



**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

Trabajo de Diploma

**ESTUDIO PARA EL INCREMENTO DE LA
PRODUCTIVIDAD DEL SEDIMENTADOR
DE ALTO RATE DE LA EMPRESA MOA
NICKEL S.A.**

**DIPLOMANTE
WILMER GRESESQUI MEDINA**

**MOA
2010**



**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

Trabajo de diploma

**ESTUDIO PARA EL INCREMENTO DE LA
PRODUCTIVIDAD DEL SEDIMENTADOR DE
ALTO RATE DE LA EMPRESA MOA NICKEL**

S.A.

**DIPLOMANTE
WILMER GRESESQUI MEDINA**

TUTORES

**MSc. CIRO MANUEL SAM PALANCO _____
CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL NIQUEL**

**ING. ORLEIDY LOYOLA BREFFE _____
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO**

**MOA
2010**

Dedicatoria.

A mi esposa e hijos por su entrega y apoyo en todo momento. A mi padre, hermanos y a todos los que de una forma u otra han incentivado mi creación y fomentado mi capacidad de superación, a todos los profesores y compañeros de trabajo y en especial a los que facilitaron la realización de esta investigación.

A todos,

Gracias.

Agradecimientos.

A todo el colectivo de profesores que impartieron los conocimientos necesarios para graduarnos como Ingenieros Metalúrgicos, a todos los que colaboraron con gran interés en la realización de esta investigación, en especial al Dr. Amaurys Palacios, Ing. Evangelia García, Ing. Eulalia Rondón, Ing. Orleidy Loyola y al siempre amigo MSc. Ciro Sam .

A la Revolución por la posibilidad que nos dio de estudiar esta especialidad que desempeña un papel tan importante en el desarrollo económico y social de nuestro país.

A todos,

Gracias.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
Problema Científico:.....	3
La Hipótesis	3
El objeto de la investigación.....	4
Para	¡Error! Marcador no definido.
Objetivos específicos:	4
CAPÍTULO I: ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO.....	5
1.1.- Reología. Conceptos y definiciones básicas.....	5
1.2.- Clasificación reológicas de los fluidos.....	6
1.3.- Curvas de flujo.....	7
1.4.- Modelos Reológicos.....	7
1.4.1.- Modelo de Ostwald de Waele:	7
1.4.2.- Modelo de Bingham	8
1.4.3.- Modelo de Bulkley - Herschell:	8
1.5.- Química de superficie. Elementos básicos más importantes.....	8
1.5.1.- Estabilidad de las suspensiones. Propiedades superficiales, teoría de la doble capa eléctrica. Potencial Zeta. Densidad de carga de las partículas. 10	
1.5.2.- Teoría de DLVO.	13
1.5.3.- Agentes activos de superficie.....	13
1.6.- Efectos de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas.....	15
1.6.1.- Mecanismo de carga superficial de las partículas.....	15
1.6.2.- Efecto del tipo de agua a utilizar en la preparación del mineral	17
1.7.- Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones minerales.....	18
1.8.- Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las suspensiones lateríticas.....	19
1.8.1.- Efecto del pH:.....	19
1.8.2.- Efecto de la composición mineralógica:	20
1.8.3.- Efecto de la granulometría:	21
1.8.4.- Efecto de la concentración de sólidos:	21
1.9.- Características y conceptos básicos de la sedimentación.....	22
1.9.1.- Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido:.....	23
1.9.2.- La viscosidad del fluido:	23
1.9.3.- La temperatura de operación:	23
1.9.4.- La estabilidad de la suspensión:	23
1.9.5.- Modelo de Michaels y Bolger para procesos de sedimentación.....	24
1.9.6.- Tipos de curvas de sedimentación.....	25
1.10.- Comentarios finales y estrategia de la investigación	27
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES	29
2.1 Materiales, reactivos y equipos utilizados	29
2.2 Metodologías y técnicas.....	30
2.2.1.- Pruebas de sedimentación.....	30
2.2.2.- Pruebas de sedimentación con Aditivo	31

2.2.3.- Pruebas de reología	31
2.2.4.- Pruebas de estabilidad	32
2.3.- Variables, niveles, matriz del diseño experimental y resultados.	33
CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	35
3.1.- Composiciones químicas	35
3.2.- Distribución granulométrica	37
CONCLUSIÓN	51
RECOMENDACIONES	52
NOMENCLATURA.	53
BIBLIOGRAFÍA.	55
ANEXO.....	1

Resumen

En el presente trabajo se determina la influencia de un aditivo para la mejora de la compactación de la pulpa en el sedimentador de alto rate del proceso ácido de la laterita.

En la investigación se utilizan las siguientes variables: dosis de floculante y la Relación Aditivo/Masa de sólidos (RAd/Sól en %). Se determinan los puntos de carga cero (p.z.c.) para cada mena y RAd/Sól. El p.z.c. disminuye linealmente con incremento de RAd/Sól. La reología mejora con RAd/Sól, de 10 y 20 % y más notable a 50 %.

Se comparan los efectos de diferentes floculantes, escogiéndose el de mejores resultados; luego se prueban diferentes relaciones RAd/Sól con el floculante seleccionado a 80 g/t, se observan sus efectos sobre las diferentes menas y se selecciona la M-6 y niveles de la RAd/Sól (20 y 50 %).

En la Sedimentación continua en miniplanta, se toma como variable respuesta la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador y la viscosidad de la pulpa concentrada. Las variables independientes: RAd/Sól y dosis de floculante. Ambas son estadísticamente significativas, el aditivo con efecto positivo sobre los sólidos, y el del floculante negativo. A pesar que con el uso del aditivo los resultados son positivos, los sólidos no superan los del sedimentador industrial (41%), el máximo valor apenas supera el 40 %.

En el análisis de la viscosidad solamente el aditivo tuvo significación estadística, con efecto negativo sobre ella.

Palabras clave: Sedimentación; Reología; Relación Aditivo-Sólido.

Abstract

The influence of an additive for the improvement of the compression of the pulp in high rate's settler of the acid process of laterite is determined in present work.

Utilized variables were flocculants Dose and Relation Additive/ Mass of solids (RAd/Sól in %). The points of zero charge (p.z.c). for each ore and RAd/Sól were determined. The p.z.c., decrease lineally with increment of RAd/Sól. The rheology improves with RAd/Sól, of 10 and 20 % and much more to 50 %. Different flocculant's effects were compared, the one belonging to better results was chosen; different relations RAd/Sól with the flocculants selected to 80 g/t were tried on later, their effects on different ores were observed, the M-6 ore and RAd/Sól levels of 20 and 50 %. Were selected.

The concentration of solids in the settler discharge and the viscosity of the concentrated slurry in continuous Sedimentation in mini-plant, were selected as dependent variables. Independent variables: RAd/Sól and Doses of flocculants. Both were statistically significant, the additive with positive effect on solids, and the one belonging to the flocculants was negative. In spite of the fact that with the use of the additive results were positive, the solids did not surpass the ones belonging to the industrial settler (41 %), the maximum value barely exceeds the 40 %.

In the analysis of viscosity only the additive had statistical significance, with negative effect on it.

Key word: Sedimentation; Reology; Relation Additive-Solids.

INTRODUCCIÓN

La industria del níquel constituye una de los principales pilares económicos del país, ya que la misma aporta anualmente un elevado porcentaje de los ingresos financieros de la nación.

Cuba posee grandes yacimientos de mineral laterítico, que proporcionan una de las fuentes más importantes de níquel y cobalto. Países como Australia, Filipinas, India, y otros de las zonas tropicales del planeta poseen grandes riquezas de lateritas, por ello se le presta gran importancia al control y la eficiencia del proceso, para así poder competir en el mercado internacional con un producto de alta calidad.

Las menas residuales niquelíferas cubanas, desde el punto de vista geológico, son el resultado de la intemperización química y están consideradas como una de las mayores reservas de níquel del mundo. Éstas se presentan con un alto contenido de óxidos de hierro y de aluminio en terrenos cuya coloración varía desde el rojo al amarillo. Por las características de estos yacimientos las labores mineras se realizan a cielo abierto para posibilitar la implantación de tecnologías altamente productivas y de muy bajo costo.

En la actualidad toda la producción de Ni+Co del país se lleva a cabo en tres fábricas, ubicadas al norte de la provincia Holguín, estas son: La Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”, que produce concentrados de sulfuros de Ni+Co, y las Empresas “Ernesto Che Guevara” y “René Ramos Latour”, las cuales producen óxidos y sínter de Ni, la primera de ellas es la que mejores resultados aporta al país. Con el fin de dar solución a los diversos problemas que puedan confrontar los procesos industriales, el estado invierte grandes recursos en aras de mejorar cada día la eficiencia en los mismos, lo que trae consigo un mayor aumento de la economía del país.

La Empresa “Cdte. Pedro Soto Alba”, históricamente tiene dificultades no solo con la manipulación de las pulpas de alimentación a la planta de espesadores, sino también con la tecnología relativamente nueva que se ha instalado en esta etapa, el llamado sedimentador de alto rate (alta velocidad en español), ya sea por la

composición mineralógica del mineral alimentado o por la carga iónica que puede traer el agua con la que se prepara la pulpa en la Planta de Preparación de Pulpa; se conoce, además, que estos iones se adsorben en la superficie de las partículas, ya que cambian las características químico – coloidales, de flujo y de sedimentación.

Ha sido objetivo de esta empresa incrementar el contenido de sólidos en la descarga de la Planta de Espesadores que, según el diseño original, debe ser 47,8 %, este ha sido alcanzado, pero con grandes limitaciones; además, cuando se han logrado altas concentraciones de sólido se han presentado dificultades con la fluidez de la pulpa espesada, parámetros que, como se sabe, guardan una estrecha relación, pues el incremento de sólidos en la descarga del espesador trae como consecuencia cambios en el comportamiento reológico de la pulpa, es decir se produce una disminución de su fluidez. Muchos investigadores, mediante sus estudios, tratan de buscar las vías de solución para incrementar el contenido de sólidos en la pulpa sedimentada, para evitar de esta forma las llamadas crisis de sedimentación que se producen en la fábrica, o dirigen su atención al sedimentador de alto rate, el cual al no alcanzar las concentraciones de diseño provoca la dilución de la pulpa de alimentación a lixiviación.

En estos procesos tecnológicos se manipulan varios productos que no pueden ser caracterizados por relaciones newtonianas y que son elaborados en diferentes equipos y transportados a través de conductos. El cálculo de los materiales y su comportamiento está relacionado fundamentalmente con la viscosidad y la estructura que forman las partículas. Es por ello que, en la actualidad, el conocimiento acerca del comportamiento no newtoniano de determinados materiales contribuye esencialmente a la solución de una gran variedad de problemas en la industria química y metalúrgica modernas.

Durante la sedimentación de pulpas minerales ejerce una influencia significativa la estabilidad de la dispersión, la cual se define como la capacidad de un sistema de mantener en el tiempo una concentración uniforme a través de todo su volumen, sin necesidad de agitación mecánica externa.

Cuando el sistema no es estable, se separan ambas fases por sedimentación de la fase sólida, debido a la fuerza de gravedad. No obstante, una suspensión es un sistema naturalmente inestable. A medida que la partícula es más pequeña, menor es el efecto de la fuerza de gravedad. A este nivel, son significativas las fuerzas de atracción y repulsión entre partículas; si predominan las fuerzas de atracción, las partículas sedimentan solas o forman agregados; en caso contrario, el sistema se mantiene estable.

Para el espesamiento de pulpas, se hace necesario disminuir la estabilidad de las dispersiones, lo que permite la formación de agregados multi-partículas con velocidades de sedimentación superiores a una partícula normal. En este caso, se emplean generalmente métodos de coagulación y floculación, los cuales permiten disminuir la barrera energética (punto de máxima energía de repulsión), reducir de este modo el potencial superficial del sistema. Varios métodos pueden ser usados para este propósito, por ejemplo: cambio en la atmósfera iónica Schukin et al (1988), agregar compuestos activos (electrolitos), lo cual ejercerá influencia en la sedimentación y en operaciones posteriores de bombeo, lixiviación, etc.

En la Empresa existen varios efluentes, desecho del proceso tecnológico, con las características señaladas anteriormente, que se vierten al medio ambiente. Estos efluentes están constituidos por una gran diversidad de electrolitos y algunos poseen alta acidez o basicidad, de ahí sus efectos dañinos al ecosistema de la región.

Problema Científico: Desconocimiento de la influencia de un efluente del proceso de lixiviación ácida de la laterita, utilizada como aditivo, sobre las características superficiales, comportamiento reológico y velocidad de sedimentación de la pulpa en la planta de espesadores.

La Hipótesis: Si se introduce en el sedimentador ALTO RATE un aditivo polar con una diversidad de electrolitos, entonces, se puede mejorar la compactación de las pulpas, y se logra a su vez, que éstas tengan las características reológicas y de sedimentación deseadas, además se mejoran los procesos de transporte de las mismas a través de conductos y equipos industriales”.

El objeto de la investigación que soporta la presente tesis lo constituyen las suspensiones acuosas de minerales lateríticos.

Objetivo general: Determinar el efecto de uno de los efluentes del proceso ácido (que contiene aditivos polares) sobre las características superficiales, reológicas, de sedimentación y compactación de las pulpas que salen del sedimentador de alto rate.

Objetivos específicos:

- Estudiar los efectos sobre la estabilidad de las suspensiones de los minerales lateríticos, cuando se añade en la alimentación del sedimentador de alto rate un aditivo polar.
- Determinar las variaciones de las características reológicas, de sedimentación y de compactación de la pulpa laterítica cuando se utiliza el aditivo polar antes señalado.
- Búsqueda bibliográfica.

CAPÍTULO I: ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

1.1.- Reología. Conceptos y definiciones básicas.

Fluido: Es toda sustancia que, bajo la acción de un esfuerzo cortante, se deforma continua e irreversiblemente. Los gases, vapores y líquidos, son fluidos por excelencia Garcell et al (1988).

Reología: Es la ciencia que estudia la deformación de los materiales, hasta incluir el flujo de los mismos ([Glasstone](#) 1969), ([Skelland](#) 1970), ([Shaw](#) 1977), ([Garcell](#) 2004).

Viscosidad: Constituye una medida de la resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento. Es una propiedad física intrínseca de los fluidos, que está definida por la Ley de Newton de la Viscosidad ([Glasstone](#) 1969), ([Skelland](#) 1970), ([Darby](#) 2000):

$$\tau_{yx} = \mu \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) = \mu \dot{\gamma} \dots\dots\dots(1)$$

donde: τ_{yx} - es el esfuerzo cortante que actúa entre las láminas del fluido.

$$\dot{\gamma} = \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) - \text{es la velocidad de deformación (gradiente de velocidad)}$$

μ : Viscosidad del fluido.

Viscosidad aparente: La ley de Newton de la viscosidad (1) constituye la definición de la viscosidad dinámica de un fluido. Para los fluidos newtonianos, (μ), es una constante a una temperatura y concentración determinadas; sin embargo, para los materiales no newtonianos $\mu = \mu(\dot{\gamma})$. Si para estos últimos se aplica la Ley de Newton, la viscosidad calculada corresponde a cada valor de $\dot{\gamma}$, considerando como si el fluido fuera newtoniano en cada punto. De ahí que esta viscosidad se conozca como viscosidad aparente, y se representa generalmente por el símbolo μ_a ([Skelland](#) 1970), ([Shaw](#) 1977), ([Darby](#) 2000), ([Garcell](#) 2004).

1.2.- Clasificación reológicas de los fluidos.

Desde el punto de vista reológico, los fluidos se clasifican en dos grupos ([Fredclson](#) 1964), ([Skelland](#) 1970), ([Shaw](#) 1977):

1. Newtonianos.
2. No Newtonianos.

Los fluidos newtonianos son aquellos que siguen la ley de Newton de la viscosidad. Todos los gases y los líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos newtonianos, puede variar considerablemente con los cambios de temperatura y con la concentración de la fase dispersa.

Los fluidos no newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aún cuando se mantengan la temperatura y otras condiciones constantes.

Los materiales no newtonianos, según la variación de la viscosidad se clasifican, a su vez, en tres grupos:

- Materiales de viscosidad invariable con el tiempo.
- Materiales de viscosidad dependiente del tiempo.
- Materiales viscoelásticos

a) De viscosidad invariable con el tiempo (Fig.1.1)

1. Dilatantes
2. Seudoplásticos
3. Plásticos ideales
4. Plásticos reales.

b) De viscosidad dependiente del tiempo

1. Tixotrópicos.
2. Reopéticos.

c) Materiales viscoelásticos

1.3.- Curvas de flujo.

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante con como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Estas curvas se denominan curvas de flujo.

En la figura 1.1 se muestran las curvas de flujo típicas de los fluidos.

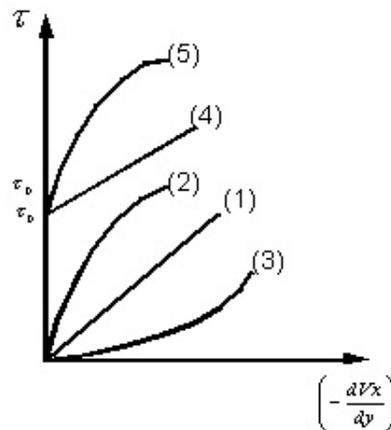


Fig. 1.1: Curvas de flujo típicas: 1- Newtoniano; 2- Seudoplásticos; 3- Dilatantes; 4- Plástico ideal; 5-Plástico-real.

1.4.- Modelos Reológicos.

Para expresar la relación existente en estado estacionario entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad se han propuesto varias relaciones empíricas (**Modelos reológicos**). Existen en la literatura una gran variedad de modelos propuestos. Los más difundidos son los siguientes ([Fredrickson](#) 1964), ([Skelland](#) 1970), ([Garcell](#) 1988), ([Darby](#) 2000), ([Garcell](#) 2004).

1.4.1.- Modelo de Ostwald de Waele:

$$\tau_{yx} = K \left(-\frac{dVx}{dy} \right)^n \dots\dots\dots(2)$$

1.4.2.- Modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta_p \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) \dots\dots\dots(3)$$

1.4.3.- Modelo de Bulkley - Herschell:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \dots\dots\dots(4)$$

1.5.- Química de superficie. Elementos básicos más importantes

La Química de Superficie, Química Coloidal o Coloide-química surgió como disciplina independiente al comienzo del siglo XX, aunque algunos fenómenos propios de esta ciencia fueron descubiertos en siglos anteriores ([Darias 1988](#)). Así, por ejemplo, el científico T. Gram., en 1861, estudió la difusión de diferentes sustancias a través de membranas de pergamino y encontró que los iones y moléculas se difundían rápidamente, mientras que la gelatina y la cola de pegar lo hacían a bajas velocidades o no podían atravesar la membrana, se denomina a estas últimas sustancias Coloide. Se demostró que muchas propiedades coloidales dependen fundamentalmente del tamaño de las partículas, y se denomina así el concepto de sistemas particulados y sistemas dispersos que permitió una clasificación más racional de las dispersiones.

Se denomina “dispersión” o “sistema disperso” a todo sistema que contiene una o más sustancias en forma de partículas dispersas en un medio. Las dispersiones pueden ser sistemas bifásicos donde las partículas constituyen la fase dispersa, y el medio es la fase dispersante ([Skelland 1970](#)), ([Shaw 1977](#)), ([Darias 1988](#)), ([Garcell et al 1998](#)) y también trifásicos, en los que el medio es una mezcla líquido – gas, ([Turro 2002](#)).

El “tamaño de las partículas” sólo puede tener un significado bien definido cuando el sistema es **monodisperso**, es decir, cuando todas las partículas tienen la misma dimensión. Sin embargo, es mucho más probable que las suspensiones tratadas industrialmente sean **polidispersas**, puesto que están constituidas por

partículas de diferentes dimensiones y/o distribución de tamaño distintos. En los sistemas polidispersos se utiliza un tamaño promedio de las partículas como dimensión representativa.

En la Fig.1.3 se muestran las partículas, y la estructura que estas tienden a formar, para una suspensión monodispersa y otra polidispersa.

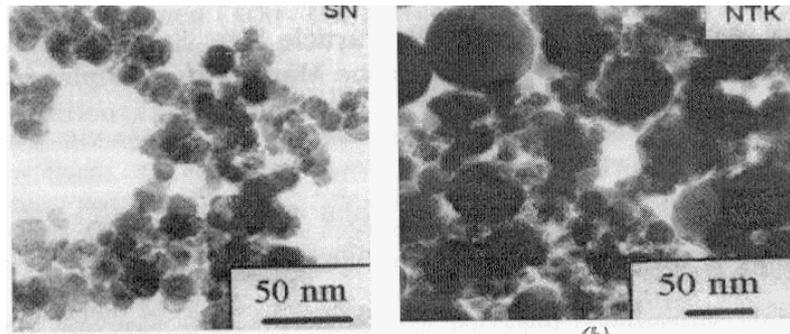


Fig. 1.3: Sistemas particulados. (a) Monodisperso, (b) Polidisperso.

Una característica estructural de gran importancia es la morfología de las partículas (Falcón et al 1997). En general, las partículas pueden tomar diversas formas: corpusculares, laminares o aciculares. Estas formas pueden ser realmente complejas, según sea el material cristalino o amorfo, y su mineralogía. Ello se ilustra en las figura 1.4 a y b, para el cieno carbonatado (Rivas & Colás 2005), en las que se observan las características morfológicas de sus fases minerales: calcita y aragonito.

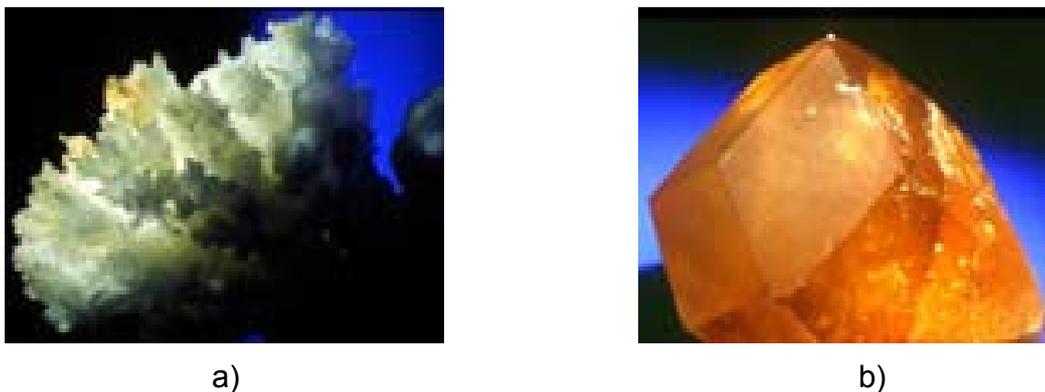


Fig 1.4: Fotos de las dos fases mineralógicas presente en el cieno carbonatado de la Bahía de Moa; aragonito (a) y calcita (b).

Cuando las partículas se agregan entre sí, pueden obtenerse formas muy diferentes que, incluso, no se parecen a la forma de las partículas primarias, como es el caso de las partículas de goethita en el mineral laterítico figura 1.5.

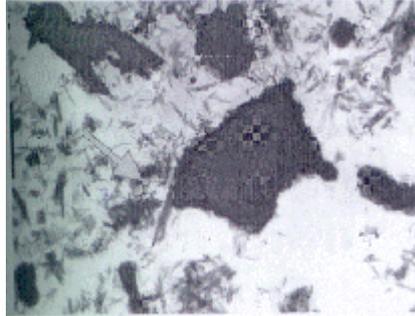


Fig. 1.5: Formación de agregados en suspensiones de lateritas.

Por otra parte, en dependencia del diámetro medio de las partículas sólidas y de la densidad relativa de éstas, así como de la concentración de la fase sólida, para el flujo por conductos, las suspensiones pueden clasificarse en: homogéneas y heterogéneas ([Darias](#) 1988).

Existen dispersiones que muestran características de las suspensiones homogéneas y heterogéneas.

1.5.1.- Estabilidad de las suspensiones. Propiedades superficiales, teoría de la doble capa eléctrica. Potencial Zeta. Densidad de carga de las partículas.

Muchas partículas coloidales en contacto con un líquido polar, como el agua, por ejemplo, adquieren una carga eléctrica superficial, para dar lugar a la aparición de las llamadas propiedades superficiales de las suspensiones coloidales, tales como la densidad de carga de superficie, el punto de carga cero (p.z.c. por sus siglas en inglés), los potenciales electrocinéticos, el punto isoeléctrico, etc., que dependen en gran medida del pH de la suspensión. Esta carga superficial influye en la distribución de los iones vecinos que se hallan en el líquido de manera que los iones de carga opuesta (contra-iones) son atraídos hacia la superficie y los iones con la misma carga (co-iones) son alejados de la superficie por repulsión. (Schukin 1988), (Shaw 1977). Esta teoría permite, de una forma relativamente sencilla, comprender los resultados de las observaciones experimentales relacionadas con

las propiedades electrocinéticas y la estabilidad de los sistemas coloidales cargados. Se han desarrollado tres modelos básicos de la doble capa eléctrica (Cornell & Schwertmann 1996). Aquí se describe resumidamente modelos de Stern-Graham, el cual considera que la doble capa está formada por dos partes, una que permanece fija a la superficie sólida (capa de Stern) con un espesor aproximado de un diámetro molecular, integrada por los iones parciales o totalmente deshidratados que se adsorben de modo específico a la superficie dada; mientras en la otra región difusa, constituida por iones hidratados que no manifiestan una adsorción tan enérgica, los iones se distribuyen según la influencia de las fuerzas eléctricas y del movimiento térmico al azar.

En la figura 1.6 se muestra un esquema de la estructura de la doble capa eléctrica.

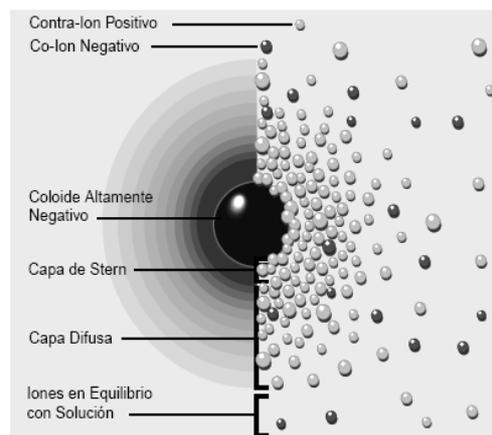


Fig. 1.6: Estructura de la doble capa eléctrica

El contacto de las partículas coloidales entre sí, en un medio dispersante de un líquido polar, trae consigo una diferencia de potencial en la interfase y por consiguiente, surgen los efectos electrocinéticos, a los que acompañan al movimiento relativo de un líquido respecto a un sólido y viceversa, cuando ambas fases están cargadas. Los fenómenos electrocinéticos son: la electro-ósmosis, la electrofóresis, el potencial de flujo y el potencial de sedimentación.

Un punto de particular interés es el potencial, en el límite donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta (ξ).

En los sistemas dispersos con características coloidales la densidad de carga de las partículas, σ y el potencial zeta, ξ , son funciones del pH y de la concentración del electrolito indiferente (no hacen cambiar el potencial φ_0 , pero ejercen influencia sobre el potencial ξ en el medio dispersante). Tanto σ como ξ constituyen una medida de la estabilidad de la suspensión. En esta tesis se adoptan los conceptos propuestos por Breeuwsma & Lyklema (1973), se entiende por adsorción específica la adsorción selectiva de iones (adsorción polar). La adsorción específica puede ser física o química y, en general, depende de la concentración de la sal y de la magnitud de σ_0 .

Por punto de carga cero (p.z.c.) se entiende el pH al cual la carga neta superficial se anula, siendo $\sigma_0 = 0$. El punto isoeléctrico (i.e.p.) es el pH al cual el potencial zeta se anula ($\xi = 0$).

El p.z.c. y el i.e.p. son idénticos en ausencia de adsorción específica; sin embargo, en presencia de adsorción específica las magnitudes respectivas del p.z.c. y del i.e.p. se desplazan en direcciones opuestas.

En el p.z.c. y el i.e.p. solo actúan las fuerzas de Van de Waals, y las dispersiones alcanzan los máximos valores de viscosidad y de τ_0 . (Cerpa & Garcell 1998) (Garcell. L. R. et al. 1998), (Garcell 2004), (Leong et al 1995), (Rivas, S. y E. Colás. 2005).

En la fig. 1.7 se muestran curvas típicas de la densidad de carga y del potencial zeta en dependencia del pH y de la fuerza iónica del medio dispersante. A pH alejados del p.z.c. o del i.e.p. las partículas pueden estar cargadas positivamente ($\text{pH} < \text{p.z.c.}$), y negativamente para ($\text{pH} > \text{p.z.c.}$).

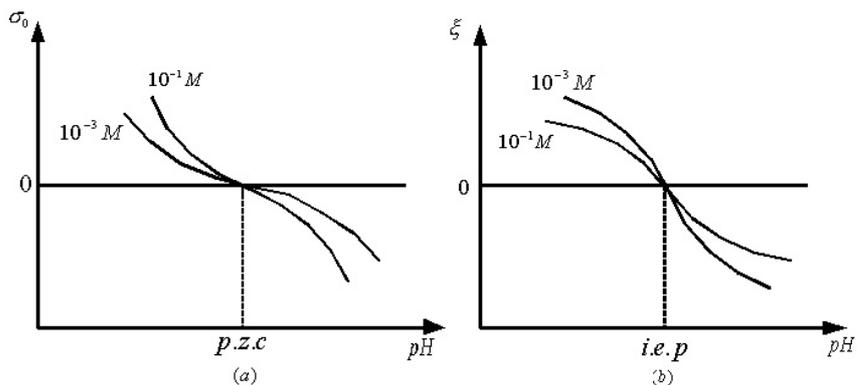


Fig. 1.7: Representación esquemática de las curvas de σ_0 vs pH (a), y ξ vs pH (b), para distintas fuerzas iónicas del electrolito indiferente (Breeuwsmá & Lyklema 1973), (Cerpa et al 1998), (Cerpa & Garcel 1998), (Darís 1988), (Garcell 1998), (Rivas & Colás 2005), (Ross & Morrison 1988), (Shaw 1977).

1.5.2.- Teoría de DLVO.

La teoría DLVO, desarrollada independientemente por Derjaguin y Landau en la URSS, 1940, y por Verwey y Overbeek en Holanda, en 1948, (Shaw 1977), (James & Parks 1982), (Darias 1988), (Ross & Morrison 1988), (Schukin et al 1988), (Cornell & Schwertmann 1996), es la más difundida para explicar la estabilidad de los coloides en suspensión. Esta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y de atracción de Van der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen.

1.5.3.- Agentes activos de superficie

El uso de aditivos para modificar el comportamiento de las suspensiones es ampliamente utilizado, por ejemplo en lo que se plantea en (ATR- Nro. 1-8 2001), permite entender el complejo mecanismo del uso de aditivos, en este trabajo se dice que es, tal vez el grupo más amplio de aditivos utilizados en recubrimientos y se utilizan para distintas funciones. Por definición un agente de superficie activa es una sustancia que se adsorbe en la interfase y altera la tensión superficial e interfacial existente en la interfase.

Estos agentes pueden ser aniónicos, catiónicos o no iónicos. Las características ionizantes de estos aditivos son extremadamente importantes en los sistemas de

recubrimientos pues ellos pueden reaccionar con otros iones libres de la formulación y pueden prevenir que funcionen apropiadamente o formar productos de reacción no dispersables.

En agua, estos productos, no tratados superficialmente, exhiben una carga superficial que es característica y dependiente del pH. Cada uno de ellos tiene, por lo tanto, un punto isoeléctrico, a un pH correspondiente donde las cargas positivas y negativas en la superficie del mismo se neutralizan unas a otras, por ejemplo ([Ross & Morrison 1988](#)), ([ATR- Nro. 1-8 2001](#)):

<u>Sólido</u>	<u>pH</u>
TiO ₂	4,7
Al ₂ Si ₂ O ₅ (Caolín)	4,8
ZnO	8,0
CaCO ₃	9,0

Cuando el pH es ajustado lejos de este punto isoeléctrico, las cargas no están equilibradas y conducen a una repulsión entre las partículas de pigmento. Esta repulsión puede ser modificada al cambiar el pH o por adición de un dispersante iónico. La extensión de la modificación dependerá de si las cargas adicionadas por el dispersante actúan al fortalecer o neutralizar las cargas de las superficies del sólido.

Por lo tanto, el estado disperso del sistema puede ser alcanzado:

- ◆ Por el uso de un poli-electrolito que genera principalmente una repulsión electrostática entre las partículas.
- ◆ Al utilizar un surfactante no iónico que imparte principalmente impedimento estérico.

1.6.- Efectos de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas.

En las dispersiones gruesas, donde las partículas son relativamente grandes, el área superficial total de la fase sólida resulta relativamente pequeña. En estos sistemas el efecto de las propiedades superficiales es prácticamente despreciable. En cambio, en las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeña un papel muy importante. Por consiguiente el comportamiento reológico es afectado, grandemente, por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, puesto que estas variables influyen sobre la interacción neta entre las partículas, es decir sobre el equilibrio atracción – repulsión, explicado en el epígrafe 1.5.

Si la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, si la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial ([Cerpa](#) et al 1998).

Leong & Boger (1990) realizaron un estudio acerca de la relación existente entre las propiedades reológicas y los fenómenos superficiales en dos suspensiones de **Lignito**, comprobaron que la interacción neta de las partículas depende de dos factores: la densidad de carga superficial de las partículas debido a la presencia de los iones carboxilados (COO^-) en sus superficies; y la fuerza iónica del medio dispersante dada la presencia de sales solubles inherentes y los cationes asociados con los carboxilos tales como: F_e^{2+} , F_e^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} .

1.6.1.- Mecanismo de carga superficial de las partículas.

Los mecanismos más importantes por los que la superficie de las partículas pueda cargarse eléctricamente son los siguientes ([James](#) & Parks 1982), ([Darias](#) 1988), ([Rodríguez](#) et al 2000), ([Rivas](#) & Colás 2005):

➤ **Ionización**

➤ **Formación de iones complejos**

➤ **Adsorción específica de iones.**

Ionización:

Tiene lugar por la disociación de grupos ionogénicos superficiales, en dependencia del pH de la solución. Por ejemplo, las proteínas poseen grupos carboxilos y amino que se ionizan para dar iones COO^- y NH_3^+

Formación de grupos complejos:

Un modelo simple generalizado propone que los centros activos FeOH, presentes en la Maghemita, Goethita (γ - FeOOH), y otros, dan lugar a la formación de pares de iones $F_eOH_2^+$ y F_eO^- que dan carga a la superficie, y que interaccionan con los cationes y aniones que se encuentran en el medio dispersante ([Cornell & Schwertmann 1996](#)), ([Garcell 1998](#)), ([Leja 1982](#)), ([Valdés 1984](#)). En estos óxidos los centros activos exhiben un comportamiento anfotérico, coexistiendo simultáneamente sitios neutros F_eOH y sitios cargados $F_eOH_2^+$ y F_eO^- , predominando un tipo de carga en dependencia del pH.

Adsorción iónica:

Es posible que la superficie adquiera una carga neta por la adsorción desigual de iones de signos opuestos. Se consideran iones absorbidos específicamente a aquellos que están unidos a la superficie en la capa de Stern, por fuerza electrostática o de Van der Waals, lo suficientemente fuerte para superar la agitación térmica, tal como ya en parte se trató en el epígrafe 1.5.1.

La adsorción iónica se puede producir por intercambio de iones contenidos en el sólido y el líquido circundante. En los procesos de intercambio iónico la carga neta de la superficie de las partículas no se altera.

([Torres 1989](#)) realizó investigaciones sobre la composición iónica y fenómenos de intercambio de iones en pulpas de Limonita. En el mismo comprobó el cambio que experimenta la composición iónica de las aguas utilizadas en la preparación de pulpas de Limonita. Al examinar sus resultados (Tabla 1.1), se puede apreciar que, para el agua industrial de reboso de los sedimentadores de la fábrica va a existir

una tendencia a la desorción para casi todos los iones excepto para el Mg^{2+} , para el agua industrial de proceso ocurre algo similar, solo que el Ca^{2+} y SiO_3^{-2} son adsorbidos. En el caso de la pulpa preparada con agua desmineralizada se observa desorción de todos los iones, lo cual es de esperar debido a la diferencia de concentraciones de iones entre el sólido y el agua.

Tabla 1.1: Composición iónica de las aguas utilizadas en la preparación de las pulpas limoníticas, antes y después de su contacto el sólido (en ppm).

TIPOS DE AGUAS	AGUAS DE REBOSO		AGUAS DE PROCESO		AGUAS DESMINERALIZADAS	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Iones investigados						
Ca^{2+}	9,00	10,00	14,00	10,00	-	30,00
Mg^{2+}	41,00	10,00	66,0	10,00	-	50,00
Na^+	6,4	31,0	5,90	31,00	-	30,1
K^+	0,52	3,38	0,52	3,15	-	3,9
Cl^-	34,9	74,5	18,6	69,8	-	149,1
SO_4^{2-}	20,4	22,8	22,8	54,0	-	-
SiO_2	1,8	1,9	17,5	1,9	-	2,9

1.6.2.- Efecto del tipo de agua a utilizar en la preparación del mineral

El tipo de agua utilizada en la preparación de pulpas, influye sobre el comportamiento reológico de las mismas, motivo por el cual ha sido analizado en diferentes trabajos realizados por ([Torres](#) 1989), ([Beirys](#) et al 1996) y ([Rodríguez & Sánchez](#) 2000).

En el trabajo de ([Rodríguez & Sánchez](#) 2000) se comprobó que la viscosidad es menor para el caso de las pulpas preparadas con predominio del agua de reboso;

las mejores características de sedimentación se obtienen para las pulpas preparadas sólo con agua de proceso.

En el estudio de ([Torres](#) 1989) los resultados evidenciaron que las mezclas preparadas con agua de reboso más agua de proceso proporcionaron curvas de flujo de mayor viscosidad y mayores características de sedimentación, en tanto que las preparadas con agua que solo contienen aniones son las que presentan mayor estabilidad y por lo tanto menor viscosidad.

Las investigaciones realizadas reflejaron que las viscosidades de las pulpas preparadas con distintos tipos de aguas son menores en aquellas que predomina el agua de reboso en su composición y mayores en las que prevalece el agua de proceso. La razón de estos comportamientos se considera esté influenciada en mayor o menor medida a la fuerza iónica de las aguas utilizadas y los fenómenos superficiales inherentes a dichos sistemas.

1.7.- Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones minerales.

Cuando un sólido es dispersado en un líquido, la viscosidad de la suspensión resultante se incrementa. La dispersión puede exhibir características de flujo newtoniano o no newtoniano, que dependen de las interacciones físicas y químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y características de las fases.

En la literatura especializada se analizan diversos tipos de interacciones. ([Cheng](#) 1980) ha resumido una multitud de interacciones dentro de tres categorías diferentes:

1. Interacciones hidrodinámicas entre el líquido y las partículas sólidas dispersas, las cuales incrementan la disipación viscosa en el líquido.
2. La atracción entre partículas, que da lugar a la formación de agregados, flóculos y estructuras.
3. El contacto partícula – partícula, el cual es la causa de las interacciones de fricción

En cada tipo de interacción interviene una variedad de factores que determinan el comportamiento y las características reológicas de la dispersión. Los factores más importantes son:

- a) Tamaño de las partículas.
- b) Forma y flexibilidad de las partículas.
- c) Concentración de la fase dispersa.
- d) Propiedades superficiales de las partículas.
- e) Naturaleza reológica del líquido dispersante (medio dispersante) y su composición iónica.
- f) Temperatura de la dispersión.
- g) Velocidad de deformación a que es sometido el sistema.

1.8.- Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las suspensiones lateríticas.

El comportamiento de las suspensiones de laterita según la influencia de diferentes factores, ha sido ampliamente estudiado ([Garcell 1962](#)), ([Avotins 1979](#)), ([Valdés 1984](#)), ([Avramidis & Turian 1991](#)), ([Cerpa et al 1998](#)), ([Cerpa & Garcell 1998](#)), ([Rodríguez & Sánchez 2000](#)), los mismos también son válidos para suspensiones preparadas a partir de desechos lixiviados (colas). Entre los diferentes factores que influyen sobre el comportamiento de estas suspensiones los más importantes son:

1.8.1.- Efecto del pH:

En un trabajo realizado por ([Cerpa & Garcell 1998](#)), se estudió el efecto del pH en las pulpas de laterita. En la figura 1.9 se muestra la variación de la viscosidad (a) y del potencial zeta (b) con el pH para muestras de laterita con diferentes proporciones de Serpentina – Goethita: SG (bajo contenido de goethita); GS (contenidos similares de goethita y serpentina); G (alto contenido de goethita).

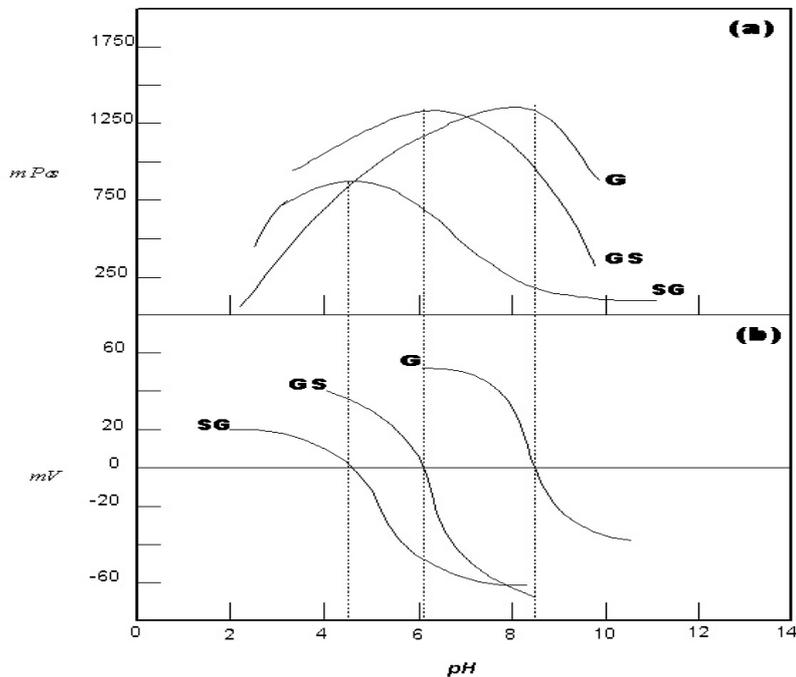


Fig. 1.9: (a) Viscosidad aparente ($\gamma = 200 \text{ s}^{-1}$) para suspensiones de laterita que contienen un 36 % de concentración de sólidos en peso, y (b) Potencial zeta, para las muestras SG, GS y G, en ambos casos como una función del pH de la suspensión.

Estos resultados confirman que los mayores valores de viscosidad corresponden al punto isoeléctrico en tanto que un aumento o una disminución del pH traen consigo una disminución de la viscosidad. Así, para la muestra SG, el máximo valor de viscosidad aparece para valores de pH cercanos al i.e.p = 4,8, donde tiene lugar el máximo de floculación. Para la muestra GS este máximo aparece a un pH, i.e.p = 6,1, mientras que en la muestra G este aparece a un pH, i.e.p = 8,4.

1.8.2.- Efecto de la composición mineralógica:

En el punto anterior al analizar la influencia de la relación Serpentina – Goethita, se observó un cambio significativo del i.e.p de las pulpas de 4,8 hasta 8,4 en la muestra rica en Goethita, atribuido específicamente a la relación Serpentina –

Goethita en la fracción coloidal. Puede; por tanto, apreciarse que las muestras de laterita presentan un amplio rango de su i.e.p, que obedece a su composición mineralógica ([Rojas](#) & Beirys 1994), ([Garcell](#) et al 1995), ([Almaguer](#) 1996), ([Cerpa](#) & Garcell 1998).

1.8.3.- Efecto de la granulometría:

En los trabajos realizado por ([Garcell](#) et al 1995), ([Almaguer](#) 1996) y ([Falcón](#) 1983) se pudo confirmar que las pulpas de Limonita preparadas con partículas mayores de 90 μm no logran formar una estructura y muestran un comportamiento Newtoniano. En cambio, las preparadas con mezclas de partículas inferiores a 50 μm forman una estructura que brinda a la suspensión propiedades plásticas, que pueden ajustar su curva de flujo al modelo de los plásticos Bingham.

En general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas cuyas partículas poseen propiedades magnéticas en que ocurre lo contrario, como es el caso de pulpas de Maghemita ([Garcell](#) et al 1998), y de las colas del proceso Caron ([Turro](#) 2002).

La clasificación granulométrica realizada a las pulpas limoníticas muestra que las partículas de tamaño menor de los 44 μ son mayoritarias, y constituyen más del 65 % del volumen de la fase sólida en la mayoría de las muestras investigadas, que influyen grandemente en el comportamiento de las pulpas lateríticas en los procesos de sedimentación ([Cerpa](#) et al 1998), ([Cerpa](#) & Garcell 1998), ([Garcell](#) 2004).

1.8.4.- Efecto de la concentración de sólidos:

En los estudios realizados con anterioridad por ([Cerpa](#) & Garcell 1998) y por ([Garcell](#) 1962) con pulpas lateríticas, pudo determinarse que para concentraciones menores a 18 % en peso de sólidos, las curvas de flujo obtenidas prácticamente son independientes de su composición mineralógica, y exhiben un comportamiento pseudoplástico.

Ya para concentraciones alrededor del 22 – 23 % en peso de sólidos hasta 45 %, la viscosidad aumenta en correspondencia con la mineralogía, y el

comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, al poder ajustarse al modelo de Bingham, en algunos casos, o al de Bulkley – Herschel, en otros.

1.9.- Características y conceptos básicos de la sedimentación.

Un método muy difundido industrialmente para la separación de suspensiones en sus componentes principales es la sedimentación, la cual se basa en la diferencia de densidades existentes entre las fases involucradas. Esta operación se lleva a cabo en equipos denominados sedimentadores, en los cuales las partículas sólidas tienden a descender, siguen la ley de caída libre de un cuerpo en el seno de un fluido, se obtienen de esta forma, en el fondo, un lodo bastante denso y con una concentración de sólidos superior a la de la suspensión alimentada, mientras que, en la parte superior se obtiene un fluido claro que debe estar libre de partículas sólidas.

Existen diferentes factores que influyen de forma directa en la eficiencia de esta operación tales como ([Falcón 1983](#)), ([Beirys & Falcón 1985](#)), ([Rosabal & Valles 1988](#)):

1. Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido.
2. La viscosidad del fluido.
3. La temperatura de operación.
4. La estabilidad de la suspensión.

A continuación se hará un breve comentario sobre la influencia en el proceso de los factores señalados.

1.9.1.- Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido:

La diferencia de densidades influye de forma positiva en la velocidad de separación de las fases, cuando se opera con una mayor diferencia de densidades entre los componentes referidos, de manera que pudiera producirse la separación por decantación del licor claro. Por lo tanto, la velocidad de separación se favorece con un aumento de la diferencia de densidades de estos componentes.

1.9.2.- La viscosidad del fluido:

La viscosidad del fluido, al igual que la diferencia de densidades, influye de forma positiva en la velocidad de separación si se opera con valores relativamente bajos de esta, ya que para valores altos de viscosidad el líquido ofrece mayor resistencia al movimiento de descenso del sólido, y se dificulta la sedimentación.

1.9.3.- La temperatura de operación:

La temperatura de trabajo, que aparentemente no se considera en esta operación, ejerce gran influencia en los factores anteriores, puesto que, cualquier variación de esta, provoca efectos marcados en la densidad y viscosidad de los componentes.

1.9.4.- La estabilidad de la suspensión:

La estabilidad de la suspensión es un factor muy importante. La suspensión puede comportarse como inestable, en el caso de que las fuerzas de atracción de Van der Waals sean las responsables de promover la agregación entre partículas, que incrementa el tamaño de los flóculos lo que favorece el proceso de sedimentación, mientras que una suspensión estable prácticamente no sedimenta.

El predominio de la interacción repulsiva o de agregación obedece a la densidad de carga eléctrica superficial (σ_0) y a la fuerza iónica del medio dispersante, lo cual puede expresarse también mediante el potencial zeta (ξ). Tanto σ_0 como ξ son funciones del pH y de la fuerza iónica del medio dispersante, tal como se ha explicado en el epígrafe 1.6.

En los pH correspondientes a puntos de máximos valores absolutos de potencial zeta, las fuerzas repulsivas son más importantes, lo que debe dar lugar a

suspensiones más estables con un comportamiento reológico ligeramente pseudoplástico con tendencia a newtoniano. Por el contrario, al aproximarse el valor de potencial zeta a cero (i.e.p), es de esperar comportamientos plásticos o altamente pseudoplásticos, debido al predominio de las fuerzas atractivas las cuales inducen a la formación de agregados.

La magnitud de la densidad de carga eléctrica de las partículas está relacionada con la formación de complejos iónicos en su superficie (en dependencia de las fases mineralógicas o compuestos químicos que forman la fase sólida), la adsorción de iones, la adición de electrolitos, etc.

Un aumento de la fuerza iónica del medio trae consigo un incremento de la densidad de carga y una disminución del potencial zeta, a pH distintos del punto isoeléctrico, debido a la compresión de la doble capa eléctrica, lo que facilita que las partículas se acerquen unas a otras al predominar las fuerzas de Van der Waals. La atracción entre partículas favorece la floculación y, por consiguiente, la sedimentación ([Beyris & West 1992](#)).

1.9.5.- Modelo de Michaels y Bolger para procesos de sedimentación

1.9.5.1.- Modelo físico:

Hasta el presente el modelo básico que fundamentalmente se aplica para interpretar y describir los procesos de sedimentación es el de Kynch ([Brown](#) et al 1963), ([Ross & Morrison 1988](#)). Existen otros modelos físicos para describir el comportamiento de las suspensiones en el proceso de sedimentación, entre ellos se encuentra el desarrollado por ([Michaels & Bolger 1962](#)), aplicado para el caso específico de la sedimentación de suspensiones de Caolinita floculadas.

La premisa fundamental en que se basa dicho modelo consiste en suponer que en las suspensiones floculadas las unidades básicas de flujo no son las partículas primarias sino pequeños grupos de partículas (con líquido atrapado en su interior) que se denominan flóculos. Dichos flóculos tienen la propiedad de conservar sus identidades bajo la acción de otras fuerzas, dado que poseen cierta resistencia mecánica.

La forma característica de los flóculos es la esférica, con tamaño uniforme, el que tiende a incrementarse con el aumento de la concentración de sólido, o con la disminución de la velocidad de formación.

Los flóculos, a bajas velocidades de formación (como es el caso de la sedimentación por gravedad), tienden a formar unidades de flóculos agrupados denominados agregados, los que pueden unirse y formar un retículo (similar a una red) que puede extenderse hasta las paredes del recipiente. Esta estructura es la que da lugar a las propiedades plásticas y estructurales de la suspensión (ver Fig.1.10). A altas velocidades de deformación los agregados desaparecen como tales y quedan los flóculos dispersados completamente.

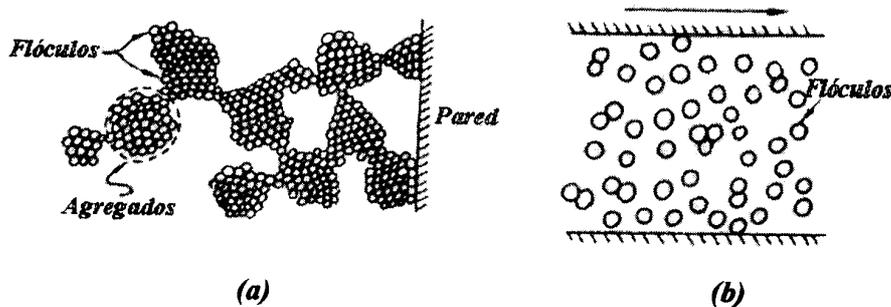


Fig. 1.10: (a) Red de agregados de flóculos. (b) Agregados dispersos.

1.9.6.- Tipos de curvas de sedimentación.

Las curvas de sedimentación se determinan al construir un gráfico de la altura, Z , del plano interfacial entre la suspensión y el líquido que sobrenada como una función del tiempo, t . En general, pueden obtenerse tres tipos de curvas, como las mostradas en la (Fig. 1.11).

Para suspensiones relativamente diluidas (bajo contenido de sólidos), se obtienen curvas de sedimentación similares a la de la Fig.1.11 (a) En este caso, el tamaño de los agregados no constituye una propiedad fundamental de la suspensión, sino más bien, es una propiedad dinámica que depende del equilibrio entre la velocidad de crecimiento de los agregados por colisión y la velocidad de destrucción de los mismos por las fuerzas hidrodinámicas (fuerzas de cizalla).

Si todos los agregados fueran del mismo tamaño y densidad, entonces todos sedimentarían a la misma velocidad, la interfase se mantendría plana y bien definida durante el descenso, y el líquido que sobrenada sería claro ([Beyris & West 1992](#)).

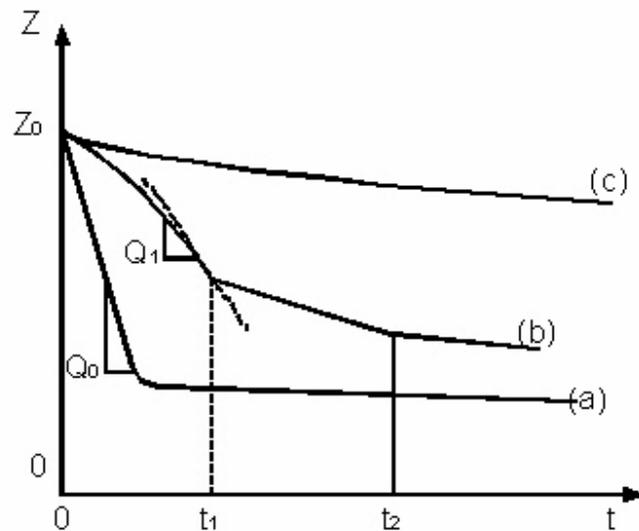


Fig. 1.11: Tipos de curvas de sedimentación.

En las suspensiones altamente polidispersas los grandes agregados sedimentan rápidamente, mientras los pequeños lo hacen más lentamente, y dejan a su paso un líquido sobrenadante más turbio y más denso, lo que lleva a las curvas de sedimentación como las presentadas en la figura 1.11 (b) y (c). En el caso de la curva (c) en ocasiones puede ser debido a la formación de agregado de flóculos que se adhieren a las paredes del recipiente ya que impiden o retardan la sedimentación de la masa de sólidos, según el modelo descrito por ([Michaels & Bolger 1962](#)), incluso con suspensiones que en otras condiciones sedimentarían con mayor velocidad.

En general el factor más importante que determina el tamaño de los agregados lo constituye el equilibrio entre las fuerzas interactivas de cohesión que los mantiene unidos y el grado de agitación de la suspensión que tiende a dispersarlos.

Velocidad de sedimentación:

Cuando las partículas son muy finas el proceso de sedimentación se dificulta, se hace muy lento, lo que conlleva al uso de aparatos muy grandes donde la suspensión debe someterse al proceso largo tiempo para obtener la capacidad de producción diaria deseada ([Rabinóvich](#) 1987), ([Ferrer](#) & Acosta 1991). Con el fin de incrementar la velocidad de sedimentación en estos casos, se emplean métodos de floculación, que consisten en provocar la formación de agregados de partículas, que tienen un mayor tamaño y peso que las partículas individuales. La floculación puede ser de naturaleza física, cuando el agrupamiento de las partículas se logra por agitación mecánica leve, por medios magnéticos o por calentamiento; o química, cuando se usan reactantes especiales que forman flóculos grandes que atrapan las partículas pequeñas o que proporcionan cargas eléctricas que hacen atraerse a las partículas (polímeros de alto peso molecular).

1.10.- Comentarios finales y estrategia de la investigación

Se consultó la bibliografía especializada y se profundizó en la teoría de los fenómenos superficiales y sobre sistemas particulados, en éstas se analizaron diferentes conceptos que son necesarios tener en cuenta, como son el concepto de viscosidad aparente; se identificaron los modelos reológicos más difundidos, con los cuales describir el comportamiento de los fluidos (pulpas) que se analizarán; se encontró, además, la definición de la doble capa eléctrica y los conceptos de densidad de carga superficial y potenciales eléctricos aplicados en esta teoría, necesarios para la comprensión de los fenómenos que se desarrollan durante la formación de las pulpas y en la operación de sedimentación. Se consultaron también algunos trabajos de investigación relacionados con el uso de diferentes tipos de aguas en la preparación de pulpas, las cuales tienen una estrecha relación con el trabajo, pero que en los mismos se limitan a describir lo que sucede cuando se utiliza uno u otro tipo de agua, sin llegar a modificar intencionalmente la fuerza iónica de esta agua o las propiedades superficiales de los sólidos. Se consultaron otros trabajos, que tienen una relación algo más directa

con esta investigación permitieron profundizar en los fenómenos superficiales relacionados específicamente con las lateritas.

Conocer de la tendencia de las pulpas de la mayoría de los minerales, en relación con la adsorción de iones, tales como Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-} , etc., que hacen variar la viscosidad de la pulpa formada, lo cual está fuertemente correlacionado con las características de sedimentación de las mismas, fue posible trazar la estrategia para la presente investigación.

La tecnología de lixiviación ácida de las lateritas siempre ha confrontado dificultades con el incremento del contenido de sólidos y con la fluidez de la pulpa concentrada, ya sea por el incremento de la concentración en la descarga del sedimentador, mayor tiempo de retención a la pulpa, o porque se alimentó un mineral con determinadas características mineralógicas, por tales razones alcanzar la concentración de diseño es un reto en muchas ocasiones.

El éxito de esta investigación radicará en las posibilidades que se tengan para que cambien a voluntad el tipo de iones presentes en el agua de preparación de la pulpa, así como la fuerza iónica de la misma, sin que esto constituya un gravamen para la situación económica del proceso; en general se pueda modificar el comportamiento de las pulpas formadas. Se harán mediciones de la densidad de carga superficial, viscosidades y algunas de las propiedades de sedimentación para las diferentes menas estudiadas y se probarán las mismas condiciones en una prueba a escala de miniplanta piloto.

Por lo tanto se concluye que: Si se tiene en cuenta todo lo hasta aquí explicado, resulta evidente que los efectos de las propiedades superficiales sobre la reología de las suspensiones minerales coloidales es un fenómeno de carácter universal de manera que, los principios que rigen estos procesos pueden ser aplicados independientemente del tipo de mineral que forme la dispersión.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

Este trabajo experimental se desarrolló en el laboratorio de Lixiviación Ácida a presión del Centro de Investigaciones del Níquel del Grupo Empresarial Cubaníquel, y para el buen desarrollo del mismo se trabajó con materiales y métodos dispuestos en este centro según las normas de calidad establecidas.

2.1 Materiales, reactivos y equipos utilizados

Materiales

Se utilizan dos tipos de minerales, tomados de la zona Moa Oriental del yacimiento de la Moa Nickel S.A, identificados por M-4 y M-6, y uno de la zona de Cajalbana en Pinar del Río que se denominó M-5, además un aditivo procedente del propio proceso (efluente), el cual se utilizó neutralizado con cienos coralinos.

Reactivos

Electrolitos: Nitrato de potasio para análisis y soluciones 0.2 normal de hidróxido de potasio y de ácido nítrico.

Equipos

- Reómetro rotacional Rheotest 2 de fabricación alemana
- PHmetro de la firma Seven Easy con precisión 0,01 unidades de pH
- Balanza técnica digital
- Balanza analítica digital
- Balanza de determinación de la concentración de sólidos
- Juegos de Tamices Tyler
- Equipo de Absorción Atómica marca Solar Unicam 929
- Probeta continua de la firma LAROX de plexiglás
- Bombas peristálticas.

Utensilios

- Probetas: 100 y 1000 mL
- Beakers
- Volumétricos de 100 mL.
- Cronómetros.
- Tanquetas.

2.2 Metodologías y técnicas

Para la planificación de los experimentos, elaboración y valoración de los resultados experimentales se utilizó el software STATGRAPHICS. VERSIÓN 5.1. Se utilizó un diseño factorial completo del tipo 2². Para el procesamiento de los datos de las pruebas de reología y sedimentación se utilizó el Excel.

Se estudió la influencia de los parámetros que a continuación se relacionan sobre las propiedades reológicas de las pulpas lateríticas, la velocidad de sedimentación de las mismas, la compactación y la viscosidad de las pulpas de descarga del sedimentador continuo:

- Dosis de floculante (en lo adelante Floc)
- Relación masa de Aditivo/ masa de sólido (en lo adelante RAd/Sól.).

Para la investigación se preparó una solución del aditivo propuesto, el cual se alimentó según la RAd/Sól del experimento planificado. Se utilizaron los tres tipos de minerales que se relacionaron anteriormente, de los cuales se seleccionó el de características medias para las pruebas de sedimentación continua.

2.2.1.- Pruebas de sedimentación

Se tomó el mineral como llega de la mina y se le determinó el por ciento de humedad, posteriormente se calculó la cantidad de agua de proceso, que se le debió añadir para formar una pulpa de aproximadamente 47 % de sólido y a partir de ella se hacen los cálculos para formar una pulpa al 7 % de sólidos; se realizó el proceso de preparación mediante el uso de un agitador mecánico hasta que se

formó una pasta (10 a 15 minutos aproximadamente), se tamizó y luego se tomó un litro de dicha pulpa para la ejecución de la prueba de sedimentación.

La pulpa, con una concentración de sólidos de aproximadamente 7 %, se añadió a una probeta de un litro (previamente milimetrada) y se agitó, luego se dejó en reposo, pasado un tiempo se inició la separación de las fases y es en este momento que se comenzó a tomar datos de la altura de la interfase, que posteriormente se introdujeron en una hoja de cálculo para su procesamiento por el soft SedTF, propiedad del CEINNIQ para la determinación de la velocidad de sedimentación (VS); transcurridas 24 horas se registró el volumen final y la densidad del licor sobrenadante, los cuales se introdujeron junto con la densidad del sólido, el volumen de la probeta, la densidad inicial de la pulpa y el por ciento de sólido final deseado en una hoja de cálculo en Excel, que procesó estos datos y entregó el volumen de líquido que se tenía que extraer para llevar la pulpa al por ciento de sólidos deseado al cual se llevó a cabo la prueba de reología, además, se calculó la densidad que debe tener esta pulpa a este por ciento de sólidos.

2.2.2.- Pruebas de sedimentación con Aditivo

Las pruebas de sedimentación, se hicieron en condiciones similares a las anteriores, con la diferencia que se calculaba que cantidad de aditivo debía añadirse en dependencia de la relación RAd/Sól y se le restaba esta cantidad a la cantidad de agua a añadir, de esta forma se mantuvo la misma concentración de sólidos en todas las pruebas

2.2.3.- Pruebas de reología

Para estas pruebas se utilizó un reómetro rotacional de cilindros concéntricos (marca Rheotest 2) de fabricación alemana, según el procedimiento reconocido ([Almaguer](#) 1996).

Inicialmente se preparó la pulpa concentrada, para lo cual se tomó toda la pulpa que sedimentó en la prueba de sedimentación (la pulpa concentrada que quedó en el fondo de la probeta), se le ajustó el por ciento de sólidos a un valor prefijado (45 %), lo cual se llevó a cabo mediante la filtración de la misma, o con la adición

de agua de reboso de la propia prueba, según correspondió. Luego se procedió a conectar el cilindro o rotor que se seleccionó y a alimentar la pulpa con la concentración de sólidos deseada al vaso del reómetro, el cual se colocó en su posición y luego se le puso la camisa termostatada, que en este caso solo se llenó de agua para mantener las muestras a temperatura ambiente. Posteriormente se conectó el reómetro y se comenzaron a tomar lecturas de los valores del factor α para cada velocidad de rotación del rotor. Estos datos también se procesaron a través de una hoja de cálculo en Excel y en la que se obtuvieron los valores de los parámetros reológicos.

2.2.4.- Pruebas de estabilidad

Se hicieron con el objetivo de determinar las curvas de estabilidad de σ_0 vs. pH y el punto de carga cero (p.z.c.), que es el punto (pH) donde las fuerzas de repulsión entre las partículas del sólido están en su mínimo valor y las fuerzas atractivas en el máximo. Se aplica el método rápido de valoración potenciométrica ([Breeuwsma & Lykleman 1973](#)), ([Garcell 2004](#)), ([Leja 1982](#)) de la siguiente forma:

Se pesó una masa determinada de la pulpa de interés que contenía la masa de sólido que se iba a analizar y se añadió en un volumen determinado de la solución que se ha utilizado, según las condiciones que se quieran probar, se le determinó el pH, éste se disminuyó con el uso de una solución ácida hasta valores ácidos, en dependencia del p.z.c. que aproximadamente tenga el sólido analizado (se barrió un intervalo donde se sospechaba se encontraba el mismo), luego se le añadió una solución alcalina para elevar de nuevo el pH hasta un valor que barrió este intervalo, los datos de pH y los volúmenes de soluciones consumidos se introdujeron en una hoja de cálculo en Excel y de esta forma se calculó el p.z.c., de forma gráfica y analítica.

2.3.- Variables, niveles, matriz del diseño experimental y resultados.

Se desarrolló un diseño experimental 2^2 con los resultados de la concentración de sólidos de la descarga del sedimentador continua (miniplanta piloto). Los niveles de las variables estudiadas, la matriz experimental y los resultados experimentales obtenidos se muestran en las Tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1: Condiciones de operación del proceso y los niveles de las variables

N°	Variable	Nivel inferior	Nivel superior
1	Relación Adit/Sól, %	20	50
2	Dosis de floculante, g/t	80	120

Tabla 2.2: Matriz del diseño con los datos reales de los parámetros y los resultados experimentales obtenidos.

N° Corr.	RAd/Sól	Floc	μ , Pa.s	Sólido
1	20	80	0,2003	38,60
2	50	80	0,0682	38,93
3	20	120	0,1093	37,64
4	50	120	0,0699	40,30
5	20	80	0,2076	39,51
6	50	80	0,1406	40,13
7	20	120	0,1283	34,74
8	50	120	0,0613	39,80
9	20	80	0,2149	39,00
10	50	80	0,0988	41,20
11	20	120	0,2484	35,00
12	50	120	0,0694	37,68

De aquí se concluye que: se tienen los métodos y procedimientos adecuados para realizar la investigación y alcanzar los objetivos que se propusieron.

CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales alcanzados, se observan en las tablas y gráficos que permiten visualizar y comprender con mayor facilidad dichos resultados.

3.1.- Composiciones químicas

La composición química de los materiales que se utilizaron se brinda en las tablas dadas a continuación:

Tabla 3.1: Composición química de las muestras de minerales utilizados en %

Muestra	Ni	Co	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Al	Cr	SiO ₂
M-4	1,015	0,140	44,20	0,014	0,034	0,80	0,82	3,61	1,87	8,98
M-5	1,138	0,072	35,04	-	-	1,65	0,46	5,77	1,55	5,93
M-6	1,230	0,124	44,25	0,013	0,034	0,85	0,82	3,62	2,13	11,56

Tabla 3.2: Composición química del agua cruda utilizada en la preparación de pulpa (en g/L).

Ni ⁺²	Co ⁺²	Mg ⁺²	Cu ⁺²	Al ⁺³	Zn ⁺²	Ca ⁺²	Mn ⁺²
2,79x10 ⁻⁵	2,02x10 ⁻⁵	7,13x10 ⁻⁴	8,03x10 ⁻⁶	1,26x10 ⁻⁵	9,25x10 ⁻⁷	4,99x10 ⁻⁴	2,00x10 ⁻⁶
Fe ⁺²	Cr ⁺³	Na ⁺¹	SiO ₃ ⁻²	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻¹	Cl ⁻¹	
1,04x10 ⁻⁵	4,64x10 ⁻⁶	1,49x10 ⁻²	3,38x10 ⁻²	4,69x10 ⁻⁴	1,23x10 ⁻²	1,2x10 ⁻²	

Tabla 3.3: Relaciones entre equivalentes gramos de cationes /aniones

Equiv. Cationes/Equiv. Aniones	1,00
Equiv. Cat. Alta carga/Equiv. SO ₄ +Silic	0,34

Tabla 3.4: Composición química del Aditivo sin neutralizar (Ad-SN) y neutralizado (Ad-N) en g/L

Código	Ni ⁺²	Co ⁺²	Fe _T	Mg ⁺²	Na ⁺¹	Cu ⁺²	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mn ⁺⁴	Cr ⁺³	SiO ₃ ⁻²	SO ₄ ⁻²
Ad-SN	0,08	0,013	0,623	2,70	0,126	0,009	5,26	0,777	1,77	0,521	0,33	51,14
Ad-N	0,03	0,008	0,654	2,59	0,090	0,001	5,17	0,796	1,77	0,525	0,45	43,30

Los minerales utilizados provienen de diferentes yacimientos, dos del yacimiento de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” (M-4 y M-6) y el tercero es del yacimiento Cajalbana, tienen una composición química bastante similares (tabla 3.1), pero el codificado como M-5 tiene alguna diferencia, sobre todo en las concentraciones de Fe, Mg, Al y SiO₂. Al parecer posee determinada cantidad de serpentina, pero desafortunadamente no se pudo comprobar, debido a las dificultades que se presentaron para realizar el análisis mineralógico.

La composición química del agua que se utilizó en los experimentos para la preparación de las pulpas se caracterizó por un desbalance en la relación entre los equivalentes gramos de los cationes de alta valencia (superior a 2+) y los equivalentes gramos de los aniones de alta carga (superior a 2-) (tablas 3.2 y 3.3) y por una más alta concentración de cationes de sodio y de aniones silicato, bicarbonato y cloruro.

El Aditivo para la preparación de pulpa se empleó solamente después de recibir un tratamiento con agentes neutralizantes, fue neutralizado (Ad-N) hasta un valor de pH = 3,5. Lo que más se destaca en este caso es la diferencia en la concentración del ión sulfato con respecto a la concentración del mismo aditivo sin neutralizar (tabla 3.4). En el proceso de neutralización el, Ad-N perdió parte de los iones sulfato, que en el Ad-SN estaban como acidez libre. El ión sulfato pasó a formar parte del sulfato de calcio que se formó al utilizarse el carbonato de calcio de los cienos coralinos como agente neutralizante.

3.2.- Distribución granulométrica

Tabla 3.5: Distribución granulométrica de los minerales estudiados (fracción, % en peso)

Mineral	DISTRIBUCIÓN DIFERENCIAL						
	ABERTURAS DE LOS TAMICES (mm)						
	+0,83	-0,83 +0,40	-0,40 +0,20	-0,20 +0,15	-0,15 +0,074	-0,074 +0,044	-0,044
M-4	0,131	0,919	0,430	3,311	1,404	2,500	91,305
M-5	0,430	0,918	0,780	3,650	1,860	3,950	88,412
M-6	0,110	0,430	0,520	3,220	0,800	3,240	91,680

Tabla 3.6: Distribución granulométrica acumulativa de los minerales estudiados (fracción acumulativa, % en peso)

Mineral	DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA						
	ABERTURAS DE LOS TAMICES (mm)						
	-0.044	+0.044	0.074	0.15	0.20	0.40	0.83
M-4	91,31	93,81	95,21	98,52	98,95	99,87	100,00
M-5	88,41	92,36	94,22	97,87	98,65	99,57	100,00
M-6	91,68	94,92	95,72	98,94	99,46	99,89	100,00

Se puede ver en la tabla 3.5 que los minerales utilizados poseen un alto contenido de partículas finas, lo cual hace que los efectos superficiales se acentúen.

Discusión de los resultados

Se inició el trabajo con un análisis de tres diferentes muestras de menas minerales, dos procedentes de la región de Moa y una tercera de la región de

Cajalbana en Pinar del Río. Inicialmente se hicieron pruebas de estabilidad, donde se determinó el punto de carga cero, luego se hicieron pruebas de reología, con todo lo cual se determinó que mena utilizar en las pruebas de sedimentación, las cuales se llevaron a cabo primero en probetas, donde se determinó el efecto de un aditivo con posibilidades de mejorar la compactación de las pulpas concentradas; luego se probaron las mismas condiciones a escala de miniplanta piloto. Las variables utilizadas fueron el tipo de floculante y la concentración del aditivo.

Pruebas de estabilidad

La determinación de las curvas de estabilidad y del punto de carga cero de las suspensiones analizadas, se llevó a cabo con un electrolito indiferente, el Nitrato de Potasio (KNO_3) a una concentración de 0,1 molar. Para la medición, se preparó una suspensión con agua de rebose con una concentración de sólidos de 100 g/L.

En los siguientes gráficos se comparan los resultados a diferentes relaciones Aditivo/Masa de sólidos (en %) para una misma mena y su efecto sobre las diferentes menas.

Por estudios anteriormente realizados, se conoce que las fases mineralógicas presentes en la laterita ejercen una fuerte influencia en sus propiedades superficiales exhiben un punto de carga cero hacia pH más altos, en el caso de la Goethita, o más bajos, para la Gibbsita y la Serpentina, oscilan en un rango desde 5,0 hasta 8,5. Al analizar el gráfico 3.1 se aprecia que todos los valores de punto de carga cero de las muestras son elevadas, llegan incluso a valores de pH- 9, como es el caso de la muestra M-5, para confirmar los resultados obtenidos en el análisis químico y granulométrico y la presencia predominante de Goethita en las menas escogidas.

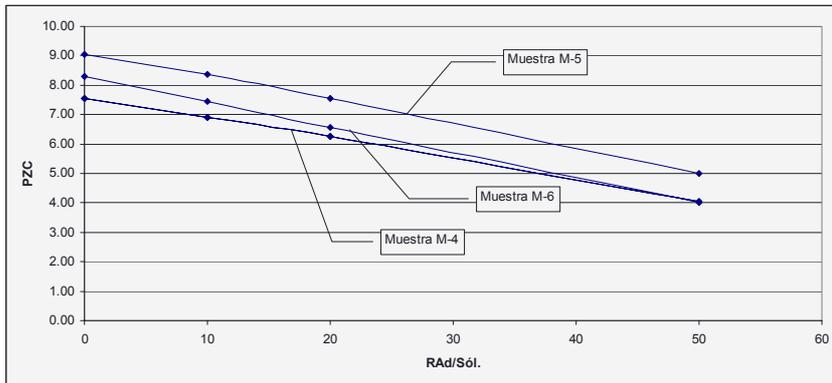


Gráfico 3.1: P.Z.C. vs Relación aditivo/masa de sólido para diferentes menas de minerales (ver Tabla A-1, A-2 y A-3 en el Anexo).

En este gráfico (gráfico 3.1) se observa la regularidad de la influencia del aditivo utilizado, y como para todas las menas el p.z.c. disminuye linealmente con el incremento de la Relación Aditivo/sólido (RAd/Sól.), característico de la absorción de cationes. El pH presenta una tendencia similar, también disminuye, pero no linealmente, sino que más bien manifiesta una disminución más suave para valores elevados de la RAd/Sól. (gráfico 3.2), puede observarse que en cada uno de los puntos el pH es inferior al valor del p.z.c., pero la diferencia entre ellos tiende a disminuir si se incrementa la RAd/Sól, lo que puede indicar la disminución de la densidad de carga superficial de las partículas (σ_p) (ver tablas 3.7, 3.8 y 3.9), lo que puede facilitar la floculación espontánea de las partículas en la pulpa.

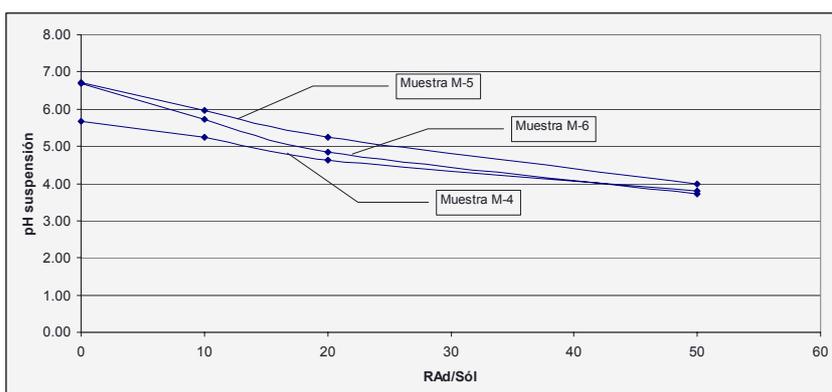


Gráfico 3.2: pH de la suspensión vs Relación aditivo/masa de sólido para diferentes minerales (ver Tabla A-4, A-5 y A-6 en el Anexo).

Tabla 3.7: P.Z.C., pH y la diferencia entre ellos a diferentes Relación aditivo/masa de sólido para la mena M-4.

RAd/Sól.	P.Z.C.	pH susp.	Diferencia
Sin aditivo	7,54	5,67	1,87
10 %	6,90	5,25	1,66
20 %	6,26	4,63	1,64
50 %	4,06	3,79	0,28

Tabla 3.8: P.Z.C., pH y la diferencia entre ellos a diferentes Relación aditivo/masa de sólido para la mena M-5.

RAd/Sól.	P.Z.C.	pH susp.	Diferencia
Sin aditivo	9,04	6,73	2,32
10 %	8,37	5,96	2,42
20 %	7,56	5,25	2,31
50 %	5,01	3,98	1,03

Tabla 3.9: P.Z.C., pH y la diferencia entre ellos a diferentes Relación aditivo/masa de sólido para la mena M-6.

RAd/Sól.	P.Z.C.	pH susp.	Diferencia
Sin aditivo	8,29	6,68	1,60
10 %	7,43	5,74	1,70
20 %	6,56	4,84	1,72
50 %	4,00	3,71	0,29

Reología y sedimentación

Para la comparación de las características reológicas se prepararon pulpas a 46 % de sólidos sin aditivo, estas pruebas se realizaron en un reómetro rotacional Rheotest 2. Con las mismas se busca comparar características como la fluencia

de las pulpas, y como puede apreciarse en el gráfico que a continuación se presenta (gráfico 3.3) al cotejar las curvas se puede comprobar que la pulpa de mejores características reológicas es la de la muestra M-6.

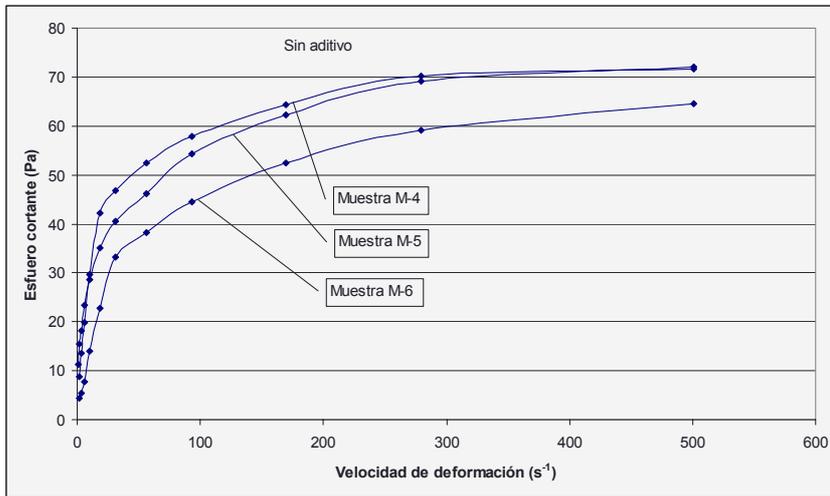


Gráfico 3.3: Comparación entre las curvas de flujo de las pulpas concentradas (~46 % de sólidos) de las diferentes menas (ver Tabla A-7 en el Anexo).

Como se puede apreciar en el gráfico 3.4 la mena M-6 es una de las de mejor sedimentación, por lo tanto se seleccionó esta muestra para la realización de las pruebas comparativas de sedimentación, con el uso de diferentes floculantes y RAd/Sól.

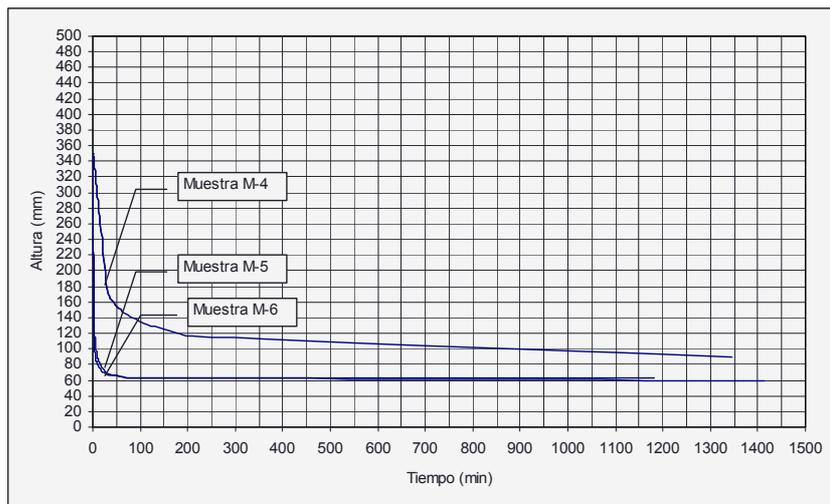


Gráfico 3.4: Comparación entre las curvas de sedimentación de las pulpas de diferentes menas (ver Tabla A-8, A-9 y A-10 en el Anexo).

Para utilizar esta mena M-6 se compararon las efectividades de diferentes floculantes en la sedimentación de la pulpa (en las condiciones del sedimentador de alto rate, con el objetivo de encontrar, posteriormente, el adecuado para su uso con el aditivo que se utilizó. Es encontrar un aditivo que permita incrementar la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador de alto rate, mediante la disminución de la fortaleza de los flóculos formados, de manera tal que puedan romperse por el rastrillo o al menos que disminuya su resistencia y liberen el agua que retuvieron durante su formación. Por lo tanto se escogió el floculante de mejores características en cuanto a velocidad de sedimentación, que es sinónimo de flóculos más fuertes y grandes, para que mantuviera parte de estas propiedades cuando se añadiera el aditivo. Como puede verse en el gráfico 3.5, el de mejores resultados fue el VHR – 920.

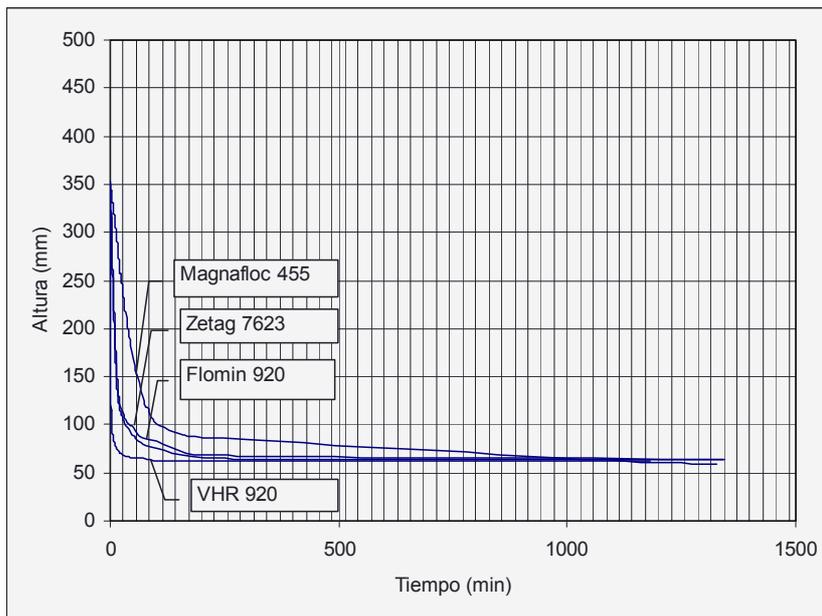


Gráfico 3.5: Comparación entre las curvas de sedimentación de las pulpas de M-6 con diferentes floculantes (ver Tabla A-11, A-12, A-13 y A-14 en el Anexo).

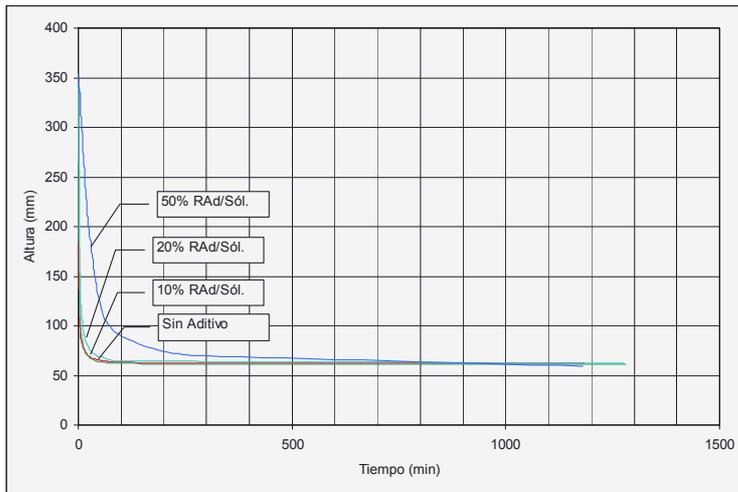


Gráfico 3.6: Comparación entre las curvas de sedimentación de las pulpas de M-6 con el floculante VHR – 920 y diferentes dosis de aditivo (ver Tabla A-14, A-15, A-16 y A-17 en el Anexo).

Como puede observarse en el gráfico 3.6 el incremento de la dosis de aditivo empeora la velocidad de sedimentación y como a bajas dosis (10 %) no hay un cambio apreciable, se observa un ligero cambio a partir de una dosis de 20 %, ya en 50 % se nota un deterioro apreciable de las condiciones. Esto es una medida de que los flóculos que se forman son mucho menores, lo que permitirá que en la pulpa concentrada se acomoden mucho mejor y retengan menores cantidades de agua, como puede verse por los resultados al cabo de 24 horas de la concentración de sólidos de las pulpas concentradas en las pruebas de probetas (tabla 3.10).

Tabla 3.10: Por ciento de sólido de la pulpa concentrada a diferentes Relación aditivo/masa de sólido resultados a 24 horas de las pruebas de probeta.

RAd/Sól.	%Sólido
Sin aditivo	31,94
10 %	32,82
20 %	33,02
50 %	33,70

Se observó (gráfico 3.7) que las características reológicas mejoran, con dosis de 10 y 20 % la disminución de la viscosidad es importante y mucho más notable a dosis de 50 %.

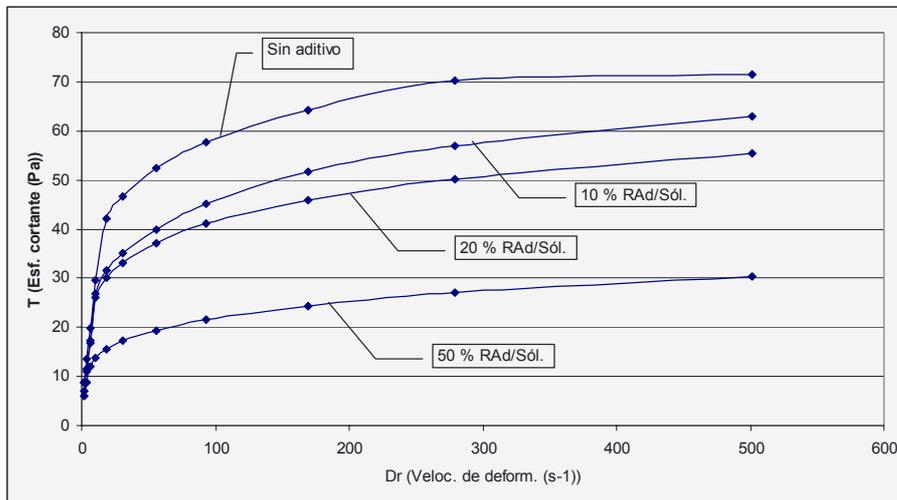


Gráfico 3.7: Comparación entre las curvas de flujo de las pulpas de M-6 con diferentes dosis de aditivo (ver Tabla A-7 y A-18 en el Anexo). 10 %

Esto da una medida de las posibilidades del uso de este aditivo, pues permitirá obtener pulpas con una mayor fluencia, que es una de los obstáculos que se presentan en la industria que impide que se alcancen altas concentraciones de sólidos en las pulpas espesadas.

Análisis estadístico de los resultados experimentales de los ensayos de la Sedimentación continua.

En este epígrafe se presentan los resultados experimentales obtenidos, aplicados en el diseño experimental descrito en el capítulo 2, así como el análisis y discusión de los mismos. El mismo consistió en un diseño estadístico experimental 2^2 , en un proceso continuo a escala de miniplanta.

Se tomó como variable respuesta la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador, expresada como % Sólidos. Se designaron como variables independientes: relación de aditivo por la cantidad de sólido en la suspensión, expresada como Adit y la dosis de floculante, expresada como Floc.

Tabla 3.11. Variables codificadas.

Nº de Exp.	X1	X2	Adit, %	Floc, g/t
1	-1	-1	20	80
2	+1	-1	50	80
3	-1	+1	20	120
4	+1	+1	50	120

Tabla 3.12. Resultados de las variables respuesta.

Nº de Exp.	Adit.	Floc.	%Sólidos	Viscosidad
1	-1	-1	38,60	0,4051
2	+1	-1	38,93	0,1379
3	-1	+1	37,64	0,2209
4	+1	+1	40,30	0,1414
5	-1	-1	39,51	0,3100
6	+1	-1	40,13	0,1406
7	-1	+1	34,74	0,2594
8	+1	+1	39,80	0,1239
9	-1	-1	39,00	0,2149
10	+1	-1	41,20	0,0988
11	-1	+1	35,00	0,2484
12	+1	+1	37,68	0,1403

El procesamiento de estos datos fue realizado a través del programa STATGRAPHICS PLUS 5.1. El intervalo de confianza escogido para este diseño es de un 95 % de probabilidad, todos los factores e interacciones que tengan un p-

valor (valor probable) mayor que 0,05 (los cuales pueden también identificarse gráficamente (gráfico 3.8), si sobrepasan la línea vertical azul) no tiene significación estadística y por lo tanto pueden eliminarse sin una repercusión grave en los resultados del modelo. En este caso, el término que tiene el p-valor mayor que 0,05 fue solamente la interacción entre las dos variables.

Concentración de sólidos en la descarga del sedimentador

En el gráfico 3.8 se muestra el diagrama de Pareto, en el que se describen los efectos sobre la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador de todos los factores de influencia considerados y de su respectiva interacción. Como puede verse las dos variables estudiadas fueron estadísticamente significativas, y los efectos de ambas variables resultaron en correspondencia a los resultados alcanzados en las pruebas de probeta (tabla 3.10), en los resultados que brinda este gráfico se nota que el aditivo tiene un efecto positivo, mientras que el del floculante es negativo, resultados que fueron pronosticados en las pruebas a escala de laboratorio (pruebas de probetas). Se presentó el inconveniente de que, a pesar de que se alcanzaron resultados positivos con el uso del aditivo, las concentraciones de sólidos en la descarga del sedimentador miniplanta no superaron las alcanzadas en el sedimentador industrial (41 %) (gráfico 3.9), que era lo que se buscaba, donde el máximo valor alcanzado apenas supera el 40 % de sólidos.

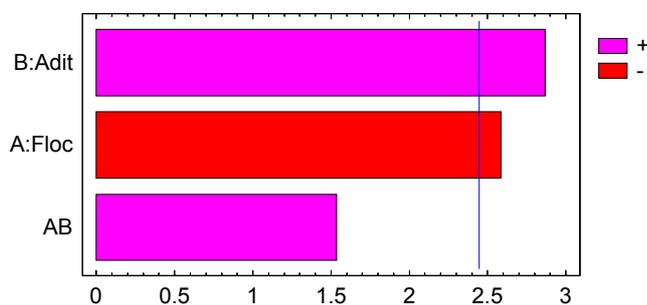


Gráfico 3.8: Diagrama de Pareto estandarizado para la concentración de sólido en la prueba de sedimentación continua.

En este caso, por la información que brinda el diagrama de Pareto se puede ver que si se elimina la interacción entre las variables el error no sería demasiado grave.

Para el intervalo de confianza establecido en este diseño (95 % de confiabilidad) se comprueba que el ajuste del modelo se considera bueno, pues así lo indica el estadístico R^2 (74,67 % (hasta 70 % se considera aceptable)). El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa entre las variables independientes. Como el p-valor es superior a 0,05, indica que no existe dependencia entre las variables consideradas independientes.

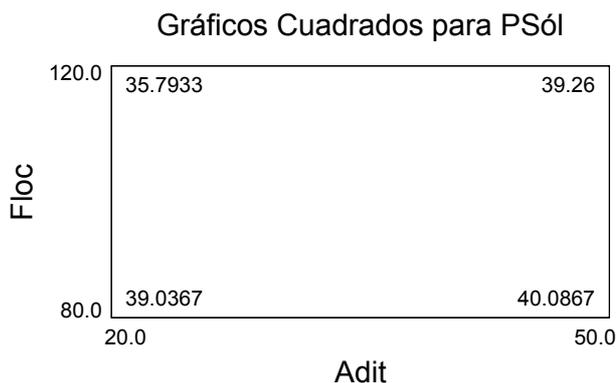


Gráfico 3.9: Diagrama de Cuadrado estandarizado para la concentración de sólido en la prueba de sedimentación continua.

Al volver al gráfico 3.9 puede apreciarse el efecto del aditivo, como el mismo mejora efectivamente la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador en cualquiera de las condiciones, aun más cuando la dosis de floculante es baja, al justificar lo planteado en la hipótesis, de que cuando se le adiciona el aditivo propuesto los flóculos se hace más débiles y más pequeños, y permite que el agua se escurra e incrementar de esta forma la concentración de sólidos.

En el gráfico 3.10 se puede apreciar con mayor claridad la interacción entre el floculante y el aditivo, siempre al disminuir la dosis de floculante mejora la concentración de sólido, aunque es menor este efecto para altas concentraciones de aditivo.

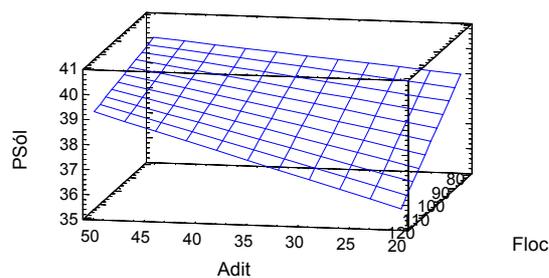


Gráfico 3.10: Diagrama de Superficie para la concentración de sólido en la prueba de sedimentación continua.

El modelo estadístico obtenido para la concentración de sólidos en la descarga del sedimentador en función de las variables codificadas es el siguiente:

$$\text{Sólido} = 38,5442 - 1,0175 \text{ Floc} + 1,12917 \text{ Adit} + 0,604167 \text{ Floc Adit}$$

Viscosidad

Haciendo el análisis de la viscosidad, que como se dijo fue determinada a una velocidad de deformación de 280 s^{-1} a una concentración de sólidos de 46 %, se puede observar en el gráfico 3.11 (diagrama de Pareto) como solamente el aditivo tuvo significación estadística y tiene un efecto negativo sobre la viscosidad, es decir que él contribuye a que la viscosidad disminuya, resultado de cierta forma pronosticado en las pruebas de probeta. Como puede notarse el floculante tuvo un resultado contrario a lo esperado, puesto que un incremento de la dosis de floculante debería conllevar a un incremento de la viscosidad, pero es probable que en los niveles utilizados ésta no fuera sensible a su variación. Ahora bien como su efecto no es estadísticamente significativo no se analizará, ya que las

variaciones que manifestó pueden deberse al efecto de alguna otra variable no considerada,

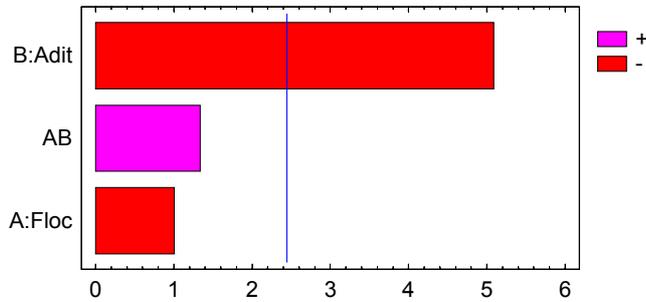


Gráfico 3.11: Diagrama de Pareto estandarizado para la viscosidad en la prueba de sedimentación continua.

Para el intervalo de confianza establecido en este diseño (95 % de confiabilidad) comprueba que el ajuste del modelo se considera bueno, pues así lo indica el estadístico R^2 (83,67 %). El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa entre las variables independientes. Como el p-valor es inferior a 0,05, indica que puede existir dependencia entre las variables consideradas independientes, pero como puede verse por el gráfico 3.12 no se observa que la curva muestre un modelo específico por lo que no existe dependencia entre las variables independientes

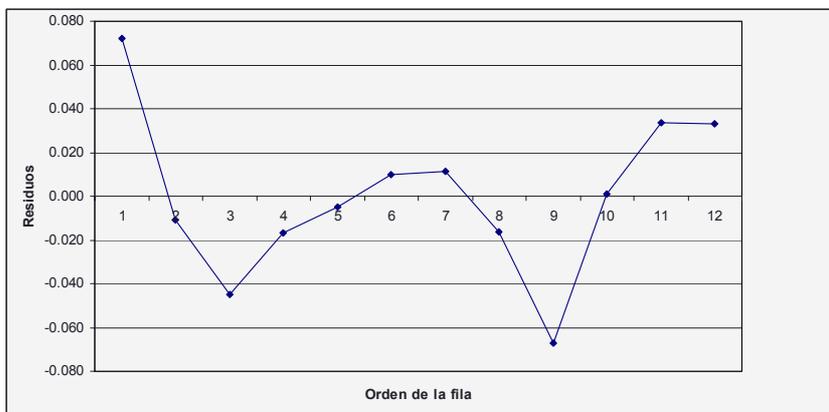


Gráfico 3.12: Diagrama de residuos para la viscosidad en la prueba de sedimentación continua.

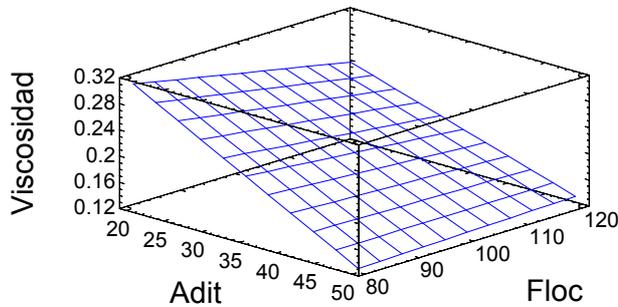


Gráfico 3.13: Diagrama de superficie para la viscosidad en la prueba de sedimentación continua.

Como puede apreciarse en el gráfico 3.13 el aditivo, en los niveles estudiados, tiene una influencia muy importante sobre la viscosidad, contribuyendo a la disminución de la misma para cualquier dosis de floculante.

El modelo estadístico obtenido para la viscosidad de la pulpa que sale en la descarga del sedimentador en función de las variables codificadas y que elimina las variables no significativas es el siguiente:

$$\text{Viscosidad} = 0,203475 - 0,072998 \text{ Adit}$$

CONCLUSIONES

- a. Se comprueba que la adición de los electrolitos que contienen iones Mg^{2+} , SO_4^{2-} y Al^{3+} , dan lugar a cambios en el pH y en el Punto de Carga Cero (PZC) de las suspensiones. Con el logro de la disminución del pH natural de las pulpas (desde un valor en los alrededores de 6 hasta 4) y el PZC (desde valores de aproximadamente 8,0 hasta 4,5)
- b. Con la adición del floculante VHR – 920 y una relación Aditivo/Sólido de 50 %, se logra mejor compactación, mayor concentración de sólido en la pulpa y mejora la fluidez de la misma
- c. Estadísticamente sobre la concentración de sólidos, el floculante VHR – 920 tuvo un efecto negativo, mientras que el Aditivo actuó positivamente. Los que fueron resultados esperados en las pruebas de probeta
- d. Los resultados esperados no se alcanzan, ya que la máxima concentración de pulpa obtenida fue ligeramente por encima de 40 %, lo cual está ligeramente por debajo del requerimiento industrial.

RECOMENDACIONES

1. Profundizar en el estudio del efecto del licor Aditivo para incrementar las RAd/Sól para de esta forma incrementar las concentraciones de sólido en la descarga del sedimentador.

NOMENCLATURA.

γ	Velocidad de deformación	.....	(s ⁻¹)
μ	Viscosidad de la suspensión	.....	(Pa.s)
μ_a	Viscosidad aparente	.....	(Pa.s)
μ_p	Viscosidad plástica	.....	(Pa.s)
ρ	Densidad relativa del sólido	.....	(g/cm ³)
ρ_A	Densidad del agua	.....	(g/cm ³)
ρ_S	Densidad del sólido	.....	(g/cm ³)
ρ_{SUSP}	Densidad de la suspensión	.....	(g/cm ³)
ρ_P	Densidad de la pulpa	.....	(g/cm ³)
σ_0	Densidad de carga superficial	.....	(C/m ²)
τ	Esfuerzo cortante	.....	(Pa)
τ_0	Esfuerzo cortante inicial	.....	(Pa)
ξ	Potencial Zeta	.....	(mV)
A.C	Agua cruda (agua industrial)		-
Ad-N	Licor de desecho neutralizado		-
Ad-SN	Licor de desecho sin neutralizar		-
i.e.p	Punto isoeléctrico	.....	Adim
K	Indice de consistencia	.....	Adim
n	Indice de flujo	.....	Adim
p.z.c.	Punto de carga cero	.....	Adim
t	Tiempo de sedimentación	.....	(min)

V_P	Volumen de pulpa	.....	(ml)
V	Volumen	.....	(ml)
Z	Altura de la interfase	.....	(mm)
Z_f	Altura final	.....	(mm)
Z_0	Altura inicial	.....	(mm)
% S	Por ciento de sólido	.....	(%)

BIBLIOGRAFÍA.

- Almaguer Furnaguera, A. 1996: "Composición de las pulpas limoníticas de la "Pedro Sotto Alba". Parte II Periodo de crisis de sedimentación". Revista Minería y Geología, Vol. XIII, N°1.
- Avotins, P. A. 1979: "The Rheology and handling of Laterite slurries". In International Lateritic Symposium, New York.
- Avramidis, K. S. and R. M. Turian. 1991: "Yield Stress of Laterite Suspensions". J. Colloid Interface Sci., Vol. 143, N°1, Abril.
- Beyris Mazar, P. y J. Falcón Hernández. 1985: "Estudio de la preparación de mineral y su influencia en la velocidad de sedimentación". Revista Minería y Geología, Vol. 1.
- Beyris Mazar, P. y D. C. West Domínguez. 1992: "Estudio de la homogeneización del mineral limonítico en la sedimentación a escala semi-industrial". Revista Minería y Geología, N°1.
- Beyris Mazar, P. y et al. 1996: "Comportamiento de distintos tipos de iones durante el proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas", Revista Minería y Geología, Vol. XIII, N°2.
- Breeuwsma, A. and J. Lyklema. 1973: "Physical and Chemical Adsorption of Ions in the Electrical Double Layer on Hematite (α -Fe₂O₃)", J. Colloid Interface Sci., Vol. 43, N°2, Mayo.
- Brown, G. G. et al. 1963: "Operaciones básicas de la Ingeniería Química". Editorial Marín, S.A., Barcelona.
- Cerpa. A et al. 1998: "Mineral-Content and Particle Size Effects on the Colloidal Properties of Concentrated Laterite Suspensions", Clays and Clay Minerals, Vol.47, No.4, 515-521,.
- Cerpa A. y L. R. Garcell. 1998: "Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas", Informe al evento Metalurgia, 98, Ciudad de la Habana,.

- Cornell, R. M. and U. Schwertmann. 1996.: "The Iron Oxides", Editorial VCH, Weiheim,
- Cheng, D. C. H. 1980: Viscosity – concentration equations and flow curves for suspensions". Chemistry and Industry, 17 Mayo.
- Darby. R. 2000: "Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids", in Flow Dynamics and Transport Phenomena.
- Darias Pérez, M. 1988: "Introducción a la Química Coloidal", Editorial ENPES, Santiago de Cuba.
- Falcón Hernández, J. 1983: "Consideraciones sobre la sedimentación de la pulpa limonítica en la planta "Pedro Sotto Alba"". Revista Minería y Geología, Vol. 2.
- Falcón Hernández, J., y et al. 1997: "Sedimentación de la pulpa cruda en la empresa Moa Nickel S.A.". Revista Minería y Geología, Vol. XIV, N°1.
- Ferrer Carbonell E. A. y G. Rosario Acosta. 1991: Estudio de la sedimentación del mineral laterítico en los espesadores de la fábrica "Comandante Pedro Sotto Alba". Revista Minería y Geología, N°3.
- Fredickson, A.G. 1964: "Principales and Applications of Rheology", Prentice-Hall Inc., New York.
- Garcell L. R. 1962: "Caracterización reológica de pulpas de limonita de Moa", Revista Tecnología Química, Vol. 3, N°2.
- Garcell, L. R., A. Díaz y G. Surís. 1988: "Transferencia de Cantidad de Movimiento, Calor y Masa". Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana.
- Garcell L. R et al. 1995: "Relación entre las características de sedimentación y granulométricas de las pulpas crudas de Moa y la presencia de determinadas fases mineralógicas". Revista Tecnología Química, vol. 15, N° 1.
- Garcell. L. R. et al. 1998: "Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions", J. Colloid Interface Sci., 205, 470-475.
- Garcell L. R. 2004: "Sedimentación de suspensiones minerales: influencia de las propiedades superficiales y reológicas sobre el proceso", Curso de

Capacitación, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

Glasstone, Samuel. 1969: "Tratado de Química Física". Edición Revolucionaria, Instituto del Libro, La Habana.

James R.O. and G.A. Parks. 1982: "Surface and Colloid Science ", (Vol.12, cap.2, p.119). Plenum Press, New York,.

Leja, Jan. 1982: "Surface Chemistry of Froth Flotation". Editorial Plenum Press, New York.

Leong, Y. K. y D. V. Boger. 1990: "Surface Chemistry Effects on Concentrated Suspension Rheology". J. Colloid Interface Sci., Vol. 136, N°1, Abril.

Leong, Y. K. et al. 1995.: "Effect of Particle Size on Colloidal Zirconia Rheology at the Isoelectric Point", J. Am. Ceram. Soc., 78 (8),

Michaels A.S. and J.C. Bolger. 1962: "Settling rates and sediment volumes of flocculated Kaolin suspensions", Ind. Eng. Chem. Fundamentals, Vol1, N°1, Feb.

Rabinóvich, E. Z. 1987: "Hidráulica". Editorial MIR, Moscú.

Rivas, S. y E. Colás. 2005: "Efecto de la granulometría y del pH sobre la reología de las suspensiones industriales de Cieno Carbonatado". Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

Rodríguez, González. O y Sánchez, Cutiño. A. 2000: "Estudio de la Sedimentación de las pulpas lateríticas y de los factores que la afectan". Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba,.

Rojas Purón, A. y P. Beyris Mazar. 1994: "influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba"". Revista Minería y Geología, Vol. 2, N°1,.

- Rosabal Vega, J. M y Valles Matos, M. 1988: "Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas" (Tomo II), Editorial Pueblo y Educación, Ciudad Habana,.
- Ross, Sydney y Ian D. Morrison.1988: "Colloidal Systems and Interfaces". John Wiley and Sons, New York,.
- Schukin, E.D., Pertsov, A.V. y Améline, E.A.: 1988 "Química Coloidal". Editorial MIR, Moscú, traducción al español ampliada y modificada, editorial MIR.
- Shaw, D. J. 1977: "Introducción a la química de superficies y coloides" 2^{da} Edición, Editorial Alambra S.A., Madrid.
- Skelland, A.H.P. 1970: "Non- Newtonian Flow and Heat Transfer", Edición Revolucionaria,.
- Torres Clavel, E. 1989: "Efecto de la interacción entre las partículas sobre el comportamiento reológico de las pulpas de las lateritas de Moa". Trabajo de Diploma. ISPJAM. Santiago de Cuba.
- Turro Breff, A. 2002: "Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal". Tesis Doctoral. Facultad de Metalurgia, ISMM, Moa.
- Valdés, F. 1984: "Fundamentos químico coloidales de la sedimentación de las pulpas acuosas del mineral laterítico". Revista Tecnológica, Vol. 14, N°3.
- ATR- Nro. 1 – 8 Newsletter. 2001"Actualidad de la tecnología en recubrimientos" (<http://www.sater.org.ar/letter8.htm#1>).

ANEXO

Tabla A.1: P.Z.C. de la muestra M-4 con diferentes fuerzas iónica de la solución.

Condiciones	P.Z.C. Muestra M-4			P.Z.C. Promedio
	0,01	0,1	Réplica	
Sin Aditivo	7,47	7,61	-	7,54
Ad 10 %	7,14	6,67	-	6,90
Ad 20 %	6,27	6,26	-	6,26
Ad 50 %	4,02	3,96	4,21	4,06

Tabla A.2: P.Z.C. de la muestra M-5 con diferentes fuerzas iónica de la solución.

Condiciones	P.Z.C. Muestra M-5			P.Z.C. Promedio
	0,01	0,1	Réplica	
Sin Aditivo	9,01	9,07		9,04
Ad 10 %	8,50	8,24		8,37
Ad 20 %	7,58	7,54		7,56
Ad 50 %	5,13	4,88		5,01

Tabla A.3: P.Z.C. de la muestra M-6 con diferentes fuerzas iónica de la solución.

Condiciones	P.Z.C. Muestra M-6				P.Z.C. Promedio
	0.01	0.1	Con paso 0.2	Hasta pH 4.5	
Sin Aditivo	8,60	8,03	8,41	8,10	8,29
Ad 10 %	7,41	7,46	-	-	7,43
Ad 20 %	6,52	6,60	-	-	6,56
Ad 50 %	4,00	4,00	4,01	-	4,00

Tabla A.4: pH de la suspensión de la muestra M-4 con diferentes fuerzas iónica de la solución.

Condiciones	pH de la suspensión a aproximadamente 10% de sól.			Promedio
	0,01	0,1	Réplica	
Sin Aditivo	5,67	5,67		5,67
Ad 10 %	5,23	5,26		5,25
Ad 20 %	4,62	4,63		4,63
Ad 50 %	3,80	3,79	3,77	3,79

Tabla A.5: pH de la suspensión de la muestra M-5 con diferentes fuerzas iónica de la solución.

Condiciones	pH de la suspensión a aproximadamente 10% de sól.			Promedio
	0,01	0,1	Réplica	Promedio
Sin Aditivo	6,71	6,74	-	6,73
Ad 10 %	5,97	5,94	-	5,96
Ad 20 %	5,25	5,25	-	5,25
Ad 50 %	3,98	3,98	-	3,98

Tabla A.6: pH de la suspensión de la muestra M-6 con diferentes fuerzas iónica de la solución.

Condiciones	pH de la suspensión a aproximadamente 10% de sólido				Promedio
	0,01	0,1	Con paso 0,2	Hasta pH 4,5	
Sin Aditivo	6,70	6,70	6,66	6,67	6,68
Ad 10 %	5,73	5,74	-	-	5,74
Ad 20 %	4,82	4,86	-	-	4,84
Ad 50 %	3,71	3,71	3,70	-	3,71

Tabla A.7: Valores de esfuerzo cortante τ (en Pa) para cada velocidad de deformación γ (s^{-1})

γ (s^{-1})	τ (Pa)		
	M-4	M-5	M-6
2,06	8,84	15,43	4,44
3,45	13,61	18,24	5,52
6,10	19,92	23,38	7,72
10,40	29,60	28,53	13,98
18,82	42,14	35,08	22,68
30,98	46,77	40,55	33,30
56,08	52,43	46,07	38,21
93,30	57,76	54,25	44,52
169,23	64,30	62,20	52,38
279,40	70,15	69,21	59,16
501,37	71,55	72,02	64,54

Tabla A.8: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-4 con floculante VHR-920 a 80 g/t.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	350,0
0,5	349,3
1,5	346,5
2,5	339,5
3,5	334,3
4,5	328,0
5,5	321,7
6,5	315,0
7,5	308,0
8,5	301,7
9,5	295,8
10,5	290,2
11,5	283,5
13,5	269,5
15,5	259,0
17,5	248,5
19,5	234,5
21,5	224,0
23,5	211,8
25,5	199,5
27,5	187,3
29,5	176,8
32,5	169,8
34,5	166,3
36,5	164,5
38,5	162,8
40,5	161,0
43,5	159,3
48,5	155,4
53,5	153,0
58,5	150,5
63,5	147,0
68,5	145,3
73,5	143,5
78,5	141,8
83,5	140,0

Tiempo (min)	H (mm)
91,5	137,2
102,5	133,7
117,5	131,3
147,5	125,3
177,5	119,7
207,5	117,3
1346,5	89,3

Tabla A.9: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-5 con floculante VHR-920 a 80 g/T.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	350,0
1,0	252,0
1,5	210,0
2,0	175,0
2,5	150,5
3,0	136,5
3,5	126,0
4,0	120,8
4,5	115,5
5,0	112,0
5,5	108,5
6,0	105,0
6,5	101,5
7,0	99,8
8,0	96,3
9,0	92,8
10,0	90,0
11,0	87,5
12,0	85,8
13,0	84,0
14,0	82,3
15,0	80,5
17,0	78,8
19,0	77,0
21,0	74,6
23,0	73,5
27,0	70,0
32,0	69,0
42,0	66,5
52,0	65,8
72,0	63,0
152,	62,3
1415	59,5

Tabla A.10: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-66 con floculante VHR-920 a 80 g/t.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	350,0
0,5	241,5
1,0	154,0
1,5	129,5
2,0	115,5
3,0	105,0
3,5	101,5
4,0	98,0
4,5	94,5
5,0	92,8
6,0	89,3
7,0	85,8
8,0	84,0
9,0	82,3
10,0	80,5
11,0	79,5
12,0	77,0
13,0	76,3
15,0	75,3
17,0	73,5
19,0	71,8
21,0	70,7
23,0	70,0
28,0	69,0
33,0	66,9
38,0	66,5
43,0	65,5
58,0	64,8
88,0	63,4
103,0	63,0
148,0	62,7
163,0	62,7
223,0	62,7
1183	62,7

Tabla A.11: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante Magnafloc 455 a 80 g/t.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	353,0
0,5	345,9
1,0	336,8
1,5	328,3
2,0	317,7
2,5	308,9
3,0	298,3
3,5	289,5
4,0	282,0
4,5	271,8
5,0	264,0
5,5	255,9
6,0	247,1
6,5	240,0
7,0	231,9
7,5	224,2
8,0	217,1
8,5	208,3
9,0	202,3
9,5	195,9
10,0	188,9
10,5	183,6
11,0	176,5
11,5	171,2
12,0	165,9
12,5	161,7
13,0	157,1
13,5	152,8
14,0	148,3
14,5	144,7
15,0	141,2
15,5	138,0
16,0	135,9
16,5	132,4
17,0	130,6
17,5	128,8
18,0	127,1
19,0	123,9
20,0	122,5

Tiempo (min)	H (mm)
21,0	120,0
22,0	118,3
23,0	116,5
24,0	114,7
26,0	112,3
28,0	109,4
30,0	106,3
32,0	105,2
34,0	102,4
39,0	98,8
44,0	95,3
49,0	93,2
54,0	90,7
59,0	88,3
69,0	84,7
79,0	81,9
104,0	77,3
134,0	73,8
179,0	70,6
239,0	68,1
329,0	67,1
1345,0	66,4

Tabla A.12: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante Zetag 7623 a 80 g/t.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	353,0
0,5	344,2
1,0	335,4
1,5	328,3
2,0	319,8
2,5	310,6
3,0	301,5
3,5	292,6
4,0	283,8
4,5	275,3
5,0	267,2
5,5	260,9
6,0	251,3
6,5	243,6
7,0	236,2
7,5	229,1
8,0	222,4
8,5	215,7
9,0	209,0
9,5	205,8
10,0	196,3
10,5	191,0
11,0	185,3
11,5	180,0
12,0	175,1
12,5	169,8
13,0	165,6
13,5	161,0
14,0	157,1
14,5	153,9
15,0	150,7
15,5	147,2
16,0	144,4
16,5	141,2
17,0	138,4
17,5	136,3
18,0	133,8
18,5	131,0

Tiempo (min)	H (mm)
19,0	128,8
19,5	127,1
20,0	126,0
22,0	121,1
24,0	117,2
27,0	113,0
29,0	110,1
32,0	106,3
37,0	102,4
43,0	98,8
52,0	97,4
62,0	89,3
72,0	86,1
102,0	83,0
167,0	71,0
237,0	68,1
297,0	67,1
1342,0	63,5

Tabla A.13: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante Flomin 920 a 80 g/t.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	350,0
0,5	342,9
1,0	333,8
1,5	325,3
2,0	314,7
2,5	305,9
3,0	295,3
3,5	286,5
4,0	279,0
4,5	268,8
5,0	261,0
5,5	252,9
6,0	244,1
6,5	237,0
7,0	228,9
7,5	221,2
8,0	214,1
8,5	205,3
9,0	199,3
9,5	192,9
10,0	185,9
10,5	180,6
11,0	173,5
11,5	168,2
12,0	162,9
12,5	158,7
13,0	154,1
13,5	149,8
14,0	145,3
14,5	141,7
15,0	138,2
15,5	135,0
16,0	132,9
16,5	129,4
17,0	127,6
17,5	125,8
18,0	124,1
19,0	120,9

Tiempo (min)	H (mm)
20,0	119,5
21,0	117,0
22,0	115,3
23,0	113,5
24,0	111,7
26,0	109,3
28,0	106,4
30,0	103,3
32,0	102,2
34,0	99,4
39,0	95,8
44,0	92,3
49,0	90,2
54,0	87,7
59,0	85,3
69,0	81,7
79,0	78,9
104,0	74,3
134,0	70,8
179,0	67,6
239,0	65,1
329,0	64,1
1345,0	63,4

Tabla A.14: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante VHR-920 a 80 g/t

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	350,0
0,5	241,5
1,0	154,0
1,5	129,5
2,0	115,5
3,0	105,0
3,5	101,5
4,0	98,0
4,5	94,5
5,0	92,8
6,0	89,3
7,0	85,8
8,0	84,0
9,0	82,3
10,0	80,5
11,0	79,5
12,0	77,0
13,0	76,3
15,0	75,3
17,0	73,5
19,0	71,8
21,0	70,7
23,0	70,0
28,0	69,0
33,0	66,9
38,0	66,5
43,0	65,5
58,0	64,8
88,0	63,4
103,0	63,0
148,0	62,7
163,0	62,7
223,0	62,7
1183,0	62,7

Tabla A.15: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante VHR-920 a 80 g/t y 10 % de RAd/Sól.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	353,0
0,5	282,4
1,0	218,9
1,5	165,9
2,0	141,2
2,5	127,1
3,0	120,0
5,0	100,6
6,0	95,3
7,0	91,8
8,0	88,3
9,0	84,7
10,0	83,0
11,0	81,2
12,0	78,4
13,0	77,3
14,0	75,9
15,0	74,5
16,0	73,8
18,0	72,0
20,0	70,6
22,0	69,9
24,0	68,8
26,0	67,8
31,0	66,4
36,0	65,3
47,0	63,5
108,0	62,5
233,0	61,8
1281,0	61,1

Tabla A.16: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante VHR-920 a 80 g/t y 20 % de RAd/Sól.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	345,0
0,5	317,4
1,0	286,4
1,5	255,3
2,0	227,7
2,5	203,6
3,0	182,2
3,5	162,5
4,0	150,1
4,5	141,1
5,0	134,2
5,5	128,0
6,0	123,5
6,5	119,7
7,0	116,3
7,5	112,8
8,0	110,1
9,0	104,9
10,0	100,4
11,0	96,9
12,0	94,2
13,0	92,5
14,0	89,7
16,0	86,3
18,0	83,5
20,0	81,8
22,0	79,4
24,0	78,3
26,0	75,9
28,0	75,2
30,0	74,2
35,0	72,5
40,0	70,7
45,0	69,0
50,0	68,3
60,0	67,3
71,0	65,6
101,0	64,9

Tiempo (min)	H (mm)
229,0	64,2
357,0	63,8
1277,0	62,4

Tabla A.17: Datos de sedimentación de altura de cama de sólido muestra M-6 con floculante VHR-920 a 80 g/t y 50 % de RAd/Sól.

Tiempo (min)	H (mm)
0,0	354,0
1,0	346,9
3,0	336,3
4,0	330,3
5,0	323,9
6,0	315,1
7,0	309,8
8,0	302,7
9,0	293,8
10,0	288,5
11,0	279,7
12,0	272,6
13,0	265,5
14,0	258,4
15,0	251,3
16,0	244,3
17,0	237,2
18,0	231,9
19,0	225,9
20,0	219,5
21,0	214,2
22,0	209,6
23,0	205,3
25,0	198,2
26,0	194,3
28,0	187,6
29,0	182,3
30,0	178,8
31,0	176,3
32,0	171,7
33,0	169,6
34,0	166,4
35,0	162,8
36,0	159,3
37,0	155,8
38,0	154,0
39,0	150,5
40,0	148,7

Tiempo (min)	H (mm)
41,0	145,1
42,0	141,6
44,0	138,1
46,0	132,8
50,0	123,9
55,0	115,1
61,0	108,0
66,0	104,4
71,0	100,9
81,0	95,6
91,0	92,0
101,0	89,2
141,0	81,4
181,0	76,8
201,0	74,3
245,0	70,8
265,0	70,1
1181,0	59,1

Tabla A.18: Valores de esfuerzo cortante τ (en Pa) para cada velocidad de deformación γ (s^{-1}), para diferentes RAd/Sól para la muestra M-6.

γ (s^{-1})	τ (Pa)		
	10 %	20 %	50 %
2,06	8,70	6,92	6,13
3,45	11,41	10,99	8,79
6,10	16,79	17,35	11,93
10,40	26,75	26,14	13,80
18,82	31,66	30,12	15,67
30,98	35,17	33,20	17,40
56,08	39,80	37,09	19,27
93,30	45,04	41,01	21,61
169,23	51,58	45,78	24,37
279,40	56,96	50,27	26,98
501,37	62,90	55,51	30,40