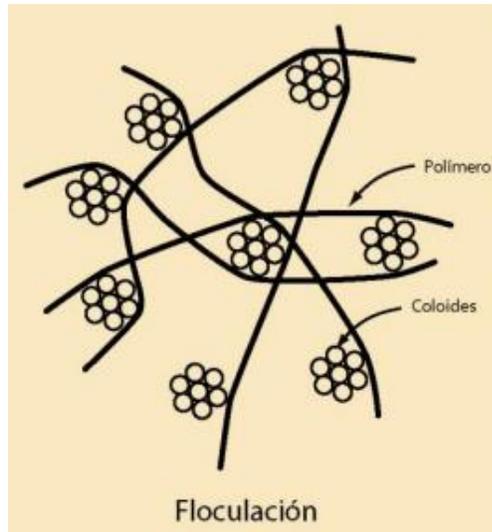
sobrenadante (agua clarificada). Otra forma de determinar la dosis de coagulante es mediante la técnica de potencial Z (se denomina potencial Z crítico al potencial bajo el cual las partículas coagulan). Las óptimas condiciones de coagulación se obtendrían en el punto isoelectrico ($Z=0$) ZPC.

1.3.2 Floculación

La floculación es un proceso que sirve como complemento de la coagulación y consiste en la agitación de la masa coagulada para favorecer el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados en una red (polímero) con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. En este proceso se usan unos polímeros de varias cadenas (catiónica, aniónica, no iónica) que producen flocs y mejoran los resultados obtenidos por los coagulantes. La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos. Al realizar un mezclado intenso, se rompen y raramente se vuelven a formar. En la Figura 1-12 se muestra el efecto de formación de flocs mediante la red (floculante). Las redes entrelazan las partículas individuales de aglomerados, lo suficientemente grandes como para sedimentar con rapidez y optimizar los procesos de separación de partículas (Cárdenas, 2000).

Los floculantes no neutralizan la carga eléctrica de las partículas, sino que proporcionan una superficie más grande y pegajosa para que las partículas se adhieran, lo que hace que los flóculos sean más grandes y densos.

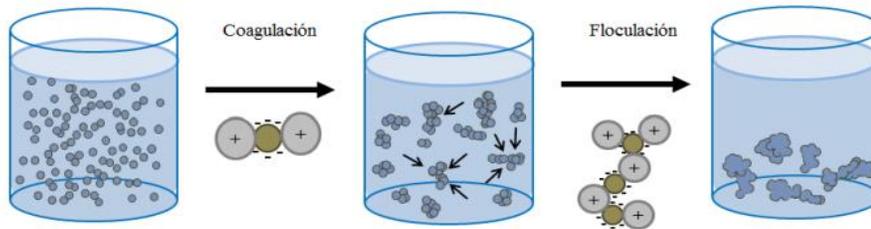
Figura 1-12: Mecanismo de aglomeración de coloides por medio de cadenas de polímeros empleando floculante.



Fuente: ocw.bib.upct.es

Para una correcta selección del tipo de floculante y cantidad a dosificar se debe conocer el tipo de sólido a sedimentar, el mecanismo o proceso mediante el cual se reduce la humedad (sedimentación, filtración, centrifugación, entre otros), su carga superficial y los electrolitos presentes en la solución, estos determinarán el tipo de polímero necesario y tipo de floculación a realizar (Concha, 2001).

En la Figura 1-13 se ilustra una suspensión de partículas coloidales, a la cual se le adiciona un agente coagulante que neutraliza las cargas de las partículas suspendidas, posteriormente, se adiciona un agente floculante que promueva la interacción entre las partículas coaguladas y como consecuencia, una precipitación de los compuestos anteriormente suspendidos para su eliminación ya sea por medio de filtración o simple decantación (Quiroga et al., 2015).

Figura 1-13: Proceso de coagulación – floculación.

Fuente: Quiroga et al., 2015.

1.4 Reología de suspensiones

Operar un sistema de separación sólido-líquido requiere conocer los parámetros más importantes en el comportamiento hidrodinámico de la suspensión dentro del espesador. Una forma de estudiar este comportamiento de estas pastas y suspensiones es mediante la caracterización reológica, donde se analiza la deformación y el flujo, además de lo concerniente a la interacción entre esfuerzo de cizalladura, tasa de cizalladura y tiempo de prueba (Macosko, 1994).

Una suspensión es una mezcla de una fase continua y una fase discreta en donde la fase continua se encuentra en mayor fracción volumétrica. Si la fase continua es agua, la fase discreta puede ser aire, aceite o partículas, llamándose espuma, emulsión o pulpa, respectivamente. El comportamiento reológico de un fluido cambia cuando se le agregan partículas pues, aunque la deformación de una suspensión se origina principalmente por el fluido, éste a su vez le transmite esfuerzos de contacto a las partículas sólidas, las cuales se ven obligadas a desplazarse, implicando colisiones y reorientación (Rojas, 2013).

Las propiedades de la suspensión que afectan el comportamiento reológico en la sedimentación de minerales están determinadas por:

- a. Fluido portador: El medio líquido en el que se suspenden las partículas minerales se conoce como el fluido portador. Puede ser agua, lodo, pulpa u otros líquidos.
- b. Concentración de sólidos: La cantidad de partículas sólidas en la suspensión se expresa como la concentración de sólidos. La reología varía significativamente con la concentración de sólidos, y la forma en que las partículas interactúan entre sí afecta la capacidad de sedimentación.
- c. Viscosidad: La viscosidad del fluido portador juega un papel crucial en la sedimentación. La viscosidad afecta la velocidad a la que las partículas se asientan, ya que las partículas deben superar la resistencia del fluido para sedimentar.
- d. Tamaño y forma de partículas: Las propiedades reológicas están influenciadas por el tamaño y la forma de las partículas minerales. Partículas más grandes y formas irregulares pueden experimentar una sedimentación diferente en comparación con partículas más pequeñas y esféricas.
- e. Distribución del tamaño de partícula: La distribución del tamaño de partícula en la suspensión también afecta la reología. Las mezclas con una amplia gama de tamaños de partículas pueden mostrar comportamientos reológicos diferentes en comparación con aquellas con tamaños de partículas más uniformes.
- f. Fuerzas interpartículas: Las interacciones entre partículas, como fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas y fuerzas de repulsión, también afectan la reología de las suspensiones minerales.
- g. Formación de estructuras sedimentarias: Durante la sedimentación, las partículas pueden formar estructuras, como floculación o aglomeración, que afectan la velocidad y la eficiencia del proceso de asentamiento.

Las pruebas reológicas determinan el comportamiento del material espesado, en términos de viscosidad y yield stress. Ambos parámetros son de vital importancia en la sedimentación de minerales pues nos permite determinar:

- a. El torque de diseño requerido para el espesador.
- b. Las características de transporte de la pulpa, es decir, si es bombeable o no lo es. Se ha dado el caso, donde físicamente es posible obtener un alto % de sólidos en la descarga, pero las pruebas reológicas indican que es una zona muy peligrosa

desde el punto de vista operativo, por el torque de diseño que se requiere, así como por la posibilidad de bombear tal material.

1.4.1 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad importante de los líquidos que describe la resistencia del líquido al flujo y está relacionada con la fricción interna en el líquido.

Al definir la viscosidad, se pueden clasificar los fluidos en dos tipos: Newtonianos y no Newtonianos:

- a. En los fluidos Newtonianos, la viscosidad es independiente de la cantidad de cizallamiento aplicado, es decir, su viscosidad es constante.
- b. En los fluidos no Newtonianos, la viscosidad depende de la cantidad de cizallamiento aplicado, es decir, no existe una proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad de deformación por lo cual su viscosidad variará dependiendo de la magnitud del esfuerzo aplicado. Hay varios tipos de comportamientos no newtonianos:
 - Pseudoplástico: La viscosidad disminuye con la tasa de corte.
 - Dilatante: La viscosidad aumenta con la tasa de corte.
 - Plástico: No hay flujo hasta que se aplica un esfuerzo crítico.

La medición de la viscosidad se realiza comúnmente utilizando un instrumento llamado viscosímetro, que aplica un esfuerzo cortante conocido a un fluido y mide la velocidad de deformación resultante.

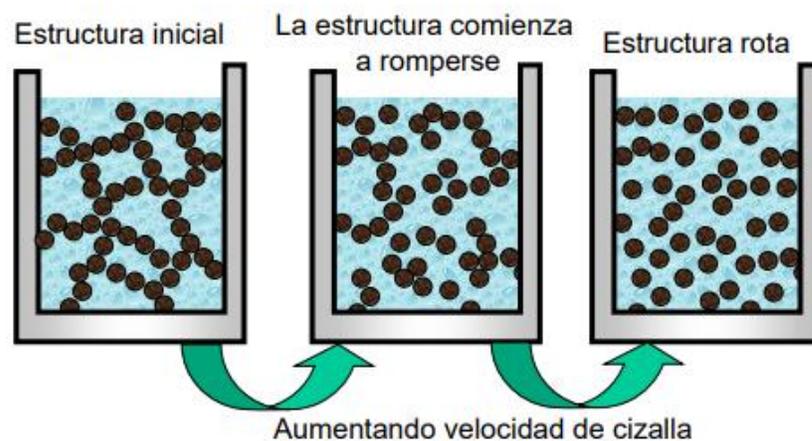
1.4.2 Esfuerzo de cedencia

El esfuerzo de cedencia, también conocido como límite elástico, yield stress o punto de fluencia, es un término utilizado en el campo de la mecánica de materiales para describir la cantidad máxima de esfuerzo que un material puede soportar sin experimentar una deformación plástica permanente. Es un parámetro importante que caracteriza la resistencia de un material a la deformación plástica y su capacidad para recuperar su forma

original después de la aplicación de una carga. Un material con punto de fluencia sólo comienza a fluir cuando las fuerzas externas que actúan sobre el material superan las fuerzas internas estructurales (Rajinder, 2007).

Las partículas con un tamaño pequeño tienden a estar sujetas a fuertes fuerzas de atracción debido a una elevada superficie y una pequeña distancia entre partículas. Estas fuerzas favorecen la agregación y la formación de estructuras que producen un paulatino aumento de la pseudoplasticidad de la suspensión hasta el punto de producir la aparición de un yield stress. Una posible explicación de la existencia de un yield stress podría ser que las partículas suspendidas forman una red con fuertes interacciones, que debe ser destruida para que el flujo pueda tener lugar (Figura 1-14).

Figura 1-14: Destrucción de una suspensión para iniciar el flujo.



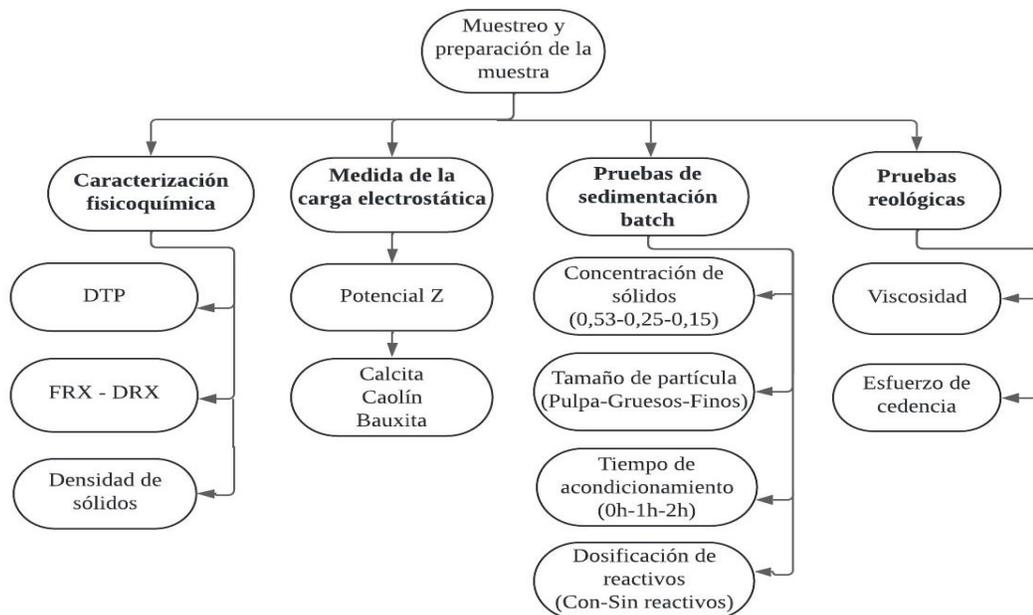
Fuente: Presentación "Rheology of dispersions", TA Instruments

2.Desarrollo experimental

2.1 Metodología

Para el desarrollo de los objetivos propuestos en este trabajo se emplea la siguiente metodología:

- Muestreo, y preparación de la muestra.
- Caracterización fisicoquímica de la muestra por medio de distribución de tamaño de partícula (DTP), Fluorescencia de rayos X (FRX), y densidad de sólidos.
- Medida de la carga electrostática de las partículas a través del Potencial Z.
- Pruebas de sedimentación batch variando las propiedades fisicoquímicas de la pulpa como concentración de sólidos, distribución de tamaño de partícula, tiempos de acondicionamiento, dosificación de reactivos.
- Cuantificación de las variables reológicas esfuerzo de cedencia y viscosidad de la pulpa.



2.2 Muestreo y preparación de la muestra

La materia prima con la cual se llevó a cabo este trabajo proviene de una planta cementera ubicada en el sur del país. Se realizó el muestreo de pulpa en un intervalo de 4 horas durante 3 días en el pastoducto de la operación que alimenta los sedimentadores.

Para evitar el envejecimiento de la muestra, se procedió a filtrar y posteriormente a secar la torta obtenida. La muestra sólida seca se rotuló y guardó en bolsas plásticas selladas. Para realizar los análisis y caracterizaciones se cuarteó la muestra de acuerdo con lo requerido en un cuarteador de rifles. Asimismo, para el desarrollo de las pruebas de sedimentación se cuarteó y se prepararon las pulpas a la concentración requerida utilizando agua del mismo proceso industrial.

2.3 Caracterización fisicoquímica

2.3.1 Caracterización granulométrica

La distribución de tamaño de partícula (DTP) se determinó a través de un analizador por difracción láser Mastersizer 2000 de la casa Malvern Instrument perteneciente al Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia. Este equipo permite analizar la distribución de tamaños de partícula de muestras entre un intervalo de 0.02 μm y 2000 μm . Para ello emplea dos fuentes de luz, un láser de helio-neón y una luz azul de estado sólido; esta técnica mide la distribución del tamaño de partícula evaluando la intensidad de la luz dispersada en función del ángulo cuando un haz láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Para calcular los resultados, se utiliza la teoría de dispersión de Mie.

Mastersizer 2000 está equipado con un sistema de inyección Hydro 2000 / MU que permite la dispersión de las muestras en fluidos mediante turbina y sonda de ultrasonido, en este caso el medio dispersante fue agua.

Figura 2-1: Mastersizer 2000.



Fuente: <https://www.malvernpanalytical.com/>

2.3.2 Caracterización química mediante fluorescencia de rayos X

Con el propósito de evaluar la composición química de la pulpa de estudio se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX).

El equipo que se utilizó para el análisis es un espectrómetro de fluorescencia de rayos x Epsilon 1 de la casa Malvern Instrument perteneciente al Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia. Este equipo es un analizador de FRX de dispersión de energía que se puede calibrar mediante materiales de referencia que coincidan con la composición de los elementos reportados. en función del reporte de las intensidades obtenidas al someter la muestra a un bombardeo de rayos x, se determinan las concentraciones de los elementos el cuál es realizado a través del software de Panalytical que viene incorporado. Epsilon 1 permite determinar de forma cualitativa y semicuantitativa la composición química de rocas, minerales, sedimentos y fluidos.

Figura 2-2: Epsilon 1.

Fuente: <https://www.malvernpanalytical.com/>

2.3.3 Densidad de sólidos por medio de picnometría

La picnometría es un método que permite determinar la densidad relativa de una muestra respecto de un material de referencia, en este trabajo el líquido de referencia fue agua. Esto se logra comparando la masa de un volumen de muestra con la masa del mismo volumen de material de referencia. Para lograrlo, se utiliza el picnómetro, un instrumento que permite, en comparación con otros materiales volumétricos, cargar un cierto volumen de muestra con gran precisión, ya que posee un tapón de vidrio con un tubo capilar que permite escapar a las burbujas de aire, midiendo así la densidad con mayor acierto

Un picnómetro (Figura 2-3) es un recipiente de volumen conocido, generalmente de vidrio, que permite contener el líquido o el sólido de interés. El picnómetro debe estar bien calibrado y libre de burbujas de aire para obtener mediciones precisas.

Figura 2-3: Picnómetro Gay-Lussac.

Fuente: Catálogo Cocisa.mx.

Para determinar la densidad de los sólidos con el picnómetro se siguieron los siguientes pasos:

- a. Pesar el picnómetro vacío: Antes de iniciar la medición, asegurándose de pesar el picnómetro vacío y registrar su masa (M1).
- b. Llenar el picnómetro con líquido de referencia (agua): llenarlo sin dejar burbujas de aire. Asegurarse de que el líquido alcance la tapa hermética y registrar su masa (M2).
- c. Retirar el líquido y secar el picnómetro: Drenar completamente el líquido del picnómetro y secarlo cuidadosamente para eliminar cualquier rastro de humedad.
- d. Introducir el sólido de interés en el picnómetro: Colocar el sólido cuya densidad deseas medir dentro del picnómetro. Asegurarse de que el sólido esté completamente seco antes de introducirlo. Registrar su masa (M3).
- e. Pesar el picnómetro con el sólido: Medir la masa total del sistema, es decir, el picnómetro lleno totalmente con el sólido y agua juntos. Registrar su masa (M4).
- f. Calcula la densidad del sólido: Aplicar la fórmula (1.4)

$$\rho_s = \frac{M3 - M1}{(M2 - M1) - (M4 - M3)} \cdot \rho_l \quad (1.1)$$

Donde: ρ_s : densidad de sólido

ρ_l : densidad de líquido

Aplicando este procedimiento se obtuvieron los resultados presentados en Tabla 2-1 para las 3 muestras de estudio.

Tabla 2-1: Resultados densidad de sólidos para Pulpa, Gruesos y Finos.

Muestra	Densidad de sólidos g/cm ³
Pulpa	2,65
Gruesos	2,60
Finos	2,55

2.4 Potencial Z

Para la medida del potencial z se utilizó un Zetasizer Nano ZS90 de la casa Malvern perteneciente al Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia con celdas capilares, el cual utiliza las técnicas conjuntas de Electroforesis y de Velocimetría por Láser Doppler. Durante una medición, las partículas positivas son atraídas hacia el ánodo y las negativas hacia el cátodo, lo que determina la movilidad de las partículas cargadas en un campo eléctrico alterno. El potencial zeta se calcula a partir de la movilidad mediante la ecuación de Henry o Smoluchowski.

Figura 2-4: Zetasizer Nano ZS90



Fuente: <https://www.malvernpanalytical.com/>

Las suspensiones para este análisis se prepararon de acuerdo con los parámetros expuestos en la Tabla 2-2. En este trabajo la concentración de estudio fue de 10 mg/ml. Los reactivos utilizados para modificar el *pH* de las suspensiones Bauxita-agua desionizada y Caolín-agua desionizada fueron HCl y NaOH de grado analítico.

Tabla 2-2: Parámetros para medición de potencial Z

Parámetro	Valor
Intervalo de tamaño	3,8nm-100μm
Volumen mínimo de muestra	0.02 ml
Intervalo de concentración	10 mg/ml a un 40% w/v

2.5 Pruebas de sedimentación batch

Para las pruebas de sedimentación se utilizó el método convencional de probeta graduada (Andrew & Lenore, 1996). El procedimiento para este método consistió en poner una muestra fresca de pulpa en una probeta de 1000 ml (las probetas normalizadas tienen una altura de 34 cm) ubicada en un plano horizontal, sin vibraciones y luego, registrar la altura que tenía la columna de lodo (interfase agua clara- suspensión) que estaba sedimentando a determinado intervalos de tiempo. Se consideró como punto de partida la línea de 1000ml de la probeta. Posteriormente con los datos de altura y tiempo, se trazó una gráfica en la que la ordenada es la altura *h* en centímetros de la columna formada por los sólidos y el eje de las abscisas es el tiempo en minutos. La gráfica se utilizó para obtener la velocidad de sedimentación de la pulpa en cm/min (la velocidad de sedimentación se obtendrá con la pendiente de la recta de velocidad constante).

Tabla 2-3: Esquema pruebas de sedimentación batch.

# Prueba	Muestra	Porcentaje de sólidos	Aditivos (ADT) y tiempo de acondicionamiento			
			Sin ADT	0 horas	1 hora	2 horas
Prueba 1	Pulpa	53	x	x	x	x
Prueba 2	Pulpa	25	x		x	x
Prueba 3	Pulpa	15	x		x	x
Prueba 4	Gruesos	53	x	x		
Prueba 5	Gruesos	25	x	x		
Prueba 6	Gruesos	15	x	x		
Prueba 7	Finos	53	x	x		
Prueba 8	Finos	25	x	x		
Prueba 9	Finos	15	x	x		

Las pruebas se realizaron en dos fases: I) *Sedimentación de las muestras sin aditivos*. II) *Sedimentación de las muestras con adición de coagulante y floculante*. Además, cada prueba se realizó por triplicado y el dato reportado corresponde al promedio de las 3 pruebas. Se establecieron pruebas de sedimentación con diferentes porcentajes de sólidos iniciales (15% – 25% – 53%), tanto para la pulpa natural, como para las fracciones correspondiente a Finos y Gruesos. La adición de coagulante y floculante se realizó con dosificaciones de 7 y 12 g/t respectivamente, según lo recomendado por el proveedor, además se utilizaron diferentes tiempos de acondicionamiento de la muestra con presencia de los reactivos. La distribución de pruebas de sedimentación batch realizadas se ilustra en la Tabla 2-3.

2.5.1 Acondicionamiento de las muestras

El acondicionamiento de las muestras implica preparar las suspensiones de partículas minerales con los aditivos coagulante y floculante para posteriormente iniciar las pruebas de sedimentación. El proceso de acondicionamiento consistió en:

- I. Añadir la cantidad adecuada de pulpa mineral al tanque de acondicionamiento.
- II. Introducir la cantidad necesaria de coagulante (7 g/t) al tanque mientras se agita para asegurar una distribución uniforme.
- III. Preparar y añadir la cantidad correspondiente de floculante (12 g/t) al tanque. Se debe agregar de manera gradual y bajo agitación constante para evitar la formación de grumos. Para la agitación, se debe asegurar que la muestra esté totalmente en suspensión y se debe realizar de manera suave para maximizar el número de colisiones entre las partículas suspendidas y los flóculos, pero cuidando de no exceder esta puesto que puede romper los flóculos ya formados (recordar que una vez rotos, estos no se vuelven a formar).
- IV. Dejar en agitación durante el periodo de tiempo requerido (1 y 2 horas para cada muestra). Para las pruebas registradas con 0h, se agrega el floculante e inmediatamente se para la agitación para empezar la prueba de sedimentación en probeta.

La presentación del floculante utilizado es de forma granular, por lo que tuvo que ser disuelto en agua y agitado durante aproximadamente una hora para lograr su maduración. La agitación fue suficiente para mantener los productos en suspensión, pero no tan rápido que permitiera la degradación del polímero. Después de la maduración, una uniforme solución viscosa se obtuvo y estuvo listo para ser dosificado.

Si el floculante no se prepara correctamente, su eficacia para inducir la formación de flóculos puede verse comprometida. Una mala disolución del floculante puede llevar a la formación de grumos o gránulos en la solución (ver Figura 2-5). Estos grumos pueden ser ineficaces para la floculación y pueden causar problemas en la distribución uniforme del floculante en la pulpa mineral.

Figura 2-5: Formación de grumos por mala preparación de floculante.



2.6 Análisis reológico

Para el estudio reológico de las suspensiones se utilizó un reómetro de la serie RN 5.1 de la casa RHEOTEST perteneciente al Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia. Este se caracteriza por sus opciones de aplicación flexibles: independientemente de los requisitos reológicos. Debido a que posee un potente accionamiento con rodamientos de bolas, de alta precisión, son posibles tanto ensayos de rotación (en modo controlado por velocidad de corte o tensión de corte) como ensayos de tensión de corte o de oscilación controlados por deformación.

Figura 2-6: Reómetro Rheotests RN 5.1.



Fuente: rheotest.de

3.Resultados y discusiones

3.1 Distribución de tamaño de partícula

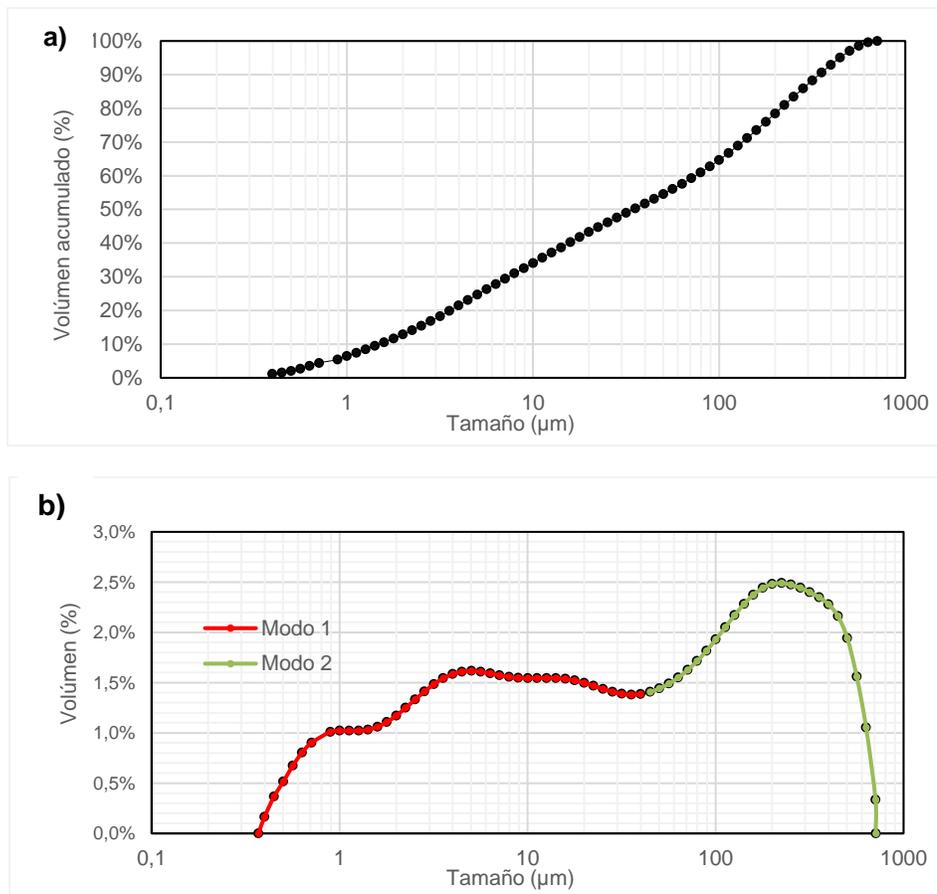
En la Figura 3-1 se presenta la distribución de tamaño de partícula de la muestra de estudio. En esta se evidenció que la muestra presenta una distribución granulométrica bastante amplia con predominancia de partículas finas abarcando tamaños desde 0,37 μm hasta 710 μm . Además, mostró que la pulpa presenta un comportamiento bimodal (Figura 3-1 B), es decir, revela la presencia de dos modos distintos de partículas, cada uno con su propio tamaño predominante.

La existencia de dos picos claramente definidos en la distribución da evidencia de la coexistencia de dos poblaciones distintas de partículas, ya sea por diferencias en los métodos de producción o por la composición del material. Estos resultados no solo son fundamentales para entender la morfología y la estructura del sistema coloidal, sino que también tienen implicaciones directas en su comportamiento físico y químico. La primera distribución parcial se observa entre 0,37 y 39 μm ; este modo señala la existencia de partículas más pequeñas y se puede plantear que este modo de finos son un coloide que genera resistencia al desencadenamiento del proceso de estratificación en el sedimentador. La segunda distribución parcial se encuentra entre 39 y 710 μm , esta representa la población de partículas más grande y se encuentra en el punto más alto de la distribución. Su posición y altura indican la presencia de partículas de tamaño considerable. La identificación y cuantificación de estos modos proporcionan información esencial sobre la heterogeneidad del sistema, permitiendo una comprensión más profunda de las interacciones. La anchura de cada modo revela la variabilidad en el tamaño de las partículas dentro de cada población. El modo 2, más estrecho, indica una mayor uniformidad en el tamaño de las partículas dentro de esa población, mientras que el modo 1, más ancho, sugiere una mayor variabilidad. La relación entre las alturas de los dos

modos proporciona información sobre la proporción relativa de partículas en cada población.

Los valores para los percentiles d10, d50 y d90 son 1,54 μm ; 39,1 μm y 313,17 μm respectivamente.

Figura 3-1: Distribución de tamaño de partícula de la pulpa.



Debido a que el tamaño de división de los 2 modos es coincidentemente el d50 de la distribución, es decir, el 50% de la muestra se encuentra por debajo de los 39 μm (partículas ultrafinas) y el 50% restante por encima de este tamaño; se decide realizar una división de los modos para ser analizados individualmente con el fin de evaluar la incidencia de los ultrafinos (coloides) en la suspensión.

Para realizar la división por tamaños se utilizó una malla ASTM #400 correspondiente a 38 μm , obteniendo dos corrientes: la fracción retenida la cual se nombra *Gruesos* y el pasante como *Finos*. En la Figura 3-2 se presentan las imágenes de las corrientes obtenidas, donde a simple vista se puede observar la heterogeneidad entre cada fracción.

Figura 3-2: División de muestra. a) Tamiz #400. b) Sólidos Pulpa. c) Sólidos Gruesos. d) Sólidos Finos.

a)



b)



c)



d)



3.2 Caracterización química

La caracterización química a través de FRX permitió identificar y cuantificar los elementos presentes en la muestra al excitarse con radiación X y medir las emisiones de fluorescencia resultantes. Se determinó la composición química tanto de la pulpa como de las fracciones Gruesos y Finos, los resultados de las concentraciones obtenidas se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Resultados análisis FRX.

Óxidos	Nombre elemento	Concentración [%]		
		Pulpa	Gruesos	Finos
MgO	Magnesio	3,684	3,320	3,593
Al ₂ O ₃	Aluminio	3,246	2,349	4,403
SiO ₂	Silicio	11,053	10,474	12,453
CaO	Calcio	48,395	51,904	48,722
Fe ₂ O ₃	Hierro	3,987	2,905	4,691

Para la fabricación de cemento es necesario disponer de mezclas muy precisas de materias primas cuya composición química este comprendida entre ciertos límites, debido a su impacto directo en las propiedades y el rendimiento del producto final. La calidad y las características del cemento están intrínsecamente vinculadas a la proporción precisa de los componentes que lo conforman.

En la práctica, la composición del crudo se designa y se caracteriza en la mayoría de los casos mediante relaciones (módulos), para cuyo cálculo se usan los porcentajes de óxidos determinados por análisis químico. En la fabricación de cemento, se acostumbra a trabajar con dos módulos que agrupan los porcentajes de los óxidos más importantes. Los parámetros de control de calidad en la elaboración de la harina cruda son: el módulo de Sílice (MS) Ec. 3.1, y el módulo de alúmina (MA) Ec 3.2.

$$M_s = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} = 1,2 - 4 \text{ (Soria, 1986)} \quad (3.1)$$

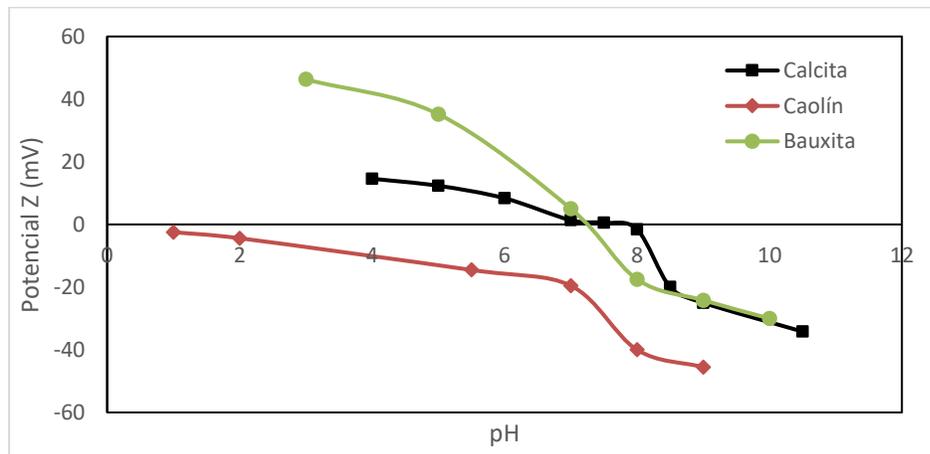
$$M_a = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} = 0,7 - 2,5 \text{ (Prato, 2007)} \quad (3.2)$$

En este trabajo se decidió tener en cuenta estos módulos para asegurarnos que las 3 muestras de estudio (Pulpa, Finos Y Gruesos) cumplieran con los parámetros de calidad exigidos. Al cumplir estos módulos y partiendo de los resultados obtenidos en Tabla 3-1 donde la composición química entre las muestras no tiene un cambio significativo, se decide evaluar cada fracción de manera individual. Es decir, para este trabajo se descarta los cambios en la composición química como parámetro relevante de estudio.

3.3 Potencial Z

Se realizaron las curvas de potencial Zeta para los minerales constituyentes de la pulpa. La calcita, mineral principal de la pulpa aportador del carbonato de calcio (Tabla 3-1) y para los correctores de calidad utilizados en la planta cementera, a los cuales nombran como “Bauxita” (corrector de aluminio) y “Caolín” (corrector de sílice).

Figura 3-3: Potencial Z minerales componentes de la pulpa

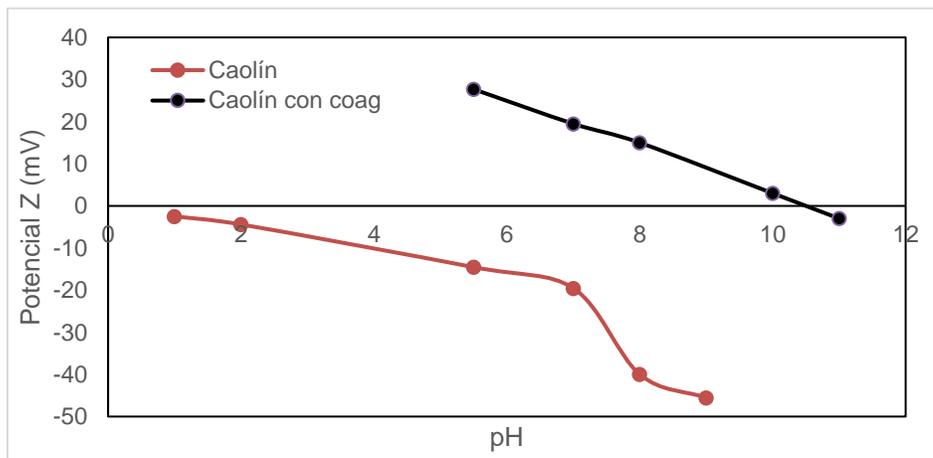


Los resultados obtenidos a partir de las gráficas de potencial z proporcionaron una valiosa visión sobre las interacciones superficiales en la pulpa. La representación gráfica de estas

mediciones revela la tendencia en términos de estabilidad coloidal de los minerales que gobiernan el sistema, pudiendo divisar el punto isoeléctrico de la calcita y bauxita en pH 7,5 mientras que en el caolín en 1. Con estos resultados y partiendo de que la pulpa tiene un pH natural de 8, podemos decir que a este pH de trabajo (según la Tabla 1-1) la calcita y la bauxita poseen una coagulación rápida o floculación espontánea, mientras el caolín presenta una buena estabilidad, es decir, a este pH las partículas de caolín presentan una fuerza de repulsión y necesitará de un agente externo para lograr su desestabilización.

Teniendo presente que, en el pH de trabajo de la pulpa la calcita y la bauxita presentan fuerzas repulsivas muy mínimas, se opta por no modificar el pH y se elige la opción de añadir agentes desestabilizantes para las partículas de la arcilla caolín. Para esto, se utiliza un coagulante con dosificación de 7 g/t (recomendado por el fabricante y utilizado por la planta cementera en la actualidad) logrando reducir las fuerza repulsivas en el pH de trabajo (como se evidencia en la Figura 3-4) y logrando una coagulación rápida o floculación espontánea de las partículas de caolín en el pH de trabajo (según la Tabla 1-1).

Figura 3-4: Potencial Z del caolín con y sin coagulante.



La interpretación detallada de estas gráficas proporciona información crucial para ajustar condiciones experimentales y optimizar la formulación de aditivos para garantizar la desestabilización de las partículas de caolín.

3.4 Pruebas de sedimentación batch

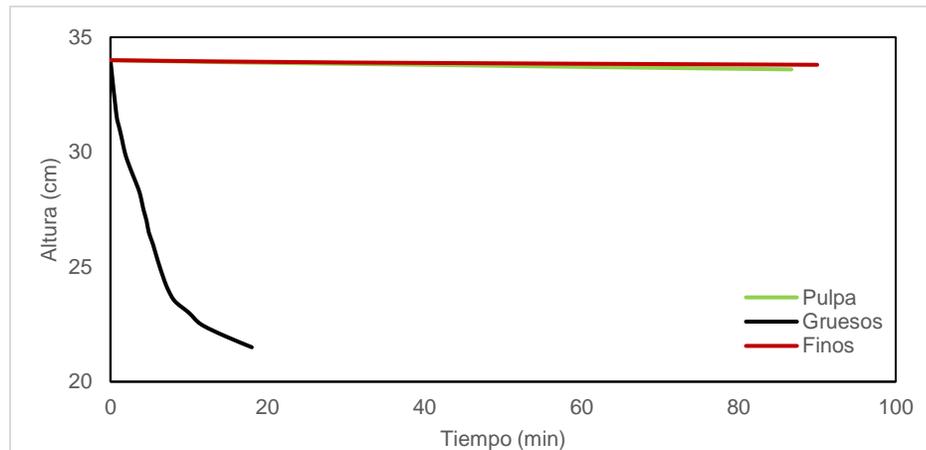
Para comprender mejor el proceso de sedimentación que tiene lugar dentro de un espesador se realizaron ensayos de sedimentación llevados a cabo con probetas graduadas.

Como se expuso en la sección 2.5, las pruebas de sedimentación se realizaron a la pulpa y a las fracciones Gruesos y Finos, a diferentes porcentaje de sólidos (53, 25 y 15%) y a diferentes tiempos de acondicionamiento de reactivos en horas (0, 1 y 2h) de los aditivos de sedimentación. Estas pruebas realizadas se resumen en la Tabla 2-3.

3.4.1 Efecto del tamaño de partícula

La presentación de las tres curvas de sedimentación, cada una correspondiente a diferentes tamaños de partícula como se expuso en la sección 3.1, ofrece una visión detallada de cómo estas variables fundamentales influyen en el proceso de sedimentación.

Figura 3-5: Curvas de sedimentación para las 3 muestras a 53% de sólidos sin aditivos.



Al examinar las curvas de la Figura 3-5, se revelan patrones distintos que destacan la interacción compleja entre el tamaño de partícula y la velocidad de sedimentación. La primera curva Finos, representativa de partículas más pequeñas, revela una sedimentación más lenta, evidenciando cómo la resistencia y las fuerzas electrostáticas de

las partículas en el medio líquido se convierte en un factor más significativo que contrarresta la fuerza gravitatoria. Asimismo, la segunda curva Pulpa, relacionada con partículas de todos los tamaños de distribución muy amplia, muestra una velocidad de sedimentación igualmente lenta, donde el sistema se comporta como una unidad y sedimenta como un bloque. La tercera curva Gruesos, asociada a partículas de mayor tamaño, exhibe una sedimentación mucho más rápida (20 veces mayor a las dos anteriores) debido a la mayor masa de las partículas, generando un aceleramiento del proceso.

Figura 3-6: Curvas de sedimentación para las 3 muestras a 25% de sólidos sin aditivos.

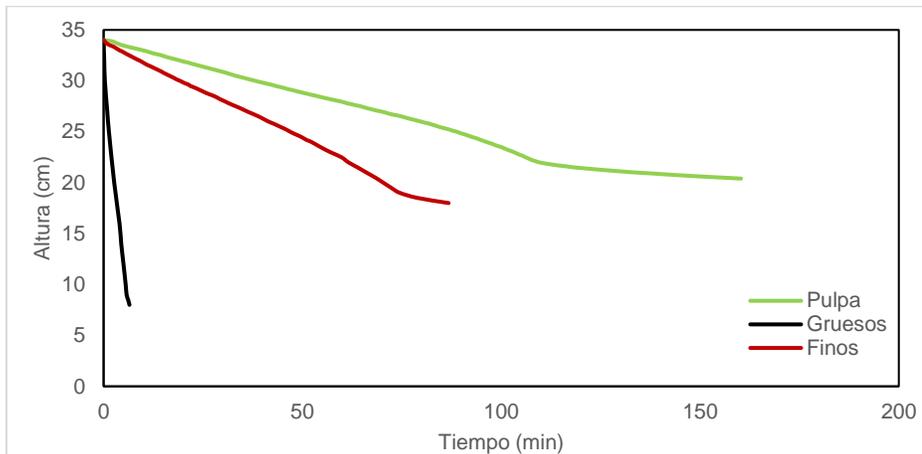
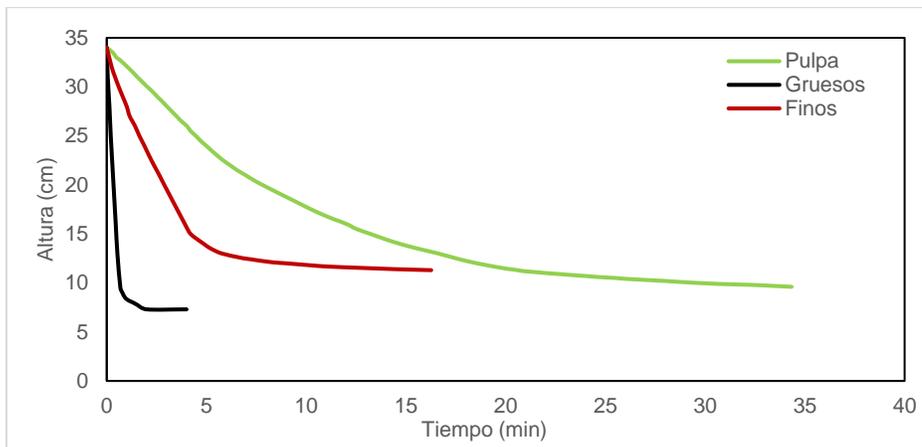


Figura 3-7: Curvas de sedimentación para las 3 muestras a 15% de sólidos sin aditivos.



En las figuras Figura 3-6 y Figura 3-7 se presentan las gráficas para las 3 muestras a porcentaje de sólidos de 25% y 15% respectivamente. En estas, se sigue evidenciando el fenómeno físico de a mayor tamaño, mayor velocidad de sedimentación. Las partículas gruesas exhiben altas velocidades de sedimentación, las partículas finas toman el comportamiento de “efecto de bloque coloidal”, y la pulpa posee acolchonamiento de las partículas gruesas por la presencia de un alto porcentaje de coloides. A partir de este análisis, queda demostrado que a medida que la partícula es más pequeña, menor es el efecto de la fuerza de gravedad.

Para la muestra pulpa en ambos casos, hubo un aumento en la velocidad de sedimentación (con relación a la muestra base de 53% de sólidos) de 29,3% y 80% para las muestras de 25% de sólidos y 15% sólidos respectivamente. Aunque se presentó un incremento en la velocidad, se sigue evidenciando el efecto de una distribución de tamaños bimodal tan amplia (tamaños desde 0,37 μm hasta 710 μm), haciendo que la muestra actúe como un continuo donde los finos acolchonan el descenso de las partículas más grandes, es decir, la presencia de partículas más pequeñas interfiere en el movimiento descendente de las partículas más grandes. Estas partículas más pequeñas llenan los espacios entre las partículas más grandes, aumentando la resistencia al movimiento y dificultando la sedimentación eficiente.

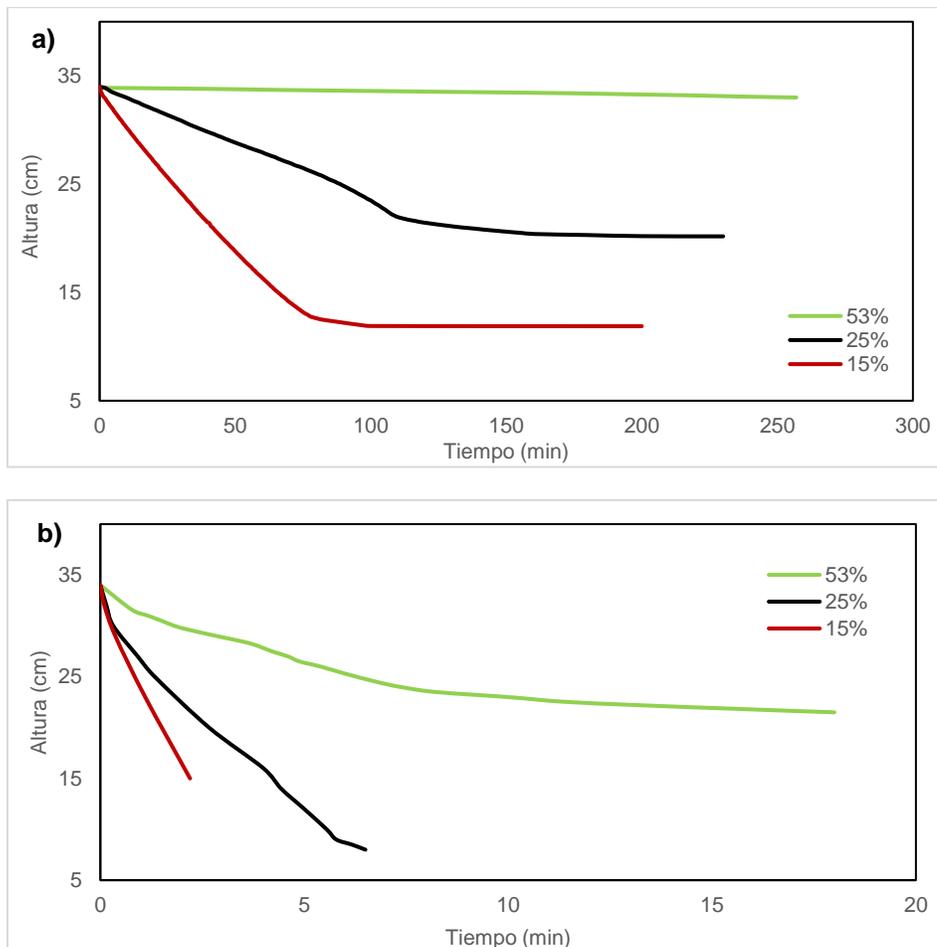
3.4.2 Efecto del porcentaje de sólidos

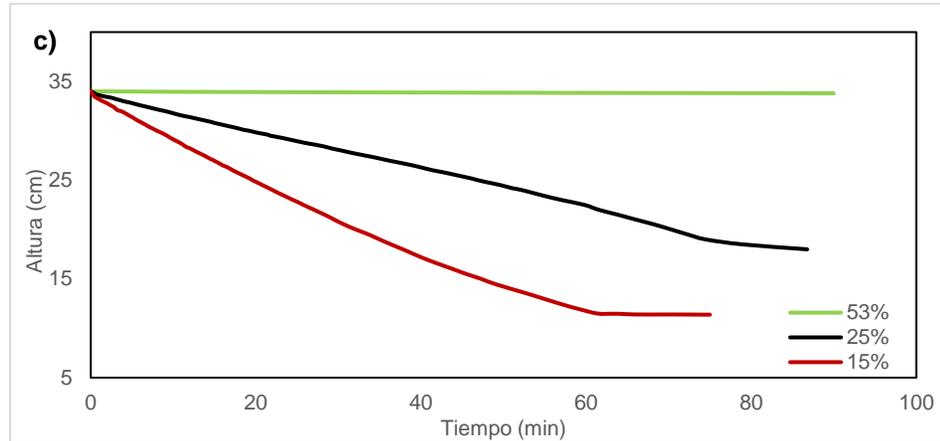
El porcentaje de sólidos en una suspensión ejerce una influencia crucial en la velocidad de sedimentación, como se evidencia en las curvas presentadas en la Figura 3-8. Al examinar las tres curvas distintas con variaciones en el porcentaje de sólidos, se observa una relación inversa entre la concentración de partículas y la velocidad de sedimentación.

En la primera curva (53%), donde el porcentaje de sólidos es elevado, se registra una pendiente menos pronunciada, es decir, una baja velocidad de sedimentación de las partículas. Este fenómeno se atribuye a la mayor cantidad de partículas presentes, donde

estas se comportan como un continuo y sedimentan todas al mismo tiempo. La segunda curva (25%), correspondiente a un porcentaje de sólidos moderado, exhibe una velocidad de sedimentación intermedia. Aquí, las interacciones entre partículas y la formación de flóculos son más pronunciadas que en la primera curva ya que tienen más espacio libre para moverse y se libera espacio entre partículas gruesas y finas permitiendo que cada una sedimente individualmente. En la tercera curva (15%), caracterizada por un bajo porcentaje de sólidos, se observa una sedimentación más rápida, debido a que la menor concentración de partículas resulta en una formación de flóculos más eficiente y presenta mayor espacio generando mayor colisión entre las partículas y favoreciendo el movimiento de tipo Browniano.

Figura 3-8: Curvas de sedimentación para las muestras a diferentes porcentajes de sólidos sin aditivos. (a) Pulpa, (b) Gruesos, (c) Finos.





En la Tabla 3-2 se resumen los valores de las pruebas de sedimentación obtenidos a partir de las gráficas expuestas en la Figura 3-8. En estas, podemos observar como a medida que disminuye el porcentaje de sólidos para la misma muestra, la velocidad de sedimentación aumenta. Además, se calcula el porcentaje de aumento de la velocidad respecto a la muestra base (53% de sólidos).

Tabla 3-2: Resultados efecto de porcentaje de sólidos en la velocidad de sedimentación.

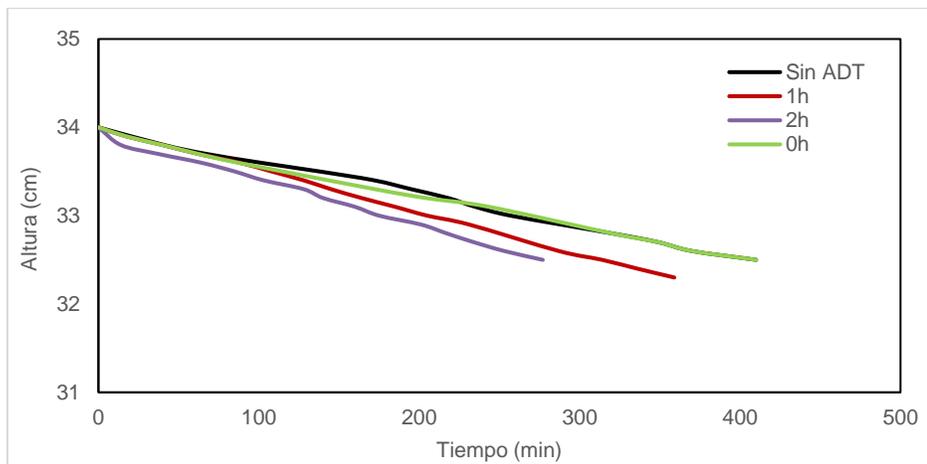
Muestra	% de sólidos	Velocidad (cm/min)	Aumento de velocidad (%)
Pulpa	53	0,0035	-
	25	0,1027	29,34
	15	0,2801	80,92
Gruesos	53	1,6738	-
	25	3,7057	2,21
	15	7,9666	4,76
Finos	53	0,0013	-
	25	0,1996	153,54
	15	0,4360	335,38

Es importante destacar el aumento significativo de la velocidad de sedimentación que obtuvo la muestra de Finos, pasando de una velocidad de 0,0013 cm/min (53% de sólidos) a 0,1996 cm/min (25% en sólidos), y a 0,4360 cm/min (15% en sólidos). Es decir, los Finos presentaron un incremento de 153,6% y 335,4% con relación a la muestra base de 53% de sólidos. Este fenómeno se debe al espacio que queda liberado al disminuir la cantidad de sólidos, se rompe el “efecto de bloque coloidal” y por ende se aumenta el desorden en las partículas provocando una acelerada velocidad de sedimentación

3.4.3 Efecto de la adición de aditivos en la pulpa.

Como punto de partida, se inició el análisis de la pulpa al natural, es decir, sin agregar coagulante ni floculante. Posteriormente, se realizaron las pruebas con los aditivos ADT a tiempos de acondicionamiento de 0, 1 y 2h. Para este trabajo 0h se refiere a añadir los aditivos e inmediatamente empezar la prueba de sedimentación. En la Figura 3-9 se presentan las curvas obtenidas en estas pruebas.

Figura 3-9: Curvas de sedimentación para la pulpa a 53% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de aditivos.



A partir de la tangente de las curvas se haya la velocidad de sedimentación que se presenta en la zona de caída libre en cada prueba, obteniendo los valores expuestos en Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Resultados velocidad de sedimentación para la pulpa a 53% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de aditivos.

Prueba	Velocidad (cm/min)	Aumento de velocidad (%)
Sin ADT	0,0035	-
0h	0,0036	1,02
1h	0,0044	1,25
2h	0,0050	1,43

Partiendo del análisis de las velocidades obtenidas podemos decir que es estrictamente necesario el tiempo de acondicionamiento de los reactivos. Lo anterior, por el hecho de que a la muestra a la cual se le añadió aditivos, pero no tuvo tiempo de acondicionamiento (0h), tuvo un comportamiento de asentamiento muy similar a la muestra sin reactivos. Además, se puede observar que con un tiempo adecuado de acondicionamiento se garantiza que se lleven a cabo las reacciones químicas y los procesos físicos asociados con el coagulante y el floculante de manera efectiva, expresado en un aumento de velocidad de sedimentación. Por esta razón, para las siguientes muestras se descarta la prueba 0h (sin tiempo de acondicionamiento). Porcentaje de aumento de velocidad expresado en la Tabla 3-3 corresponde al incremento de la velocidad respecto a la muestra neutra, reflejando en este porcentaje la efectividad de los aditivos.

Asimismo, a partir de las gráficas obtenidas en Figura 3-10 y Figura 3-11 se hayan las velocidades de asentamiento para las pruebas de sedimentación de la pulpa a 25 y 15% de sólidos respectivamente (ver.Tabla 3-4) En estas, se hace nuevamente evidente la importancia del tiempo de acondicionamiento respecto al aumento en la velocidad de sedimentación.

Tabla 3-4: Resultados velocidad de sedimentación para la pulpa a 25 y 15% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de aditivos.

Prueba	25%		15%	
	Velocidad (cm/min)	Aumento de velocidad (%)	Velocidad (cm/min)	Aumento de velocidad (%)
Sin ADT	0,1027	-	0,2801	-
1h	0,1470	1,43	1,9781	7,06
2h	0,1392	1,36	1,6390	5,85

En estas 2 pruebas, a diferencia de la muestra anterior, tuvo mejor rendimiento, expresado en mayor velocidad de sedimentación, la muestra con acondicionamiento de 1 hora y no la de 2 horas. Aunque la variación no fue muy significativa y se podría concluir que una hora es el tiempo óptimo de acondicionamiento para estos dos casos, una de las posibles explicaciones a este fenómeno es que se puede haber presentado una sobre floculación debido al mayor espacio que tienen las partículas para interactuar por poseer menos

sólidos en el mismo volumen. En estos casos donde se presenta sobre floculación, se pueden presentar dos situaciones: I) los flóculos formados son tan grandes que tienden a romperse, o II) Se forman flóculos muy grandes pero porosos, haciendo que retarde el proceso de sedimentación.

Figura 3-10: Curvas de sedimentación para la pulpa a 25% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de reactivos.

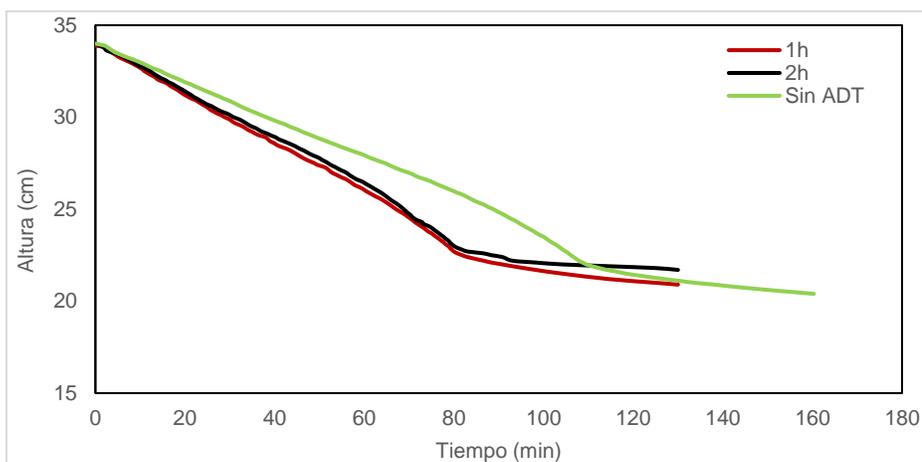
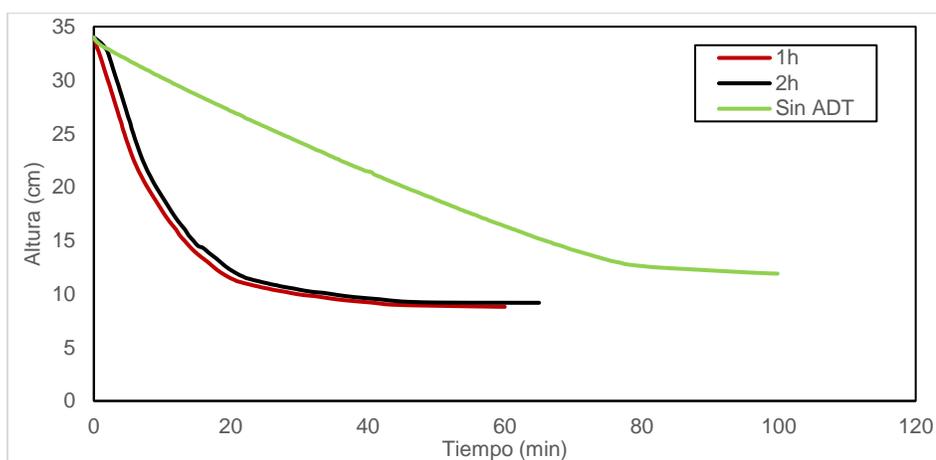


Figura 3-11: Curvas de sedimentación para la pulpa a 15% de sólidos a diferentes tiempos de acondicionamiento de reactivos.

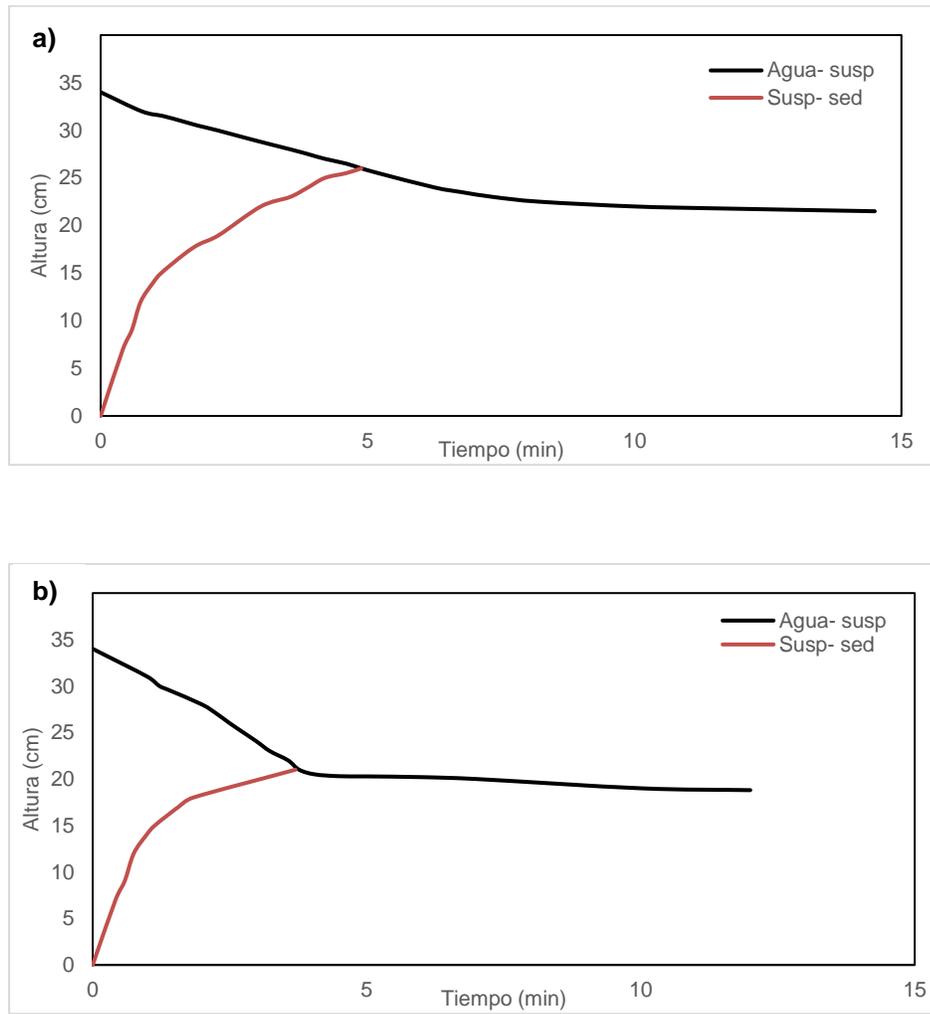


3.4.4 Efecto de la adición de aditivos en la fracción gruesos

Para las pruebas de sedimentación de esta fracción, se tomó la decisión de realizarlas sin aditivos y a 0h debido a la rápida acción del coagulante y floculante. Con relación a las pruebas realizadas a esta fracción, en estas pruebas a 53% y 25% fueron las únicas dónde se pudo observar y cuantificar la interfaz suspensión- sedimento correspondientes a las zonas B y D como se expuso en la sección 1.1.1.

En la Figura 3-12 se ilustran las curvas para agua- suspensión y suspensión- sedimento donde se puede ver claramente el punto crítico de cada prueba

Figura 3-12: Curva de sedimentación para la fracción Gruesos a 53% de sólidos. (a) Sin aditivos (b) con aditivos



Para las pruebas sin aditivos se dificultó la toma de datos ya que la interfaz agua-suspensión no era muy evidente debido a la alta turbiedad que estaba presentando el agua, a diferencia de las muestras con aditivos, donde el agua era agua clara (ver Figura 3-13). Esta dificultad pudo haber sido influenciada por:

- a) Amplia distribución granulométrica en el modo Gruesos, causando que las partículas más grandes sedimenten y los coloides queden suspendidos debido a las altas fuerzas repulsivas.
- b) Con una menor concentración de partículas, el movimiento browniano (movimiento aleatorio de partículas debido a la energía térmica) tiene una influencia más pronunciada. Esto puede dificultar la observación de la sedimentación, ya que las partículas pueden experimentar desplazamientos laterales más significativos.

Figura 3-13: Pruebas de sedimentación a 25% de sólidos. Izq: prueba sin aditivos - Der: prueba con aditivos

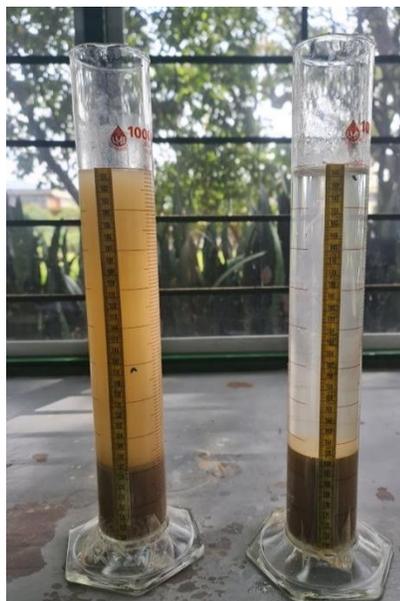
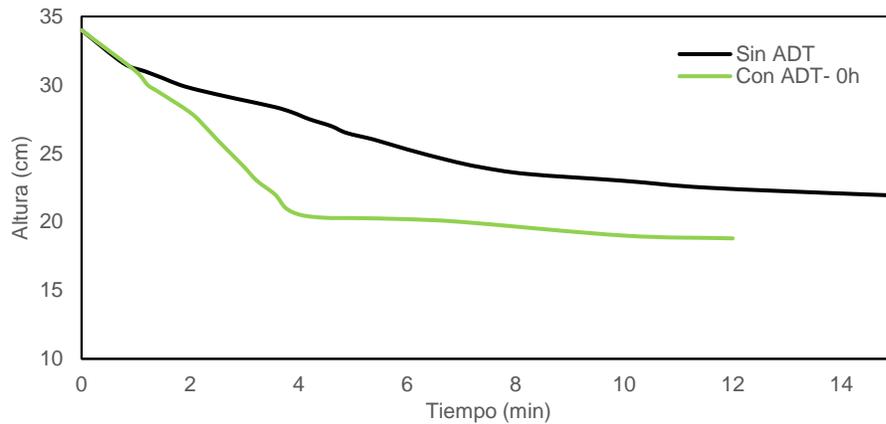
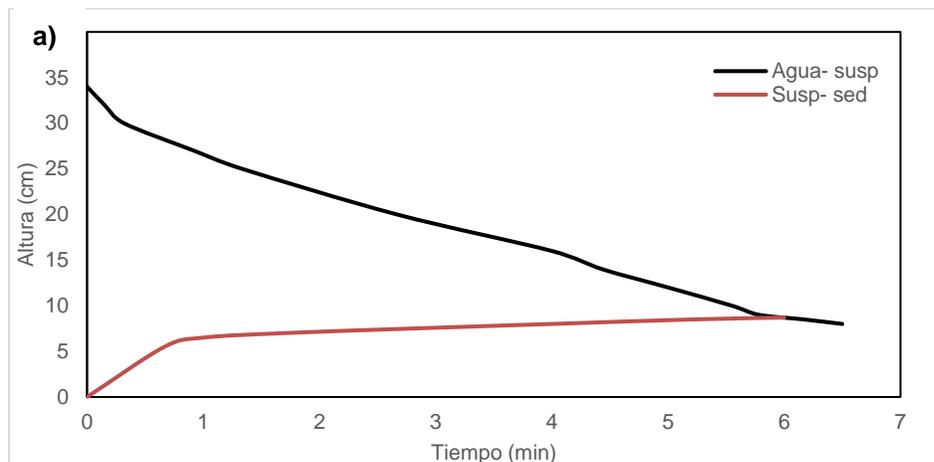


Figura 3-14: Curvas de sedimentación para la fracción Gruesos a 53% de sólidos.

La Figura 3-14 muestra el efecto de los aditivos sobre la fracción de gruesos a 53% de sólidos, logrando aumentar la velocidad en 2,01%. Obteniendo velocidades de 1,67 cm/min para la muestra sin aditivos y 3,36 cm/min para la muestra con aditivos.

De la misma forma se realizaron las pruebas y se obtienen las gráficas para la fracción Gruesos con 25% de sólidos Figura 3-15 . En estas, también se presenta alta turbiedad en el agua para la muestra sin aditivos. En las gráficas se define el punto crítico de la prueba (corte entre curva agua- susp y curva susp- sed).

Figura 3-15: Curvas de sedimentación para la fracción Gruesos a 25% de sólidos. (a) Sin ADT (b) Con ADT.

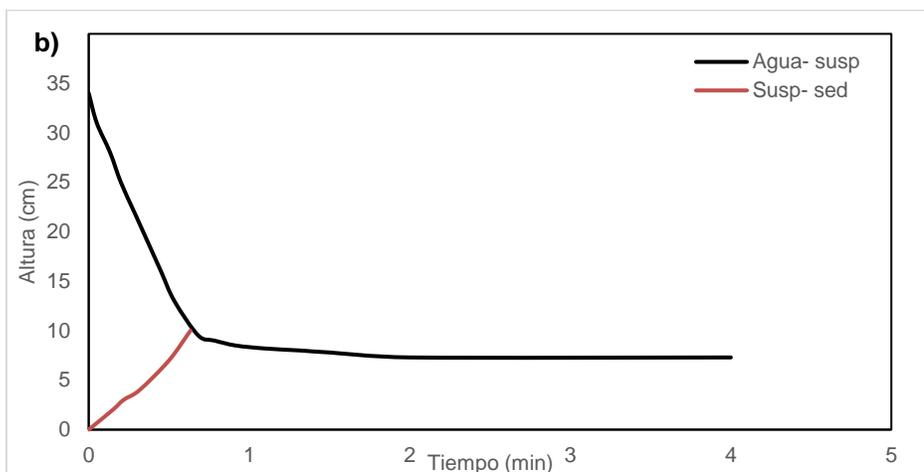
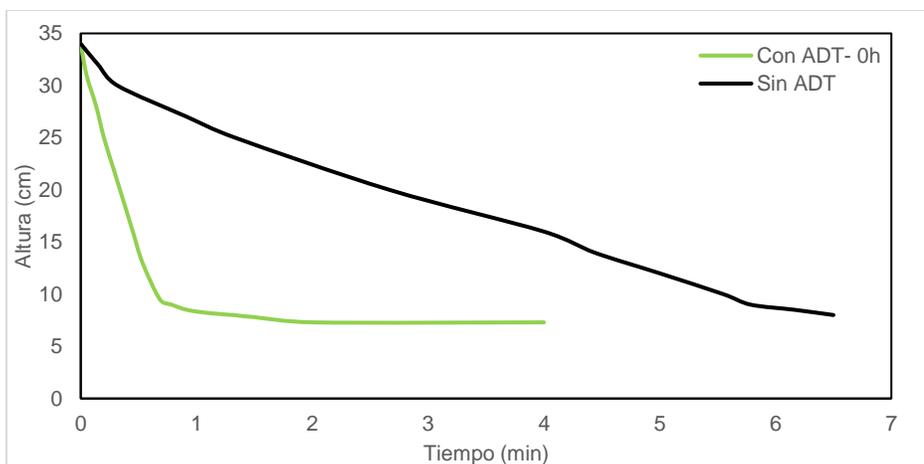


Figura 3-16: Curvas de sedimentación para la fracción Gruesos a 25 % en sólidos



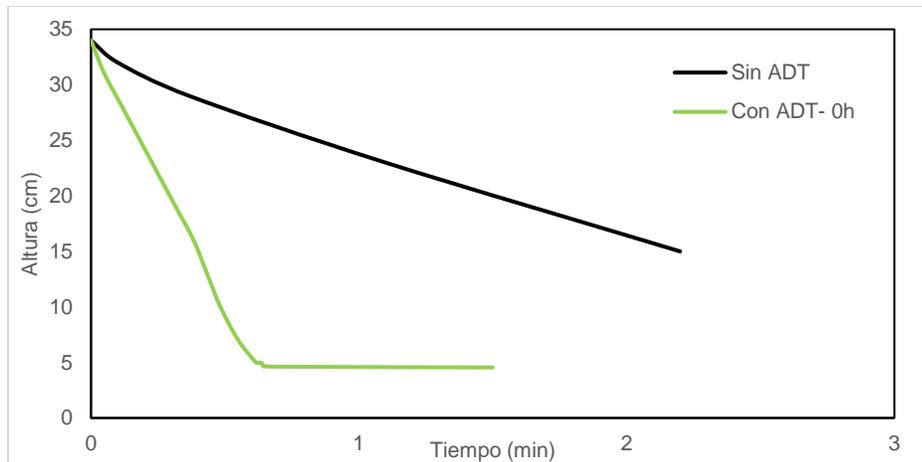
La Figura 3-16 muestra el efecto de los aditivos sobre la fracción de gruesos a 25% de sólidos, logrando aumentar significativamente la velocidad en 10,21%. Obteniendo velocidades de 3,70 cm/min para la muestra sin aditivos y 37,84 cm/min para la muestra con aditivos.

Asimismo, se realizan se realizan las pruebas y se obtienen las gráficas para la fracción Gruesos con 15% de sólidos Figura 3-17. En estas, también se presenta alta turbiedad en el agua sin aditivos. En estas pruebas, con la adición de aditivos se logra aumentar la

velocidad en 5,15%. En estas, no fue posible medir la interfaz suspensión- sedimento, debido a la alta dilución en que se encontraba la muestra.

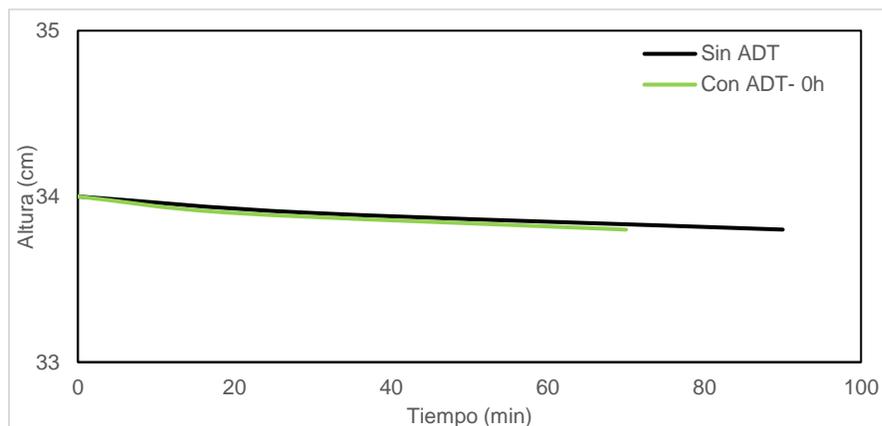
El comportamiento que exhiben las suspensiones de la fracción de gruesos expuestas en esta sección 3.4.4, nos demuestra la importancia de la adición de aditivos para lograr altas tasas de velocidad de sedimentación. Además, queda evidenciado el efecto que tiene el floculante sobre la turbiedad del agua de rebose.

Figura 3-17: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Gruesos a 15% de sólidos.



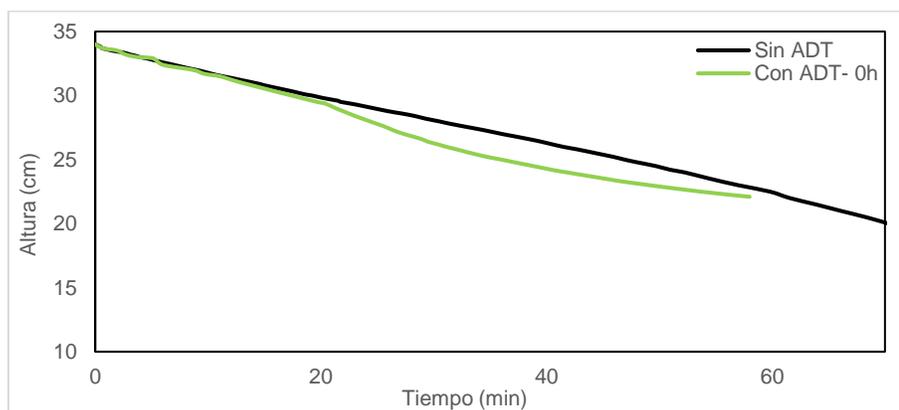
3.4.5 Efecto de la adición de aditivos en la fracción finos.

Figura 3-18: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Finos a 53% de sólidos.



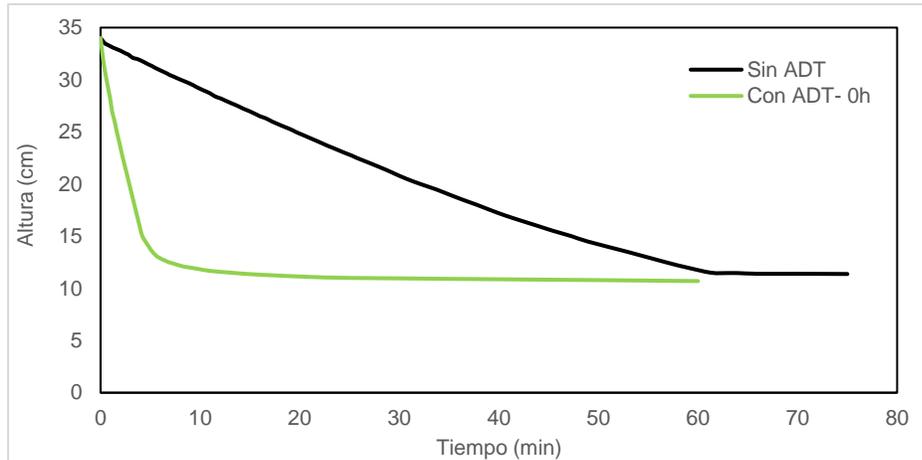
En la figura Figura 3-18 podemos observar el comportamiento de la fracción Finos. En esta, es evidente la baja velocidad de sedimentación que presenta la muestra (velocidad de sedimentación más baja calculada en todas las muestras), incluso para la muestra con aditivos. Se obtuvo valores de 0,0013 sin aditivos y 0,0021 con aditivos. Estas bajas velocidades de sedimentación se deben a que la presencia de coloides puede dar lugar a un "efecto de bloqueo coloidal", donde los coloides interfieren en la sedimentación de partículas más grandes al bloquear los espacios entre ella, y debido a las altas fuerzas repulsivas que ocasiona una estabilización de la suspensión. Es decir, las partículas finas adquieren el comportamiento de sedimentar como un continuo y no como partículas sueltas. Esto puede dar como resultado una sedimentación menos eficiente.

Figura 3-19: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Finos a 25% de sólidos.



Asimismo, en la figura Figura 3-19 se presentan la gráfica para la fracción Finos correspondiente a porcentaje de sólidos 25%. En esta, también se evidencia el "efecto de bloque coloidal" presentada en la muestra de 53% de sólidos, aumentando un poco su velocidad. Se obtuvo 0,1996 cm/min para la muestra sin aditivos y 0,4360 para la muestra con aditivos, logrando aumentar la velocidad en 2,18%.

Figura 3-20: Curvas de sedimentación con y sin aditivos para la fracción Finos a 15% de sólidos.



En la figura Figura 3-20 se presentan la gráfica para la fracción Finos correspondiente a porcentaje de sólidos 15%. En esta se evidencia un cambio muy significativo en la pendiente de la curva de la muestra con aditivos, se observa una pendiente prolongada lo que quiere decir un aumentando en la velocidad de sedimentación. Se obtuvo velocidades de 0,44 cm/min para la muestra sin aditivos y 4,35 cm/min para la muestra con aditivos.

A partir del análisis de estas 3 figuras, puede concluirse el efecto de los aditivos para la fracción Finos, donde la muestras a 53% de sólidos no tuvo un cambio muy significativo aumentando su velocidad con la adicción en 1,61%; la muestra a 25% de sólidos tampoco obtuvo un rendimiento muy significativo aumentando en 2,18%; y finalmente la muestra a 15% presentó un rendimiento bueno aumentado la velocidad de sedimentación en 9,89%.

Por otro lado, en la figura Figura 3-21 se puede observar el efecto que obtuvieron las muestras a 15 y 25%. Este efecto es conocido como “efecto clúster”, y puede ser causado por razones como: I) Si el proceso de floculación no se ha llevado a cabo de manera eficiente, es posible que las partículas no hayan formado flóculos sólidos de manera uniforme; o II) Sobre-aplicación de floculante puede llevar a una floculación excesiva o

clustering de partículas. Esto puede resultar en la formación de flóculos demasiado grandes o inestables que impiden la cohesión de las cadenas, creando espacios vacíos entre ellos y dificultando la sedimentación homogénea.

Figura 3-21: Efecto clúster en muestra Finos floclada.



3.4.6 Resumen resultados obtenidos en las pruebas de sedimentación

En la Tabla 3-5 se resumen los resultados obtenidos y expuestos en las secciones desde 3.4.3 a 3.4.5. El aumento de velocidad hace referencia al porcentaje de incremento que tuvo la suspensión en la velocidad de sedimentación respecto a la muestra sin aditivos y a la misma concentración.

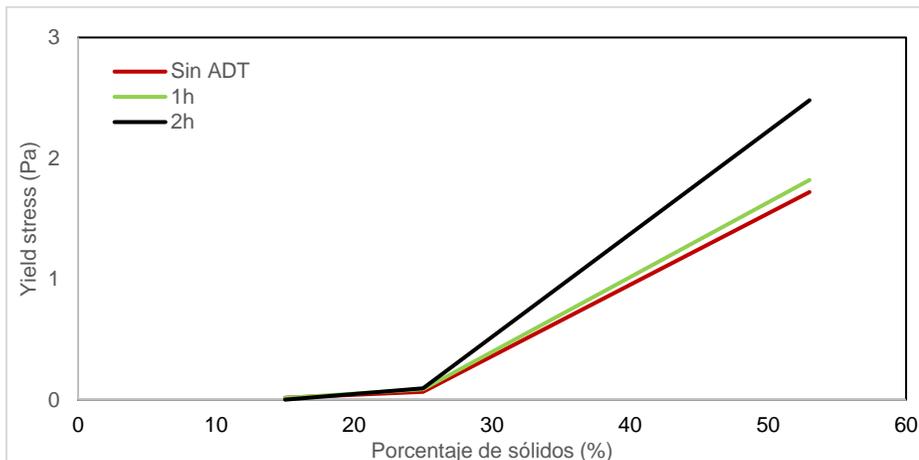
Tabla 3-5: Resumen resultados pruebas de sedimentación.

Muestra	% de sólidos	Aditivos	Velocidad de sedimentación (cm/min)	Aumento de velocidad (%)	
Pulpa	53	Sin ADT	0,0035	-	
	53	0h	0,0036	1,03	
	53	1h	0,0044	1,26	
	53	2h	0,0050	1,43	
	25	Sin ADT	0,1027	-	
	25	1h	0,1370	1,33	
	25	2h	0,1292	1,26	
	15	Sin ADT	0,2801	-	
	15	1h	1,9781	7,06	
	15	2h	1,6390	5,85	
	Gruesos	53	Sin ADT	1,6738	-
		53	0h	3,3559	2,01
25		Sin ADT	3,7057	-	
25		0h	37,8353	10,21	
15		Sin ADT	7,9666	-	
15		0h	41,017	5,15	
Finos	53	Sin ADT	0,0013	-	
	53	0h	0,0021	1,62	
	25	Sin ADT	0,1996	-	
	25	0h	0,2636	1,32	
	15	Sin ADT	0,4360	-	
	15	0h	4,3504	9,89	

3.5 Viscosidad y esfuerzo de cedencia de la pulpa

Las pruebas reológicas se realizaron para la pulpa a las 3 concentraciones estudiadas (53, 25 y 15%) sin aditivos, y con aditivos a tiempos de acondicionamiento de 1 y 2h.

Figura 3-22: Yield stress en función del porcentaje de sólidos para la pulpa.



En la Figura 3-22, se muestran las curvas de yield stress en función de la concentración de sólidos para las pulpas con aditivos y sin aditivos. En ambas graficas se aprecia que existe un efecto de los aditivos, especialmente del floculante, sobre la pulpa que hace aumentar el valor del yield stress. Esto se debe a que los flóculos crean estructuras más grandes y tridimensionales en la suspensión, lo que aumenta la resistencia al flujo y, por lo tanto, el yield stress. Además, los flóculos formados tienden a ocupar espacios entre partículas, reduciendo los huecos interparticulares y haciendo que la estructura sea más compacta.

Asimismo, se hace evidente que a mayor concentración de sólidos mayor yield stress de la muestra debido a la alta estabilidad que adquiere el sistema a medida que aumenta el porcentaje de sólidos y por ende la cantidad de partículas finas. A medida que se incrementa la concentración de partículas en la suspensión, la interacción entre ellas se intensifica, resultando en una estructura más compacta y resistente al flujo.

Tabla 3-6: Resultados pruebas reológicas para la pulpa.

% de sólidos	Prueba	Yield stress (Pa)	Viscosidad (Pa.s)
53%	Sin ADT	1,720	0,390
	0h	1,820	0,450
	1h	2,480	0,550
25%	Sin ADT	0,066	0,075
	0h	0,086	0,091
	1h	0,095	0,093
15%	Sin ADT	0,001	0,028
	0h	0,015	0,072
	1h	0,017	0,077

En la Tabla 3-6 se presentan los resultados de las pruebas reológicas para la pulpa. En esta se presentan los resultados de yield stress expuestos anteriormente en la Figura 3-22. Además, se presentan los resultados de la viscosidad de las diferentes pruebas. En efecto, como era lo esperado la adición de floculante y coagulante generan un aumento en la viscosidad de la pulpa mineral. Esto se debe a que la adicción de estos aditivos genera una estructura organizada y cohesiva, formando flóculos más grandes y menos dispersos.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La velocidad a la que las partículas sólidas sedimentan en un medio acuoso, como la usada en la industria cementera, está directamente influenciada por la distribución de tamaños de las partículas que forma parte de la suspensión. Partículas más grandes tienen una mayor masa y, por lo tanto, experimentan una fuerza gravitatoria más significativa, lo que acelera su descenso en el medio líquido, obteniendo para este estudio velocidades 20 veces mayor con relación a las suspensiones de las fracciones Finos y Pulpa (ver Figura 3-5). Sin embargo, a medida que las partículas se vuelven más pequeñas, la influencia de las fuerzas de resistencia del medio líquido aumenta, creando un fenómeno llamado “efecto de bloque coloidal” (donde las partículas se estabilizan y actúan como un continuo ralentizando el proceso). Ahora bien, en suspensiones con partículas de tamaños muy diversos, las interacciones entre estas partículas influyen en gran medida en la velocidad de sedimentación debido al comportamiento de acomodamiento y acolchonamiento que obtiene la suspensión por la presencia de partículas finas.

Es así como la distribución de tamaños de partículas en una suspensión es un factor clave y define la velocidad a la cuál las partículas sedimentan. Una distribución muy amplia puede afectar la eficiencia de la sedimentación ya que las partículas más pequeñas pueden llenar los espacios entre las partículas más grandes ralentizando el proceso. La distribución amplia de tamaños puede aumentar la resistencia del medio líquido a medida que las partículas se desplazan a través de él influyendo en diversas propiedades del sistema, como la reología, la estabilidad coloidal y la respuesta a fuerzas externas.

El porcentaje de sólidos en una suspensión mineral tiene un impacto significativo e inverso con la velocidad de sedimentación como se demostró en la sección 3.4.2. A medida que

se aumentó el porcentaje de sólidos en una suspensión, la viscosidad del fluido aumentó. Esta mayor viscosidad ralentiza la velocidad de sedimentación, ya que las partículas encuentran más resistencia al moverse a través del medio. Al disminuir los porcentajes de sólidos en las suspensiones en 25% y 15%, se lograron aumentos en la velocidad desde 2,21% hasta 335,38%. La fracción que tuvo mejor efecto al cambio de concentración fue la suspensión de la fracción Finos, pasando de una velocidad de 0,0013 cm/min a 0,4360 cm/min representando un aumento del 335,38%. Mientras que la fracción que tuvo menos impacto fue la suspensión de la fracción Gruesos aumentando la velocidad en 4,76% a la menor dilución de 15%.

Por otro lado, el potencial z es un parámetro crucial que influye en varios aspectos del comportamiento de las partículas en suspensión y nos permite conocer la interacción partícula- partícula. En el pH de trabajo de la pulpa que es de 8, la calcita y bauxita, componentes principales del crudo de cemento, presentan bajos valores de potencial zeta (-1,5 y -17,5mV) ocasionando una floculación espontanea, es decir, las fuerzas repulsivas entre las partículas son muy bajas. En cambio, la arcilla (nombrada por la empresa como caolín) presenta un alto potencial zeta (-40mV) en el pH de trabajo ocasionando altas fuerzas repulsivas entre las partículas lo que conlleva a una estabilización de la suspensión y bajas tasas de velocidad de sedimentación. Por lo anterior, se hace estrictamente necesario añadir un agente coagulante para lograr la desestabilización de estas partículas, es decir, lograr disminuir el potencial z y evitar que las partículas se repelen entre ellas.

Es así como la adicción de coagulante y floculante juegan un papel fundamental en la sedimentación de crudo de cemento. Estos, encargados de neutralizar las cargas de las partículas y posteriormente aglomerarlas (ocasionando un aumentando en su tamaño efectivo), aumentaron la eficiencia del proceso en un rango entre 1,03% y 10,21% comparado con las muestras de suspensión sin coagular ni flocular. Además, fueron los encargados de eliminar la alta turbidez que presentó el agua clarificada de las suspensiones de la fracción Finos. Cabe resaltar, como se expuso en la sección 3.4.5, la importancia del tiempo de acondicionamiento de la suspensión con la adicción de los aditivos para asegurar un correcto efecto en las partículas. Se debe tener en cuenta, que para una óptima eficiencia del proceso coagulación- floculación, hay algunos factores

claves a tener presentes: (a) concentración de la pulpa, (b) tipo y dosificación correcta, (c) preparación del floculante, (d) tiempos de acondicionamiento.

Por otro lado, la adición de floculante y coagulante desempeña un papel crucial en la manipulación de las propiedades reológicas de la suspensión. Cuando se añade floculante, este agente químico actúa facilitando la formación de flóculos, promoviendo la aglutinación de partículas en estructuras más grandes y menos dispersas. Este proceso de floculación aumenta la viscosidad al generar una red tridimensional de flóculos que interactúan y resisten el flujo del fluido. Además, la formación de flóculos aumenta la resistencia al corte de la muestra por lo que es necesario un esfuerzo mayor para romper o deformar estas estructuras cohesivas, lo que resulta en un aumento del yield stress el cuál se aumenta a medida que aumenta la concentración de la suspensión. Con la adición del floculante, se aumentó el yield stress entre 1,4 a 1,7% y la viscosidad hasta en 2,75%.

Por lo anterior, y por los resultados reológicos expuesto en la sección 3.5 donde las suspensiones floculadas presentan mayor yield stress que las suspensiones sin flocular, da cuenta de la estructura cohesiva y resistente que genera la adición de floculante al sistema.

4.2 Recomendaciones

Por los datos obtenidos en la sección 3.3 Potencial zeta, se recomienda evaluar el tipo y dosificación de coagulante para impactar directamente al caolín, ya que fue el mineral detectado que presenta mayor estabilidad debido a su alto valor de potencial z en el pH de trabajo. Además, se recomienda realizar pruebas sin adición de floculante, es decir, sólo con adición de coagulante para evaluar el efecto de desestabilización.

Realizar pruebas de sedimentación con tiempo de acondicionamiento 1h y 2h de las fracciones gruesos y finos, con el fin de evaluar las tasas de velocidad de sedimentación que se pueden alcanzar al tener un tiempo de acondicionamiento adecuado. Además, se recomienda evaluar todas las fracciones a tiempos de acondicionamientos más cortos, por ejemplo variando cada 10 minutos, y evaluar el comportamiento.

A. Anexo: Granulometría pulpa

Tamaño (µm)	Peso Retenido (%)	Peso Retenido Acum.(%)	Peso Pasante Acum.(%)	Tamaño (µm)	Peso Retenido (%)	Peso Retenido Acum.(%)	Peso Pasante Acum.(%)
	0	0,00%	100,00%	17,825	1,52%	58,20%	41,80%
711	0	0,00%	100,00%	15,887	1,54%	59,72%	40,28%
709,627	0,33%	0,00%	100,00%	14,159	1,54%	61,26%	38,74%
632,456	1,05%	0,33%	99,67%	12,619	1,55%	62,80%	37,20%
563,677	1,56%	1,39%	98,62%	11,247	1,54%	64,35%	35,65%
502,377	1,94%	2,94%	97,06%	10,024	1,54%	65,89%	34,11%
447,744	2,16%	4,89%	95,11%	8,934	1,55%	67,44%	32,57%
399,052	2,28%	7,05%	92,95%	7,962	1,56%	68,98%	31,02%
355,656	2,35%	9,33%	90,68%	6,325	1,59%	72,11%	27,89%
316,979	2,40%	11,67%	88,33%	5,637	1,61%	73,70%	26,30%
282,508	2,44%	14,07%	85,93%	5,024	1,62%	75,31%	24,69%
251,785	2,47%	16,51%	83,49%	4,477	1,61%	76,92%	23,08%
224,404	2,49%	18,99%	81,01%	3,557	1,54%	80,12%	19,89%
200	2,48%	21,48%	78,52%	3,170	1,48%	81,66%	18,34%
178,25	2,44%	23,96%	76,04%	2,825	1,41%	83,14%	16,86%
158,866	2,37%	26,40%	73,60%	2,518	1,33%	84,55%	15,45%
141,589	2,28%	28,77%	71,23%	2,244	1,25%	85,88%	14,12%
112,468	2,05%	33,22%	66,78%	2,000	1,17%	87,13%	12,87%
100,237	1,93%	35,27%	64,73%	1,589	1,06%	89,41%	10,59%
89,337	1,82%	37,20%	62,80%	1,416	1,03%	90,47%	9,53%
79,621	1,71%	39,02%	60,98%	1,262	1,02%	91,50%	8,50%
70,963	1,63%	40,73%	59,27%	1,125	1,02%	92,52%	7,48%
63,246	1,55%	42,36%	57,65%	1,002	1,02%	93,54%	6,46%
56,368	1,49%	43,91%	56,10%	0,893	1,01%	94,56%	5,44%
44,774	1,41%	46,84%	53,17%	0,710	0,90%	95,57%	4,43%
39,905	1,39%	48,24%	51,76%	0,632	0,80%	96,47%	3,53%
31,698	1,39%	51,01%	48,99%	0,564	0,67%	97,27%	2,73%
28,251	1,41%	52,40%	47,60%	0,502	0,51%	97,95%	2,05%
25,179	1,44%	53,80%	46,20%	0,448	0,37%	98,46%	1,54%
22,44	1,47%	55,24%	44,76%	0,399	0,16%	98,83%	1,17%

B. Anexo: Resultados Potencial Z

Potencial Z minerales componentes de la pulpa			
<i>pH</i>	<i>Calcita</i>	<i>Caolín</i>	<i>Bauxita</i>
1	-	-2,48	-
2	-	-4,4	-
3	-	-	46,5
4	14,6	-	-
5	12,3	-14,5	35,2
6	8,3	-	-
7	1,35	-19,5	-
8	-1,5	-40	-17,5
9	-25	-45,5	-24,2
10	-34,2	-	-30

Potencial Z caolín		
<i>pH</i>	<i>Caolín</i>	<i>Caolín con Coag</i>
1	-2,48	-
2	-4,4	-
3	-	-
4	-	-
5	-14,5	27,7
6	-	-
7	-19,5	19,5
8	-40	15
9	-45,5	3
10	-	-3,1

Bibliografía

- Acniti (2018). El potencial zeta cosas importantes para las nanoburbujas. Acniti productora de generadores de nanoburbujas y concentradores de oxígeno; acniti. <https://www.acniti.com/es/tecnolog%C3%ADa/potencial-zeta-burbujas-ultrafinas/>
- Barrios, E. (2017). *Innovación en el depósito electroforético de TiO₂ utilizando diferentes agentes estabilizantes*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
- Betancur C., Jiménez G., & Linares, B. (2012). Potencial zeta (z) como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. *Dyna*, 79(175), 166-172.
- Bustos, M., Burger, R., & Tory, E. (1999). *Sedimentation and Thickening: Phenomenological Foundations and Mathematical Theory*. Kluwer Academic Publishers de Holanda.
- Bustamante, M.O. (1999). *Reología de suspensiones: viscosidad de suspensiones minerales bajo una aproximación termomecánica. Un nuevo modelo de la viscosidad de suspensiones minerales*. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.
- Bustamante, M., Bustamante, P., Osorio, J., & Daza, C. (2019). *Diseño geométrico de espesador-sedimentador y espesador en contracorriente (CCD) en minería de oro para disposición de relaves*. Boletín de Ciencias de la Tierra, 46, pp. 19-26.

- Bustamante, M., & G. Aguilera. (2015). *Una Aproximación a la Modelación del Esfuerzo de Cedencia en Suspensiones Minerales*, DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación floculación*.
<http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>
- Cabrera, J. (2021). *Sedimentación y espesamiento de minerales*.
- Coe, H., & Clevenger, G. (1916). "Methods for determining the capacity of slimesettling tanks," *Trans. AIME*, Vol. 55, pp. 356-385
- Concha F. (2001). *Manual de filtración & separación*. Universidad de Concepción Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Concha, F., & Bürger, R. (2003). Thickening in the 20 th century: a historical perspective. In *MINERALS & METALLURGICAL PROCESSING* (Vol. 20, Issue 2).
- Coming E.W, DeBord C., Pruiss C. (1954). *Continuous settling and Thickening, Ind. Eng.Dhem.Des.Process Desv.*
- CROVETTO, B. (2019). *Modelación de la sedimentación en la reología de suspensiones de partículas finas*. [Tesis pregrado ingeniero civil de minas]. Universidad de Chile.
- De la Cruz B., Campo Y., Rojas R., & Pupo R. (2016). *Influencia de la concentración de sólido en la velocidad de sedimentación de lodo de la industria de áridos*. Redalyc.org; Minería & Geología.
<https://www.redalyc.org/journal/2235/223548649002/html/>
- Dodane, P, & Bassan, M. (2014). *Manejo de lodos fecales*. Londres, UK: IWA Publishing.
- Eklund L., & Jernqvist A. (1975). Experimental study of the dynamics of vertical continuous thickener I, *Chem. Eng. Sci*,
- Fitch E., & Stevenson D. (1977). Gravity separation equipment. In solid separation equipment Scale-up. Ed. D.B. Purchas, Croydon.
- Foust, A. (1997). *Principios de Operaciones Unitarias*. Compañía Editorial Continental. México.

- García A. (2016). *Estudio de la capacidad suspensionante de arcillas en engobes cerámicos*. [Tesis de Maestría]. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Gupta, A., & Yan D. (2016). *An Introduction to Mineral Processing: Design and Operations*, Elsevier.
- Gustafsson, J., Nordenswan, E., & Rosenholm, J. (2002). *Effect of pH on the sedimentation, z-potential, and rheology of anatase suspensions*. Department of Physical Chemistry, Abo Akademi University, Finland.
- Huerta, K. (2022). *Importancia de los floculantes en procesos industriales*. Contyquim. <https://contyquim.com/blog/importancia-de-los-floculantes-en-procesos-industriales>
- Jiménez, C. (2017). *MECÁNICA DE FLUIDOS: Viscosidad y turbulencia*. Tec.ac.cr. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10194/Din%C3%A1mica%20de%20fluidos%20viscosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Klaus, L. (2004). *Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung*.
- Macosko, C. (1994) *Rheology: Principles, Measurements, and Applications*. VCH Publishers, Inc., University of Minnesota, Minneapolis.
- Mamani, Y. (2018). *Estudio de la sedimentación en espesador de concentrado en minera aurífera Retamas S.A.* Perú.
- Martín I., Salcedo R., & Font R. (2011). *Mecánica de fluidos. Tema 5. Operaciones de separación sólido- fluido*. Universidad de Alicante.
- Merrill, J. (2016). *Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada*. Santiago de Chile.
- Microtrac (2023). *Potencial Zeta*. Productos. Microtrac.es. <https://www.microtrac.es/es/productos/potencial-zeta/>
- Mishler, R. (1918). *Methods for determining the capacities of slime-thickening tanks*. Trans. AIME, Vol. 58, pp. 102-125.

- Nasiha, H., & Shanmugam, P. (2018). Estimation of settling velocity of sediment particles in estuarine and coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 203, 59–71. doi:10.1016/j.ecss.2018.02.001
- Perales, A. (2011). *Curso: Tecnología Mineralúrgica*. Material de clase. Upct.es. <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=88&topic=3>
- Portilla J., y Orduz, O. (2017). *Determinación de las curvas características de la sedimentación tipo ii con diferentes coagulantes comerciales a nivel laboratorio*. Edu.co. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/3302bfcd-e611-4965-b17a-c2977c6196c7/content>
- Prato, N. (2007). *Curso: Química del cemento*. Ancap
- Procesos de eliminación de agua en pulpas y lodos. Tema 11: operaciones de desaguado mecánico*. (s/f). Upct.es. https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5561/mod_resource/content/1/Tema_11_-_Operaciones_de_Desaguado_Mecanico.pdf
- Quiero, A. (2018). *Métodos de Diseño de Espesadores*. Departamento de ingeniería. Universidad Arturo Prat- Chile.
- Quiroga, A., Rodríguez, H., Rangel, P., & Rangel, G. (2015). *Polímeros inorgánicos como coagulantes en el tratamiento de aguas residuales*. Cio.mx. https://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion2/S2-BYQ10.pdf
- Raja,P., & Barron, A. (2022). *Análisis de potencial zeta*. Libre Texts español; Libre Texts. [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos_F%C3%ADsicos_en_Qu%C3%ADmica_y_Nano_Ciencia_\(Barron\)/02%3A_An%C3%A1lisis_f%C3%ADsico_y_t%C3%A9rmico/2.05%3A_An%C3%A1lisis_de_Potencial_Zeta](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos_F%C3%ADsicos_en_Qu%C3%ADmica_y_Nano_Ciencia_(Barron)/02%3A_An%C3%A1lisis_f%C3%ADsico_y_t%C3%A9rmico/2.05%3A_An%C3%A1lisis_de_Potencial_Zeta)
- Rajinder, P. (2007) *Rheology of particulate dispersions and composites. Surfactant science series*.
- Ramalho, R.S. (1977). *Introduction to Wastewater Treatment Processes*, Academic Press
- Rojas, N. (2013). *Modelación de la ecuación constitutiva de suspensiones de caolín en función de la energía libre superficial del mineral*. Universidad Nacional de Colombia.

- Sabín, J.; Prieto, G.; Ruso, J.; Sarmiento, F. (2007). *Fractal Aggregates Induced by LiposomeLiposome Interaction in the Presence of Ca²⁺*.
- Stokes, G. (1851). «On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums». Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 9: 8-106
- Sayago, J. (2001). Estudio del efecto de la forma y el tamaño de las partículas sobre la velocidad de sedimentación gravitacional de suspensiones. [Trabajo especial de grado]. Universidad Central de Venezuela
- Solt, G., & Shirley, C. (1991). *An Engineer's Guide to Water Treatment* 1st Edición. Routledge.
- Soria, F. (1986). La fabricación de Clinker de cemento Portland. Curso sobre Materias primas para la obra pública. Gabinete de formación y documentación. CEDEX
- Svarovsky, L. (ed.); "Solid-liquid separation", Chemical Engineering Series, Butterworths, London (1977).
- Talmage W., & Fitch E.B. (1955). *Ind. Eng. Chem*, pp 47.
- TEMA 6. *Reología de sistemas multifásicos*. (s/f). Rua.ua.es.
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3631/1/tema6RUA.pdf>
- Vecer, M., & Pospisil, J. (2012). Stability and rheology of aqueous suspensions, *Procedia Engineering*.