



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SEDIMENTACIÓN DE PULPAS MINERALES LATERÍTICAS EN LA
TECNOLOGÍA CARBONATO AMONIACAL Y SU INFLUENCIA EN EL
CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS SEDIMENTADORES**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: MIGUEL JIMÉNEZ GUILARTE

MOA – 2014



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SEDIMENTACIÓN DE PULPAS MINERALES LATERÍTICAS EN LA
TECNOLOGÍA CARBONATO AMONÍACAL Y SU INFLUENCIA EN EL
CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS SEDIMENTADORES**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: MIGUEL JIMÉNEZ GUILARTE

TUTOR: ASIST. ING. MURPIS POMPA LARRZABAL

MOA - 2014

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Miguel Jiménez Guilarte

Autor de esta tesis de grado, certifica su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Miguel Jiménez Guilarte

Ing. Murpis Pompa Larrazábal

PENSAMIENTO



No debe perderse el tiempo en sufrir,
debe emplearse en cumplir con nuestro deber.

José Martí

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor por la ayuda brindada para la realización del trabajo.

Ing. Murpis Pompa Larrazabal

A todos los que sirvieron de empuje en la culminación de la tesis.

En especial a mi primo Ing. Oscar Londres Guilarte

A. Ing. Sorangel Rivas Romero.

Tecnóloga de Procesos Alicia Pearson Francis

A la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de
Formarme como profesional.

A todos:

Eterno Agradecimiento.

SÍNTESIS

El propósito de esta investigación es determinar la influencia del proceso de sedimentación de las pulpas minerales lateríticas en el consumo de energía de los sedimentadores. Para llevar a efecto este propósito se empleó el diseño factorial completo, donde se estudiaron como variables, la velocidad de sedimentación en función de la concentración de sólidos en peso durante la sedimentación de estas pulpas. El estudio se realizó a escala de laboratorio evaluándose el comportamiento de tres niveles de concentración de sólidos: 17 %, 27% y 46% concentración de sólidos en peso. Se le efectuó un estudio reológico de las pulpas para las diferentes concentraciones de sólidos. Se obtienen a partir del estudio del proceso de sedimentación y la reología el área de sedimentación necesaria en los sedimentadores para poder llevar a cabo la sedimentación ininterrumpida. Luego se demostró a través del método Talmage y Fitch y de ecuaciones empíricas que relacionan los factores que influyen en el proceso de sedimentación con el consumo de energía en los sedimentadores. En el trabajo se confirma la relación entre el proceso de sedimentación con el consumo de energía de los sedimentadores y se realiza una evolución económica y de impacto ambiental.

ABSTRACTS

The purpose of this investigation is to determine the influence of the process of sedimentation of the pulps mineral lateríticas in the energy consumption of the thickener. To take to effect this purpose the complete factorial design it was used, where they were studied as variables, the sedimentation speed in function of the concentration of solids in weight during the sedimentation of these pulps. The study was carried out to laboratory scale being evaluated the behavior of three levels of concentration of solids: 17%, 27% and 46% concentration of solids in weight. It was made a study reologic of the pulps for the different concentrations of solids. They are obtained starting from the study of the sedimentation process and the rheology the area of necessary sedimentation in the thickener to be able to carry out the uninterrupted sedimentation. Then it was demonstrated through the method Talmage and Fitch and of empiric equations that relate the factors that influence in the sedimentation process with the energy consumption in the thickener. In the work confirms the relationship among the sedimentation process with the energy consumption of the thickener and it is carried out an economic evolution and of environmental impact.

INTRODUCCIÓN GENERAL	Pág.
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Generalidades sobre los procesos de sedimentación	1
1.2.1 Tipología de procesos de sedimentación	7
1.2.2 Desarrollo del conocimiento sobre los procesos de sedimentación	9
1.3 Investigaciones precedentes relacionadas con los procesos de sedimentación	12
1.3.1 Sedimentación de pulpas minerales lateríticas	12
1.3.2 Modelación de los procesos de sedimentación	12
1.4 Teoría básica sobre los procesos de sedimentación	14
1.4.1 Sedimentación de partículas floculentas.	15
1.4.2 Zonas de sedimentación	15
1.4.3 Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación	16
1.4.4 Factores que influyen en el proceso de sedimentación	16
1.5 Sedimentación continua. Tipología de sedimentadores o espesadores	17
1.5.1 Consideraciones para el diseño de sedimentadores	19
1.5.2 Metodología para el diseño de sedimentadores	21
1.5.3 Naturaleza del proceso de sedimentación. Empleo de los sedimentadores convencionales	22
1.6 Comportamiento reológico de los fluidos pulpas minerales	23
1.7 Conclusiones del capítulo 1	25
2. MATERIALES Y MÉTODOS	27
2.1. Introducción	27
2.2. Caracterización del proceso de sedimentación ininterrumpida de las pulpas minerales lateríticas	27
2.2.1. Fundamentos del proceso tecnológico	28
2.3. Procedimiento metodológico sobre la determinación del consumo de energía para sedimentación ininterrumpida en sedimentadores	29
2.4. Determinación del área de sedimentación disponible para sedimentación ininterrumpida	30
2.4.1. Cálculo del diámetro del tanque del sedimentador para sedimentación ininterrumpida	34
2.5. Requerimientos de torque operativo durante la sedimentación ininterrumpida	34
2.6. Velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo	35
2.7. Determinación de la potencia consumida en sedimentación ininterrumpida	36
2.8. Equipos. Metodologías experimentales utilizadas	37
2.8.1. Procesamiento estadístico de los datos	41
2.9. Conclusiones del capítulo 2	42
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	44
3.1. Introducción	44

3.2.	Resultados experimentales del análisis del comportamiento reológico de las pulpas minerales lateríticas	44
3.3.	Resultados experimentales del análisis de la distribución granulométrica de las pulpas minerales lateríticas	48
3.4.	Resultados del análisis de la sedimentación realizado a las pulpas minerales lateríticas	50
3.5.	Resultados de la determinación del área de sedimentación disponible para sedimentación ininterrumpida	52
3.6.	Cálculo del diámetro del tanque del sedimentador para sedimentación ininterrumpida	53
3.7.	Requerimientos de torque operativo durante la sedimentación ininterrumpida	53
3.8.	Velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo	54
3.9.	Determinación de la potencia consumida en sedimentación ininterrumpida.	55
3.10.	Valoración de las dimensiones ambiental y económica de la investigación.	56
3.10.1.	Determinación del efecto económico.	56
3.10.2.	Impacto ambiental.	58
3.11.	Conclusiones del capítulo 3.	59
	CONCLUSIONES	60
	RECOMENDACIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXO	

Introducción

INTRODUCCIÓN GENERAL

En la solución de los problemas asociados con proyectos de ampliación, modernización o diversificación de capacidades de producción de las industrias químicas y metalúrgicas, en lo que manipulan pulpas minerales lateríticas, adquiere gran importancia el conocimiento de las características del flujo de estas pulpas. Ello resulta evidente cuando se tratan problemas relacionados con el transporte de pulpas, con su calentamiento, o con sus procesamientos en diversos equipos.

Hoy en día, en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y en particular en la Unidad Básica de Producción de Lixiviación y Lavado (en lo adelante UBP de Lixiviación y Lavado) existe como **situación problemática** la confirmación de que los mecanismos de accionamiento de los sedimentadores convencionales actuales son capaces de soportar un aumento de la capacidad de la planta, de modo que se pueden procesar 8334 kg/s (500 t/h) de mineral reducido, suspendidos contenidos en una pulpa con un espesamiento previsto en el intervalo de 55 ÷ 58 % de sólidos. Esto provoca que en las mencionadas plantas persistan como **problemas no resueltos**: mecanismos de accionamiento de los sedimentadores con mecanismo de rastrillos rígidos provistos con perfiles que originan la acumulación de sólidos sobre los mismos así como, obstaculizan la remoción de eventuales incrustaciones que aumentan el peso neto de los mismos, ocasionando averías del mecanismo central de los sedimentadores con grandes pérdidas económicas en el proceso productivo; la rotura o avería del accionamiento por correas, que de no detectarse en tiempo provoca la completa solidificación del producto espesado en el interior del tanque, lo que disminuye la eficiencia metalúrgica y tecnológica del proceso en sí, dado que son menos los sedimentadores que se encuentra concentrando pulpas minerales lateríticas y por tanto el resultado final no será el mismo; la reparación del sedimentador precisa del empleo de cuantiosos recursos humanos, un grado de contaminación por el derramamiento de pulpa solidificada al suelo y los recursos destinados a solucionar la averías pueden ser muy grandes (Diagnóstico técnico de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” 2010).

Entre las causas fundamentales que motivan la citada situación problemática se encuentran: la presencia en la pulpa de partículas de sólidos muy pequeñas, menores de 50 μm (lamas), encontrándose su movimiento dominado principalmente por la fricción superficial, lo cual incrementa la viscosidad de la pulpa y reduce la claridad de separación (Kell & Spottiswood 1982; Pavez 2000; Bustamante et al. 2008) y la relación que existe entre los índices tecnológicos del proceso de sedimentación y el consumo de energía en los sedimentadores, con las características y volúmenes de pulpas procesadas con el esquema actual de producción actual y sus aumentos futuros (Proyecto básico de modernización de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” 2004).

Los criterios anteriormente expuestos ratifican la necesidad de orientar la presente investigación a la búsqueda de nuevas vías para mitigar la segunda causa que da origen a la situación problemática que, a partir de la información actual disponible confirme sí los sedimentadores de la UBP de Lixiviación y Lavado pueden ser operados con las modificaciones de las condiciones de explotación actuales, o si será necesario adecuar a los mismos.

De los criterios expuestos se establece como **problema** a resolver:

El insuficiente conocimiento para confirmar que existe relación empírica entre el proceso de sedimentación y el consumo de energía de los sedimentadores, lo que dificulta el adecuado estudio de selección, evaluación y aplicación de una capacidad de accionamiento y arrastre apropiada en su mecanismo de accionamiento, para su funcionamiento normal.

Se establece como **objeto de la investigación**:

Proceso de sedimentación ininterrumpida en sedimentadores convencionales de régimen continuo de la tecnología carbonato amoniacal.

Y su **campo de acción**:

Influencia del proceso de sedimentación en el consumo de energía de los sedimentadores convencionales de régimen continuo.

Dado el problema a resolver se formula como **hipótesis**:

El estudio mediante el método lógico, de los fundamentos teóricos y empíricos existentes acerca del proceso de sedimentación, conjugados con métodos empíricos, permite confirmar la influencia de la sedimentación en el consumo de energía de los sedimentadores; y con ello la selección, evaluación y aplicación de una capacidad de accionamiento y arrastre suficiente.

Se define como **objetivo general**:

Confirmar sí el proceso de sedimentación ejerce influencia notable en el consumo de energía de los sedimentadores; basado en el establecimiento del trabajo y el consumo de potencia requeridos para hacer girar el agitador de rastrillo dado con una velocidad establecida en contra de los sólidos sedimentados.

De acuerdo con el objetivo propuesto, se establece como **tareas a desarrollar**:

1. Desarrollo de una perspectiva teórica a partir de la revisión bibliográfica y la construcción del marco teórico conceptual de la investigación relacionado con el objeto de estudio.
2. Planificación y desarrollo de experimentos.
3. Confirmación de la relación entre el proceso de sedimentación, y el consumo de energía de los sedimentadores.
4. Análisis de las incidencias económicas y ambientales asociados al proceso de sedimentación.

Capítulo 1

Marco Teórico Conceptual De La Investigación

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En innumerables tecnologías de las industrias (química, el tratamiento de residuales, la metalurgia extractiva y la alimenticia) se pone en práctica la sedimentación gravimétrica, proceso basado en la capacidad que tiene el sólido en un sistema líquido-sólido de sedimentar bajo la acción de la fuerza de gravedad y posteriormente consolidarse de modo que se obtiene un licor clarificado, virtualmente libre de partículas sólidas, y un producto espesado con bajo contenido de líquido, en el intervalo de $35 \div 60 \%$ (Mariño et al. 2007). La sedimentación es un fenómeno natural que sustenta una de las operaciones básicas de más solera en ingeniería de procesos, cuyas aplicaciones más eficientes y económicas, y cuyos más estimulantes requerimientos, tienen lugar con frecuencia en el ámbito de plantas de proceso de minerales (Mular y Bhappu 1982).

En el presente capítulo se establece como **objetivo:** desarrollar una perspectiva teórica, a partir de la revisión de las bibliografías existentes, que permitan construir el marco teórico conceptual relacionado con el proceso de sedimentación de pulpas minerales lateríticas, y su influencia en el consumo de energía en los sedimentadores.

1.2. Generalidades sobre los procesos de sedimentación

El proceso de sedimentación, es la técnica de separación líquido-sólido que ha adquirido mayor difusión, tanto en el procesamiento de minerales como en la hidrometalurgia, debido a que es un proceso de alta capacidad y de costo comparativamente bajo, respecto a otros procedimientos de separación de sistemas heterogéneos; esencialmente como operación de separación previa de suspensiones con la obtención de semiproductos (McCabe et al. 1991). Actualmente, una gran variedad de minerales son manipulados con múltiples aparatos donde se pone en práctica la sedimentación por varias razones: más económicos, relativa sencillez en su diseño, escaso mantenimiento; aunque sí sea dependiente de suficiente disponibilidad de espacio. A pesar de los criterios anteriores y de los esfuerzos de los analistas de sistemas y modelistas, en la actualidad, las variables o factores de que

depende la eficiencia (productividad) del proceso de sedimentación aún no han sido satisfactoriamente estudiadas y expresadas en forma de un modelo matemático general, para su utilización en el diseño de equipos de sedimentación (Lothar; 2012). Esto se debe en buena medida, que al conceptualizar la sedimentación, se simplifica considerablemente la realidad, teniendo un carácter puramente técnico y no considera el complejo mecanismo mediante el cual transcurre la operación. Siendo su descripción más académica que real (King 1982; Mariño et al. 2010).

Así, procesos como la sedimentación se hacen de importancia relevante en el proceso de separación líquido-sólido, como se puede apreciar a través de los estudios realizados por Bouso (1989) y Sayago (2001), que la consideran como una parte fundamental en la mayoría de los procesos de tratamiento e hidrometalúrgicos, y de importancia especial después de procesos de lixiviación, clarificación antes de cambio iónico, extracción por solventes, precipitación, donde hay que recuperar los líquidos o soluciones portantes y en aquellos otros procesos donde se precise recuperar los sólidos de la mejor calidad posible, cristalización o precipitación. Por otro lado, Mariño et al. (2007), Beyris y Falcón (2007) y Mariño et al. (2010) exponen, basados en el análisis de investigaciones desarrolladas en empresas cubanas, que el proceso de sedimentación es de importancia vital en la industria hidrometalúrgica cubana para la producción de níquel más cobalto, porque si no se alcanza a la salida del tanque sedimentador o espesador la concentración de sólidos según lo establecido en el diseño, esto repercute negativamente en la economía nacional.

La sedimentación (Kynch 1952; Scott 1968; Kos 1980; Cheng 1980; Tiller 1981; Bueno y Gutiérrez 1986) es estudiada en los procesos de separación en una suspensión sólida-líquida, cuyo mecanismo es poco conocido, observándose que muchas suspensiones son inestables y dan lugar a separaciones espontaneas en tiempos relativamente pequeños. La sedimentación de suspensiones se estudia con el objeto de aplicar un análisis y obtener una ecuación que permita predecir la velocidad de descenso de las partículas en la suspensión. En los últimos años se da relativamente mayor atención a la sedimentación de suspensiones en sedimentadores inclinados por su importancia en el campo industrial.

1.2.1. Tipología de procesos de sedimentación

Las partículas de sólidos suspendidos contenidos en una suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. En las referencias consultadas (Zarate 1995; Karl y Wells 1999; Vega y Villacreses 2006; Oliva et al. 2008; Corral 2009; Condado 2012) en base a la concentración y tendencia a la interacción de las partículas pueden darse cuatro tipos de sedimentación, ellas son:

- **Sedimentación discreta:** tiene lugar cuando las partículas que sedimentan lo hacen de forma individualizada y no varían sus características (forma, tamaño, densidad) durante su descenso, llegándose a equilibrar las fuerzas que actúan sobre las partículas, sedimentando a velocidad constante. A escala industrial esta forma de sedimentación se presenta en los desarenadores y en los sedimentadores de las plantas de tratamiento de agua.
- **Sedimentación floculenta:** tiene lugar cuando se producen choques entre las partículas que sedimentan, se pueden agregar formando partículas de mayor tamaño, como resultado de la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas por la adición de reactivos químicos llamados floculantes y se produce un incremento en la velocidad de sedimentación. Las características de las partículas (forma, tamaño, densidad) si cambian durante su descenso. A escala industrial se presenta en la clarificación de aguas, y en la concentración de minerales.
- **Sedimentación retardada o zonal:** se observa cuando las materias floculadas forman una masa con una concentración relativamente elevada de partículas. La suspensión floculada sedimenta como una masa unitaria presentando una interface distinta durante su descenso. A escala industrial describe la sedimentación de los lodos activados biológicos y los lodos químicos concentrados.
- **Sedimentación por compresión o espesamiento:** se observa cuando las partículas están en contacto físico total unas con otras, que forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, y se produce una reducción del

volumen debido a la evacuación del fluido ocluido. A escala industrial este modo se da en la fase de consolidación del sedimento en los **sedimentadores o espesadores**.

De forma general, se pueden encontrar referencias a diversos mecanismos de movimiento de las partículas en el seno de un fluido. Con relación a un conjunto de partículas sólidas que se encuentran en la corriente de un fluido que se mueve verticalmente, de abajo hacia arriba, a una determinada velocidad. Se pueden distinguir dos tipos de sedimentación, atendiendo al movimiento de las partículas que sedimentan (Gutiérrez y Bueno 2004), ellas son:

- **Sedimentación libre o individualizada:** se produce en suspensiones de baja concentración de sólidos. La interacción entre partículas puede considerarse despreciable, por lo que sedimentan a su velocidad de caída libre en el fluido.
- **Sedimentación por zonas:** se observa en la sedimentación de suspensiones de alta concentración de partículas sólidas. Las interacciones entre las partículas son importantes, alcanzándose velocidades de sedimentación menores que en la sedimentación libre. La sedimentación se encuentra retardada o impedida. Dentro de los sedimentadores se desarrollan varias zonas, caracterizadas por diferente concentración de sólidos y, por lo tanto, diferente velocidad de sedimentación.

A escala industrial la sedimentación encuentra aplicación de diversos modos, de acuerdo a como operan los aparatos designados como sedimentadores o espesadores. En tal sentido, dependiendo de cómo se realice la operación, la sedimentación puede clasificarse en los tipos siguientes (Bronws 1967; Zelikman et al. 1982; Kasatkin 1987, Perry 2000):

- **Sedimentación discontinua:** el flujo volumétrico total de materia fuera del sistema es nulo, transcurre en régimen no estacionario. Este tipo de sedimentación es la que tiene lugar en una probeta de laboratorio, donde la suspensión se deja reposar.
- **Sedimentación continua:** la suspensión diluida se alimenta continuamente y se separa en un líquido claro y una segunda suspensión de mayor concentración. Transcurre en régimen estacionario.

De manera general, se considera que el objetivo de la operación de sedimentación en el contexto de un proceso industrial o de laboratorio puede ser diverso, y abunda en esta diferenciación de técnicas o suboperaciones de sedimentación. **Clarificación**, cuando se pretende la eliminación de un material denso de su suspensión, siendo éste generalmente de escaso valor (un contaminante o una ganga metalúrgica), en cuyo caso el objetivo es eliminar la fase fraccionada, recuperando un disolvente lo más puro posible (virtualmente libre de partículas sólidas). Por otra parte, **espesamiento** o concentración, por el contrario, que el material en suspensión sea más valioso que el disolvente (una mena metalúrgica, por ejemplo) y que interese su recuperación acompañado de la menor cantidad posible de disolvente (con bajo contenido de líquido). Lógicamente pueden perseguirse ambos objetivos simultáneamente (por ejemplo, si se trata de recuperar la fase particulada y recircular el fluido) aunque en los dos casos prevalece una finalidad de **separación** (Gutiérrez y Bueno 2004; Mariño et al. 2009).

1.2.2. Desarrollo del conocimiento sobre los procesos de sedimentación

Se considera el trabajo publicado por Hazen en 1904, como el primero que enuncia los principios teóricos de la sedimentación laminar, cuando analizó los factores que influyen en la sedimentación de partículas sólidas en suspensiones diluidas con agua. Refiere que el tiempo de retención, no es un parámetro a considerar en el diseño de tanques de sedimentación, sino que la productividad de sólidos sedimentado es proporcional al área de la superficie del tanque, y a las propiedades del sólido, e inversamente proporcional al flujo a través del tanque. En un inicio, los equipos de clasificación imitaron a los tanques de sedimentación y de clarificación, al incorporar un dispositivo para descargar el sedimento precipitado. De ahí que, las primeras teorías de clasificación mecánica sentaron sus bases en la teoría de Hazen para equipos de sedimentación. La aparición de los clasificadores hidráulicos condujeron a las teorías de la sedimentación obstaculizada o impedida en campos gravitatorios, y por último, la introducción de los hidrociclones abrió el camino para la sedimentación gravitacional y se explotó la sedimentación obstaculizada en campo centrífugo como un mecanismo.

La investigación sobre la sedimentación gravitacional se basó antes de 1950 en la ley de Stokes, formulada en 1851, lo cual describe la sedimentación de partículas discretas en suspensiones con bajas concentración de sólidos. Stokes supuso que la sedimentación ocurre como un proceso estacionario. Coe y Clevenger (1916) investigaron la diferencia en el comportamiento de la sedimentación entre suspensiones de partículas gruesas y finas. En el caso de partículas gruesas, tanto la sedimentación como la consolidación transcurrieron a velocidad constante, mientras que las muy finas se aglomeraban en lodos, observándose un descenso progresivo en su velocidad de sedimentación y una variación en resolución de la consolidación (Richardson y Zaki 1954; Schiffman et al. 1985).

La teoría del comportamiento de las suspensiones concentradas durante la sedimentación fue analizada por Kynch (1952) y señala que el proceso de sedimentación obstaculizada ocurre de modo muy transitorio y las ecuaciones de continuidad requieren de un modelo físico. Por otro lado, expone que se obtiene una única velocidad de sedimentación de los sólidos para cada concentración específica, dando inicio y desarrollo al concepto de curvas de sedimentación (Kos 1985).

Un número de investigadores (Michaels y Bolger 1962; Shirato et al. 1970; Tiller 1981; Fitch 1983) esclarecen que la teoría de Kynch no se cumple en la zona de compresión de suspensiones floculadas, donde la velocidad de la partícula está bajo la dependencia del gradiente de tensión de sólidos, así como también de la concentración. Las investigaciones realizadas por Been (1980), Tiller (1981) y Fitch (1983) han generalizado la teoría de Kynch al incluir el proceso de consolidación del producto espesado.

Es bien conocido que en muchas operaciones del procesamiento de minerales, las aplicaciones aparezcan y sean utilizado muy adelantado de su comprensión científica. Esto es el caso en el espesamiento. La primera referencia de variables que inciden en la sedimentación es debido a Nichols (1908). Dentro de los autores que investigaron los efectos de sólidos y concentración de electrolitos, el grado de floculación, y la temperatura durante el proceso también se incluyen Ashley (1909), Forbes (1912), Mishler (1912, 1918), Clark (1915), Ralston (1916), Free (1916), mencionó trabajo de Coe y Clevenger (1916).

Boycott (1920) es el primer investigador que reporta sus observaciones en la sedimentación de suspensiones de sólidos en líquidos, anotando que los sólidos sedimentan más rápidamente en ductos inclinados que en ductos verticales. Nakamura y Kuroda (1937) suponen que el incremento aparente de la velocidad de sedimentación se debe al descenso de las partículas sólidas a lo largo de la cara inclinada; produciendo un gradiente de densidad a través de la distancia que separa las caras inclinadas del sedimentador, dando lugar al establecimiento de una corriente de convección que transporta más rápidamente a las partículas al fondo de la columna.

Analizando las referencias anteriores, se distinguen tres teorías básicas de sedimentación laminar o acelerada. La primera relaciona la sedimentación con el área superficial, teoría iniciada por Hasen (1940) y posteriormente desarrollada por Champ (1946). Esta teoría sostiene que la proporción de sedimento removido es función del área de sedimentación, de las características de asentamiento del sedimento y de la cantidad de pulpa tratada por unidad de tiempo y completamente independiente de la profundidad de sedimentación.

La segunda teoría sostiene principalmente que solos las caras inferiores de las láminas aceleran la sedimentación al reducir las alturas, sosteniendo adicionalmente que las partículas al depositarse mantienen la misma separación entre sí. Esta teoría se basa en los trabajos de sedimentación estáticas realizados por Nakamura y Kuroda (1937) y transformada a sedimentación dinámica por Lizenmerier (1925) (efectos de avalancha) al determinar la influencia de crecimiento del floculo en los gradientes de velocidad producidos por diferencia de velocidad de asentamiento.

La última teoría sostiene la correlación entre las condiciones ideales de flujo y las condiciones y las condiciones ideales de sedimentación. Esta teoría fue iniciada por Fischerstrom (1955) y desarrollada por Brunsmann (1965). Esta teoría sostiene que la eficiencia remocional de partículas suspendidas es producida por la ocurrencia simultánea de bajos números de Reynolds y altos número de Froude.

1.3. Investigaciones precedentes relacionadas con los procesos de sedimentación

Pese a lo fructíferos que puedan ser las investigaciones llevados a cabo para la sedimentación de partículas asiladas, sin una correlación entre este hecho y la realidad, (que las partículas se encuentran en una pulpa) no se puede observar realmente lo satisfactorio o productivo que pueden ser los mismos, de allí que se hallan realizados investigaciones que permiten adicionalmente conocer la relación que existe entre la sedimentación de una partícula y la sedimentación de una pulpa. Se considera que la sedimentación de pulpas de minerales ha tenido un tratamiento metodológico comparativamente muy modesto, lo que ha contribuido a alimentar la convicción de que se trata de una operación muy empírica (Sayago, 2001; Gutiérrez y Bueno 2004).

El proceso de sedimentación gravitacional se estudia con el objetivo de aplicar un análisis y obtener una ecuación que permita predecir la velocidad de precipitación o sedimentación de las partículas sólidas en la suspensión, que responde a la necesidad de resolver un problema común en el diseño de cualquier operación separativa: la economía de espacio en el dimensionado de equipos (Browns 1965; Kasatkin 1987, Perry 2008). Como parámetro fundamental del proceso se tiene a la velocidad de sedimentación, la que depende principalmente de la distribución granulométrica, concentración de sólidos suspendidos, pH, composición químico-mineralógica, composición iónica y la temperatura. (Valdés 1983; Ponce 1983; Miranda 2002; Mariño et al. 2007; Beyris y Fálcon 2007; Salinas 2012).

1.3.1. Sedimentación de pulpas minerales lateríticas

Son innumerables las investigaciones que se han llevado a cabo en materia de sedimentación gravitacional de pulpas minerales lateríticas desde estudio de los factores y propiedades del mineral que influyen sobre la velocidad de sedimentación (Cerpa et. al., 1999; Tartaj et al. 2000; Turro et al., 2003; Iglesias et al. 2005; Pérez y Garcell 2006, Beyris y Falcón 2007; Herrera et al. 2010), hasta investigaciones dirigidas a incrementar la densificación de la pulpa, incrementando el porcentaje de sólidos en la pulpa del fondo del sedimentador, mediante el uso de aditivos combinados (Castellanos y Acevedo 2004; Iglesias et al. 2005; Herrera y Castellanos

2005; Iglesias et al. 2006; Castellanos et al. 2009; Álvarez et al. 2009; Herrera et al. 2010). Las primeras investigaciones referenciadas, permitieron dar una explicación de algunas propiedades físico-químicas de las pulpas limoníticas, pero no brindaron soluciones prácticas que mejoraran el proceso. Por lo contrario, los resultados de las segundas investigaciones, demostraron que era factible incrementar la densificación de la pulpa y alcanzar de un 2-3 % de sólidos superior en la pulpa del fondo del sedimentador, aunque no producía una mejora significativa en la velocidad de sedimentación (Castellanos et al. 2012).

La experiencia industrial ha confirmado las bondades de la tecnología, tanto en productividad como en el procesamiento de diferentes minerales, algunos de baja calidad, determinado por la velocidad de sedimentación-compactación y las propiedades reológicas de la pulpa.

1.3.2. Modelación de los procesos de sedimentación

Los modelos del proceso de sedimentación han sufrido una evolución histórica. Los primeros modelos se basaban en muchas asunciones: condiciones de flujo ideal, tanques ideales sin turbulencia, partículas discretas sin cohesión entre ellas, no consideraban los procesos de compactación en el fondo del sedimentador o decantador (Ribes, 2005).

En 1952 el matemático G. J. Kynch académico de la Universidad de Birmingham en Gran Bretaña, presentó en su célebre artículo “Una teoría de sedimentación” una teoría cinemática de la sedimentación basada en la propagación de concentración de ondas en la suspensión. La suspensión es considerada como un continuo, llamada suspensión ideal y el proceso de sedimentación es representado por la ecuación de continuidad de la fase sólida (Concha, 2001). La teoría del flujo de Kynch (1952) supuso un cambio importante en el diseño y simulación de sedimentadores. Actualmente la mayoría de los modelos de sedimentación más importantes se basan en las consideraciones de esta teoría.

Por otro lado, en la modelación de la velocidad de sedimentación zonal, está se considera esta como una función de la concentración de sólidos existente inicialmente en la suspensión. El modelo matemático más aceptado (ecuación 1.1) y utilizado es el modelo exponencial de Vesilind (1968).

$$V_{sz} = V_0 \cdot \exp(-nX) \quad (1.1)$$

Donde:

V_{sz} - velocidad de sedimentación zonal (obtaculizada), m/s

V_0 - Velocidad límite de caída (sedimentación) en régimen laminar; m/s

n - coeficiente experimental, adimensional

X- Proporción de sólidos en volumen (volumen sólidos/volumen pulpa) en la pulpa; %

Este modelo basado en la teoría del flujo de Kynch, considera que la velocidad de sedimentación de una partícula depende únicamente de la concentración local de partículas, que todas las partículas tienen la misma forma, tamaño y densidad, y que la concentración de partículas es constante en cada sección horizontal del decantador. Pero no se puede aplicar en el caso de las pulpas floculadas porque puede dar resultados no esperados, porque en el caso de éste tipo de pulpas las partículas sólidas al aglomerarse entre sí, varían su forma, tamaño y densidad.

1.4. Teoría básica sobre los procesos de sedimentación

Se define la sedimentación (Kasatkin 1987; Perry 2000; Vega y Villacreses 2006; Corall 2009; Orozco 2009; Armin et al. 2009; Cabrejos 2011; Ranjan 2011; Laguarda 2012) como el proceso de separación de sistemas heterogéneos sólido-líquido, donde las partículas de sólidos suspendidos contenidos en líquido (solución acuosa) se separan en respuesta a la acción de la fuerza de gravedad, de las fuerzas de inercia (entre ellas las centrífugas), o de las fuerzas electrostáticas; generando una pulpa espesada en la parte inferior y un líquido clarificado sobrenadante en la parte superior. Si bien, los más importantes desarrollos tecnológicos modernos para la sedimentación se desarrollan en la industria minera, en especial en la industria metalúrgica, donde las aplicaciones más exigentes y robustas han sido requeridas, hoy en día encontramos soluciones en la industria química y de aguas residuales, entre otras (Mariño et al. 2010).

Algunas referencias (Zelikman et al. 1982; Gutiérrez y Bueno 2004) refieren que durante la sedimentación tiene lugar un desplazamiento mecánico relativo de las fases, en la cual se haya implicado un mecanismo de transferencia de cantidad de movimiento por flujo viscoso. Como regla, ella no van acompañada de reacciones químicas; sus leyes se determinan por las leyes de la hidrodinámica, que depende en

sumo grado de la construcción de los aparatos y de las condiciones de su explotación.

1.4.1. Sedimentación de partículas floculentas

La velocidad de las de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencias de velocidades de sedimentación de los flóculos, influencia de la turbulencia y variación de gradientes de velocidad; factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general (Mular y Bhappu 198). Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorios o plantas pilotos con el propósito de predecir la eficiencias teóricas remocionales en función de las cargas superficiales o velocidades de asentamiento preseleccionadas (figura 1.1).

1.4.2. Zonas de sedimentación

Los estudios realizados por Coe y Clevenger en 1916 (Concha y Burger 2003), identificaron que la sedimentación de suspensiones homogéneas generan 4 zonas en la columna de sedimentación que desde la parte superior hasta la parte inferior de la columna fueron denominadas como: A, zona de agua clara, B zona de concentración inicial constante, C es una zona de concentración variable y D es la zona de compresión (ver figura 1.2).

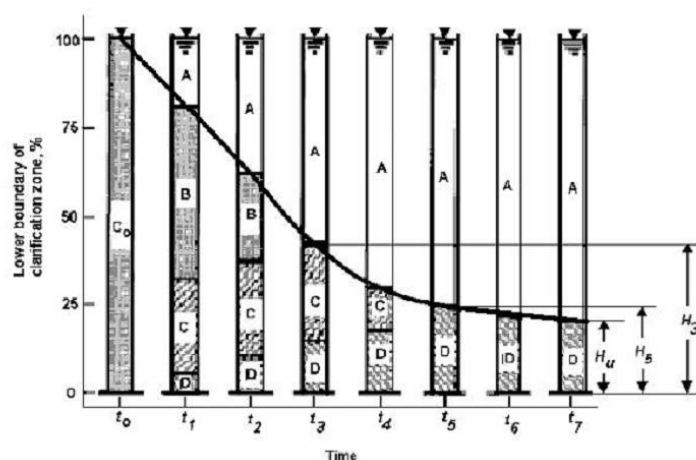


Figura 1.1. Cinética de la sedimentación. **Fuente** (Sincero, 2008)

Varios autores describieron la sedimentación de suspensiones mediante variaciones de la ecuación de Stokes o por modelos empíricos (Egolf y McCabe 1937), pero sin

contribuciones realmente importantes en la modelación de la sedimentación. El desarrollo del conocimiento en sedimentación por Coe y Clevers (1916) hasta la mitad del siglo 20 fue basado en balances macroscópicos del sólido y el fluido en sedimentación en probetas y sobre la observación de diferentes concentraciones establecidas en el sedimentador.

1.4.3. Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación

La intensificación procesos de sedimentación puede ser alcanzada añadiendo a la suspensión sustancias que disminuyen la estabilidad de la suspensión y aglomeran las partículas formando otras más gruesas (coagulación ó floculación) para aumentar su tamaño y como consecuencia, su velocidad de sedimentación que es función del cuadrado de dicho tamaño (Zelikman et al. 1982, Nuñez, 2004).

Cuando se utilizan reactivos para aglomerar las partículas finas en los equipos de separación sólido-líquido, técnicamente se manifiesta una diferencia entre el efecto de coagulación y el de floculación aunque muchos productos empleados en la separación sólido-líquido poseen los dos efectos. Un agregado coagulado se volverá a formar después de que haya sido destruido y por el contrario un floculo una vez destruido no volverá a formarse. Percibiendo mayor empleo los floculantes en los procesos de sedimentación ya que la pulpas en la zona de compresión estará (entre 5 - 60 minutos) bajo una agitación suave. Además, el consumo del floculante es mucho menor que el del coagulante y son mucho más eficaces (mayor velocidad de sedimentación).

Por efecto del floculante se puede obtener, más rápidamente, no sólo un sedimentado de mayor concentración en sólidos (menos líquido) sino también en clarificado (rebose) más limpio (menor contenido en sólidos), pero un sistema coloidal la floculación no se puede aumentar indefinidamente (Svarosvsky 2000, Wills 2006). Porque por encima de una concentración óptima la adición de un polímero es contraproducente.

1.4.4. Factores que influyen en el proceso de sedimentación

Después de revisadas múltiples fuentes bibliográficas (Falcón et al., 1991; Chaukley 1995, Valdés 1983; Ponce 1983; Beyrys 1997; Mariño 2002; Miranda 2002; Beyris y Falcón 2007; Hernández et al. 2009 y Aldana 2012) se ha llegado a establecer que la

distribución granulométrica, la concentración de sólidos suspendidos, la composición iónica, el pH, la composición químico-mineralógica y la temperatura, son factores que inciden, de manera notable, en los índices tecnológicos del proceso de sedimentación de las pulpas minerales lateríticas lixiviadas.

1.5. Sedimentación continua. Tipología de sedimentadores o espesadores

En la industria, el proceso de sedimentación se lleva a cabo en régimen continuo en aparatos llamados sedimentadores o espesadores (Saavedra, 1999). Aparato de separación sólido-líquido continuo, en el que las partículas sólidas contenidas en una pulpa se dejan decantar, produciendo un rebose de licor clarificado (overflow) y un producto concentrado en la descarga (underflow). La superficie de separación de las cuatro zonas queda estática; la alimentación se añade en la zona donde la concentración del sólido es igual a la de la suspensión (Wills 2006).

La tipología de los sedimentadores está directamente relacionada con las características de los fangos a tratar. Los factores físicos y químicos influyen de manera determinante en la aplicación de uno u otro sistema de espesamiento, así como en las condiciones de operación de los mismos.

Tienen más divulgación los aparatos de acción continua de un piso (ver figura 1.2). Consiste básicamente de un tanque, con diámetros en un rango de 5 a 200 m, profundidades de 1 a 7 m, y con el fondo relativamente plano o tronco-cónico con pendiente hacia el interior de éste (Hughes 2000; Wills 2006). En la actualidad las características que distinguen las zonas A, B, C, D no son muy específicas, aparte del aumento en concentración de sólidos; y la descripción resulta ser más académica que real” (Mular y Bhappu 1982).

En el interior del estanque existe uno o más brazos radiales (rastras) que giran a baja velocidad (normalmente 8 m/min de velocidad perimetral) y su consumo de energía es muy bajo. De cada brazo están suspendidas una serie de aspas diseñadas para arrastrar los sólidos sedimentados hacia la salida central. En la mayoría de los sedimentadores estos brazos se elevan automáticamente si el par (torque) excede un cierto valor, evitando de este modo el daño debido a la sobrecarga (Bronws 1965; Kasatkin 1987; Gupta 2006). Las rastras también ayudan a la compactación de las

partículas sedimentadas y producen una descarga más espesa que la que se alcanza por simple sedimentación.

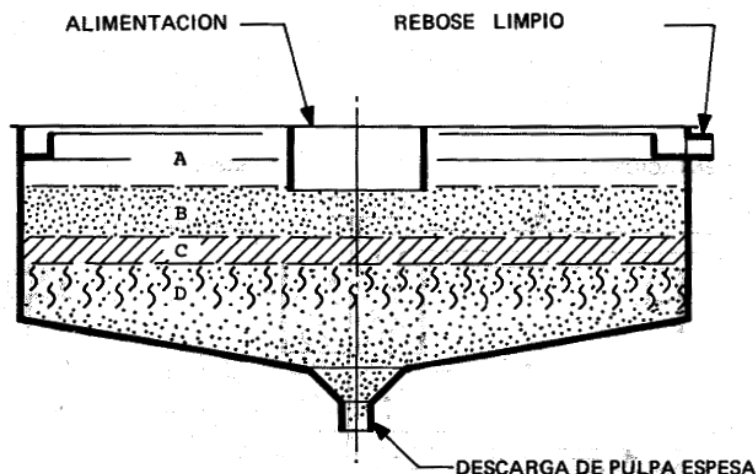


Figura 1.2. Sección de un sedimentador continuo mostrando la situación de las cuatro zonas de pulpa en sedimentación. A- agua limpia o solución; B – pulpa de consistencia de alimentación; C- pulpa de transición B a D; D – pulpa en compresión.

Fuente: (Mullar y Bhappu, 1982).

Es sedimentador consta de un estanque cilíndrico, la bandeja de alimentación (feedwell), la canaleta de rebose (overflow launder), las rastras (rakes) y la abertura de descarga (discharge opening), todos ellos elementos comunes a cualquier sedimentador (ver figura 1.3).

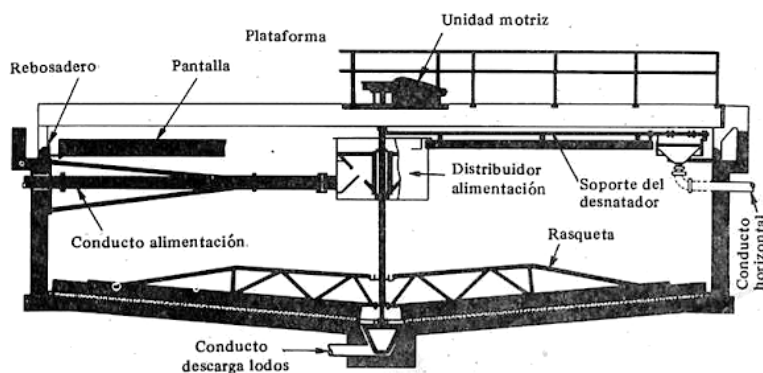


Figura 1.3. Sedimentador de sección circular. Partes componentes.

Por otro lado, el interés de las operaciones industriales puede estar en obtener un flujo libre de sólidos, **clarificador**, o espesar los sólidos para posterior tratamiento o

aprovechamiento, **espesador** o **sedimentador**. Así, las funciones de un decantador son (Wills 2006; Gupta 2006):

- Producir líquido claro; lo que implica que la velocidad ascendente del líquido ha de ser menor que la de sedimentación de las partículas. La capacidad de clarificación depende del diámetro del depósito.
- Producir el espesamiento del sólido, que está controlado por el tiempo de resistencia de las partículas en el depósito, lo que depende de la profundidad existente por debajo de la entrada de la alimentación.

La capacidad de clarificación viene determinada por la velocidad de precipitación de las partículas sólidas en suspensión. Esta velocidad puede calcularse mediante la velocidad de descenso de la superficie superior de separación en los ensayos de sedimentación discontinua. Por otro lado, la capacidad de espesamiento es una función del volumen de la zona de sedimentación de un tanque, depende del período de retención necesario para que el fango alcance la densidad deseada (King 2001).

1.5.1. Consideraciones para el diseño de sedimentadores

Los espesadores son equipos típicos que no han cambiado mucho su apariencia desde la invención del espesador Dorr en 1905, y estos equipos tienen un tiempo de vida superior a los 20 años. Los mecanismos convencionales de recogida de fango consisten en rasquetas de fondo muy robustas. El puente normalmente es fijo. La tracción de las rasquetas es central. La estructura sumergida en la que se apoyan las rasquetas que remueven lentamente el manto de fango y permiten que se abran canales que dejen salir el líquido y la compactación se vea favorecida.

Un diseño adecuado de un sedimentador por gravedad implica tener en cuenta las posibles sobrecargas (cero paradas o atascos) y el posible desarrollo de condiciones anormales. Por eso los parámetros de diseño de un sedimentador son (Wills 2006; Gupta 2006):

- **Velocidad ascensional**, o **carga superficial**, que es el cociente de caudal de fluido y la superficie del depósito de sedimentación.
- **Tiempo de retención**, que es volumen del depósito de sedimentación dividido por el caudal; se puede sustituir éste parámetro por la altura del sedimentador.

Por tanto, para dimensionar un sedimentador destinado a realizar operaciones de sedimentación se requiere la determinación del **área**, la **profundidad** o altura, así como el coeficiente **K**, del par del accionamiento del sedimentador, en función del caudal y de las características de la alimentación, así como de la concentración de la suspensión que abandona el sedimentador por la parte inferior del mismo (Mular y Bhappu 1982; Núñez 2005).

El área de un espesador (parámetro fundamental de diseño) varía en razón inversa de la velocidad de sedimentación suponiendo todas las demás condiciones constantes. La velocidad de sedimentación es una característica fundamental de cada pulpa, la cual debe ser determinada experimentalmente bajo ciertas condiciones de floculación. Es importante que el cálculo del área del espesador tenga la mínima área de trabajo según las necesidades del proyecto, y que considere un margen de seguridad para posibles variaciones de las características del alimento, tales como mineralogía, granulometría, gravedad específica, entre otras (King 2001).

Los factores fundamentales que determinan el funcionamiento de sedimentador gravimétrico se citan a continuación (Suárez, 2007):

- Tipo de material.
- Naturaleza de la floculación.
- Carga de sólidos sobre el sedimentador.
- Tiempo de retención de sólidos en la zona de compresión.
- Tiempo de retención.
- Caudal de descarga.
- Sistema de alimentación.

Debido a la variabilidad de las características de la sedimentabilidad y capacidad de espesamiento de las suspensiones cuando se presentan los fenómenos de sedimentación zonal y sedimentación por compresión, es importante la realización de ensayos. Generalmente, la superficie necesaria (área) para el espesado de pulpas minerales se determina por el método de Talmadge y Fitch (Mariño et al 2010).

1.5.2. Metodología para el diseño de sedimentadores

El criterio fundamental para el diseño de sedimentadores, es determinar la relación entre la velocidad de sedimentación (ver figura 1.4) y las dimensiones del tanque a emplearse. La velocidad de sedimentación del mineral se mide mediante pruebas de laboratorio y con ellas se determina un parámetro de diseño denominado área unitaria (área de espesamiento dividido por flujo de sólido de alimentación, $m^2/t/día$). Tres procedimientos son los más usados para realizar este cálculo: Coe & Clevenger, Talmage & Fitch y Wilhelm & Nadie (Mariño et al 2009).

Como los minerales se extraen de varios frentes de explotación, el comportamiento de las suspensiones (pulpas metalúrgicas) varía mucho tanto en sus velocidades de sedimentación como en las alturas relativas de las distintas zonas durante la sedimentación. Para evaluar con exactitud las características de sedimentación de cada suspensión individual, es preciso realizar un estudio experimental (McCabe 1991).

Aunque se considera como una buena práctica de diseño el utilizar plantas piloto o ensayos de laboratorios para seleccionar los equipos de sedimentación, ésta no garantiza una operación exitosa a escala real. El diseño deberá considerar las dificultades involucradas en el paso de una escala a otra y el carácter cambiante de del sedimento de las pulpas minerales.

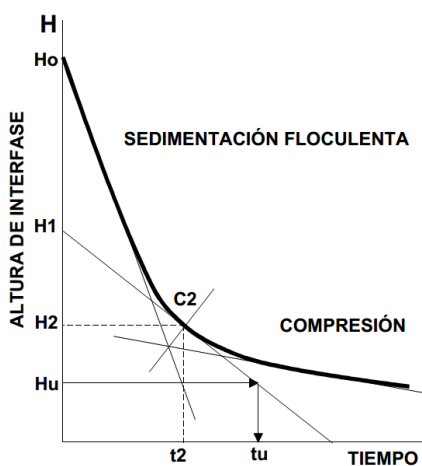


Figura 1.4. Determinación de las velocidades de sedimentación a partir de la curva de sedimentación discontinua.

Las principales variables de diseño para cualquier proceso de espesamiento son:

- La concentración de sólidos y gasto de la alimentación.
- Demanda de químicos y costo de éstos.
- Concentración de sólidos suspendidos y disueltos, así como el gasto del líquido clarificado.
- Concentración de sólidos y gasto de pulpa espesada.

El objetivo de los sedimentadores es conseguir un producto espesado a extraer por el fondo. La sedimentación en los sedimentadores se lleva a cabo en condiciones de sedimentación zonal. El problema fundamental de diseño consiste en la determinación del área de la sección transversal para que un lodo con una concentración inicial de sólidos sea compactado hasta conseguir una concentración final (densidad) en la descarga inferior.

De modo que; la productividad del volumen de líquido claro producido en la unidad de tiempo por un sedimentador continuo depende fundamentalmente del área de la sección transversal disponible para la sedimentación, siendo en los sedimentadores industriales casi independiente de la profundidad del líquido (McCabe 1991; Mariño et al. 2009). En los sedimentadores el área de diseño de ser mínima que garantice la clarificación del licor teniendo en cuenta la productividad por este y es el parámetro de diseño fundamental, sin olvidar la altura de la zona de compactación (compresión), que garantiza el tiempo necesario para la compactación del producto espesado hasta la concentración deseada.

1.5.3. Naturaleza del proceso de sedimentación. Empleo de los sedimentadores convencionales

El sedimentador de régimen continuo desarrollado en la industria minera tuvo después aplicación en la industria química, y en las aguas residuales. Sin embargo, salvo excepciones menores, las máquinas más robustas son requeridas en la industria metalúrgica, en tanto que la construcción más son las que se aplican en el tratamiento de agua residuales y en otras industrias (Wills 2006). Es evidente que a mayor densidad de los sólidos y mayor cantidad de éstos que va a manipular el sedimentador de un tamaño determinado, más robusta debe ser la concepción del

mecanismo de accionamiento. Muchas pulpas metalúrgicas tienen densidades de 2600 kg/m^3 o más, y sedimentan con concentraciones de $60 \div 70 \%$ de sólidos en peso, pero los sedimentadores deben tener un diseño más pesado que los que operan con aguas residuales donde la densidad de los sólidos es de $1100 \div 1300 \text{ kg/m}^3$ y raramente sedimentan con concentraciones superiores al 10% de sólidos en peso. En algunas aplicaciones, aunque los sólidos de la alimentación sean muy finos, y la unidad funcione como clarificador, la concentración del hundido (producto espesado), puede llegar a ser alta, siendo entonces preciso un mecanismo semipesado (Mular y Bhappu 1982).

En los sedimentadores convencionales de régimen continuo las pulpas con alto contenido de sólidos inicialmente se reacomodan libremente, pero como la densidad va en aumento las partículas penetran a una zona o estado obstaculizado que causa una disminución en la velocidad de sedimentación en calidad de que la concentración aumenta debido a la compresión interparticular. Dichos equipos suelen emplearse para servicio pesado donde las densidades de la descarga son elevadas y con sedimentación obstaculizada, y se requiere de grandes torques para transportar los sólidos sedimentados desde la periferia del tanque hasta el orificio central de descarga para bombearlos. Asimismo, los sedimentadores son a menudo usados para el almacenamiento y facilitar la alimentación continua de flujo a filtros o centrifugas.

1.6. Comportamiento reológico de los fluidos pulpas minerales

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos; a su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos (McCabe 1991; Perry 1988; Garcell et al., 1988 y Laurencio 2012).

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante (figura 1.5 A), siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad, a diferencia de los no newtonianos (figura 1.5 B, C, D).

En todo proceso tecnológico de la industria de la metalúrgica extractiva el conocimiento del comportamiento reológico de las pulpas minerales es de gran

utilidad para el cálculo de los equipos. Hay que destacar que el comportamiento reológico de este tipo de sistemas es extremadamente complejo, y está estrechamente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas; en el caso específico de las suspensiones acuosas de minerales influyen el tamaño y la distribución de las partículas en suspensión (Cerpa et al. 1999, Cerpa et al. 2001, Pérez 2004, Rivas & Colás 2005), la concentración y las características mineralógicas de la fase dispersa (Zamora 2003), las propiedades químicas de superficie (Cerpa & Garcell 1998, Garcell et al. 2001) y la temperatura de la suspensión (Pérez 2004). La caracterización de los minerales en solución permitiría ampliar la comprensión de la influencia de algunos de los factores antes mencionados. Las relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalladura en un fluido real constituyen una parte de la ciencia de la reología.

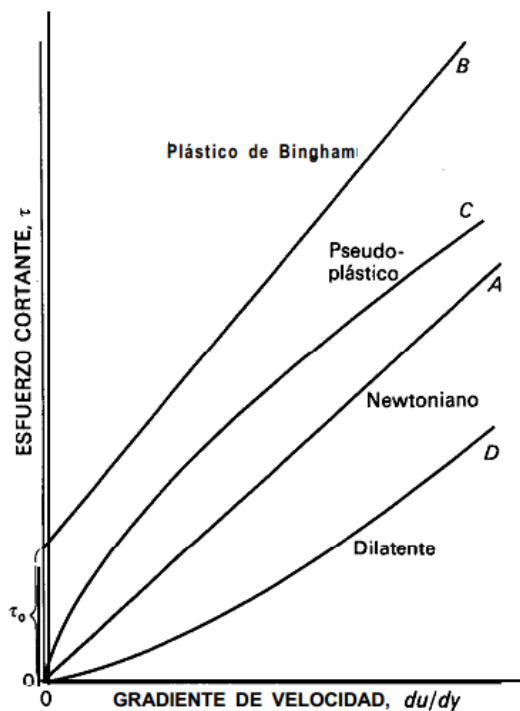


Figura 1.5. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad para fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente (McCabe 1991).

Estudios realizados en pulpas lateríticas han permitido determinar que para concentraciones inferiores al 18 % en peso de sólidos las curvas de flujo prácticamente son independientes de su composición mineralógica y exhiben un

comportamiento pseudoplástico. Sin embargo, para concentraciones de alrededor de 22 hasta 45 % en peso de sólidos la viscosidad aumenta dependiendo cada vez más de la mineralogía y el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo de Bingham, en algunos casos, o al de Bulkley–Herschel, en otros (Skelland 1970, Cheng 1980, Garcell et al. 1988, Avramidis & Turian 1991, Cerpa & Garcell 1998, Garcell et al. 1998, Cerpa et al. 1999, Garcell 2001, L. Garcell, com. esc. 2004, Pérez 2004).

Haciendo una revisión de las múltiples bibliografía acerca del comportamiento de las pulpas minerales lateríticas se permite resumir que hasta el momento, que su comportamiento reológico de acuerdo a las características de la deformación puede presentar comportamiento tipo fluido, pero es posible que bajo otras circunstancias presente comportamiento tipo sólido, esto depende fuertemente de las condiciones de deformación.

1.7. Conclusiones del capítulo 1

- La literatura científica contiene estudios orientados al efecto de factores y propiedades del mineral laterítico sobre la velocidad de sedimentación y el uso de aditivos combinados en el incremento de la densificación de la pulpa y alcanzar porcentajes superiores de sólidos en la pulpa del fondo del sedimentador, pero son escasos los trabajos vinculados con la relación de los índices tecnológicos del proceso de sedimentación y el consumo de energía en los sedimentadores.
- No ha sido resuelto satisfactoriamente el problema de confirmar la relación entre los índices tecnológicos del proceso de sedimentación y el consumo de energía en los sedimentadores, y el estudio de la posibilidad de predecir esta relación mediante correlaciones empíricas, favorece a la solución de un problema global.

Capítulo 2

Materiales Y Métodos

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Una vez expuesta la perspectiva teórica del proceso de sedimentación y prevista la influencia de los factores más importantes, sobre el consumo de energía de los sedimentadores, mediante el método lógico se fundamenta el diseño de los experimentos para la comprobación empírica de los resultados teóricos. El establecimiento de una metodología que describa como influyen los índices tecnológicos del proceso de sedimentación ininterrumpida en el consumo de energía de los sedimentadores resulta novedoso debido, entre otros aspectos, a las múltiples situaciones reales que se presentan durante su implementación en las empresas cubanas productoras de níquel.

El **objetivo** de este capítulo es: definir los métodos, procedimientos y condiciones experimentales que fundamentan las propiedades a investigar para dar solución al problema planteado.

2.2. Caracterización del proceso de sedimentación ininterrumpida de las pulpas minerales lateríticas

El proceso de sedimentación ininterrumpida se realiza mediante un esquema tecnológico basado en la lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido, o proceso Caron. La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato-amoniacal se explica por las ventajas propias de esta tecnología, a pesar de que consume mucha energía eléctrica, tiene muchas ventajas en comparación con el proceso pirometalúrgico.

Es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencilla y amplia utilización de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, sedimentadores, columnas de destilación, entre otros). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentínicos.

Para mejorar la eficiencia y lograr una mayor productividad en la reducción de Ni + Co se llevaron a cabo las modificaciones, innovaciones y racionalizaciones introducidas que han llevado a la industria a los niveles productivos en que se encuentra, tanto desde el punto de vista tecnológico, mecánico, seguridad industrial, disciplina tecnológica, estimulación y atención a los trabajadores, quienes han permitido que la empresa muestre mejores resultados convertirla en una empresa competitiva a nivel mundial.

2.2.1. Fundamentos del proceso tecnológico

La pulpa del mineral reducido, desde los tanques de contacto pasa por dos sistemas paralelos de cuatro etapas de lixiviación a contracorriente. La lixiviación se realiza con el licor carbonato – amoniacal en los sedimentadores por medio de aeración de la pulpa con el aire, los datos del proceso se reflejan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Datos del proceso de sedimentación ininterrumpida

Parámetros	Valor actual	Valor futuro
Volumen de alimentación	885 a 950m ³ /h	1 800 a 2 240 m ³ /h
Volumen de sólidos	300 a 320 t/h	390 a 500 t/h
Densidad de los sólidos	3, 8 a 4,17 t/m ³	4 a 4,5 t/m ³
Densidad de la solución	1,025 a 1,04 t/m ³	1,025 a 1,04 t/m ³
Densidad de la pulpa	1,14 a 1,16 t/m ³	1,14 a 1,18 t/m ³
Porcentaje de sólidos	10 a 15 %	14 a 17 %
Concentración del underflow	55 a 56 %	57 a 58 %

Fuente: (Proyecto de modernización Empresa Comandante Ernesto Che Guevara 2004)

Después de la cuarta etapa de lixiviación, la pulpa de mineral se dirige a dos sistemas paralelos de lavado de etapas cada uno. El lavado también se realiza con el licor de carbonato amoniacal por el método de contracorriente en los sedimentadores.

El licor enriquecido en níquel y cobalto una parte del flujo de la primera etapa se envía a la Planta de Recuperación de Amoníaco para filtrarlo en los filtros de placas para limpiarlo de hierro y la pulpa de desecho se suministran a la planta de recuperación de amoníaco donde se extrae el níquel en forma de carbonato básico y se recupera el

amoníaco. El licor de la primera y la segunda etapas de lixiviación se enfría en los intercambiadores de calor con el agua y se dirige a la planta de reducción de mineral para mezclarlos con el mineral reducido.

2.3. Procedimiento metodológico sobre la determinación del consumo de energía para sedimentación ininterrumpida en sedimentadores

A la hora de proyectar los aparatos de la tecnología para plantas de proceso de minerales, consignadas a realizar operaciones de sedimentación ininterrumpida, es importante conceder la capacidad (tamaño) y rendimiento (productividad) suficiente para hacer frente a las demandas picos y prevenir el desarrollo de condiciones que ocasionan las paradas o atascos, así como problemas inusuales de operación.

Las metodologías más difundidas en la literatura (Browns 1965; Pávlov 1981; Kasatkin 1987, Perry 2008), las cuales relacionan los parámetros de diseño de sedimentadores con las condiciones reales del proceso de sedimentación y las teóricas (sedimentación obstaculizada, forma de las partículas, movimiento del medio), propician la determinación del **área** o superficie de sedimentación, la **altura** o profundidad del sedimentador, pero no admiten estimar el consumo de energía requerido para el accionamiento de los elementos principales de un sedimentador (motores y elementos de transmisión, el eje y los brazos giratorios). Estos últimos tienen como función, el transportar los sólidos sedimentados al punto de descarga central y crear canales en la pulpa para permitir la liberación de líquido y obtener, de este modo, un producto espesado con mayor concentración en sólidos (densidad). Es por ello que se manifiesta la necesidad de establecer expresiones y métodos apropiados para evaluar anticipadamente el consumo de energía necesitado para efectuar la sedimentación ininterrumpida en los sedimentadores.

La mayoría de los sedimentadores se construyen para la separación por proceso de sedimentación de partículas aglomerables (floculadas). Este fenómeno es mucho más complejo que el anterior por cuanto la velocidad de sedimentación o precipitación, V_{sed} , de los flóculos no es constante sino creciente con el tiempo, ya que éstos aumentan de tamaño con la profundidad del tanque. Por lo tanto la eficiencia es función no solo de la carga de sólidos, sino también del tiempo de retención por ésta razón no se han

podido desarrollar ecuaciones matemáticas que describan ésta operación en forma aceptable y por consiguiente, se recurre a ensayos experimentales (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente 1982).

Para estimar el consumo de energía que se requiere para hacer girar el mecanismo de rastillo dado con una velocidad determinada en el sedimentador, es preciso disponer de correlaciones empíricas de torque y de potencia en función de otras variables o parámetros del sistema. La forma de tales correlaciones puede encontrarse por análisis dimensional, en función de las medidas importantes del tanque determinadas a través de las condiciones reales y teóricas de proceso de sedimentación.

2.4. Determinación del área de sedimentación disponible para sedimentación ininterrumpida

Para determinar el tamaño en el diseño de un sedimentador se requiere de la determinación del área de sedimentación y la profundidad del sedimentador, en función del caudal y de las características de la alimentación, así como de la concentración de la suspensión que abandona el sedimentador por la parte inferior del mismo (Mariño et al. 2009). En la figura 2.1 corresponde al esquema de un sedimentador de régimen continuo, mostrando estas características:

- Caudal de alimentación, Q .
- Concentración de sólidos en la alimentación C_0 .
- Sólidos en la alimentación S_0 .
- Caudal de descarga, Q_2 .
- Concentración de sólidos en la descarga C_2 .
- Sólidos en la descarga S_2 .
- Caudal de licor clarificado, Q_1 .
- Sólidos en el rebose S_1 .

El área de un sedimentador debe ser tal que proporcione suficiente tiempo de retención, como para permitir que la partícula con la menor velocidad de sedimentación pueda llegar al fondo del tanques antes que al rebose. La dimensión de un sedimentador se expresa a menudo mediante el área disponible por unidad de sólidos

secos en peso por día ($\text{m}^2/\text{t}/\text{día}$). En la literatura clásica (Browns 1965; Pávlov 1981; Kasatkin 1987, Perry 2008) el área de sedimentación de una cámara colectora de polvo o de un sedimentador para pulpas minerales se determina mediante la fórmula:

$$F_{sed} = \frac{V}{\omega_{sed}^*} \quad (2.1)$$

Donde:

F_{sed} – área de sedimentación; m^2

V – gasto másico volumétrico de líquido que pasa a través del aparato paralelamente a la superficie de sedimentación; m^3/s

ω_{sed}^* – velocidad de cálculo media de sedimentación obstaculizada; m/s

Según Pávlov (1981) la relación entre la velocidad de cálculo media de sedimentación obstaculizada de las partículas y la velocidad de sedimentación unitaria depende de la concentración volumétrica de la suspensión.

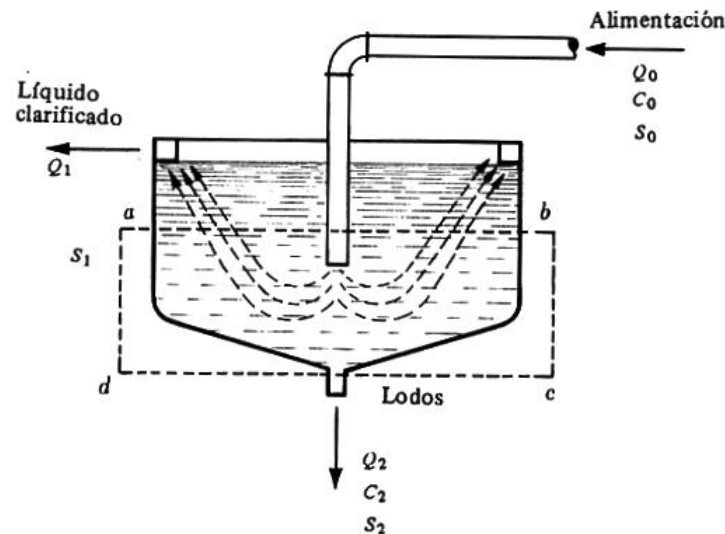


Figura 2.1. Balance de materia de un sedimentador.

En los cálculos aproximados teniendo en cuenta, en cierto grado, la diferencia entre las condiciones reales de sedimentación y las condiciones teóricas (sedimentación obstaculizada, forma de las partículas, movimiento del medio), la velocidad de cálculo media de sedimentación se toma con frecuencia igual a la mitad de la velocidad teórica de sedimentación de una partícula unitaria y se calcula por la expresión (Pávlov 1981; Mariño et al. 2009):

$$\omega_{sed}^* = 0,5 \cdot \omega_{sed} \quad (2.2)$$

Con arreglo a un sedimentador de acción ininterrumpida para sedimentación de las pulpas minerales (figura 2.2.), la expresión 2.1 adquiere la siguiente forma (Pávlov 1981; Mariño et al. 2009):

$$F_{nec} = F_{esp} \cdot P \cdot K \quad (2.3)$$

Donde:

F_{nec} – área necesaria para la sedimentación; m^2

F_{esp} - área específica del sedimentador; $m^2 \cdot h/t$

P - Productividad necesaria; t/h

K - coeficiente de seguridad;

El coeficiente de seguridad es superior a la unidad y puede llegar a 2 y más, en dependencia de la confiabilidad del cálculo. Para este estudio se definió $K = 1,2$ para una seguridad del 20%.

El valor de la concentración inicial c_0 , kg/dm^3 viene dado por la expresión siguiente:

$$c_0 = \frac{\rho_s \cdot (\rho_{pulp} - \rho_m)}{\rho_s - \rho_m} \quad (2.4)$$

Donde:

c_0 - concentración inicial, kg/dm^3

ρ_s - densidad del sólido; kg/dm^3

ρ_{pulp} - densidad de la pulpa o suspensión; kg/dm^3

ρ_m : densidad del medio líquido; kg/dm^3

Metodología de Talmadge y Fitch

Este método utilizado responde a la norma cubana NRIB “Prueba de sedimentación” consiste en la confección de una curva de sedimentación característica de la pulpa, a partir de las lecturas de la cama de sólidos en función del tiempo, a partir de ellas valiéndose de construcciones de gráficos, determinar todos los factores necesarios para el cálculo de la velocidad de sedimentación, superficie específica y unitaria de sedimentación y de la altura de la columna de sólidos.

Establece que el área específica de sedimentación necesaria para lograr la concentración de sólidos en el producto espesado deseado es:

$$F_{esp} = \frac{t_u}{c_o \cdot h_o} \quad (2.5)$$

Cuando se desea obtener el valor del área específica en $\text{m}^2 \cdot \text{d}/\text{t}$, estando expresado el tiempo unitario t_u en min, la concentración c_o en kg/dm^3 y la altura h_o en mm, la ecuación anterior se queda de la siguiente forma:

$$F_{esp} = 0,6994 \frac{t_u}{c_o \cdot h_o} \quad (2.6)$$

Donde:

Donde:

t_u - tiempo unitario; min

h_o - altura inicial; mm

De acuerdo a razonamientos anteriores, para determinar el tiempo unitario presente en estas ecuaciones, es necesario conocer la ubicación del punto crítico.

Todas las expresiones anteriores permiten calcular el área de un sedimentador para sedimentación ininterrumpida, donde la única variable desconocida es la velocidad de sedimentación ω_{sed}^* , que es función de la concentración existente en la zona de sedimentación, cuyo cálculo se hace experimentalmente, pendiente del tramo recto de la curva de la figura 2.2.

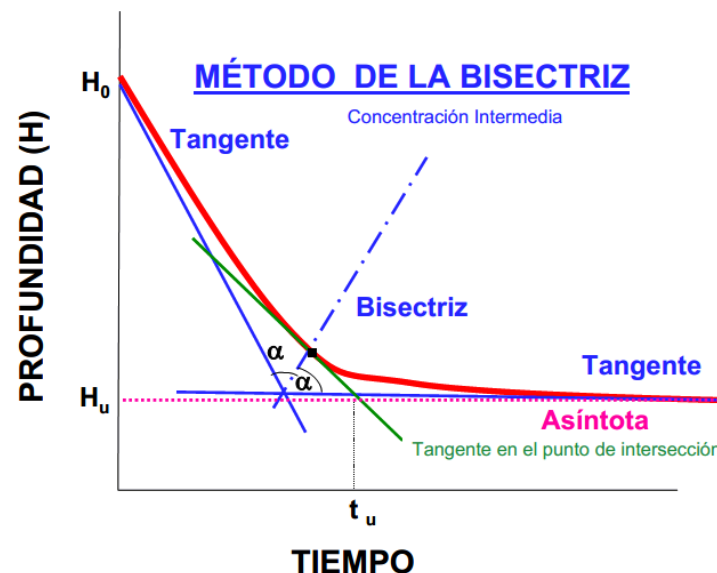


Figura 2.2. Curva de la cinética de la sedimentación. **Fuente:** (Núñez 2001)

El volumen de líquido claro producido en la unidad de tiempo por un sedimentador continuo depende fundamentalmente del área de la sección transversal disponible para la sedimentación, siendo en los sedimentadores industriales casi independiente de la profundidad del líquido (McCabe 1991; Mariño et al. 2009). Por eso en nuestro trabajo sólo nos limitaremos al cálculo del área disponible para la sedimentación, como parámetro fundamental para selección o diseño del sedimentador.

2.4.1. Cálculo del diámetro del tanque del sedimentador para sedimentación ininterrumpida

Poseen mayor divulgación los sedimentadores continuos de sección circular de un piso, como se indicó en capítulos anteriores; dependiendo la elección de uno u otro de factores como tamaño de la instalación, terreno disponible, experiencia del contratista, estimación de costos, entre otros.

Una vez determinada el área de la sección transversal disponible para la sedimentación. Se determina el diámetro para la selección del tanque del sedimentador mediante la expresión:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{nec}}{\pi}} \quad (2.7)$$

Donde:

D – diámetro del sedimentador; m

Fsed–área de sedimentación necesaria; m²

2.5. Requerimientos de torque operativo durante la sedimentación ininterrumpida

Las necesidades de torque operativo de un sedimentador durante el funcionamiento normal, es una fracción del recomendado, seleccionado, o aplicado. Actualmente en la literatura no existe un método exacto para determinar el par máximo operativo para la selección del mecanismo de accionamiento de un sedimentador.

Según Mular y Bhappu (1982) y Cabrejos (2011) la capacidad de accionamiento y de arrastre del mecanismo de accionamiento de un sedimentador durante el proceso de espesado es una función de:

- Del tipo de material.

- De la distribución granulométrica.
- Del tipo de sedimentador.
- Del porcentaje de sólidos en la descarga (o underflow).
- De la reología.

La pulpa espesada sobre el piso de un sedimentador circular resiste el movimiento de las rastras, por lo que produce torque. En la literatura (Mular y Bhappu 1980; MIP Process Technologies 2009; Cabrejos 2011) el cálculo del torque para una unidad de transmisión circular está basado en una ecuación simple de viga volada representada por la ecuación empírica (2.8):

$$T = K \cdot D^2 \quad (2.8)$$

Donde:

T – torque operativo en sedimentación ininterrumpida; N·m

D - diámetro del sedimentador; m

K - factor del par del mecanismo de accionamiento; N/m, depende de las características de la alimentación, así como de la concentración de la suspensión que abandona el sedimentador por la parte inferior.

$$K = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + 2}{5} \quad (2.9)$$

Para lo que:

K – factor del par del accionamiento; N/m

K₁ – coeficiente de cálculo referido por ciento de sólidos en el hundido; N/m

K₂ – coeficiente de cálculo referido a la distribución granulométrica; N/m

K₃ – coeficiente de cálculo referido la densidad del sólido; N/m

K₄ – coeficiente de cálculo referido a la carga de sólidos secos; N/m

Los coeficientes envueltos en la ecuación 2.9 se determinaron a partir de representaciones gráficas (figura 1, del anexo 1) y conocido el valor de K se clasifica el trabajo que desarrolla el sedimentador (ligero, normal, duro o muy duro) utilizando la tabla 1 del anexo 2.

2.6. Velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo

La velocidad de rotación acondicionada del motor eléctrico al eje de los brazos de barrido del fondo del sedimentador, ha de ser entre $0,015 \div 0,5 \text{ min}^{-1}$ (Kasatkin 1987), para que giren a baja velocidad; una agitación suave del precipitado en la zona de compresión favorece a una deshidratación más intensa de éste.

La velocidad de la salida del reductor (coincide con la velocidad de rotación de los brazos), según MIP Process Technologies (2009) y Cabrejos 2011 puede calcularse como a partir de la ecuación (2.10):

$$n_{\text{brazos}} = \frac{v}{\pi \cdot D} \quad (2.10)$$

Donde:

n_{brazos} - velocidad de rotación de salida; min^{-1}

v - velocidad periférica del rastrillo; m/min , generalmente los sedimentadores operan a una velocidad en el rastrillo de 8 a 12 m/min .

D - diámetro del sedimentador; m

La confirmación de este resultado se observa en los efectos beneficiosos que reciben de la agitación suave, los precipitados acuosos coloidales y ciertas pulpas metalúrgicas (Lothar; 2012).

2.7. Determinación de la potencia consumida en sedimentación ininterrumpida

El torque máximo operativo para la selección del mecanismo de accionamiento y la velocidad de rotación de los brazos determinan la potencia necesaria para sedimentación ininterrumpida que sirve para la selección del motor eléctrico para accionar su mecanismo central.

Esta potencia para la selección del motor eléctrico puede calcularse mediante la ecuación 2.8 (MIP Process Technologies 2009):

$$N_m = T \cdot \omega = \frac{2\pi \cdot n \cdot T}{60 \cdot 1000 \cdot \eta} \quad (2.11)$$

Donde:

N_m - potencia consumida para sedimentación ininterrumpida; kW

T - par operativo en sedimentación ininterrumpida; $\text{N}\cdot\text{m}$

η - rendimiento total de la transmisión mecánica; adimensional

n – velocidad de rotación a la salida de la transmisión mecánica; min^{-1}

Según MIP Process Technologies (2009) se toma 0,5 como valor promedio del rendimiento total de la transmisión mecánica, para diseño previo. Lo que garantiza un ligero sobredimensionamiento del motor. Lo que permite disponer de una fuerza extra de accionamiento para las demandas picos y evitar las paradas o atascos.

2.8. Equipos. Metodologías experimentales utilizadas

Definir durante el diseño de un sedimentador los requerimientos de consumo de energía para aumentar la concentración de sólidos de una pulpa industrial por medio de la sedimentación, es de constante preocupación para evitar las paradas o condiciones inusuales de operación de su mecanismo de accionamiento; por lo que se hace necesario determinar las regularidades del comportamiento del consumo de energía. Dicha regularidades están en función de par (torque) requerido para mover el mecanismo de rastrillos a través de los sólidos sedimentados que, conjuntamente con los parámetros de diseño, las características de la alimentación y la evacuación del producto espesado, pueden influir en las mismas.

Lo planteado implica la realización de ensayos en planta piloto o laboratorio para caracterizar las propiedades del sólido, del líquido, así como de la pulpa resultante. Se deduce entonces la necesidad de predecir a través de correlaciones empíricas si el consumo de energético de un sedimentador es una función del tamaño del tanque, de las características de la alimentación y de la evacuación del producto espesado.

A continuación se relacionan los experimentos que se concibieron para las muestras de pulpas minerales lateríticas de diferentes frentes o etapas del proceso productivo en la UBP de Lixiviación y Lavado:

1. Análisis del proceso de sedimentación.
2. Análisis reológico.
3. Análisis de la distribución granulométrica.

Con un programa de ensayos, se debe de estimar un cronograma y determinar el tamaño de la muestra. Por lo tanto, se debe de realizar una solicitud para el volumen de pulpa requerido y las instrucciones de cómo empaquetar y enviar la muestra. Finalmente, se describirá como las muestras son recibidas y preparadas para ensayar.

1. Selección y preparación de las muestras.

Para determinar el volumen requerido para realizar los ensayos con pulpas, se debe de analizar el requerimiento de pulpa por cada ensayo a realizar y sumarlos. Las cantidades aproximadas de pulpa para cada ensayo pueden ser estimadas según la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Cantidades aproximadas de pulpa para realizar los ensayos

Ensayo de pulpa	Cantidad aproximada	Observación
Concentración recibida	1/4 litro	-
Análisis de tamices	1/2 litro	-
Reología	1 litro	Para ensayar mínimo 3 concentraciones ($C_w \pm 5\%$)
Prueba de sedimentación	1 1/4 litro	-

Fuente: Adaptado de Laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ).

Para un programa completo del laboratorio, que incluye todos los ensayos disponibles, no más de 4 galones (15 litros) de muestra serán requeridos y asumiendo que la muestra enviada se encuentra a una concentración en peso de sólidos representativa.

2. Análisis del proceso de sedimentación.

El estudio de la cinética del proceso de sedimentación permite determinar la velocidad de sedimentación de una pulpa floculada y con elevada concentración de partículas sólidas y poder determinar el área unitaria de sedimentación.

El procedimiento aplicado estuvo conforme al método de Talmage y Fitch implementado en la norma NRIB-11-02-12 y NRIB-579 para la Industria Básica del actual Ministerio de Minas y Energía en relación a lo propuesto por (Peña y Sam 2007; Giacomani et al. 2008; Armin et al. 2009): método estándar para prueba de sedimentación, velocidad de sedimentación, así como el área unitaria. Considerando que éste resulta justo, únicamente en pulpas cuyo contenido de sólidos se encuentra en el rango entre 10 y 30 % (Perry 2008) y cuya dispersión granulométrica es relativamente pequeña; esto último es característico de las pulpas de sólidos que tienden a flocularse (Armin et al. 2009; Pérez et al. 2010; González et al. 2012;

Castellanos et al. 2012); como ocurre en el caso específico de las pulpa minerales lateríticas.

- Materiales utilizados

1. Probeta esmerilada.
 2. Balanza técnica con error de 0,1 g.
 3. Cronómetro.
 4. Muestras de pulpas minerales lateríticas del proceso industrial tomadas en la entrada y salida de los sedimentadores, de la cual se conoce la densidad de sus fases.
3. Análisis reológico.

La presencia de los sólidos (específicamente finos) en una pulpa, cambia la reología del fluido o líquido espesado. Se incrementa la viscosidad de la pulpa, y su movimiento se hace dependiente de la fricción y en algunos casos no llegan a sedimentar y se sale del mismo por la parte superior; en líquido que rebosa.

El estudio reológico de las pulpas minerales lateríticas en la investigación, se realizó en el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ), donde se determinó la relación del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad mediante el uso del viscosímetro rotacional REOTEST 2 (figura 2.3).



Figura 2.3. Viscosímetro rotacional REOTEST 2

Para la determinación de la densidad (concentración) de las pulpas, se ha empleado una técnica picnométrica. Para ello se ha determinado la masa de un recipiente con un volumen de 1000mL, el cual fue llenado con cada muestra de pulpa. La diferencia entre la masa de dicho recipiente vacío y seco, y lleno de cada una de las pulpas ha sido empleado para la determinación de la densidad.

La viscosidad aparente se determinó mediante un viscosímetro rotacional, de cilindros coaxiales (figura 2.3). El modo de operación de éste aparato consiste en aplicar un gradiente de velocidad a la muestra haciendo girar el cilindro interno (husillo). De esta manera la pantalla digital ofrece un valor de viscosidad aparente distinto para cada gradiente aplicado (en el caso de fluidos no newtonianos).

4. Análisis de la distribución granulométrica.

La distribución de partículas sólidas tiene una fuerte influencia en la viscosidad de una pulpa. La hidráulica de una pulpa que contiene cantidades significativas de partículas finas más pequeñas que 74 μm depende de la reología.

Para la determinación distribución granulométrica mediante la experimentación se aplicó el siguiente procedimiento:

- Procedimiento NC -631. Método estándar para determinar la distribución del tamaño de partículas por tamizado de minerales.

Este método se basa en pesar la muestra y hacerla pasar por un juego de tamices, pesando el retenido en cada tamiz, y determinar el porcentaje de este con relación a la masa de la muestra inicial.

- Aparatos y utensilios

1. Juego de tamices seleccionado de acuerdo al interés del cliente.
2. Estufa eléctrica capaz de alcanzar hasta 105 °C, con control de temperatura que garantice una variación de ± 5 °C.
3. Balanza de precisión para la determinación de la masa con una sensibilidad de la menos 0,1 g.
4. Vibrador de tamices para vía húmeda o vía seca.
5. Cepillo de nylon.
6. Brocha de cerda animal.

7. Cuarteadores manuales o mecánicos.
8. Recipiente o capsulas para secar muestras.
9. Pala de mano.
10. Ducha y conexiones para agua.
11. Desecadoras.

La forma de las partículas sólidas de una pulpa afecta la velocidad de asentamiento de dichas partículas. La forma de una partícula es determinada observando la velocidad de asentamiento de las partículas sólidas de un tamaño dado; efectuado en un cilindro vertical lleno de agua y a una temperatura constante.

- **Número de corridas experimentales**

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial 2^k . El número de corridas experimentales se determinó en correspondencia con lo planteado en la literatura (Suárez 1998; Turro 2002; Laurencio 2012) y los valores prefijados por el viscosímetro; tomándose cinco niveles del gradiente de velocidad y 3 niveles de concentración de sólidos en peso, para tres réplicas de cada experimento.

2.8.1. Procesamiento estadístico de los datos

El procesamiento de los datos se efectuó mediante la norma cubana NC - 92 – 21, que establece el procedimiento para evaluar la anormalidad de los resultados de las observaciones de una variable aleatoria continua, cuya distribución probabilística sea normal.

Para una serie ordenada de los resultados de las observaciones de una variable aleatoria continua:

Se calcula la media muestral:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2.12)$$

Donde:

X_i - elementos de la serie.

n - número de pruebas.

Y la desviación típica muestral:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.13)$$

Este procedimiento es para evaluar la anormalidad de los resultados de las observaciones cuando la desviación típica es desconocida.

Los términos y definiciones adoptados en esta norma concuerdan con los de la NC 92-01-1:78, control de la calidad. Términos y definiciones, y NC 92-01-2:78 control de la calidad. Cálculo de probabilidades y estadística aplicado al control de la calidad. Términos, definiciones y símbolos.

2.9. Conclusiones del capítulo 2

1. Se describieron los métodos, procedimientos y condiciones experimentales, que fundamentan las propiedades a investigar para argumentar la relación entre los índices tecnológicos de la sedimentación ininterrumpida y consumo de energía en sedimentadores de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
2. Se propone una metodología de cálculo que tiene en cuenta los efectos de las condiciones reales y teóricas del proceso de sedimentación sobre los parámetros de diseño y permite el pronóstico del consumo de energía de los sedimentadores, bajo condiciones diferentes condiciones operación:
 - La expresión 2.8 constituye el modelo para el cálculo de torque operativo que debe desplegar el mecanismo de accionamiento del sedimentador para mover el mecanismo de rastrillo a través de la pulpa espesada. El mismo es función caudal, de las características de la alimentación y densidad de la suspensión que abandona el sedimentador por la parte inferior.
 - La expresión 2.11 constituye el modelo para el cálculo del consumo de potencia durante la sedimentación ininterrumpida que sirve para la selección del motor eléctrico para el accionamiento. La misma está en función del par, la velocidad de los brazos de barrido de fondo y del rendimiento de la transmisión.

Capítulo 3

Análisis de los Resultados

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

En los capítulos precedentes se establecieron las teorías, materiales y los procedimientos que permiten determinar la influencia del proceso de sedimentación en el consumo energético de los sedimentadores utilizados en la tecnología carbonato amoniacal para el procesamiento de minerales lateríticos.

El método de analogía, aplicado en parte de los resultados del trabajo, tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase en procesos mecánicos reales. Las analogías empíricas incluyen el comportamiento real del proceso en estudio, este es un método válido independientemente de la complejidad del problema. Sin embargo, su precisión es adecuada si se utilizan dentro del intervalo de aplicación en el cual fueron desarrolladas.

Se hace necesario establecer los criterios y resultados, que fundamentan el cumplimiento del objetivo y la veracidad de la hipótesis, a partir del análisis y procesamiento de la información obtenida a través de la observación, la experimentación y cálculos.

En este capítulo tiene como **objetivo** el de valorar los resultados obtenidos para explicar los fundamentos científicos e interpretar las regularidades observadas que conducen a la solución del problema identificado.

3.2 Resultados experimentales del análisis del comportamiento reológico de las pulpas minerales lateríticas

Para la determinación de las características reológicas se muestrearon pulpas minerales del proceso, en sedimentadores que abarcaron desde las etapas de lixiviación hasta las etapas de lavado. La proporción de sólidos en las pulpas estuvieron en el siguiente orden 17 %, 27 % y 46 % de sólidos, estas pulpas son floculadas magnéticamente a la salida de los turboaireadores antes de su entrada a los sedimentadores. Dichas pruebas se realizaron en un reómetro rotacional Rheotest 2.

Se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.1, en la misma se recoge la dependencia entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para las diferentes concentraciones de sólidos experimentadas. Con los resultados experimentales, se construyeron las curvas de flujo mediante el empleo de software (Microsoft Excel2007), donde se identificaron los parámetros del modelo matemático que relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, así como su coeficiente de correlación.

Se representaron gráficamente los datos experimentales del esfuerzo de corte (τ) en función del gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$) y se trazaron las curvas de flujo (figura 3.1), las mismas permiten realizar el ajuste de los datos mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del estudio reológico a la pulpa mineral laterítica

No.	Pulpa de fondo del sedimentador 109 C, concentración de sólidos de 17 %		Pulpa de fondo del sedimentador 201 B, a una concentración de sólidos de 27 %		Pulpa de fondo del sedimentador 221 B, a una concentración de sólidos de 46 %	
	Gradiente de Velocidad, $\dot{\gamma}(1/s)$	Esfuerzo de corte, τ (Pa)	Gradiente de Velocidad, $\dot{\gamma}(1/s)$	Esfuerzo de corte, τ (Pa)	Gradiente de Velocidad, $\dot{\gamma}(1/s)$	Esfuerzo de corte, τ (Pa)
1	129,81	7,72	122,23	15,2	111,65	24,32
2	183,83	9,03	182,59	17,4	182,06	26,19
3	291,15	9,8	299,73	20,22	322,91	29,23
4	440,81	11,5	462,11	23,23	523,63	34,14
5	730,26	14,08	775,73	27,36	920,98	40,51

En la figura 3.1 se observa que para todas las concentraciones de sólido en peso la viscosidad aumenta dependiendo cada vez más de la mineralogía y el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo de Bingham, confirmándose lo expresado por Garcell et al. (1988) y Gaitán (2010). El comportamiento manifestado, está caracterizado por los parámetros reológicos, esfuerzo cortante inicial τ_0 y viscosidad plástica μ_p . En cuanto a los

parámetros reológicos, fue posible identificar la tendencia respecto a la dependencia de cada factor con la concentración de sólidos en peso. Los modelos ajustados para cada concentración de sólidos en peso se exponen en la tabla 3.2.

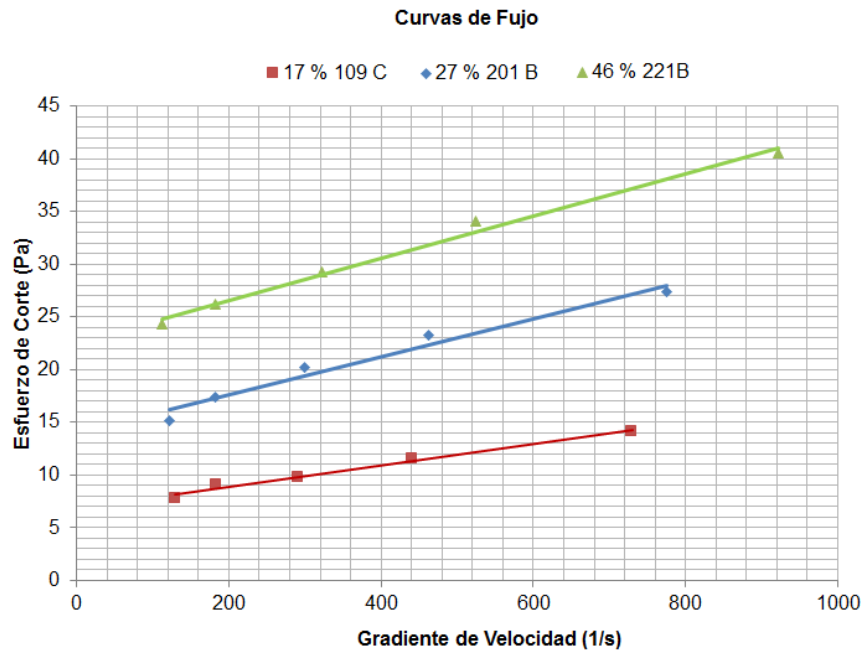


Figura 3.1. Curvas de flujo de las pulpas minerales lateríticas en función de la concentración de sólidos en peso.

Tabla 3.2. Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

Concentración de solidos	Modelo ajustado
17 %	$\tau = 6,83 + 0,0101 \cdot \dot{\gamma}$
27 %	$\tau = 14,038 + 0,018 \cdot \dot{\gamma}$
46 %	$\tau = 22,62 + 0,02 \cdot \dot{\gamma}$

En la tabla 3.3, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

Tabla 3.3. Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple.

No.	Parámetros	Concentraciones de sólidos en peso		
		17 %	27 %	46 %
1	$\mu_0(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0,101	0,018	0,02
2	$\tau_0 (\text{Pa})$	6,83	14,038	22,62
3	R^2	0,985	0,99	0,99

El coeficiente de correlación múltiple (R^2) en todos los casos fue superior a 0,996; por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales, indicativo de que se experimenta un fluido estable.

Los resultados obtenidos del comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad se muestran en la tabla 3.4. Los resultados obtenidos posibilitan visualizar el grado de variabilidad de la viscosidad aparente ante variaciones de la concentración de sólido en peso y el gradiente de velocidad, observándose en todo caso un comportamiento no newtoniano.

Tabla 3.4. Resultados obtenidos de la viscosidad aparente

No.	Pulpa de fondo del sedimentador 201 B, concentración de sólidos de 17%		Pulpa de fondo del sedimentador 109 C, a una concentración de sólidos de 27 %		Pulpa de fondo del sedimentador 221 B, a una concentración de sólidos de 46 %	
	Gradiente de Velocidad, $\dot{\gamma}(1/s)$	Viscosidad aparente μ (Pa · s)	Gradiente de Velocidad, $\dot{\gamma}(1/s)$	Viscosidad aparente μ (Pa · s)	Gradiente de Velocidad, $\dot{\gamma}(1/s)$	Viscosidad aparente μ (Pa · s)
1	129,81	0,05944	122,23	0,07928	111,65	0,21782
2	183,83	0,0491	182,59	0,06848	182,06	0,14385
3	291,15	0,03357	299,73	0,05876	322,91	0,09559
4	440,81	0,02557	462,11	0,04898	523,63	0,0652
5	730,26	0,01928	775,73	0,04288	920,98	0,04215

Con el empleo de los resultados mostrados en la tabla 3.4 se graficó el comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad (figura 3.2).

En la figura 3.2 se resalta que la viscosidad aparente de las pulpas minerales lateríticas disminuye de forma potencial con el aumento del gradiente de velocidad. En la misma se puede apreciar que para los menores valores del gradiente de velocidad se manifiesta un mayor cambio de la viscosidad. Lo que coincide con lo planteado por la literatura (Brows 1965; Kasatkin 1987; McCabe 1991; Gaitán 2010) asociado a cambios de estructuración en el comportamiento de las partículas dispersas en suspensiones minerales.

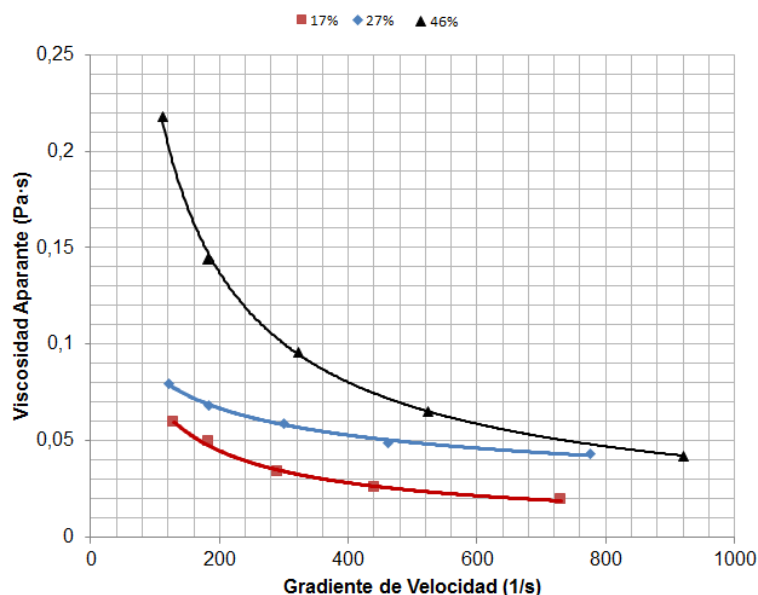


Figura 3.2. Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

3.3. Resultados experimentales del análisis de la distribución granulométrica de las pulpas minerales lateríticas

Como se planteó anteriormente se inició el trabajo con un análisis de diferentes muestras de pulpas minerales lateríticas procedentes del proceso productivo de la UBP de Lixiviación y Lavado. La masa de la muestra que se utilizó en el análisis granulométrico se define sobre la base de la recomendación propuesta en la norma NC 631 (2008) elaborada por el Comité Técnico de Normalización de Minerías y Minerales para el análisis granulométrico por tamizados de minerales para las empresas pertenecientes al Ministerio de Energía y Minas, aplicable a tamaño de partículas desde 36 μm hasta aproximadamente 71 mm.

Los resultados experimentales obtenidos del análisis de la distribución granulométrica de las pulpas minerales lateríticas se muestran en la figura 3.3, donde se muestra la curva granulométrica resultante del ensayo de análisis de tamices.

La distribución del tamaño de partículas sólidas en las pulpas minerales lateríticas, tiene una fuerte influencia en la viscosidad. Además, se tiene que considerar que si se tiene un amplio rango de tamaños de partículas, se debe de considerar los datos más desfavorables para la sedimentación ininterrumpida.

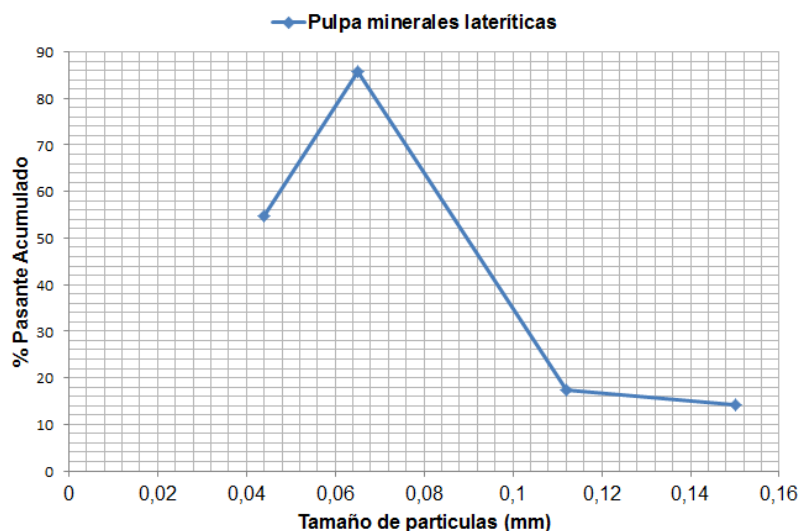


Figura 3.3. Resultados del ensayo de análisis de tamices (curvas granulométricas).

Es importante destacar que aproximadamente el 85 % de la muestra contiene un diámetro de inferior a 0,065 mm. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas estructurales (Turro, 2002). Del análisis se deriva que las muestras de lodo constituyen sistemas altamente polidispersos.

Es sabido que la velocidad de reacción en este sistema de lixiviación depende del tamaño de la superficie de las partículas minerales. Cuando las partículas de mineral son pequeñas, se aumenta la superficie de contacto de ésta con la solución acelerándose la lixiviación de los metales. Sin embargo, el mineral muy molido no favorece las cualidades de sedimentación y se crean dificultades con la separación de la cola de la solución.

3.4. Resultados del análisis de la sedimentación realizado a las pulpas minerales lateríticas

Se presentan a continuación los resultados de las curvas de sedimentación obtenidas por vía experimental en las corridas de sedimentación realizadas a las pulpas minerales lateríticas (floculadas) a diferentes concentraciones, que se muestrearon en la alimentación de los sedimentadores 109 C, 201 B, 221 B. Para ello se realizó un control riguroso en las lecturas, anotando el volumen de la suspensión, indicado por la superficie limítrofe entre el licor clarificado y la cama de

sólidos (pulpas), a intervalos de tiempos prefijados, de acuerdo con las características de las pulpas; tomando en calidad de lectura final, la realizada a las 24 h. La información fue acopiada según la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Modelo utilizado para recogidas de datos experimentales sobre la cinética de la sedimentación.

Tiempo	Volumen	Altura
τ (min)	V_3 (cm ³)	H (mm)

Estos resultados fueron graficados (figura 3.4), para determinar el tiempo unitario, así como el área necesaria o disponible de sedimentación, Para facilidad de observación, las tres curvas de sedimentación se muestran a continuación.

Tabla 3.6. Tiempo unitario, crítico y altura crítica para los tres casos en estudio

Prueba	Tiempo unitario, τ (min)	Tiempo crítico, τ_c (min)	Altura, H (mm)	Velocidad de sedimentación, ω_{sed} (m/s)
A130-17	20	11	251	$3,8 \times 10^{-4}$
A130-27	35	26	168	$1,06 \times 10^{-4}$
A130-46	6	5	7	$2,2 \times 10^{-5}$

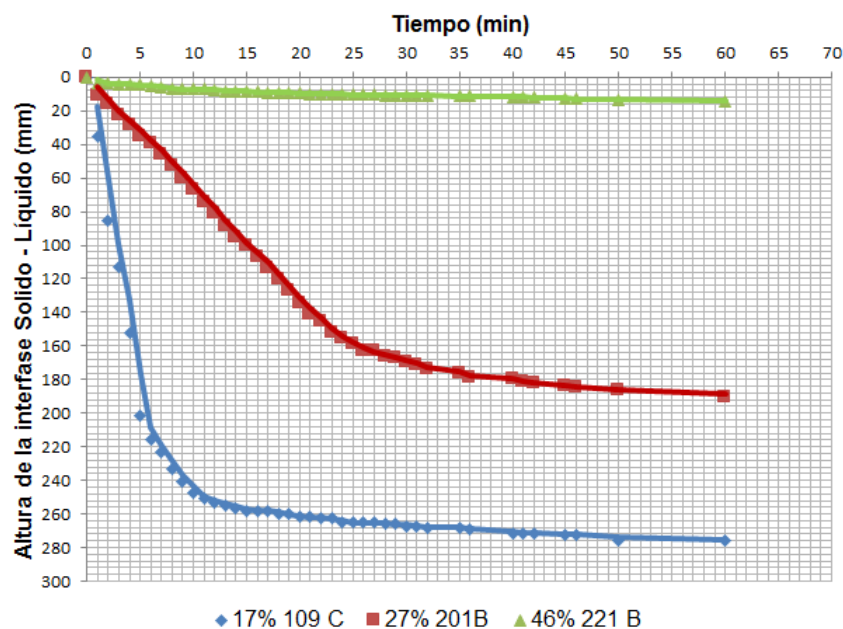


Figura 3.4. Comparación entre las curvas de sedimentación de las pulpas a diferentes concentraciones de sólidos en peso.

En la tabla 3.6 se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos de las pruebas de sedimentación realizadas.

Tomando como conducta de referencia los resultados mostrados en la tabla 3.6 se graficó el comportamiento de la velocidad de sedimentación en función de la proporción de sólidos en la pulpa (figura 3.5).

En la figura 3.5 se observa que la velocidad de sedimentación disminuye de forma potencial con el aumento paulatino de la concentración de sólidos en las pulpas minerales lateríticas, de manera que para los mayores valores de concentración de sólidos en peso se manifiesta una disminución considerable en la velocidad de sedimentación, lo que coincide con el principio planteado por las investigaciones desarrolladas (Coe y Klevenger 1916; Kynch 1952; Talmage y Fitch 1955; Mariño et al. 2010) asociado a que la velocidad de sedimentación de cada partícula, se encuentra en función únicamente de la concentración de sólidos a su alrededor. Estos resultados obtenidos justifican la necesidad de conocer los índices tecnológicos del proceso de sedimentación para estimar el consumo de energía involucrada en sedimentadores donde se manifiesta la sedimentación ininterrumpida.

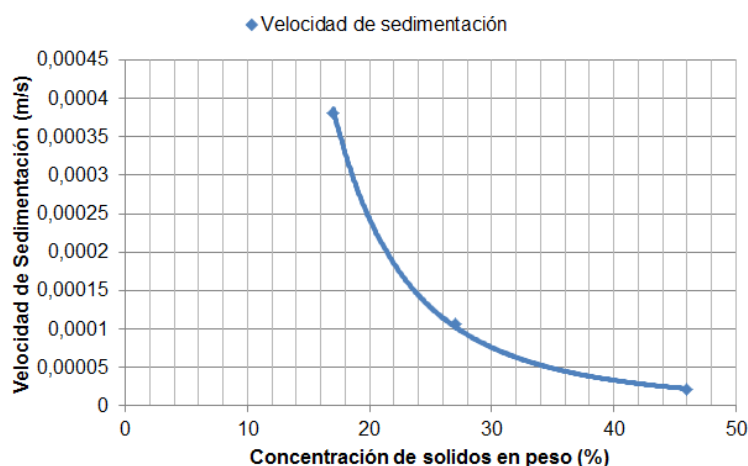


Figura 3.5. Dependencia de la velocidad y concentración de sólido en peso.

3.5. Resultados de la determinación del área de sedimentación disponible para sedimentación ininterrumpida

La determinación del área necesaria de sedimentación se realizó a partir de la ecuación 2.3, considerando la fase actual de producción de la empresa, que se

encuentra procesando 320 t/h de mineral reducido. Los resultados del cálculo se reflejan en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos del cálculo del área necesaria de sedimentación

Tiempo unitario τ_u (min)	Altura inicial h_o (mm)	Área específica de sedimentación necesaria F_{esp} ($m^2 \cdot d/t$)	Área específica de sedimentación necesaria F_{esp} ($m^2 \cdot h/t$)	Área necesaria de sedimentación F_{nec} (m^2)
20	251	0,194	4,6	1719
35	168	0,325	7,796	2994
6	7	1,281	30,74	10 180

Como se puede apreciar en la tabla 3.7, la disminución de la velocidad de sedimentación producto de un aumento paulatino de la concentración de sólidos en peso inicial de la pulpa, origina que sea necesario de disponer de una mayor área necesaria para llevar a cabo la sedimentación ininterrumpida de pulpas minerales lateríticas.

3.6. Cálculo del diámetro del tanque del sedimentador para sedimentación ininterrumpida

La determinación del diámetro del tanque del sedimentador para sedimentación ininterrumpida se realizó por la ecuación 2.7, teniendo en cuenta el área de sedimentación necesaria y los resultados se presenta en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados del cálculo del diámetro del tanque del sedimentador

No.	Área necesaria de sedimentación F_{nec} (m^2)	Diámetro del tanque D (m)
1	1719	47
2	2994	62
3	10 180	114

Con los resultados de la tabla 3.8, es posible realizar la selección del tamaño del sedimentador, así como del cálculo del espacio disponible para la instalación de los sedimentadores. Porque en general, y salvo contadas excepciones, el proceso de

separación sólido-líquido requiere ser efectuado de modo repetitivo, es decir, en varias etapas (Bouso, 1989).

3.7. Requerimientos de torque operativo durante la sedimentación ininterrumpida

Antes se tuvo que efectuar el cálculo del factor de par del mecanismo de accionamiento a partir de la ecuación 2.6. Considerando las características de la alimentación y de evacuación de los sólidos en los sedimentadores para la etapa actual del proceso de producción de la empresa reflejado en la tabla 2.1 del capítulo 2, estableciendo los coeficientes K_1 , K_2 , K_3 y K_4 por las gráficas del anexos 1, que están recogidos en la tabla 3.9. Por lo que si se sustituyen los datos se obtiene:

$$K = 257,6 \text{ N/m}$$

Tabla 3.9 Factores de cálculo K_1 , K_2 , K_3 y K_4 en la expresión 2.9 para determinar el torque operativo durante la sedimentación ininterrumpida establecidos.

Porcentaje de sólidos en la descarga (%)	Distribución granulométrica (% < 65 μ m)	Densidad del sólido ρ (kg/dm ³)	Carga de sólidos secos (m ² /t/día)
56	85	4,0	0,3
K_1 (N/m)	K_2 (N/m)	K_3 (N/m)	K_4 (N/m)
363	187	389	347

La determinación del torque operativo ininterrumpido necesaria para el desarrollo del proceso de sedimentación se realizó a partir de la ecuación 2.8, el diámetro del tanque (tabla 3,8) y considerando el factor del par del mecanismo de accionamiento. Los resultados del cálculo se reflejan en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Resultados del cálculo del torque operativo en la sedimentación.

No.	Diámetro del tanque D (m)	Factor del par del mecanismo de accionamiento K (N/m)	Torque operativo durante la sedimentación T (J)
1	47	257,6	569 038,4
2	62	257,6	990 214, 4
3	114	257,6	3 347 769,6

Los resultados de la tabla 3.10 reflejan que el trabajo desarrollado por los sedimentadores se califica de duro, en función del valor que se obtiene del

coeficiente de par del mecanismo de accionamiento ($K = 257,6 \text{ N/m}$), si es evaluado en la tabla 1 del anexo 2.

3.8. Velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo

La determinación de la velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo del sedimentador se realizó por la ecuación 2.10, teniendo en cuenta la velocidad periférica del rastrillo (8 m/min) y el diámetro del tanque (tabla 3.8), los resultados de los cálculos se reflejan en la tabla 3.11.

Los resultados de la tabla reflejan la velocidad necesaria en los brazos de barrido de fondo del sedimentador para que no se perturbe el proceso de sedimentación ininterrumpida, según lo planeado Kasatkin (1987) esta velocidad ha de ser entre $0,015 \div 0,5 \text{ min}^{-1}$.

Tabla 3.11. Resultados del cálculo de la velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo.

No.	Diámetro del tanque D (m)	Velocidad periférica del rastrillo V (m/min)	Velocidad de rotación n (min^{-1})
1	47	8	0,054
2	62	8	0,041
3	114	8	0,022

3.9. Determinación de la potencia consumida en sedimentación ininterrumpida

La determinación de la potencia consumida en sedimentación ininterrumpida se realizó a partir de la ecuación 2.11. Considerando el torque operativo (tabla 3.10), la velocidad de los brazos de barrido de fondo (tabla 3.11) y asumiendo un rendimiento en la transmisión mecánica ($\eta = 0,5$) que garantiza un ligero sobredimensionamiento en la selección del motor eléctrico. Lo que permite disponer de una fuerza extra de accionamiento para las demandas picos y evitar las paradas o atascos. Los resultados se reflejan en la tabla 3.12.

Los resultados de la tabla 3.12 reflejan que la sedimentación ininterrumpida es un proceso que demanda consumo de potencia, aquí se da cumplimiento al objetivo de este trabajo.

Tabla 3.12. Resultados del cálculo de la potencia consumida en sedimentación ininterrumpida.

No.	Velocidad de rotación n (min^{-1})	Torque operativo durante la sedimentación T (J)	Rendimiento de la transmisión η	Potencia consumida para sedimentación ininterrumpida N_m (kW)
1	0,054	569 038,4	0,5	6,4
2	0,041	990 214, 4	0,5	8,5
3	0,022	3 347 769,6	0,5	15,5

3.10. Valoración de las dimensiones ambiental y económica de la investigación

En la selección de los materiales y tecnología de fabricación de las piezas que conforman los sistemas de espesado de pulpas minerales se deben abarcar consideraciones claves, de consumo de energía y efecto sobre el medio, además de la sustentabilidad en la explotación de menas lateríticas en la zona oriental del país. La concentración de minerales tiene un peso relevante en su manipulación para obtener como resultado productos del níquel (sínter y óxidos de níquel), con una influencia marcada sobre los costos de operación y mantenimiento. Se analizan entonces las implicaciones ambientales y económicas que se producen en las líneas de transporte de minerales.

3.10.1. Determinación del efecto económico

El principal efecto económico del proceso de sedimentación está asociado a que se produzca la completa solidificación de la pulpa en el interior de los sedimentadores con malas consecuencias para el proceso productivo y la reparación del tanque.

Un caso de una completa solidificación, es necesario primeramente saltar un eslabón en el proceso de lixiviación, lo que disminuye la eficiencia y la calidad del proceso en sí, dado que ahora son menos los tanques se están sedimentando el mineral y por tanto el resultado final no es el mismo.

Muchas veces es necesario utilizar máquinas extractoras de mineral. Este proceso involucra mucha fuerza laboral y un derrame de la pulpa al suelo con grandes

pérdidas para la empresa y finalmente el problema puede durar varios días y los recursos destinados a solucionar las averías pueden ser muy grandes.

En el análisis económico se realiza la comparación de los costos de reparación capital del sedimentador y de mantenimiento para llevar a cabo la total sustitución de los brazos rígidos de fabricación rusa por la completa solidificación de la pulpa en su interior. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 3.13.

Tabla 3.13. Comportamiento de los costos de reparación capital del sedimentador

Concepto	Costo (CUP)
Materiales y Mano de Obra	2147095,2
Insumos de la Construcción	1324,59
Transportación horizontal y vertical en el perímetro fabril	221,78
Costo total	2 148 641,57

Por el concepto de consumo de lubricantes se gasta una suma total de 124 CUC. En este cálculo económico no se incluye los problemas con atrasos que puedan encarecer las labores de reparación capital.

Cundo se procede a la reparación capital del sedimentador la pulpa solidificada en su interior se derrama y se vierte en la presa de colas con pérdidas metalúrgicas para la planta que no están reflejadas en la tabla 3.13. Las pérdidas económicas por este concepto se reflejan en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Pérdidas Metalúrgicas de la planta

Valores Nominales	Extracción en los Reactores, (%)	Rangos Frecuentes de Variación	Variación de la Extracción	Pérdidas al año (ton)	Total (USD)
Temperatura, K (303-314)	Níquel= 90 Cobalto= 25	Temperatura, K (316-323)	Níquel = 88,5 Cobalto = 18	Ni = 149,7 Co = 53,6	Ni = 1 464 614,03 Co = 1 746 689,7
Densidad, kg/m ³ (1130-1140)	Níquel = 90 Cobalto = 25	Densidad, kg/m ³ (1650-1750)	Níquel = 89 Cobalto = 19	Ni = 149 Co = 55,6	Ni = 1 027 173,91 Co = 1 565 208
Pérdidas Metalúrgicas Totales en un Año (CUC)				Total: 5 184 763,82	

3.10.2. Impacto ambiental

La sedimentación ininterrumpida de pulpas minerales lateríticas en sedimentadores de acción continua con esquema tecnológico carbonato–amoniaco, está dado por una serie de actividades e impactos entre los que se pueden resaltar, la identificación de las acciones con repercusión ambiental (derrame de pulpa lixiviada al suelo, escape de amoníaco, emisión de ruido continuo) y la identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones (tabla 3.15).

Tabla 3.15 Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.

Medio Físico	Medio Socioeconómico
Suelo	Hombre
Agua	Aspectos Sociales
Aire	Aspectos Económico

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la disminución exacta del análisis desarrollado, determinando cómo repercute sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar tanto en el objeto como en los elementos externos a este.

El proceso de caracterización de los impactos ambientales (tabla 3.16) es de suma importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta en el análisis desarrollado, determinando como repercute sobre el medio cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el proceso de espesado y clarificación de pulpas minerales lateríticas por sedimentación.

Las afectaciones mencionadas producen efectos indirectos y negativos como degradación ambiental del medio marino y costero, sustitución de los ecosistemas originales de fondos arenosos por arcillosos, producto de los grandes volúmenes de sedimentos depositados en la zona infralitoral, y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental del hombre, expuestos también a enfermedades respiratorias.

Tabla 3.16. Identificación de los impactos ambientales asociados a la sedimentación ininterrumpida de pulpas minerales lateríticas.

Acciones o Actividades	Factores Ambientales	Impactos Ambientales
Escape de Amoniaco	Aire	Disminución de la calidad del Aire
Escape de Amoniaco	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Escape de Amoniaco	Económico	Pérdidas por concepto Económico
Derrame de la Pulpa	Económico	Consumo de los recursos hidráulicos
Emisiones de Ruido Continuo	Hombre	Pérdidas de la Sensibilidad Auditiva

3.11. Conclusiones del capítulo 3

- Se confirmó que existe relación entre los parámetros del proceso de sedimentación y el consumo de energía de los sedimentadores.
- Se estableció el comportamiento reológico de la pulpa y fue determinada la velocidad de sedimentación para diferentes concentraciones de sólido en peso.

Conclusiones

CONCLUSIONES GENERALES

1. Con los resultados obtenidos en el trabajo, se confirma que el proceso de sedimentación de las pulpas minerales lateríticas es un factor que incide de manera notable en los índices de consumo energético de los sedimentadores, sometidos a régimen de trabajo continuo.
2. Según los resultados experimentales de la reología de las pulpas minerales lateríticas se determinó que para todas las concentraciones de sólidos en peso presentó un comportamiento reológico que adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo de Bingham.
3. Las averías de los sedimentadores por la completa solidificación de las pulpas minerales lateríticas en su interior, causa un impacto económico anual negativo de 2 148 641,57 CUP por las reparaciones capitales de los tanques y de sus mecanismos de accionamiento y por pérdidas metalúrgicas un total de 5 184 763,82 CUC.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

1. Realizar otras investigaciones donde se pongan de manifiesto la influencia de otros factores del proceso de sedimentación de las pulpas minerales lateríticas en el consumo de energía de los sedimentadores.
2. Utilización de los métodos y materiales biográficos para futuras investigaciones.

Βιβλιογραφία

BIBLIOGRAFÍA

1. ECKENFELDER W .W. FORD D .L. 1970: Water Pollut. Control Experimental Procedures for Process Design. The Pemberton Press. Jenkins Publishing Co. Austin and New York, pp. 67-73, 220-233.
2. KNOCKE R. W. 1986: Effects of floc volume variation son Activated Sludge Thickening Characteristics. Jour. Water Pollut. Control Fed. 58 (7): 784-791.
3. LOTHAR H., M. 2012: Espesamiento de lodos a gravedad y por Flotación: Mecanismos y criterios de diseños: Compañía Estatal de Tecnología de Saneamiento Básico y Defensa del Medio Ambiente (CETEESB), Sao Pablo, Brasil.
4. TAKACS I., PATRY G, G. NOLASCO D. 1991. A Dynamic Model of the clarification. Thickening Process. Wat. Res 25:10: 1263-1271.
5. KOS, P. 1985: Sedimentation and thickening—General overview.” Proc., Engrg. Found. Conf., Flocculation, Sedimentation and Consolidation, B. M. Moudgil and P. Somasundaran, eds., 39–55.
6. CAMP. T. R. Sedimentation and the design of settling tanks. . Transactions ASCE, 111:895-918; 1946, Paper 2285.
7. FISHERSTROM. Sedimentation in Rectangular Basins. Proc. Amerc. Soc. Civ. Eng. May 1955.
8. LINZENMEIER, E. MUNCH. Med, Wsher, 1925, p.5.
9. HAZEN, ALLEN. On Sedimentation. Transaction ASCE, 5:45-71, 1904.
10. BRUNSMANN. Gravity Separation and flow Conditions. Pielkenrood Vinitex Pub.
11. TAY ANDREW TOO-HWA, HEIKE GARY. W. 1983. Velocity and Suspended Solids Distribution in Settling Tanks. JourWater Pollut. Control Fed. 55:03:261-269
12. MARIÑO-PÉREZ, A.; FALCÓN-HERNÁNDEZ J.; SALES-VALADAO, G., E.. 2100: Correlación teórica entre las concentraciones de sólidos en el lodo sedimentado por gravedad y en la torta sin escurrir. *Minería y Geología* 26 (4): 79-103.

13. BOUSO, J., L. 1989: Separación sólido-líquido: circuitos en contracorriente. *Canteras y Explotaciones: Tratamiento y Concentración*. Marzo.
14. KARL-R., J.; WELLS-A., S. 1999: Numerical model of sedimentation/thickening with inertial effects. *Journal of Environmental Engineering* 125 (9): 792-806.
15. OLIVA-UC, J.; GIACOMAN-VALLEJOS, G.; PÉREZ-CORTÉS, M... 2008: Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. *Ingeniería* 12 (2): 17-29.
16. HERNÁNDEZ-FLORES, A.; TRUJILLO-CODORNÍUX, R., A.; TOIRAC-SUÁREZ, M., M. 2009: Separación y concentración de fases minerales en la mena laterítica. *Minería y Geología* 25 (4): 1-14.
17. MARIÑO-PÉREZ, A.; FALCÓN-HERNÁNDEZ, J.; SALES-VALADAO, G., E.; ALMENARES-REYES, R., S. 2007: Nuevo enfoque para el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional. *Minería y Geología* 23 (3): 1-16.
18. BEYRIS-MAZAR, P.; FALCÓN-HERNÁNDEZ, J. 2007: Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. *Minería y Geología* 23 (1): 1-14.
19. ROJAS-VARGAS, A.; GARLOBO-CRUZ L.; SALAZAR-INFANTE Y.; GARCÍA-PÉREZ A. 2004: Efecto de la floculación magnética sobre las extracciones de níquel y cobalto (I). *Tecnología Química* 26 (2): 57 – 63.
20. COE, H. S.; CLEVINGER, G. H.. 1916: Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. *Trans. Am. Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum. Engrs.*, 55, 356.
21. RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N.. 1954. Sedimentation and fluidization: Part I.” *Trans. Instn. Chemical Engineers* 32(35)
22. SCHIFFMAN, R. L., PANE, V., AND SUNARA, V.. 1985: Sedimentation and consolidation. 'Proc., Engrg. Found. Conf., Flocculation, Sedimentation and Consolidation, B. M. Moudgil and P. Somasundaran, eds., 57–121.
23. CERPA, A. Y OTROS, 1999. Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions, *Clays and Clay Minerals*, 47: 555-520.

24. TARTAJ, P.; CERPA, A. Y OTROS. 2000. Colloid and Interface Science: 231, 176
25. TURRO BREFF, A.; GARCELL PUYANS, L.R.; IZQUIERDO PUPO, R. 2003. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso CARON, Tecnología Química 18 (2).
26. IGLESIAS, C.; GUERRA, I.; ÁLVAREZ ALONSO, A.; CASTELLANOS SUÁREZ, J. Y OTROS. 2005. Pruebas continuas a escala piloto de espesamiento de pulpa cruda con recirculación del reboso (Reporte Técnico). Agosto. Moa Nickel y La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.
27. PÉREZ GARCÍA, L.; GARCELL, L.R. 2006. Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. Tecnología Química, 25 (1).
28. HERRERA, V.; ALONSO, J. Y MARÍN, J. 2010. Estudio de las propiedades físico-químicas de las pulpas acuosas de minerales lateríticos (Informe de Proyecto 62028). La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.
29. HERRERA, V. Y CASTELLANOS SUÁREZ, J. 2005. Resumen de los reportes técnicos. Incremento del % de sólidos de la pulpa cruda (Reporte Técnico). Mayo. La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.
30. IGLESIAS, C.; GUERRA, I.; ÁLVAREZ ALONSO, A. Y CASTELLANOS SUÁREZ, J. 2006. Prueba industrial de dosificación de aditivo CIPIMM a la pulpa cruda alimentada al sedimentador – C. Julio. Departamento de Tecnología, División Técnica, Moa Nickel,
31. IGLESIAS, C.; GUERRA, I.; ÁLVAREZ ALONSO, A. Y CASTELLANOS SUÁREZ, J. 2006. Prueba industrial de dosificación de aditivo CIPIMM a la pulpa cruda alimentada al sedimentador – C. Julio. Departamento de Tecnología, División Técnica, Moa Nickel.

32. CASTELLANOS SUÁREZ, J.; ALFONSO OLMO, E.; ÁLVAREZ ALONSO, A., 2009. Procedimiento para mejorar el espesamiento de pulpas acuosas de minerales lateríticos en la tecnología ácida a presión. Certificado de Patente No. 23478.
33. ÁLVAREZ ALONSO, A.; DUMÉNIGO, M.; CASTELLANOS SUÁREZ, J. Y ALONSO, J. 2009. Estudio de las propiedades físico-químicas de los minerales en pulpas lateríticas (Reporte Técnico). La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.
34. CASTELLANOS-SUAREZ, J.; CASANOVA-GÓMEZ, A.; ÁLVAREZ-ALONSO, A.; CABALEIRO-PIEDRA, Y., CORTÉS-MIRANDA, M. 2012: Estudio de las propiedades físico-químicas de las pulpas de limonita. Artículos Científicos, INFOMIN, 4 (2). 19-29.
35. CORRAL-MARTÍNEZ, C. C. 2009: Velocidad de sedimentación de óxido de zirconio dispersado en alginato de sodio adicionado con goma gelan. Dr.C. Carlos Francisco Cruz Fierro (Tutor). Tesis de Residencia Profesional. Instituto Tecnológico de Durango. 52 p.
36. ZARATE-ROMANO, V. 1995: Estudios de sedimentación de lodos secundarios de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales del estado de Nuevo León. Dr.C. Alejandro Ramírez Alcázar (Tutor). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. 117 p.
37. CONDADO-LOZANO, J. 2012: Alternativas de disposición final de lodos estabilizados de la planta de tratamiento de aguas residuales de Xalapa, Veracruz. Ing. David Lozano Laez (Tutor). Trabajo de Diploma. Universidad Veracruzana. 66 p.
38. VEGA-GUZMÁN C, J., VILLACRESES-ZAMBRANO, A, J. 2006: Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio. Dr.C. David Matamoros (Tutor). Trabajo de Diploma. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 182 p.
39. SAYAGO-PEÑALOZA J. 2001: Estudio del efecto de la forma y el tamaño de las partículas sobre la velocidad de sedimentación gravitacional de suspensiones.

- Dr.C. Mary Luz Alonso (Tutor). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 119 p.
40. LAGUARDA-MARTÍNEZ, E. 2012: Investigation of sedimentation behaviour of Microcrystalline cellulose: Relating particle-to-particle interaction to sedimentation behavior. Dr.C. Tuve Mattsson (Tutor). Tesis de Maestría. Chalmers University of Technology. 44 p.
41. RANJAN-ROUT, J. 2011: Study of the settling characteristics of fly ash-water slurry and designing of a settling pond. Dr.C. P. Rath (tutor). Tesis de Grado. National Institute of Technology. 54 p.
42. CASTELLANOS SUÁREZ, J. Y ACEVEDO DEL MONTE, E. 2004. Las tecnologías y su impacto en la producción actual de Moa Nickel y su expansión. Centro de Investigaciones para la industria Minero Metalúrgica. La Habana, Cuba, Enero. (Presentación).
43. CONCHA, F.2001: Manual de Filtración y Separación. Universidad de Concepción, Chile.
44. EGOLF, C.B.; MCCABE, W.L. Rate of Sedimentation of Flocculated Particles. Trans. Alche. Vol 33. 1937. P 620
45. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. (CEPIS). 1981 .Teoría. Diseño y control de los procesos de clarificación de agua .Serie Técnica 13. Segunda impresión, Departamento de ingeniería y ciencias del Ambiente .Organización panamericana de la salud. Organización mundial de la salud. CEPIS, Perú, p p112.

Anexos

Anexo 1.

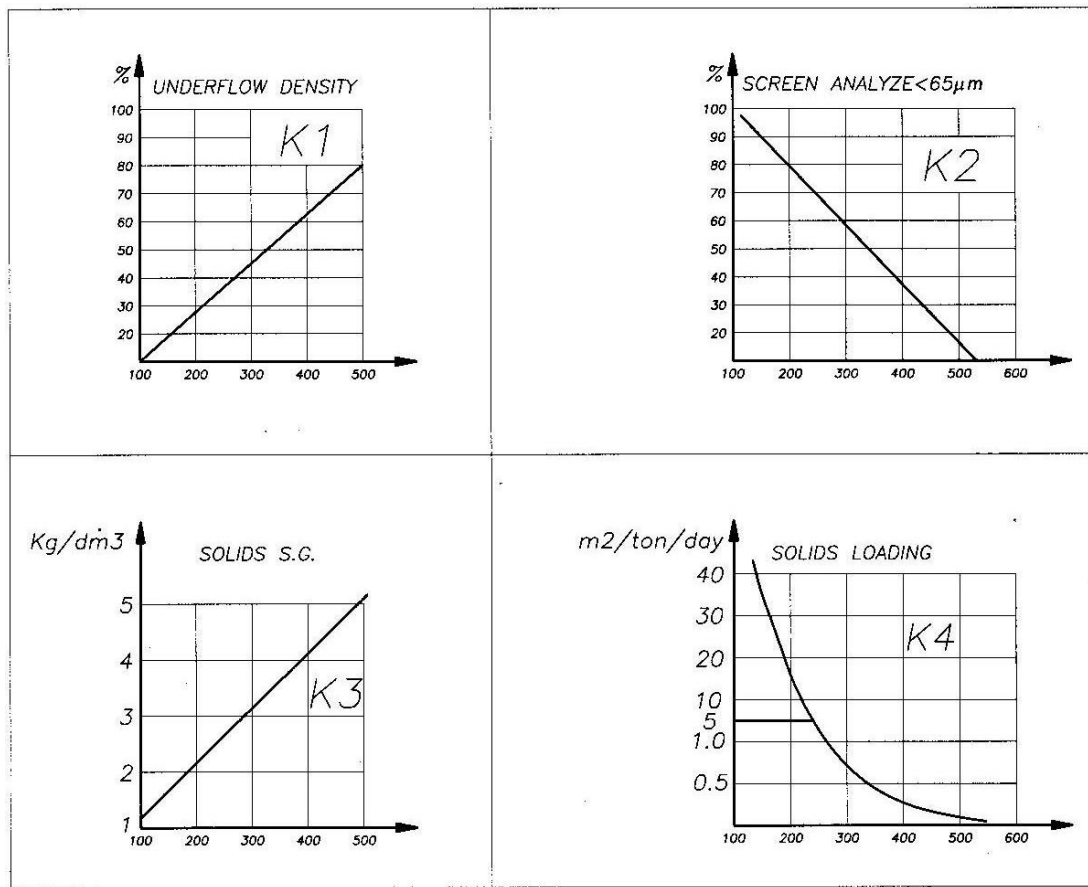


Figura 1. Gráficas para determinar el valor de los coeficientes K1, K2, K3, K4 para determinar a K, factor del par del mecanismo de accionamiento.

Anexo 2.

Tabla 1. Clasificación del tipo de trabajo del sedimentador para sedimentación ininterrumpida

CONCEPTO	Clasificación del trabajo			
	LIGERO	NORMAL	DURO	MUY DURO
Carga de sólidos $m^2/t/día$	Sobre 4.7	1.4 a 4.7	0.5 a 1.4	Menor que 0.5
Pie ² /t/día	(Sobre 50)	(15 a 50)	(5 a 15)	Menor que (5)
Concentración del hundido % sólidos secos	5 o menos	5-30	30-50	Más de 50
% del total de sólidos menores de 74 micras (% - 200 mallas)	100	85 a 100	50 a 85	Menos que 50
% del total de sólidos mayores de 210 micras (% + 65 mallas)	0	0 a 5	5 a 15	Más de 15
Peso específico de sólidos secos	1.0 a 1.25	1.25 a 3.0	3.0 a 4.0	Sobre 4.0
Determinación del par donde $Par = KD^2$				
K en Newton/metro donde D es el diá- metro del tanque en metros.	15 a 58	73 a 131	146 a 292	Sobre 292
K en libras/pie donde D es el diáme- tro del tanque en pies	1 a 4	5 a 9	10 a 20	Sobre 20

Fuente: (Mular y Bhappu 1982)

