



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. Antonio Núñez Jiménez
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO METALURGÍA

TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Título: Caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su perfeccionamiento en el hidrot transporte.

Diplomante: Yanet Caballero Noa

Tutores: Ing. Rodney Martínez Rojas
Ms. C Marlon Menéndez Hung
Ing. Luis Enrique González Driggs

Moa, 2008
"Año 50 de la revolución"



PENSAMIENTO

Solo el amor eterniza. Quien no ama se nulifica

Quien ama las cosas se cosifica

Quien ama a las personas se personaliza

Quien ama al infinito se eterniza.

El hombre tiene la misteriosa capacidad de reducirse a la nada o de elevarse hasta el infinito.

El hombre es la medida, la capacidad de Dios.

Dios es en cada persona lo que la persona le permita ser.

Yo soy mi propia capacidad de infinito o de aniquilación.

José Antonio Merino



DEDICO ESTE TRABAJO DE DIPLOMA

A mis padres José Antonio y María del Pilar como recompensa por su esfuerzo, dedicación y confianza cuando todo se volvió imposible a la mitad del camino. Con todo cariño y amor aquí esta la culminación de seis años de sacrificios, alegrías y tristezas.

A la memoria de Ayita, para que desde el cielo, se sienta orgullosa de verme realizada como profesional.

A mi Abuela Margot, mi tía Nelida, a Ana Maria, Elizabeth, Kela y a todos mis Primos Hermanos por preocuparse y contribuir a la culminación de mis estudios.

A toda la familia y en especial a los primos menores, Lili, Mary, Manry, Kirelis, Lismaydi y Cristian para que les sirva de ejemplo en un futuro.

A mis amigas Liane, Yari, Sandra, Jessica, Li y Karelin por todo su apoyo, consejos y por creer que si podía.



AGRADECIMIENTO

*Mil gracias doy a Dios por demostrarme que realmente él es **EL AMIGO QUE NUNCA FALLA**, a la Virgen de La Caridad por interceder como una madre y concederme mis suplicas.*

*Agradezco a la congregación **MISIONERAS CORAZON DE MARIA**, en especial a la madre Rosa Delfina, por tenerme presente en sus oraciones y formarme como una persona de bien.*

A mis tutores Marlon y Enrique, por darme la oportunidad de trabajar junto a ellos, por apoyarme y preocuparse por la culminación de este trabajo.

A mi novio Rodney autor original de este tema, por confiar en mi y permitirme ayudarlo en sus proyectos futuros.

A la profesora y amiga Beatriz por todo su esfuerzo, cariño, paciencia y ayuda incondicional.

A la Ing. Ana por contribuir a mi formación profesional.

A mis hermanas Nayla y Katica, sin ellas no hubiera sido posible terminar mis estudios, mil gracias por su preocupación, por llorar y reír conmigo y por considerarme parte de su propia familia.

A mi segunda madre, Juana por todo su amor y atenciones sin medida, mil gracias de corazón.

A todos mis compañeros de aula, en especial a Yulia, Nieves, Layra y Maricela.



A mis queridos Yoalbis, Maria, Yobí, Nela y Dery que de una forma u otra aportaron su grano de arena en la realización de este trabajo.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio sobre la caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su perfeccionamiento en el hidrotransporte, con el objetivo de describir el comportamiento reológico de las muestras tomadas y el modelo matemático que lo describe.

En el análisis de granulometría de las pulpas se obtiene un predominio mayoritario de partículas finas inferiores a 0.046 mm siendo el 70% en peso de las muestras de las cuales el 50% corresponden a partículas de 0.038 mm, para lo cual se relaciona un modelo de distribución diferencial másica tomando como propiedad de separación el tamaño de la partícula.

Las pulpas de Cieno Carbonatado tienen un comportamiento pseudoplástico para un porcentaje de sólido de un 38 % pudiendo ajustarse al modelo matemático de Ostwald de

Waele $\tau_{x,y} = K \cdot (\dot{\gamma})^n$ y para valores de 41 y 45 % de Sólido presenta un

comportamiento típico de un plástico de Bingham, cuyo modelo es

$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$ mediante los cuales se obtienen los parámetros reológico que

caracterizan dicho modelos. Y se comprueba que el parámetro que más influencia presenta sobre el comportamiento reológico es el porcentaje de sólido, no siendo así para la temperatura y el pH en los rangos estudiados.



ABSTRACT

Presently work is carried out a study about the characterization of the pulps of Carbonated Silt for its improvement in the hidrotransporte, with the objective of describing the behavior reológico of the taken samples and the mathematical pattern for the one which this described.

In the analysis of grain of the pulps a majority prevalence of inferior fine particles is obtained to 0.046 mm being 70% in weight of the samples of which 50% corresponds to particles of 0.038 mm, for that which a model differential distribution of mass is related taking as separation property the size of the particle.

The pulps of Carbonated Silt have a behavior seudoplástico for a percent of solid of 38% being been able to adjust to the mathematical pattern of Ostwald of Waele

$\tau_{x,y} = K \cdot (\gamma)^n$ and it stops values of 41 and 45% of Solid it presents a typical behavior

of a plastic of Bingham whose model is $\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma$ by means of which the rheologic parameters are obtained that this models characterize. And is proven that the parameter that more influence presents on the behavior rheologic is the solid percent, not being this way for the temperature and the pH in the studied ranges.

**ÍNDICE**

Contenido	Págs.
Introducción	1
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	5
1.1 Introducción	5
1.2- Trabajos precedentes sobre el Cieno Carbonatado	5
1.3 Ubicación y caracterización del área del yacimiento	9
1.3.1 Génesis del Cieno Carbonatado	10
1.3.2 Descripción del proceso de minado	12
1.3.3 Control del proceso de minado	12
1.4 Descripción del flujo tecnológico	13
1.5 Sistemas particulados. Característica generales	18
1.6 Clasificación reológica de los fluidos	21
1.6.1 Modelos reológicos	22
1.6.2 Curvas de flujo	25
1.6.3 Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones minerales	27
1.6.4 Efectos de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas	28
1.6.5 Factores que influyen en el comportamiento reológico de las dispersiones (pulpas) minerales	29
1.7 Conclusiones parciales del capítulo	30
Capítulo II Materiales y métodos	31



2.1	Introducción	31
2.2	Origen de la muestras de Cieno Carbonatado	31
2.3	Procedimientos experimentales	32
2.3.1	Toma y preparación de las muestras	32
2.3.2	Análisis químico	33
2.3.3	Análisis Granulométrico	35
2.3.4	Determinación de la densidad del sólido y la pulpa	38
2.3.5	Determinación del % de sólido y el pH de la pulpa de Cieno Carbonatado	39
2.3.6	Análisis de sedimentación de la pulpa	40
2.3.7	Análisis reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado	42
2.4	Procesamiento de los datos	44
2.5	Conclusiones parciales	44
Capítulo III	Análisis de los resultados.	45
3.1	Introducción	45
3.2	Análisis químico	45
3.3	Análisis Granulométrico	46
3.3.1	Análisis Fraccional másico según el tamaño de partículas	50
3.4	Determinación de densidad del sólido y la pulpa	53
3.5	Comportamiento del porcentaje de sólido y el pH	53
3.6	Análisis del proceso de sedimentación de las pulpas de Cieno Carbonatado	56
3.7	Análisis de Reología	57
3.8	Impacto medio ambiental	62
3.9	Conclusiones parciales del capítulo	63
	Conclusiones	64
	Recomendaciones	65
	Bibliografía	66
	Anexos



INTRODUCCIÓN

El níquel a partir del año 2000 se convierte en uno de los principales rubros de exportación, representado por la Industria Cubana del Níquel con más de 60 años de creada, la cual se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, lo que permitirá incrementar su aporte a la economía nacional.

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba (1997) se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria Minero Metalúrgica, y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrados de níquel con mayor eficiencia en las inversiones.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo de la producción se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones y el equipamiento tecnológico, para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos de la región oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de extracción minera; lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

En la actualidad, Cuba representa el cuarto lugar en la exportación de níquel superado por países desarrollados como Canadá, Nueva Zelanda y Estados Unidos.

Los yacimientos lateríticos constituyen la materia prima para la obtención de Níquel + Cobalto, aunque en nuestro país se concentran reservas importantes, las producciones mundiales de estos elementos nos obligan a incrementar el control del proceso metalúrgico para poder competir en el mercado internacional con productos de alta calidad.

Existen actualmente tres fábricas que son las encargadas de toda la producción de Ni + Co en Cuba, ellas son: la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, la cual produce



sulfuros de Ni + Co; y las empresas “René Ramos Latour” y “Ernesto Che Guevara”, que obtienen como producto final sínter de Ni + Co.

La empresa mixta cubana canadiense, Comandante”Pedro Sotto Alba”. Moa Nickel SA, utiliza un proceso hidrometalúrgico, mediante la lixiviación ácida a presión, única en su tipo en la nación cubana y líder en cuanto a su rendimiento en el mundo. Por su eficiencia significa un valuarte de la Economía Cubana.

Además del mineral laterítico, la utilización del Carbonato de Calcio, (CaCO_3) contenidos en los Cienos Carbonatados, constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la Planta de Neutralización para lograr el pH óptimo del licor lixiviado obtenido a partir de la lixiviación del mineral niquelífero con vista a su posterior procesamiento en el área de Precipitación de Sulfuros.

Es la única planta en el mundo de tecnología ácida que utiliza este material en el proceso de neutralización, ya que el resto de las plantas, como es el caso de las plantas australianas (Murrin – Murrin, Cawse, Bulong) utilizan calizas beneficiadas más un producto llamado calcreta resultado de la molienda de restos fósiles recientes.

La pulpa de Cieno Carbonatado es de color gris y es extraída de una de las minas más grandes del mundo, situada al oeste de cayo grande de Moa, la cual es sometida a un proceso de beneficio, en la planta de preparación de pulpa de coral en la zona portuaria, las partículas mayores que 20 mesh forman el rechazo, esto se logra por medio de un sistema de cribado, las de menor diámetro son enviadas a los sedimentadores con el objetivo de incrementar el porcentaje sólido hasta el valor de diseño de 40 - 45 % bajo condiciones idóneas, esta pulpa es enviada a la planta de neutralización por medio de un sistema de transporte hidráulico por tuberías para ser almacenada en los tanques de dicha planta.

El transporte hidráulico por tubería juega un rol fundamental en el transporte de pulpas, debido a su efectividad económica y medioambiental respecto a los demás tipos de transporte, el mismo ha tomado mayor auge con el estudio de los sistemas de hidrotransporte de pulpa.

En estos sistemas los costos son mínimos tanto por el mantenimiento, como por la inversión, siendo un proceso continuo que puede ser llevado a cabo automáticamente con un esfuerzo mínimo, los procesos de carga y descarga se llevan a cabo



automáticamente con un esfuerzo mínimo en este proceso continuo, garantizando que se amorticen los gastos de la instalación.

La situación actual del transporte del Cieno Carbonatado, desde la torre de beneficio hacia los tanques sedimentadores, así como el bombeo desde la planta de coral hasta la planta de neutralización, se caracteriza por las siguientes **deficiencias**:

- Bajo conocimiento del personal que operan las Plantas a cerca de las propiedades físico – mecánicas del Cieno Carbonatado.
- No aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo) del mineral.
- No se garantiza el % de sólido de diseño de la pulpa que se envía al proceso de neutralización, provocando afectaciones en el bombeo, y en el proceso de neutralización.
- Variaciones frecuentes en la granulometría de las pulpas beneficiadas, atendiendo a las características geotecnológicas de los sectores de minería. que Provoca el arenamiento e incrustaciones en los sedimentadores y las tuberías.
- Reconversión tecnológica al sistema de beneficio actual.
- Aumento del parámetro % de cloruro en las mezclas debido a la naturaleza del mineral y la composición química del agua de lavado (agua de rebose).

Todos estos factores provocan por consiguiente la corrosión y frecuente rotura en la tubería dado que es una hidromezcla de comportamiento complejo (suspensiones en fluidos no newtonianos), insuficientemente estudiados en la actualidad.

Es necesario que se realice un estudio sobre el comportamiento de las características, composición, propiedades reológicas, mecánicas, físicas y químicas del Cieno Carbonatado y su hidromezcla para una correcta reingeniería del sistema, ya que se caracteriza por una baja eficiencia metalúrgica y alto consumo energético en sus sistemas de bombeo y la imposibilidad de un ajuste de las expresiones matemáticas para una correcta evaluación del sistema actual, dado principalmente por la falta de información y conocimiento del material a transportar.

Sin embargo:

El **problema** a investigar se define como:



Insuficiente conocimiento acerca de las variables que influyen en el comportamiento del Cieno Carbonatado con fines de hidrotransporte.

Sobre la base del problema científico se establece el objeto de la investigación, la hipótesis científica y el objetivo.

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

Las pulpas de Cieno Carbonatado minado en la bahía de Moa.

Hipótesis

Si se realiza una caracterización integral de las pulpas de Cieno carbonatado es posible definir su comportamiento reológico con fines de hidrotransporte.

Objetivo del trabajo

Obtener el modelo reológico que permita definir el comportamiento de la pulpa de Cieno Carbonatado en su hidrotransporte.

Objetivos específicos

- Caracterizar las pulpas de Cieno Carbonatado minado en la bahía de Moa atendiendo a composición química, granulométrica y las propiedades físicas – químicas y de flujo.
- Analizar el comportamiento reológico de las pulpas y los factores que influyen sobre el mismo.

De acuerdo al objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

1. Búsqueda bibliográfica para la sistematización del conocimiento sobre la temática a tratar.
2. Preparación y toma de la muestras para la realización del estudio.
3. Determinación de las principales propiedades físicas, químicas y mecánicas de la pulpa de cieno carbonatado.
4. Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para determinar el modelo que caracteriza el comportamiento reológico de las pulpas estudiadas.



5. Valorar el impacto ambiental asociado al Cieno Carbonatado estudiado.

CAPITULO I MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema expuesto en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos necesarios para el estudio experimental del Cieno Carbonatado y su caracterización como un fluido no newtoniano que se transporta por tubería.

1.2 Trabajos precedentes sobre el Cieno Carbonatado

El antecedente más lejano acerca de este yacimiento se remonta a la década del 50, con el proceso de dragado por parte de los norteamericanos; la información al respecto debió atesorarse en los archivos del entonces Servicio Geológico Norteamericano, donde es obvio que se debió haber realizado una valoración geólogo – económica que permitiera tomar la decisión de crear y emplazar una tecnología de tal magnitud y complejidad, (hasta décadas recientes única en su tipo en el mundo) y que hasta la actualidad se haya sostenido una explotación continuada del yacimiento de cienos carbonatados.

Los primeros estudios de los que hay referencia, se remontan a (Correa 1957) quien realizó un estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al Oeste de Cayo Moa Grande.

En la década de los 60 se inicia la extracción de los Cienos Carbonatados (denominados en esa época “coral” o “fangos coralinos”). En 1964 el Centro Coordinador para el Desarrollo del Norte de Oriente, solicitó al I.C.R.M. (Instituto Cubano de Recursos Minerales) la realización de estudios de localización y ubicación



de las reservas de “coral”, para después tomar decisiones respecto a la tecnología a adoptar en el proceso de refinación del níquel.

Posteriormente Nedved (1966) presento el informe final de los trabajos de búsquedas de fangos coralinos, donde se tomaron diferentes muestras evaluándose en las mismas el contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) y granulométricamente por las mallas 20, 48, 100, 200 mesh.

Se reportan en la literatura (Castillo 1988) problemas con la extracción y utilización de la materia prima, recomendando el empleo de la fracción gruesa (fracción retenida en la malla de 20 mesh) constituidos por conchas de moluscos, algas calcáreas y restos de corales teniendo en cuenta su perspectivas por contenidos de carbonato de calcio.

En los trabajos realizados por (Nápoles 1992) se evaluó la materia prima para contenido de CaCO_3 y granulométricamente en las mallas +20, +100, +325 y -325 mesh y se calcularon reservas en categoría industrial.

La principal deficiencia en la ejecución de estos trabajos radica en que no se contó con los recursos técnicos adecuados que garantizarán el posicionamiento confiable de las labores realizadas en correspondencia con la exigencia de las escalas de los trabajos.

Con posteridad especialistas de (CEPRONIQUEL 1997) recalcularon las reservas sobre la base de la información de (GEOMAR 1992) obteniendo reservas muy inferiores a las reportadas por esta última.

En trabajos realizados por (Campos 2001) se refleja el carácter terrígeno de los sedimentos que conforman el depósito, además de la composición química y mineralógica donde se establece la exclusión de los sedimentos terrígenos los cuales proceden de la formación de las rocas de la asociación ofiolítica y de la corteza de interperismos laterítico vinculados a la misma.

El Cieno Carbonatado, como ya se ha dicho es minado en la bahía y transportado hasta la planta de coral establecida en áreas aledañas al puerto de Moa. En dicha planta es sometido a un proceso de beneficio para la utilización del material menor de 20 mesh, y el resto constituye el rechazo que es almacenado en depósitos cercano a dicha planta.



Este material después de beneficiado se somete a un proceso de aumento de la concentración entre un 30 a un 45 % de sólido en dos tanques el cual es requerido en el proceso de neutralización y es transportado hasta la fábrica Comandante "Pedro Soto Alba". Moa Nickel SA ubicada a 4 km, mediante un sistema de transporte por tuberías. Este sistema de hidrotransporte cuando opera bajo los parámetros adecuados es de mucha utilidad y ventaja sobre otros métodos de transportación.

La necesidad de determinar con más precisión los parámetros para la transportación por tuberías de estas mezclas concentradas, es evidente durante la manipulación de los materiales en operaciones y procesos tecnológicos, en diferentes ramas de la economía nacional (metalurgia, petróleo, construcción, industria química y la agricultura).

El conocimiento de las propiedades de flujo de las suspensiones que se transportan es de gran importancia para decidir las características de los sistemas de bombeo, redes de tuberías, accesorios y equipos que deben utilizarse según las necesidades tecnológicas, así como los requerimientos medioambientales, no menos importante que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

Trabajos realizados por Garcell (1991, 1993, 1998, 2001) sobre pulpas de minerales lateríticos, limoníticos y serpentiniticos permite establece que la pulpa concentrada utilizada industrialmente por la empresa "Pedro Soto Alba". Moa Nickel SA contiene un elevado por ciento de partículas muy finas, lo que aporta cierta plasticidad, comprobando que se puede clasificar como sólidos en suspensión con un comportamiento de fluidos no newtonianos, los cuales han sido pocos estudiados en la actualidad.

La variedad de las propiedades físico – mecánicas de estas mezclas confiere propiedades específicas a los flujos en su movimiento por tuberías u otros dispositivos de transporte similares. Autores como Barreto (1979), Izquierdo (1989), Suárez (1998) y Turro (2002) han estudiado sistemas de hidrotransportes de materiales concentrados que se comportan como suspensiones no newtonianas similares al de las pulpas de cieno carbonatado. En los trabajos donde abordan estas temáticas se obtiene modelos físico – matemático del movimiento de suspensiones minerales y su comportamiento en



el movimiento de estas por tuberías, a partir del análisis experimental de las propiedades físico - químicas y mecánicas, composición granulométrica, mineralógica y comportamiento reológico y factores que influyen sobre este.

En los trabajos descritos por Caldiño et al. 2004, se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Se corrobora el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observa y evalúa la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuya en forma significativa a este incremento; en el estudio no se tiene en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como, pH y diámetro medio de las partículas de arena.

Se han realizado otras investigaciones en los cuales el Cieno Carbonatado constituye el objeto de estudio, se establecen las características físico - químicas de la hidromezcla de Cieno Carbonatado para la evaluación del sistema de bombeo en la planta de Neutralización. Hernández (2003); se aporta el gráfico que relaciona el factor de fricción en función del número de Reynolds y Hedstron. Jiménez (2005). Partiendo de la caracterización del Cieno Carbonatado donde se evalúa además la instalación existente para la transferencia de la pulpa desde el puerto hasta la planta de Neutralización.

Se obtiene un modelo matemático Romero (2004) que describe las características granulométricas de suspensiones lateríticas y Cieno Carbonatado y se definen los efectos de la característica granulométricas y coloides químicas sobre la reología de dichas suspensiones.

Sin embargo en los trabajos anteriormente descritos, no se determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus investigaciones; lo cual dificulta el ajuste de estas condiciones a nuevas condiciones de transporte de los fluidos estudiados.

Las metodologías obtenidas como resultado de estas investigaciones para la evaluación y proyección de sistemas de hidrotransporte de suspensiones minerales, no pueden ser generalizadas para todo tipo de sistemas, y solo pueden ser utilizadas para el



material que ha sido objeto de estudio. Por lo que se hace necesario un estudio para la caracterización del Cieno Carbonatado que permita obtener expresiones matemáticas de su comportamiento en el movimiento por tuberías para la evaluación de dicho sistema, insuficientemente estudiado hasta la actualidad.

1.3 Ubicación y Caracterización del área del Yacimiento

En la bahía de Cayo Moa se localiza el depósito de Cienos Carbonatados, que se explota para ser utilizado en el proceso industrial de la empresa antes mencionada, en la neutralización de las soluciones ácidas obtenidas en el proceso de lixiviación. El área de la Concesión minera de la Moa Nickel. SA (MNSA) abarca una extensión de 8.05 km², y comprende la franja costera, desde punta Cabagán por el Oeste, hasta las proximidades del canal del puerto de Moa por el Este y desde la línea de la costa de la región emergida adyacente por el Sur; hasta las cercanías a cayo Moa por el Norte, localizándose entre los vértices de coordenadas Lambert y geográficas. Ver figura 1.1



Figura 1.1 Ubicación del yacimiento

La bahía de Cayo Moa constituye una amplia zona marítima situada en la región oriental de la costa norte de la Isla de Cuba, limitada al norte por una barra de arrecifes que bordea un amplio bajo a menos de 2 m de profundidad, donde se encuentra enclavado Cayo Moa. La entrada a la bahía de Cayo Moa se realiza por quebrados que cortan los arrecifes. El del este, de mayor profundidad se asocia al canal principal, que da acceso a los buques de gran porte que atracan en el puerto de Moa; el canal del oeste, de poca profundidad, es accesible para embarcaciones menores con conocimiento de la zona. El canal este es la principal vía de comunicación con la zona exterior. A través de él se incorporan a la bahía no sólo los flujos encargados de renovar las aguas de la bahía, sino también conecta con el exterior el grueso de las sustancias contaminantes y azolves que se descargan a través del río Moa.



Las costas de la bahía de Cayo Moa son bajas y cubiertas de mangles en su mayor parte, y siguen una línea irregular donde penetran algunas ensenadas y cortan varios ríos. La franja costera llana y estrecha posee muchas construcciones seguidas de elevaciones cubiertas de bosques, en cuyas laderas se asienta parte de la ciudad de Moa.

1.3.1 Génesis del Cieno Carbonatado

El yacimiento de Cienos Carbonatados de la bahía de Cayo Moa es un depósito compuesto por sedimentos clásticos friables cuaternarios, de carácter biodetrítico y terrígeno que se caracterizan en su conjunto por un elevado contenido de carbonato de calcio.

Es apreciable el carácter discordante del depósito de sedimentos clásticos carbonatados con relación a su basamento; de esta forma los sedimentos carbonatados son parte de una secuencia sedimentaria sin relación con el basamento de la cuenca en que se depositaron; al transportarse fueron sedimentándose en una zona de aguas tranquilas y de poca circulación en un ambiente de laguna retroarrecifal.

En las proximidades de la ciudad de Moa, los restantes elementos que conforman el substrato plegado no afloran y en la zona costera y la plataforma marina, las rocas de la asociación afiolítica y en ocasiones su corteza de intemperismo, son cubiertas por depósitos sedimentarios del Neógeno – Cuaternario que en su base están compuestos por caliza arrecifales, calizas biodetríticas, margas, roscas arcillosas y depósitos palustres sobre los que yacen en el área de la bahía de Cayo – Moa, arenas y sedimentos areno limosos y limosos calcáreos que en su conjunto forman el yacimiento de cieno carbonatado.

Los sedimentos que conforman el yacimiento presentan una estratigrafía matizada por la carencia de una verdadera estratificación y donde predominan los cambios granulométricos graduales en la vertical y los cambios faciales laterales.

En estos sedimentos marinos cuaternarios de edad Holoceno – Reciente, la deposición estuvo controlada, no sólo por el régimen de transporte hidrodinámico específico de la zona costera, sino también por el relieve e inclusive las características litológicas de las fuentes de suministro.



En el perfil litológico generalizado del depósito aparecen con diferente grado de mezcla, las siguientes “capas” u horizontes: **arena carbonatada, cieno carbonatado de limoso a arenoso, y cieno terrígeno.**

Las rocas del basamento están constituidas por calizas arrecifales y biodetríticas, además de areniscas, que por lo general contienen fragmentos de corales. Por zonas aparecen arcillas y turbas que por lo general se mezclan con la parte inferior más arenosa del yacimiento de cienos carbonatados.

Se establece dos tipos litológicos útiles de este material. Nedved (1966). El primero, de color gris claro, con alta plasticidad y poco arenoso, con fuerte olor a H_2S , en el prevalecen las partículas menores de 0.08 mm que pasan la malla 200 mesh (entre 50 y 90 %) y las partículas gruesas sobre mallas 200 mesh no sobrepasan el 10 %. El segundo tipo de color gris oscuro, menos plástico, con incremento de las partículas gruesas (abundantes conchas) carece de olor a H_2S y aumenta el contenido de partículas gruesas sobre mallas 20 mesh hasta 30%.

1.3.2 Descripción del proceso de minado

Actualmente el sistema de explotación es a través de grúas flotantes con una cuchara de quijada bivalva de 2.5 m³ y puede efectuar hasta una profundidad máxima de 12 metros. La estación del mineral en los bloques de explotación delimitados, los cuales están divididos en sectores asociados a los pozos productivos del bloque. Durante cada viaje de ida y regreso de la patana se debe registrar la posición al inicio y final, garantizando con esto el minado continuo y organizado dentro del sector. Antes de comenzar el proceso de extracción del mineral se debe garantizar la ubicación y delimitación del sector definido dentro del Bloque de Reserva seleccionado, la ubicación se realiza con ayuda de un sistema de posicionamiento requerida GPS y la delimitación se garantiza con Boyas ubicadas en los vértices del sector y en cada una de las líneas de minado.

El minado en cada sector se realiza desde el Este hacia el Oeste, una vez agotada las reservas en este sector se traslada para el siguiente según el Plan de minería



aprobado por la autoridad minera (Oficina Nacional de Recursos Minerales), atendiendo a los parámetros de batimetría y calidad de cada uno de los sectores.

1.3.3 Control del proceso de minado

El control de los parámetros de calidad en el yacimiento se realizan mediante el Sistema Integral Minero (SIM) es un software aplicado a la minería a cielo abierto y fondos marinos con los siguientes objetivos:

- Tener una base de datos geológica actualizada.
- Crear los modelos digitales de bloques de los yacimientos.
- Crear “Bancos” de minería para la explotación.
- Estimar los recursos y reservas mineras.
- Planificar su explotación.
- Realizar consultas dinámicas de las diferentes actividades mineras.
- Actualizar automáticamente las bases de datos y modelos de bloques.
- Mantener un control topográfico actualizado del yacimiento.
- Control de pérdidas de mineral.
- Agotamiento Geológico de zonas del yacimiento.

1.4 Descripción del flujo tecnológico

1.4.1 Planta de Coral

El objetivo de esta planta es formar una pulpa de Cieno Carbonatado con un sólido entre 40 y 45 % según se muestra en la tabla 1.1 donde el contenido de arena debe ser menor del 17 % y cloruro menor de 700 ppm. Además sirve de almacenaje para mantener un suministro estable a la planta de Neutralización. Ver anexo 5

Tabla 1.1 Característica de diseño pulpa de Cieno Carbonatado

Parámetros	Diseño
Densidad (kg/m ³)	1320 – 1340
% de sólido	40 – 45
% de arena	≤17



Cloruro (ppm)	500 - 600
Carbonato de calcio %	≥ 87
Composición granulométrica(-325 mesh) %	≤ 76
pH	8 - 9

Fuente: Datos técnicos planta de Cieno

El Cieno Carbonatado se extrae de las formaciones coralinas del fondo del mar en la Bahía de Moa. El proceso de minado se realiza con grúas que utilizan palas de cubos bivalvas como medio de extracción, las que depositan el Cieno Carbonatado sobre las patanas que lo trasladan hasta la planta de preparación de pulpa de Cieno Carbonatado. Una vez en esta, se descarga el mineral en un depósito ver figura 8 anexo 7, que tiene capacidad para 800 TM ó se alimenta directamente al embudo de la lavadora, esta descarga ó alimentación se realiza con una grúa situada en tierra.

El Cieno Carbonatado que se alimenta al embudo entra en contacto con el agua inyectada por los spray, pasa a través de una criba fija que deja pasar las partículas menores de 152.4 mm y cae por gravedad a la lavadora de paletas; ver anexo 7 figura 7; en este equipo es donde se define la eficiencia de la planta. Después de formada la pulpa en la lavadora se descarga a una zaranda vibratoria de doble paño donde el tamizado es ayudado por agua a presión (entre 30 y 40 lb/pulg), la malla superior es de 0.25 pulg. y la inferior es de 0.833 mm, después del tamizado se obtiene por una parte el rechazo (representa aproximadamente el 10 % del Cieno Carbonatado procesado) y por otro lado la pulpa de Cieno Carbonatado con un sólido entre 10 y 20 % (siempre debe buscarse los valores más bajos dentro de este rango), ésta pulpa es bombeada hacia el espesador #1; toda el agua utilizada en los equipos señalados anteriormente es proveniente del reboso del espesador #1.

Para lograr bajar la concentración de cloruro de sodio y subir el porcentaje de sólido a los valores establecidos existen dos sedimentadores con el sistema de lavado a contra corriente.



Antes de ser alimentada la pulpa al sedimentador #1, entra en contacto con el agua de reboso del sedimentador #2 en la caja de alimentación de este espesador, de aquí se alimenta al sedimentador por un tubo que descarga en la parte superior y central del mismo, en éste tubo es donde ocurre el proceso de lavado.

Del fondo del sedimentador #1 se extrae la pulpa espesada y se bombea a la caja de alimentación del sedimentador #2 donde se le adiciona agua cruda para efectuar la última etapa de lavado de la misma forma que se hizo en el sedimentador anterior, después de espesada la pulpa se bombea a un tanque (TK-3) de donde se bombea para la planta de Neutralización.

1.4.2 Planta de Neutralización

La planta de neutralización tiene como objetivo neutralizar el licor ácido procedente de la planta de lavaderos. El pH del licor antes mencionado debe ubicarse entre 2.4 – 2.6 que es el rango óptimo para precipitar el níquel y el cobalto en forma de sulfuros. Ver anexo 6.

En dependencia de las características del proceso, el licor puede ser procesado en la planta de tres formas diferentes

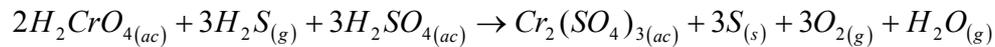
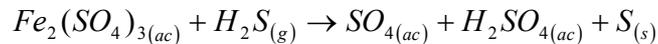
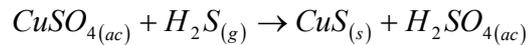
P1: puede recibirse directamente desde lavaderos.

P2: Puede recibirse directamente desde lavaderos y además agregar licor del tanque de almacenaje de licor ácido.

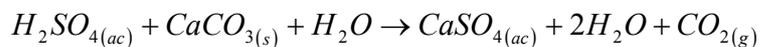
P3: Pueden recibirse en el tanque de almacenaje de licor ácido y consumirse de este; es decir todo el licor que se procesa se extrae de dicho tanque (operación directa del tanque de licor ácido)

P4: Puede recibirse desde lavaderos a través de las bombas de licor ácido de neutra como reforzadoras (operación en serie).

El primer tratamiento que sufre el licor antes de llegar a los reactores en una inyección de H_2S , esta se realiza con el objetivo de reducir el hierro y el cromo y además para precipitar el cobre en forma de sulfuro de cobre (CuS). Esta etapa se conoce como primer reactor del proceso y en ella se lleva a cabo las siguientes reacciones:



El Licor Reducido (RL) seguidamente es neutralizado en un sistema de cuatro reactores en serie (2, 3, 4, 5) mediante la adición de pulpa de coral (90 % de $CaCO_3$) proveniente de la Planta de Espesadores de Cieno Carbonatado, dicha pulpa es almacenada en dos tanques (1) con agitación mecánica y neumática destinados para estos fines. El proceso de neutralización que ocurre en los reactores se lleva a cabo según la siguiente reacción:



La pulpa neutralizada que sale de los reactores llega a la caja distribuidora número 2 (C2), y desde esta última dicha pulpa es alimentada en partes iguales a los sedimentadores (6) por medio de canales de alimentación.

En los sedimentadores se concentra la pulpa de yeso que luego es succionada por bombas de fondo (11) y enviada a la caja distribuidora número 1 (C1), desde esta última una parte de la pulpa se recircula a los reactores y la otra parte es enviada a Lavaderos con el objetivo de recuperar el licor rico en níquel y cobalto.

El rebose de los sedimentadores lo constituye el Licor Producto (PL) o Licor Neutralizado (LN) que es el producto final de la planta, dicho licor se puede enviar directamente hacia la Planta de Lixiviación para su precalentamiento, o puede ser enviado al tanque de almacenaje de licor producto (8) desde el cual se enviará luego a Lixiviación para someterlo al proceso anteriormente descrito.

La función fundamental de esta planta es la de neutralización del licor ácido (LA) procedente de la planta de lavaderos. Con un valor del PH del licor en un rango 1.4 – 1.6 y se lleva hasta un valor de 2.4 – 2.6 en el licor producto que es el rango óptimo para precipitar el níquel y el cobalto en forma de sulfuros.

1.4.3 Característica del equipamiento utilizado para la extracción, tratamiento y transportación del Cieno Carbonatado

**Tanques sedimentadores (264 - TK - 1 y 2)**

El sedimentador 1 está diseñado para manejar una solución de alimentación sólido-líquido de 7 a 12 % de sólido a partir de la cual se concentra el sólido de 35 a 40% para extraerlo y se clarifica el líquido para ser utilizado en la lavadora de paletas y en la zaranda.

El sedimentador 2 está diseñado para manejar una solución de alimentación sólido-líquido de 9 a 17 % de sólido a partir de la cual se concentra el sólido de 40 a 45% para extraerlo y se clarifica el líquido para ser utilizado en el lavado del coral en el sedimentador 1. Ambos tanques tienen la función de lavar y espesar la pulpa de coral.

Tanque 3 (264 - TK - 3)

En este se recibe la pulpa con un 40% de sólido proveniente del sedimentador 2 y sirve como un tanque colector para las bombas de transferencia. En el tanque esta montado un agitador para evitar que la pulpa se sedimente.

Equipos dinámicos de la planta de coral**Lavadora de paletas (264 - LW - 1)**

Tiene la función de desbaratar las pelotas de Cieno Carbonatado y formar con el agua la pulpa de coral, esto se logra mediante dos ejes con paletas que al girar van transportando el coral hacia la descarga de la misma.

La lavadora tiene 24 pies de largo por 7 pies de ancho, los ejes son movidos por un reductor acoplado a un motor a través de poleas y correas, tiene una capacidad de 64.5 TM/h de Cieno Carbonatado seco, lográndose en la descarga una pulpa con 20% de sólido.

Zaranda (264 - SN - 1)

Tiene la función de tamizar una pulpa con 20% de sólido, para esto cuenta con dos mallas, una superior con una abertura de 0.25 pulg. y la inferior es de 20 mesh, para el tamizado además de las vibraciones de la zaranda se usa agua a presión (30 - 40 psig.) suministrada por spray, como resultado de la operación se obtiene una pulpa de coral entre 10 y 20 % de sólido y un rechazo que constituye aproximadamente el 10 % del coral seco procesado, la capacidad de este equipo es 64.5 TM/h.



Bomba para el bombeo de coral al espesador 1 (264 - PU - 7)

Esta bomba tiene la función de bombear la pulpa de Cieno Carbonatado que sale de la zaranda para el espesador 1.

Bombas de recirculación y transferencia de coral en los espesadores (264 - PU - 3A/3B, 4, 5A/5B)

Estas bombas tienen las siguientes funciones:

- PU - 3A: solo recircula el coral en el tanque 1.
- PU - 3B: recircula el coral en el tanque 1 y pasa coral del tanque 2 al 1.
- PU - 4A: pasa coral del tanque 1 al 2 y del tanque 1 al 3.
- PU - 5A: recircula coral en el tanque 2 y pasa del 2 al 3, del 1 al 2 y del 1 al 3.
- PU - 5B: recircula coral en el tanque 2 y pasa coral del 2 al 3.

Características de la bomba:

Bombas de desplazamiento positivo de diafragma, de doble succión y doble descarga con variador de velocidad en el motor, son de velocidad variable por sistema electrónico

Bombas para el bombeo de agua (264 - PU - 1 y 2).

Estas bombas tienen la función de bombear el agua de reboso del tanque 2 para el lavado en el espesador 1 ó bombear agua para la torre de Cieno Carbonatado, ambas succionan del TK - 4.

Bombas para la transferencia de coral hacia la planta de Neutralización (264 - PU 6A - 6B y 6C).

Estas bombas se usan para bombear la pulpa de Cieno Carbonatado producto de esta planta, se diferencian en su capacidad.

Característica de la bomba:

- Bomba de desplazamiento positivo (pistón), con diafragma. Tipo: ZGL 50/135-K 200-2 SM 460 HD.
- Presión de trabajo: 35 bar
- Capacidad: 10-21 m³/h.
- Número de emboladas: 25-50 min⁻¹.



- Potencia absorbida por el eje motriz: 19.3-38.6 kW

1.5 Sistemas particulados. Características generales

Se denomina “dispersión” o “sistema disperso” a todo sistema que contiene una o más sustancias en forma de partículas dispersas en un medio. Las dispersiones son sistemas bifásicos donde las partículas constituyen la fase dispersa, y el medio es la fase dispersante. Son sistemas bifásicos las suspensiones de laterita y del Cieno Carbonatado analizadas en este trabajo.

A un sistema disperso (Sólido – Líquido) se le denomina **suspensión** si el tamaño medio de las partículas sólidas es mayor de $0.1 \mu\text{m}$ (sistema de dispersión gruesa); y si se encuentra dentro de los límites de $(0.001-0.1) \mu\text{m}$, se le nombra **dispersión coloidal** (sistema de alta dispersión).

Muchas partículas coloidales presentan superficie liofílicas (que tienen afinidad por los líquidos) y normalmente están solvatadas hasta el punto de estar cubierta por una capa del espesor de una molécula del medio dispersante, que debe tratarse como parte de la partícula.

Una característica estructural de gran importancia es la forma de las partículas. En general, las partículas pueden tomar diversas formas: corpusculares, laminares o lineales. Estas formas pueden ser realmente complejas, pero, en primera aproximación, se pueden tratar teóricamente de acuerdo con elipsoides de revolución, varillas o agujas, láminas, discos, filamentos.

Cuando las partículas se agregan entre sí, pueden obtenerse formas muy diferentes que, incluso, no se parecen a la forma de las partículas primarias. En muchas dispersiones, los agregados y flóculos son realmente **amorfos**.

Los sistemas particulados pueden ser clasificados de la siguiente forma:

Granulares: Cuando las fuerzas gravitatorias predominan sobre las fuerzas de superficies. (Mayores de $50 \mu\text{m}$)

Aglomerados: cuando las fuerzas gravitatorias y de superficie son del mismo orden (partículas $1 - 50 \mu\text{m}$).

Coloidales: cuando predominan las fuerzas superficiales (partículas menores de $1 \mu\text{m}$).



Los aglomerados están constituidos por partículas unidas débilmente que pueden separarse con la aplicación de ultrasonido. En los agregados las uniones entre las partículas son más fuertes causadas por enlaces químicos o reacciones de sinterización, y pueden romperse mediante molienda.

El “tamaño de la partícula” solo puede tener un significado bien definido cuando el sistema es monodisperso, es decir, cuando todas las partículas tienen la misma dimensión. Sin embargo, es mucho más probable que las suspensiones tratadas industrialmente sean polidispersas, las que están constituidas por partículas de diferentes dimensiones y/o distribución de tamaño distintos. En estos sistemas, como dimensión representativa se utiliza un tamaño medio de las partículas, el cual se determina de la contribución relativa de las distintas dimensiones de las partículas que los constituyen.

Muchas partículas coloidales presentan superficies liofílicas (que tienen afinidad por los líquidos) y normalmente están solvatadas hasta el punto de estar cubiertas por una capa del espesor de una molécula del medio dispersante, que debe tratarse como parte de la partícula. Las suspensiones lateríticas son liofóbicas (no tienen afinidad por el líquido) y polidispersas con diferentes distribuciones de tamaño.

Una característica estructural de gran importancia es la forma de las partículas. En general, las partículas pueden tener diversas formas: corpusculares, laminares, o lineales. Estas formas pueden ser realmente complejas, pero, en primera aproximación se pueden tratar teóricamente como esferas, elipsoides de revolución, varillas o agujas, láminas, discos, filamentos. Cuando las partículas se agregan entre sí, pueden obtenerse formas muy diferentes que, incluso, no se parecen a la forma de las partículas primarias.

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

Las suspensiones homogéneas son aquellas en las que las partículas sólidas están uniformemente distribuidas en el medio dispersante, predominando las partículas finas y



relativa alta concentración de sólidos. Este tipo de suspensión generalmente exhibe comportamiento no newtoniano, ya que las interacciones entre partículas son importantes y forman estructuras.

Las suspensiones heterogéneas están formadas por partículas relativamente grandes, con concentraciones de sólido más bajas, y en las que las fases sólida y líquida conservan sus identidades separadas. Por la general, muestran un flujo newtoniano dado que la interacción entre partículas es poco importante y no forman estructuras.

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

En la Figura.1.4 se presenta un diagrama que ayuda a clasificar una suspensión como homogénea o heterogénea, teniendo en cuenta el tamaño máximo de partículas (en una fracción no mayor de 5 % en peso) y su densidad relativa.

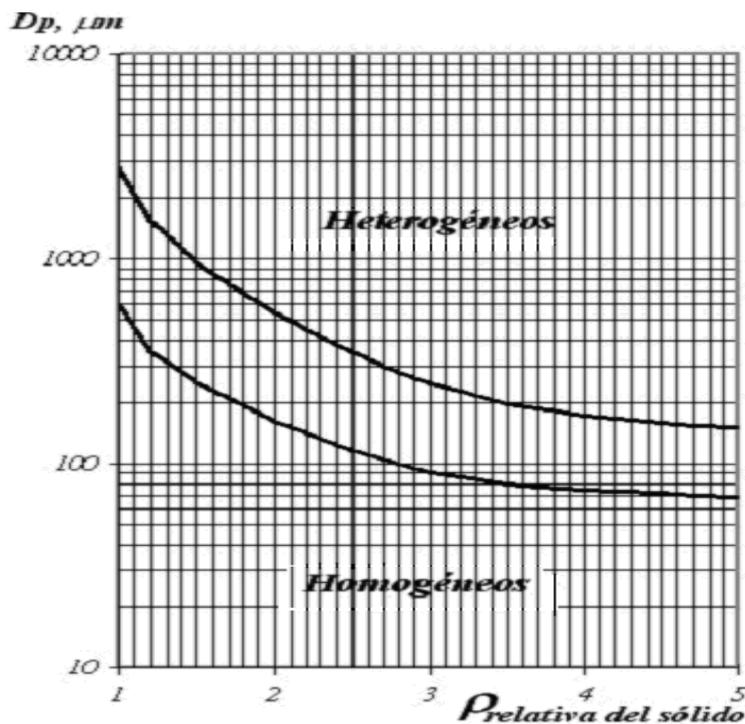


Figura 1.4 Sistemas homogéneos y heterogéneos según el diámetro de las partículas y la densidad relativa del sólido.

Fuente: Garcell, 2001



1.6 Clasificación reológica de los fluidos

El término reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. La reología es la ciencia del flujo y la deformación; estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas y materiales cristalinos.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtoniano y no newtoniano (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Díaz, 1989). A su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos. A continuación se establece, la caracterización de los principales factores y parámetros relacionados a las propiedades de transporte de fluidos complejos y en específico a los casos de estudio.

Se clasifican en dos grupos:

- Newtonianos.
- No Newtonianos

1.6.1 Modelos reológicos

Los modelos más difundidos, (Garcell, 1988; Turro, 2002) son los tratados en este tópico.

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y los líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos newtonianos; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante (τ) y

del gradiente de velocidad $\left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right) = \gamma$. (Figura 1.2-a).

$$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right) \quad (1.1)$$



Los fluidos no newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aún cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos:

1. De viscosidad independiente del tiempo

- Seudoplásticos: Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para $n < 1$). (Figura 1.2-b).

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n \quad (1.2)$$

Donde:

n - índice de la ley de potencia, (adimensional).

K - índice de consistencia, (Pa. s).

El parámetro n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para $n < 1$ el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante. Para $n = 1$, la ecuación 1.2 se transforma en la ley de Newton, siendo $K = \mu$. El parámetro K es el índice de consistencia, el cual da una medida del grado de viscosidad del material.

Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente μ_a

De acuerdo con la (ecuación 2.1) la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.3)$$

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (1.2) se obtiene:



$$\mu_a = K \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (1.4)$$

- Dilatantes: Sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para $n > 1$). (Figura 1.2-c).
- Plásticos ideales: Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial (τ_0), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe. (Figura 1.2-d).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1.5)$$

Donde:

τ_0 - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

μ_p - Viscosidad plástica.

Para $\tau_0 = 0$ la ecuación 1.5, se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$. La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene, combinando la ecuación 1.5 en la ecuación 1.3.

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p \quad (1.6)$$

- Plásticos reales: Sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que τ_0 . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley. (Figura 1.2-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (1.7)$$

Los parámetros \underline{k} , \underline{n} y $\underline{\tau_0}$, tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para $n = 1$, la



ecuación 1.7 se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_0 = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_0 = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 1.7 y 1.3, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (1.8)$$

2. De viscosidad dependiente del tiempo

- **Tixotrópicos:** La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidos a un gradiente de velocidad determinado. Se comportan reológicamente como pseudoplásticos, plásticos ideales y reales. (Figura 1.3 -a).
- **Reopécticos:** La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes. (Figura 1.3-b).

3. Viscoelásticos ó de Maxwell

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas. Las sustancias viscoelásticas fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, pero, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo cortante, el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos. Este comportamiento se ha observado en NAPALM, en soluciones de polímeros, en masas cocidas de la industria azucarera con altos contenidos de gomas (polisacáridos), en ciertas resinas y en emulsiones de crudo cubano, de acuerdo a lo reportado por (Toose, 1995) y (Ferro, 2000).

1.6.2 Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad; τ contra $-(dv/dy)$, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

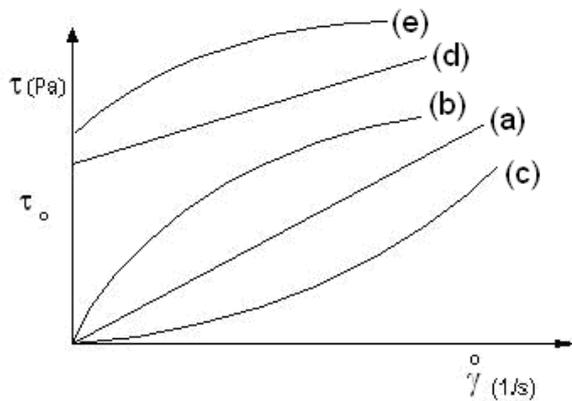


Figura 1.5. Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.

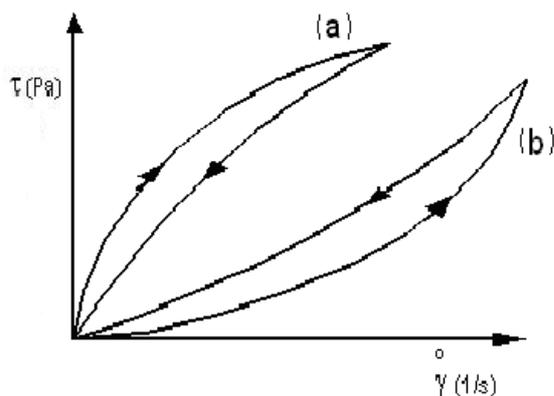


Figura 1.6 Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

Fuente: Garcell, 2001.

Importancia de las curvas de flujo

Son varias las aplicaciones de los datos que aportan las curvas de flujo por lo que solo se mencionaran a continuación las más importantes:

1. Permite identificar el comportamiento y la naturaleza reológica del fluido, así como seleccionar el modelo que describe dicho comportamiento
2. Permite determinar valores de viscosidad para diferentes condiciones de trabajo.



3. Posibilita establecer si un equipo o un conducto, que ha sido diseñado para manipular un material determinado, puede ser utilizado con otro producto.
4. La evaluación del funcionamiento de un sistema de flujo dado

Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido.

1.6.3 Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones minerales

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

En la literatura especializada se han analizado distintos tipos de interacciones, los cuales han sido resumidos por Cheng (1980) dentro de tres categorías diferentes:

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

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

- Tamaño y distribución de tamaño de las partículas.
- Forma y flexibilidad de las partículas.
- Concentración de la fase dispersa.



- Propiedades superficiales de las partículas.
- Naturaleza reológica del líquido dispersante.
- Temperatura y pH de la dispersión.
- Velocidad de deformación a que es sometido el sistema.
- Composición química y mineralógica del sólido.
- Composición iónica del medio dispersante.

1.6.4 Efectos de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas

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

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción de Van der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas que se producen por el solapamiento de las dobles capas eléctricas que rodean a las partículas (repulsión de Born), y depende del pH.

Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial.

En los trabajos de Cerpa (1999) y Garcell (1990,1993), con pulpas de lateritas. Leong y Boger (1990) con suspensiones de lignito, y de Garcell (1998) con suspensiones de maghemita, se ilustra la relación entre los fenómenos de la Química de Superficies y la



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

1.6.5 Factores que influyen en el comportamiento reológico de las dispersiones (pulpas) minerales

.Al conformarse la dispersión de un sólido en un líquido trae consigo el aumento de la viscosidad de la dispersión resultante, las que pueden tener un comportamiento newtoniano o no newtoniano en dependencia de la naturaleza y las características de las fases por separado así como de las propiedades de la fase sólida [8,10].

Para el primer caso (newtoniano), teniendo en cuenta el nivel de complejidad, sus viscosidades pueden estimarse por expresiones dependientes de la fracción volumen del sólido y de la viscosidad de la fase líquida. Por su parte en las dispersiones no newtonianas (de características coloidales), aparecen interacciones entre las fases y partículas que obligan al uso de métodos experimentales para la determinación de sus viscosidades. Las interacciones hidrodinámicas están asociadas a suspensiones de media y bajas concentraciones, mientras que las dos restantes están muy relacionadas con las suspensiones concentradas.

Hasta ahora se han visto los tipos de interacciones presentes en las diferentes suspensiones, pero estas, a su vez se ven afectadas por diversos factores, tales como:

- Concentración de sólidos
- Composición granulométrica y formas de las partículas
- Temperatura
- pH

1.7 Conclusiones parciales del capítulo



1. El análisis de los trabajos precedentes reportan algunas de las características del Cieno Carbonatado aunque estas son insuficientes estudiadas, al mismo tiempo los datos que se obtienen no han sido actualizados.
2. Los trabajos realizados se basan en las características geólogo – mineras del yacimiento.
3. Las investigaciones realizadas sobre el hidrotransporte del mineral, no han tenido en cuenta las características reológicas, y resulta imposible ajustar las ecuaciones de los parámetros de hidrotransporte.
4. Se han realizado trabajos sobre transporte de materiales que se comportan como fluidos no newtonianos, pero las metodologías no son reproducibles para otros fluidos debido a que solo se tiene en cuenta las características del objeto de estudiado en cada caso.
5. Se exponen los fundamentos teóricos, que permiten caracterizar el material reológicamente.



CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Los conocimientos sobre la composición y propiedades de la pulpa de Cieno Carbonatado utilizado industrialmente en las empresas “Pedro Soto Alba”. Moa Nickel SA, contribuyen a la selección de métodos adecuados de evaluación y toma de decisiones en la solución de problemas asociados al transporte del fluido en estudio.

Para el desarrollo de toda investigación se necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, y es por eso que resulta indispensable una correcta toma de muestra, así como la aplicación de los métodos adecuados en aras del cumplimiento del objetivo propuesto, en nuestro caso particular para la solución del problema planteado es necesario la implementación de análisis granulométrico, de sedimentación, análisis químicos modernos y análisis de la reología de la pulpa de Cieno carbonatado así como el tratamiento de los resultados experimentales.

En tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer los métodos y procedimientos experimentales para la obtención de las principales propiedades y composición de las pulpas de Cieno carbonatado que permita la caracterización del mismo.

2.2 Origen de las muestras de Cieno carbonatado

El yacimiento de Cieno carbonatado de la bahía de Moa es un depósito compuesto por un elevado contenido de carbonato de calcio, el cual supera el 80% en condiciones naturales, el mismo alcanza entre el 88 y 90 %, luego de ser beneficiado el mineral en la planta de procesamiento.

En el análisis experimental se utilizaron muestras de cieno tomadas en varios puntos del proceso tecnológico de preparación de la pulpa de Cieno carbonatado, desde el minado pasando por la torre de beneficio hasta la descarga de dicho material en la planta de Neutralización.



A continuación se relacionan los puntos de toma de muestras utilizados para el análisis.

Tabla 2.1 Puntos de toma de muestras

Muestras	Punto de toma de muestra
M - 1	Patana de transporte de mineral
M - 2	Tubería de alimentación al TK-1 de la planta de cienos
M - 3	Descarga de las tuberías en la planta de neutralización

2.3 Procedimiento Experimental

2.3.1 Toma y preparación de las muestras

Para realizar el estudio se tomaron muestras representativas en los lugares señalados en la tabla 2.1. El Cieno carbonatado minado llega a la planta de preparación en una patana, a partir del cual se toma la **muestra 1** para ello se aplica el método de puntos (Mitrofanov, 1984). El número de puntos de obtención de muestra depende de la regularidad del área de minado y la dimensión de la superficie sujeta al muestreo (Patana). Esta última tiene un Área de 250 m². El volumen tomado en cada punto es de aproximadamente 2 Kg, hasta obtener un volumen lo suficientemente representativo, el cual es sometido a un proceso de homogenización y cuarteo como muestra el esquema.

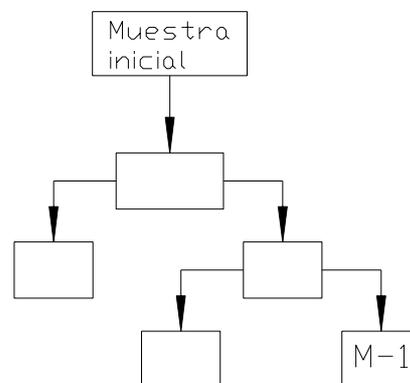




Figura 2.1 Esquema de preparación de la muestra 1

Al finalizar el proceso se selecciona una muestra de aproximadamente 4 Kg, la cual es almacenada en bolsa de plástico teniendo en cuenta la reserva necesaria para el desarrollo de los experimentos.

Para la toma de la **muestra 2** se hace un compósito de la pulpa alimentada al tanque 1, este compósito se obtiene con tomas realizadas cada 4 horas por un periodo de 2 días, esta pulpa es homogenizada y almacenada una cantidad de 4 litros para la realización de los experimentos.

De forma similar al procedimiento anterior se realiza la toma de la **muestra 3**. En el tanque 3 (tanque de alimentación a las bombas de transferencia) se realizan una toma de la pulpa con un período de 4 horas hasta obtener un compósito de la pulpa, la cual se homogeniza y se obtiene una muestra de 4 litros de la pulpa.

2.3.2 Análisis químico

Con el objetivo de determinar el comportamiento de los diferentes elementos químicos que componen las muestras estudiadas se utiliza el método (ICP) plasma inductivamente acoplado en un Espectrómetro de Emisión Óptica.

2.3.2.1 Fundamento del método de análisis químico por ICP

La base, del método, es la medición de la Emisión Atómica, por una técnica de Espectroscopia Óptica. La porción de ensayo es nebulizada y el aerosol producido es transportado al plasma, donde se produce la excitación. Las líneas atómicas características del espectro de emisión son producidas por un plasma inductivamente acoplado (ICP). Los espectros son dispersados por un espectrofotómetro de red y las intensidades de las líneas son monitoreadas por los detectores. Las señales procedentes de los detectores son procesadas y controladas por una computadora.

Método de Cálculo

$$\% = \frac{mg / l}{10^6} \times \frac{diluciones}{alícuotas}$$

Donde:



mg/l: concentración de la porción de ensayo del elemento sometida a medición espectrométrica.

Procedimiento

Las muestras se filtran al vacío, se seca el sólido, se tritura y se pasa por una malla 50. Se pesa 0.5g y se disuelve con 7ml de ácido nítrico y 21 de ácido clorhídrico. Se lleva a 100 ml y se coloca en el espectrómetro obteniendo los resultados de los por ciento de los elementos presentes en las muestras analizadas.

2.3.2.2 Análisis del Cloruro y del Carbonato contenido en la pulpa de Cieno Carbonatado.

2.3.2.2.1 Determinación del cloruro

El análisis se realizó de la siguiente forma

1. Se toman 5 ml de la muestra
2. Se adicionan al elenmeyer y se completa con agua destilada hasta 100 ml, se adiciona además 2 ml de ácido nítrico de 0.4 N (normal), 10 gotas del indicador (difenilcarbazona) y se valora con nitrato de mercurio ($Hg NO_3$) de 0.02 N hasta que se produce el cambio de color.
3. Luego por valoración se calcula el cloruro por la siguiente expresión:

$$cloruro = \frac{N(HgNO_3) * MM(Cl)}{V_{muestra}} * 1000 \quad (2.1)$$

2.3.2.2.2 Análisis del % de carbonato

Este procedimiento establece la determinación de carbonato de calcio en la pulpa de alimentación a la planta de neutralización, para un contenido entre 70% y 95% de carbonato de calcio en el cieno.

La porción de ensayo es neutralizada con ácido clorhídrico, se añade un exceso, el cual es determinado por valoración con solución de hidróxido de sodio, utilizando mezcla de indicadores (rojo de metilo y bromo cresol) como indicador.



Se pesan $1 \text{ g} \pm 0.0002 \text{ g}$ de la muestra de ensayo y se transfiere a un beaker con capacidad de 250 ml. Se añade lentamente, mientras se agita 25 ml de solución de ácido clorhídrico 1 N. Se deja reaccionar hasta que cese el desprendimiento de CO_2 .

Se lavan las paredes del beaker con un chorro fino de agua. Se filtra a través de un papel de filtración medio – rápida, y lave no menos de 5 veces con agua caliente.

Reciba el filtrado en un elenmeyer de 300 mL de capacidad.

Para la valoración

Añada 3 gotas de solución indicadora y valore con la solución de hidróxido de sodio 0.5 N hasta que una gota cambie el color de rojo a verde.

Por vía empírica se calcula por la siguiente formula:

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{N_1(\text{HCl}) * V_1(\text{HCl}) - N_2(\text{NaOH}) * V_2(\text{NaOH})}{\text{masa}} * 5 \quad (2.2)$$

Donde:

V_1 : ml añadidos de solución de ácido clorhídrico.

V_2 : ml consumidos de hidróxido de sodio en la contra valoración.

N_1 : normalidad de la solución de ácido clorhídrico.

N_2 : normalidad de la solución de hidróxido de sodio.

m: masa de la porción de ensayo, expresada en g.

2.3.3 Análisis granulométrico

Con el fin de determinar la composición granulométrica del material se realiza el análisis de cribado de las muestras estudiadas, para ello se toma una muestra de 1 Kg y se tamiza a través de un juego estándar de cribas, posteriormente se determinan el porcentaje de residuo en cada una de estas, respecto a la masa de la muestra inicial. La siguiente tabla nos muestra los tamices con sus dimensiones de los tamices utilizados en el análisis del Cieno, la selección de ellos estuvo fundamentada en la



utilización normalizada de los mismos en los laboratorios de la empresa “Pedro Soto Alba” para este tipo de material.

Tabla 4.1 Tamices utilizados y aberturas de las mallas

Tamiz (No de mallas)	Abertura de las mallas, mm
20	0,850
50	0,300
100	0,150
200	0,075
325	0,045

Análisis granulométrico por vía húmeda

Cuando la muestra contiene una cantidad considerable de material fino, en busca de obtener resultados confiables se utiliza el método por vía húmeda. Donde la muestra se vierte a una criba con orificios de menor dimensión y las partículas más diminutas se lavan con un chorro de agua débil o sumergiendo la criba en un depósito con agua. El lavado se realiza hasta que el agua salga clara. El resto de las muestras que quedan en la criba se seca, pesa y por las diferencias entre las masas se determina la masa del material lavado. El producto bajo la rejilla de esta última criba se añade a la masa del material lavado obtenida anteriormente.

Después de escoger el juego de tamices se prepara una pulpa y se lava con el objetivo de romper los aglomerados naturales de las muestras. Posterior al cribado que se realiza por vía húmeda se secan las muestras que quedan en cada tamiz en una estufa, luego se pesa cada fracción y se calculan sus porcentajes en peso, respecto al de la muestra original.

Los resultados obtenidos por el método de cribado húmedo fueron comparados con los resultados obtenidos por un **analizador de partículas HORIBA LA – 910**, este método es más exacto en el análisis de las partículas desde el diámetro de partícula mayor (0.850 mm) hasta partículas del orden de los 0.001 mm.



2.3.3.1 Procedimiento HORIBA

- Se prepara la muestra de pulpa que se desea analizar
- Se pesan aproximadamente 35 g de pulpa de Cieno Carbonatado
- Se transfiere a un beaker de 1000 ml
- Agitar por espacio de 5 minutos con el agitador con el objetivo de homogenizar la muestra
- Con una pipeta se toma alrededor de 2 ml y se vierte en el equipo, 2 – 5 minutos.
- Todos los datos quedan registrados en la máquina y se obtienen las curvas de cernido y retenido.

Características del analizador de partículas para el coral.

- Revolución de la bomba..... 1 F
- Revolución del agitador.....2 F
- Índice de Refracción..... 118 -10

Este análisis nos permitirá obtener la distribución sumaria por clases en las muestras analizadas y el tamaño de partículas predominantes en la muestra.

2.3.3.2 Método de Análisis fraccional

Las funciones de distribución diferencial másica y $\gamma(\xi)$, son un medio sencillo, necesario y suficiente para la caracterización de cualquier materia prima mineral o producto por tanto, coincidimos con estos investigadores en que cualquier otro método es insuficiente o excesivamente complicado.

Las funciones de distribución diferencial másica; $\gamma(\xi)$ no sólo permiten el cálculo de los indicadores clásicos del beneficio, sino que también contribuyen a realizar el pronóstico de los índices tecnológicos de cualquier esquema de beneficio, independientemente de la propiedad de separación.

La función de distribución diferencial másica; $\gamma(\xi)$; de las partículas de cualquier mezcla de cualquier propiedad física (ξ), es aquella función para la cual el producto $\gamma(\xi) d\xi$ es igual a la fracción másica de cualquier intervalo elemental $[\xi, \xi + d\xi]$ y su incremento



$d\xi$; la función $\gamma(\xi)$ no es más que la distribución diferencial de la densidad de distribución del sólido en las fracciones elementales. (Tijonov, 1984).

Si se denota mediante $\gamma(\rho)$ la distribución de probabilidades de la variable ρ se tendrá que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\rho) d\rho = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \gamma(\rho) d\rho = 1 \quad (2.3)$$

$$\text{y} \quad \gamma(\rho_o) = \frac{1}{\Delta\rho} \lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} P(\rho_o < \rho < \rho_o + \Delta\rho) \quad (2.4)$$

Donde $P(a < \rho < b)$ es la probabilidad de que el parámetro ρ esté confinado en el intervalo (a, b) . La función γ permite caracterizar la distribución de las partículas del mineral inicial de acuerdo con la propiedad física ρ . El valor $\gamma(\rho)d\rho$ expresa la proporción de la fracción $[\rho, \rho+d\rho]$ con respecto al mineral inicial.

2.3.4 Determinación de la densidad del sólido y la pulpa

Para la determinación de la densidad del sólido se utiliza el **método del picnómetro**, dicha prueba se realizó en el laboratorio de química de la facultad de Metalurgia Electromecánica, siguiendo el procedimiento descrito a continuación. (Heny, K.E; Fred, H.W; Stephen, R.L, 1959).

- Se toma un picnómetro vacío y se pesa (Peso A)
- Se le añade agua destilada y se vuelve a pesar (peso B)
- Se vacía y seca el picnómetro minuciosamente y se le introduce el mineral para ser pesado (peso C)
- El mineral con agua se pone en una estufa a calentar para que escapen las burbujas de aire, se enfrían y si el agua esta en encima del material se tapa y se pesa (peso D).

El peso específico se determina por la expresión siguiente:

$$Pe = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (2.5)$$



Debe tenerse cuidado en eliminar todas las burbujas de aire surgidas al ser hervida el agua y ser enfriada. Si se utiliza con cuidado este método, se obtienen resultados muy precisos.

Para este análisis se utiliza un juego de picnómetros de 25 ml, una balanza digital con precisión ± 0.01 g y una estufa de temperatura hasta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Densidad de la pulpa

Para determinar la densidad de la pulpa de Cieno Carbonatado se utiliza el método volumétrico, a través del procedimiento siguiente.

- Se toma una probeta graduada de capacidad 500 ml (volumen) y se pesa.
- Luego se toma la muestra de pulpa de Cieno Carbonatado y se homogeniza mediante agitación
- Se vierte la pulpa en la probeta hasta el volumen de 500 ml, y se pesa obteniéndose los resultados en (g).

La densidad de la pulpa en g/cm^3 se obtiene por la siguiente expresión

$$\rho_p = \frac{m}{V} = \frac{\text{masa(g)}}{\text{volumen}(\text{cm}^3)} \quad (2.6)$$

Para este análisis se utiliza una probeta de capacidad 500 ml, un agitador y balanza digital con precisión ± 0.01 g

2.3.5 Determinación del % de sólido y el pH de la pulpa de Cieno Carbonatado

- Con los datos obtenidos de densidad de la pulpa se calcula el % de sólido por la siguiente formula:

$$\% \text{sólido} = \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_p} \cdot \frac{G_s}{G_s - \rho_l} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Donde:

$$\frac{G_s}{G_s - \rho_l} = 1.629 \quad \text{Para el Cieno Carbonatado}$$

ρ_p : Densidad de la pulpa en g/cm^3

ρ_l : Densidad del agua equivalente a 0.9962 g/cm^3



G_s : Gravedad específica del mineral

- Otro procedimiento para la obtención del % de sólido utilizado en el trabajo es el método de secado con un analizador de humedad MB 45.

Se coloca la muestra en el analizador el cual funciona sobre la base del principio termogravimétrico. Al comienzo de la medida, el analizador de humedad determina el peso de la muestra que debe ser menor a 500g, a continuación, la muestra se calienta rápidamente por medio de la unidad halógena desecadora y la humedad se evapora. Durante la operación de desecación, el equipo determina continuamente el peso de la muestra y presenta el resultado. Cuando la desecación concluye el resultado se muestra como el % de contenido de humedad, % de sólido, peso o % de tolerancia de humedad.

Para evaluar el comportamiento en la reología de la pulpa durante su hidrotransporte del % de sólido de la pulpa se toma una data de valores de **% de sólido** en el periodo de un mes analizada mediante el método del secado con el analizador de humedad del laboratorio de la planta de espesadores de la Empresa " Pedro Soto Alba". Moa Níckel S.A.

Se tuvo en cuenta además el comportamiento del pH de la pulpa del material analizado, para lo cual se obtuvo una data de valores determinados mediante un pH metro Orión 3 Star para lo cual se realizaron mediciones cada 24h.

2.3.6 Análisis de sedimentación de la pulpa

El análisis de sedimentación se realiza con el objetivo de valorar el comportamiento de las pulpas de Cieno Carbonatado durante el proceso de sedimentación.

La curva de sedimentación se realiza de forma experimental para ello se toma una probeta de 1000 ml, y una muestra del material atendiendo al % de sólido y densidad del mismo.

Procedimiento



- La probeta de capacidad 1000 ml, graduada en milímetro para conocer la altura de la misma y su variación durante el proceso de sedimentación.
- Se toma una muestra de la pulpa que se desea analizar y se homogeniza mediante un agitador.
- Se vierte dicha pulpa en la probeta y se deja reposar sin agitarse
- Y se van obteniendo valores de altura Z (mm) y tiempo t (horas) que permitirán obtener la curva de sedimentación al graficar Z vs t

Para el transporte hidráulico de pulpas es muy importante tener en cuenta el concepto de sedimentación: “Es la disposición por gravedad de las partículas sólidas en un medio fluido”

Las partículas sólidas en un medio fluido en reposo tienden a caer por la fuerza de gravedad. Si las partículas caen en un medio suficientemente extenso, están alcanzando una velocidad máxima, denominada velocidad límite de caída libre y depende del tamaño y densidad de la partícula y de las propiedades físicas del fluido

La velocidad de sedimentación para partículas de mayor diámetro en la pulpa en estado estacionario se obtiene por la expresión: (Pavlov, 1981)

$$\omega_{sed} = \frac{d^2(\rho - \rho_m)g}{18\mu_m} \quad (2.8)$$

Donde:

d: Es el diámetro de la partícula.

ρ : Densidad de la partícula (kg/m^3)

ρ_m : La densidad del medio (agua) (kg/m^3)

μ_m : El coeficiente dinámico de viscosidad del medio (agua)

Para temperatura ambiente $\mu_m = 0.8545 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

Cuando la concentración de partículas es grande, de manera que una partícula puede ponerse en contacto con otra durante el descenso se entorpecerá la caída de las partículas, disminuyendo la velocidad de las mismas. Estas condiciones dan lugar al



denominado régimen de caída contrariada, y por lo tanto la velocidad con que caen las partículas se les denomina velocidad de caída contrariada

En el caso del fenómeno de sedimentación en los sistemas de transporte por tuberías, se tiene en cuenta la velocidad de caída contrariada en función del diámetro medio de las partículas y la densidad del sólido por la expresión: (Martínez 2004)

$$W = 3.12 \cdot \sqrt{d_{cp}} \cdot \sqrt[4]{(\rho_s - 1)} \quad (2.9)$$

Donde:

d_{cp} : Diámetro medio de la partícula

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i \cdot dm}{G} \quad (2.10)$$

El diámetro medio de cada clase:

$$d_m = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (2.11)$$

$G = \sum g_i$ Peso total de la muestra

ρ_s : Densidad de l sólido

2.3.7 Análisis del comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado

Pruebas de reología

El equipo utilizado en las pruebas fue un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos, Rheotest 2,1 de fabricación alemana. Este sistema de medidas es de tipo Searle, es decir, el gradiente de velocidad se logra por medio de dos cilindros, uno exterior (vaso) en reposo y otro interior rotatorio (rotor), que gira con un número de revoluciones fijo o variable.

El giro del cilindro interior provoca el flujo del líquido que se encuentra en la ranura anular que forman los dos cilindros. La resistencia del líquido cizallado es proporcional al momento de giro o torque, dependiente de la viscosidad. Entre el motor de accionamiento y el eje del cilindro interior está colocado un instrumento de medición del momento de giro.



En los viscosímetros rotacionales Rheotest el esfuerzo cortante viene dado por el ángulo de deformación que experimenta un resorte interior que se deforma, bajo la acción de las fuerzas de resistencia al flujo que se genera en la pared del cilindro.

Para la medición se usó el sistema de vaso S, cilindro s_2 con una relación de radios $R/r=1,06$. Del equipo se pueden leer directamente los valores de α y gradiente de velocidad γ (1/s). Los valores de esfuerzo cortante τ (Pa) se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = z * \alpha \quad (2.12)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (Pa).

z : constante del cilindro rotor que se utiliza (Pa/cSt).

α : Lectura del instrumento y que resulta proporcional a la resistencia que ejerce el fluido al giro del rotor (cSt).

Se toman como valores de γ los de la variable Dr , registrados en tablas según el fabricante del equipo, y determinados a partir del comportamiento de fluidos newtonianos. Los valores de z para el cilindro utilizado son los siguientes:

Cilindro S_2 $z_{S_1}=0,577$ $z_{S_2}=5,78$

Esto nos permitirá graficando esfuerzo cortante τ contra gradiente de velocidad γ ; obtener las curvas de flujo que describen el comportamiento reológico de las pulpas analizadas.

El análisis se realizó atendiendo a los factores que influyen sobre el comportamiento de las curvas de flujo en la reología de suspensiones de Cieno Carbonatado como son el % de sólido, temperatura y pH. Estas curvas pueden ser ajustadas y obtener los **modelos reológicos** que describen el comportamiento del flujo mediante un análisis de regresión que permitirá clasificar al mismo como un **fluido newtoniano o no newtoniano**.



2.4 Procesamiento de los datos

Una vez obtenido los resultados experimentales se procedió al tratamiento de estos. A partir de los resultados experimentales del análisis granulométrico se obtiene la característica sumaria o acumulativa por clase de tamaño, que permite la determinación del D_{80} y la distribución en por ciento por fracciones de tamaño que permitirá clasificar las pulpas de Cieno Carbonatado como un sistema polidisperso o monodispersa según el tamaño de la partícula. Con estos datos se obtiene además el modelo que caracteriza la distribución de las partículas del mineral inicial de acuerdo con el tamaño de la partícula.

Con el análisis de reología se obtendrán las curvas de flujo que describen el comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado, el modelo reológico al cual se ajustan dichas curvas y su clasificación como un fluido newtoniano o no newtoniano.

Todo este procesamiento de datos se realizará con la ayuda de software especializado como Excel, estadística, Origin, y otros.

2.5 Conclusiones parciales

1. Los métodos y técnicas experimentales utilizadas para el análisis están fundamentadas a partir de la necesidad de la descripción y caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado y su comportamiento reológico para su hidrotransportación.
2. Los métodos experimentales de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental y equipamiento modernos para el desarrollo de las pruebas realizadas.
3. A través de la obtención de las curvas de flujo para diferente porcentaje de sólidos se puede obtener los modelos matemáticos mediante un análisis de regresión que describen el comportamiento reológicos de las pulpas de Cieno Carbonatado y su respectivo ajuste a un modelo reológico que permitirán un conocimiento de las características de dichas pulpas para su hidrotransporte.



CAPITULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

El estudio de las propiedades físicas, químicas, así como la composición granulométrica y distribución del tamaño de las partículas de Cieno Carbonatado utilizado en la empresa “Pedro Soto Alba”. Moa Nickel S.A son de importancia en la caracterización del material objeto de estudio, lo que permitirá un análisis de la reología del material, la obtención de los modelos reológicos del mismo que describen el comportamiento de las pulpas para su hidrotransportación y contribuyen a su perfeccionamiento.

A partir de este planteamiento el **objetivo** de este capítulo es:

Analizar los resultados experimentales, considerando el impacto medioambiental asociado a la transportación de las pulpas de Cieno Carbonatado por tuberías.

Para ello se analizan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al Cieno Carbonatado, a partir de propiedades como % de sólido, pH, densidad, análisis químico del mineral, la composición granulometría, sedimentación y características reológicas de las suspensiones del material en función de factores que influyen en su comportamiento.

3.2 Análisis químico

Los resultados del análisis químico de la muestra de Cieno carbonatado proveniente del proceso de minado M-1 y las obtenidas en el proceso M-2 y M-3 se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Composición química del Cieno carbonatado

Muestra	% Ni	% Fe	% Mg	% Mn	% Ca	% Al	% Na
M - 1	0,119	1,45	1,80	0,046	27,80	0,609	0,306
M - 2	0,114	1,15	1,73	0,028	29,14	0,470	0,200
M - 3	0,113	1,16	1,72	0,027	30,74	0,479	0,111



Como los resultados indican, la muestra M-1 posee los valores máximos para los elementos siguientes: hierro, magnesio, manganeso, aluminio y sodio, lo cual se debe a que en ella se incluye la fracción mayor de 0.85 mm. Respecto a la muestra M-2 y M-3 no existen diferencias significativas entre ellas aunque es preciso aclarar que el contenido de sodio con respecto a M-1 disminuye debido al proceso de lavado, al cual es sometido el material, no obstante entre la M-1 y M-2 esta disminución sugiere que en el sedimentador ocurre una disolución parcial del cloruro de sodio contenido en la muestra. El enriquecimiento de la muestra M-3 en cuanto al contenido de calcio, es de 30.74%, se debe a que en esta etapa la pulpa se somete a un proceso de floculación y sedimentación donde los sólidos en suspensión con contenidos de calcio son precipitados.

En el anexo 1 se incluyen otros elementos que fueron analizados pero no presentan valores significativos.

Por la importancia que reviste el seguimiento del contenido de cloruros para la transportación de la pulpa por tuberías, debe garantizarse que su valor sea inferior al rango de 500-600 ppm con el objetivo de evitar procesos de corrosivos. Como se observa en la tabla 3.2 la muestra que se hidrottransporta tiene un valor inferior a dicho rango.

Tabla 3.2 Contenido de Carbonato y Cloruro en M-3.

Muestra	Cloruro (Cl)	Carbonato (CaCO ₃)
M-3	397.07 ppm	87.93 %

3.3 Análisis granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico por vía húmeda a las tres muestras antes mencionadas, comprobándose similitud entre ellas en cuanto a la fracción predominante.



Como se muestra a continuación en las tablas 3.3 y 3.4 correspondiente al análisis granulométrico realizado a las muestras M-1 y M-2 el porcentaje en peso de la fracción mayor que 0.085 mm en la muestra M-1 constituye el 4.23% y forma parte del rechazo de la planta, sin embargo en la muestra M-2 se mantuvo este tamiz como una operación de control y se reporta un contenido de 1.73% este resultado sugiere que la eficiencia del proceso se encuentra limitada.

Tabla 3.3 resultados del análisis granulométrico muestra M-1

No de mallas (mesh)	Diámetro (mm)	Peso (g)	% en peso	Retenido	Cernido
20	- 0,890 + 0,850	9,13	4,237	4,237	100,000
50	- 0,850 + 0,300	10,61	4,924	9,161	95,763
100	- 0,300 + 0,150	10,26	4,762	13,923	90,839
200	- 0,150 + 0,075	18,68	8,669	22,592	86,077
325	- 0,075 + 0,046	15,68	7,277	29,870	77,408
-325	- 0,046 + 0	151,11	70,130	100,000	70,130
	Total	215,47	100,000		0,000

Tabla 3.4 Resultados del análisis granulométrico muestra M-2

No de mallas (mesh)	Diámetro (mm)	Peso (g)	% en peso	Retenido	Cernido
20	- 0,890 + 0,850	2,93	1,730	1,730	100,000
50	- 0,850 + 0,300	7,31	4,315	6,045	98,270
100	- 0,300 + 0,150	10,5	6,198	12,243	93,955
200	- 0,150 + 0,075	17,6	10,390	22,633	87,757
325	- 0,075 + 0,046	17,32	10,224	32,857	77,367
-325	- 0,046 + 0	113,74	67,143	100,000	67,143
	Total	169,4	100,000		0,000

Una de las causas observadas que limitan la eficiencia del proceso de cribado en la planta es el vertimiento del material en la zona de cribado.

En la figura 1 y 2 del anexo 2 se encuentra representada la característica sumaria de las muestras M-1 y M-2 en la que es evidente el predominio de la fracción fina.



Ambas muestras fueron sometidas a la determinación del contenido de sus elementos valiosos por clases de tamaño, este resultado se observa en las tablas 3.5 y 3.6

Tabla 3.5 Contenido de elementos valiosos por clase de tamaño muestra M-1

Muestra	% Ni	% Fe	% Mg	% Mn	% Ca	% Al	% Na
0,850	0,136	1,03	0,90	0,008	32,37	0,137	0,097
0,300	0,127	1,03	1,08	0,025	33,18	0,215	0,089
0,150	0,169	1,09	1,13	0,043	32,70	0,258	0,091
0,075	0,136	1,16	1,20	0,052	32,11	0,273	0,090
0,046	0,145	0,80	1,33	0,033	32,25	0,169	0,089

Tabla 3.6 Contenido de elementos valiosos por clase de tamaño muestra M-2

Muestra	% Ni	% Fe	% Mg	% Mn	% Ca	% Al	% Na
0.850	0,110	0,55	1,10	0,013	32,77	0,087	0,093
0.300	0,118	0,87	1,19	0,021	31,91	0,174	0,093
0.150	0,127	0,85	1,08	0,032	33,10	0,185	0,101
0.075	0,137	0,79	1,15	0,026	32,20	0,150	0,096
0.460	0,140	0,71	1,34	0,023	32,15	0,136	0,088

Este resultado sugiere que los elementos registrados manifiestan el siguiente comportamiento, para el níquel y el magnesio ambos se concentran en las fracciones finas, predominantemente en la fracción menor de 0.046mm; el manganeso y el aluminio en las fracciones intermedias, el sodio se concentra en las fracciones gruesas mientras que el hierro manifiesta un comportamiento irregular.

En el caso particular del calcio la variabilidad de su contenido por clases de tamaño no es significativo por lo que puede considerarse que presenta una distribución homogénea para todas las clases de tamaño.

Es preciso tener en cuenta que las muestras M-1, M-2 y M-3 fueron tomadas en pleno proceso productivo continuo y aunque constituyen puntos consecutivos del proceso, no existe garantía de que las muestras formen parte de una misma carga de la patana debido al tiempo requerido en cada una de las operaciones.



Por la importancia que tiene la caracterización de la muestra M-3 para el hidrotransporte se realizó un estudio más detallado de la misma. A continuación se muestran los resultados del análisis granulométrico en la tabla 3.7

Tabla 3.7 Resultado del análisis granulométrico muestra M-3

No de mallas (mesh)	Diámetro (mm)	Peso (g)	% en peso	Retenido	Cernido
20	- 0,890 + 0,850	3,5	1,36	1,36	100,00
50	- 0,850 + 0,300	10,72	4,19	5,55	98,63
100	- 0,300 + 0,150	15,55	6,07	11,63	94,44
200	- 0,150 + 0,075	24,08	9,41	21,04	88,36
325	- 0,075 + 0,046	27,23	10,64	31,68	78,95
-325	- 0,046 + 0	174,78	68,31	100,00	68,31
	Total	255,86	100,00		0.00

La clasificación por clases de tamaño realizada a la muestra M-3 de la pulpa de Cieno Carbonatado demuestra que estas pulpas forman sistemas polidispersos, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,046mm, constituyendo el 68.31 % en peso de las fases sólidas en la muestra.

Como puede apreciarse en la figura 3.4 existe un predominio de las fracciones finas de forma general y el D_{80} se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0.08444 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor.

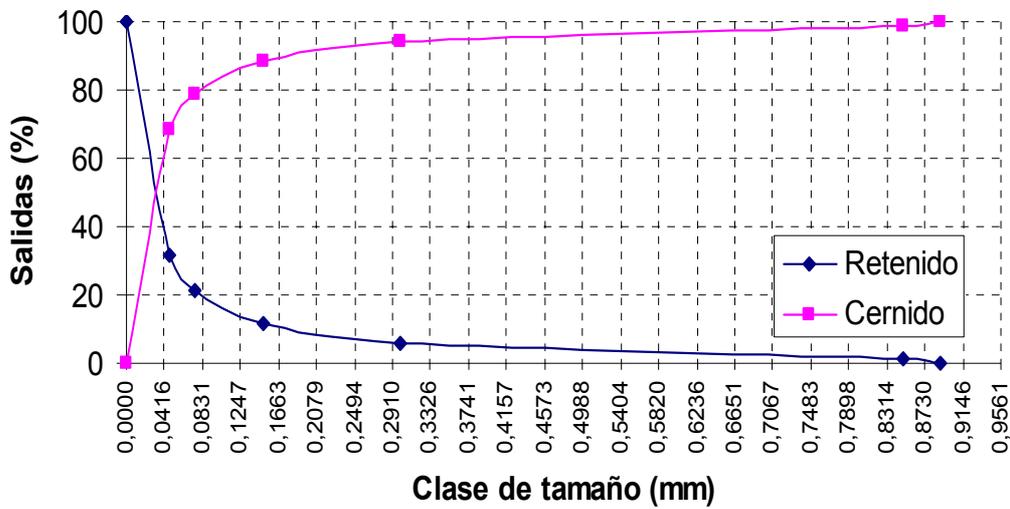


Figura 3.1 Curva de característica sumarias de la pulpa analizada

Teniendo en consideración que en la pulpa de Cieno Carbonatado que se transporta hasta la planta de Neutralización, la fracción menor de 0.046mm está representa aproximadamente por el 70% del sólido, por lo que se realizó un análisis de esta fracción en el analizador de partículas Horiba cuyos resultados se muestran en el anexo 3, estos resultados se pueden observar además a través de la característica sumaria representada en la figura 3.2

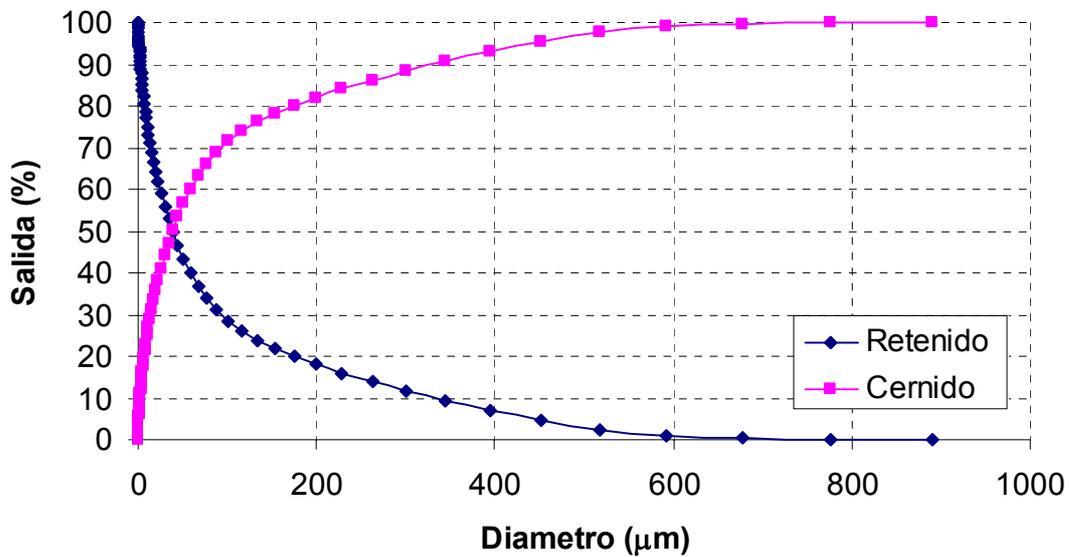


Figura 3.2 Curva de característica sumarias de la muestra M-3 en el Horiba

Es importante destacar que aproximadamente el 50% de la fracción menor de 0.046 mm está constituida por la fracción menor de 0.038 mm.

3.3.1 Análisis fraccional másico según el tamaño de partícula

Los resultados del análisis granulométrico se pueden apreciar a través de la función de distribución másica $\gamma(\ell)$ en la Tabla No 3.8, teniendo en cuenta en este caso como propiedad de separación el tamaño de las partículas.

Tabla 3.8 Resultados experimentales de la función de distribución másica $\gamma(\ell)$.

Clase de tamaño (mm)	Tamaño de partícula ℓ , (mm)	Magnitud de intervalo de clase $\Delta\ell$, (mm)	$\gamma(\ell)$, (1/mm)	$\gamma(\ell)*\Delta\ell$, (mm)
-0.890 +0,850	0.870	0.040	0.342	0.013
-0,850 +0,300	0.575	0.550	0.076	0.041



-0,300 +0,150	0.225	0.150	0.405	0.067
-0,150 +0,075	0.112	0.075	1.254	0.094
-0,075 +0,046	0.060	0.029	3.669	0.106
-0,046 +0	0.021	0.046	14.850	0.683

Se verifica el incremento del valor de la función con la disminución del tamaño de la clase granulométrica. Un aspecto de significativa importancia radica en el predominio de las fracciones menores de (-0.046) mm.

A continuación se expone el modelo que describe la función de distribución másica $\gamma(\ell)$ que caracteriza la pulpa tomando como propiedad de separación el tamaño de la partícula.

$$\bar{\gamma}_i(\ell) = 5.5281 + \frac{94.9806}{1 + \exp\left(\frac{\ell - 0.0390}{0.0074}\right)} \quad (3.1)$$

Como se aprecia en la figura 3.3 existe gran similitud en el comportamiento de la función de distribución $\bar{\gamma}_i(\ell)$ para todas las clases de tamaño.

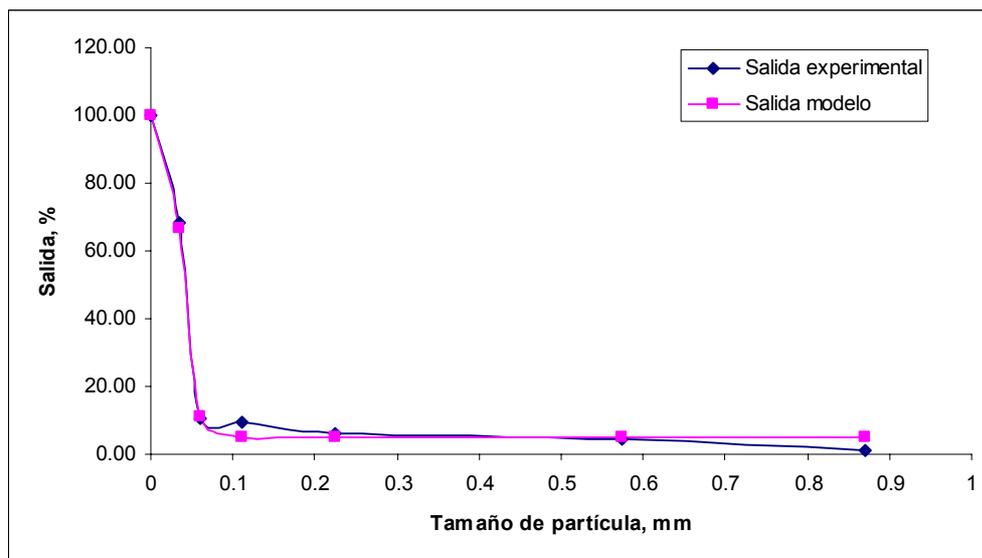




Figura 3.3 Comportamiento $\bar{\gamma}_i(l)$ en el experimento y en el modelo.

Esto puede comprobarse a través de la siguiente tabla, donde pueden observarse los valores que toma $\bar{\gamma}_i(l)$ para el modelo y experimentalmente para los diferentes intervalos de tamaño estudiados, en ella se plasma además el coeficiente de correlación múltiple que es igual a 0.996, en cuanto al análisis de varianza para un 95 % de confianza el Fisher calculado es mucho mayor que el tabulado, lo cual evidencia la confiabilidad y reproducibilidad del modelo obtenido.

Tabla 3.9. Estadísticas de la regresión para $\bar{\gamma}(l)$.

Estadísticas de la regresión		Clases de tamaño, mm	$\bar{\gamma}_i(l)$ para el modelo	$\bar{\gamma}_i(l)$ experimental
Coeficiente de correlación múltiple	0,996	-0.890 + 0,850	1.314	0.342
		-0,850 + 0,300	0.095	0.076
		-0,300 + 0,150	0.350	0.405
Análisis de varianza		-0,150 + 0,075	0.702	1.254
F calculado	8958,1889	-0,075 + 0,046	3.802	3.669
Valor crítico de F	7,4711E-08	-0,046+0	14.482	14.850

3.4 Determinación de la densidad del sólido y la pulpa

A continuación en la tabla 3.10 se relacionan los valores de la densidad del sólido y de la pulpa de Cieno Carbonatado obtenidos al aplicar el método del picnómetro y el método volumétrico respectivamente.

Tabla 3.10 Valores de densidad de la pulpa y el sólido de Cieno carbonatado de determinados a M-3.

Densidad, (Kg/m ³)	
Sólido	Pulpa
3015	1310

3.5 Comportamiento del por ciento de sólido y el pH



3.5.1 Comportamiento del % sólido

En el capítulo anterior se relacionan los métodos utilizados para obtener la propiedad física de porcentaje de sólido de las pulpas de Cieno Carbonatado. Este análisis se realiza a la pulpa M-3 que es transportada desde la planta de cienos ubicada en el puerto, donde se prepara y beneficia para ser utilizada en la planta de Neutralización. Para la confección de la data que permite determinar el comportamiento del porcentaje de sólido (Anexo 5), se realizaron mediciones durante veinte días, como se observa en el gráfico de la figura 3.4 el valor del % de sólido se manifiesta de forma irregular, el cual varía en un rango entre 28 y 40%. Es válido destacar que en el período para el cual se realiza el estudio, el valor de este parámetro es inferior al proyectado según el diseño de la planta (45 %), que es el valor óptimo para garantizar el contenido de carbonato de calcio necesario para el desarrollo de las reacciones en el proceso de neutralización del licor ácido.

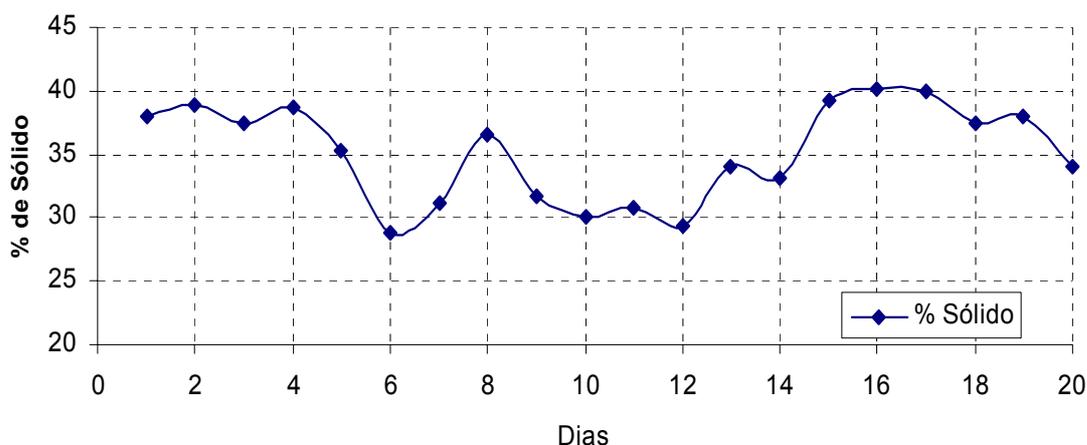


Figura 3.4. Comportamiento del % de sólido en la pulpa de la muestra M-3

Esta variación en el porcentaje de sólido está dada por la irregularidad en la calidad del material obtenido en el proceso de minería, en estos casos no se implementan operaciones en el proceso de preparación de la pulpa que permitan incrementar el % de sólido y a su vez garantizar el enriquecimiento del producto en su contenido de carbonato de calcio. En la planta de cienos solo se incorpora al proceso las partículas menores de 20 mesh obteniendo grandes pérdidas de Cieno Carbonatado en el material que conforma el rechazo.



Los valores de porcentaje de sólido obtenidos por los métodos volumétricos y de secado se exponen en la figura 3.5.

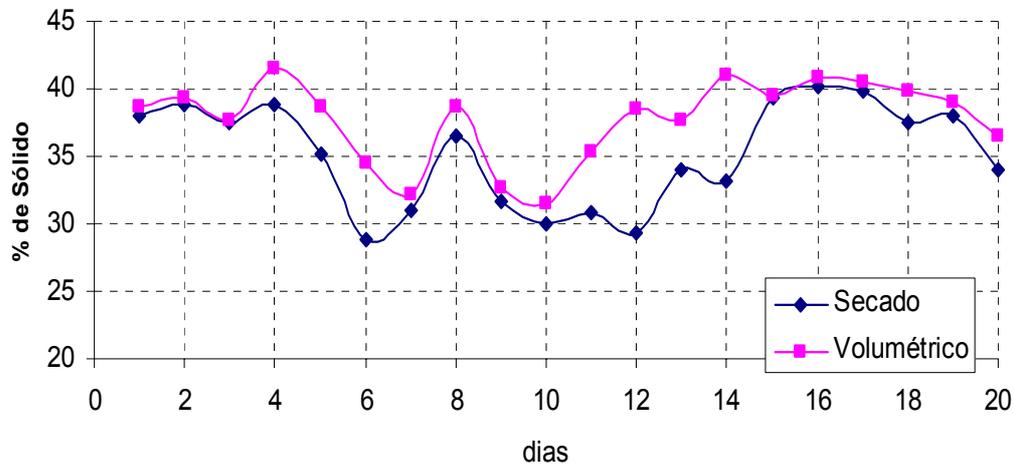


Figura 3.5 Comportamiento del % de sólido determinados por los métodos volumétricos y de secado.

Un análisis comparativo de estos resultados permite comprobar que en todos los casos se obtienen valores menores cuando se utiliza el método de secado, debido a que cuando se aplica el método volumétrico se introducen errores por una incorrecta homogenización de la muestra y no se tiene en cuenta además, la variación de la gravedad específica del material.

3.5.2 Comportamiento del pH

Al igual que el porcentaje de sólido, se analiza el comportamiento de pH de la pulpa que es bombeada a la planta de neutralización, para esto, se confeccionó como en el parámetro anterior una data (ver anexo 5) con los valores de pH presentado por la pulpa, Para su determinación se utiliza la muestra a la cual se le determina el porcentaje de sólido, la prueba se realiza con ayuda de un pH metro.

Como se observa en la figura 3.6 con los datos obtenidos se confecciona la gráfica del comportamiento del pH en la pulpa.

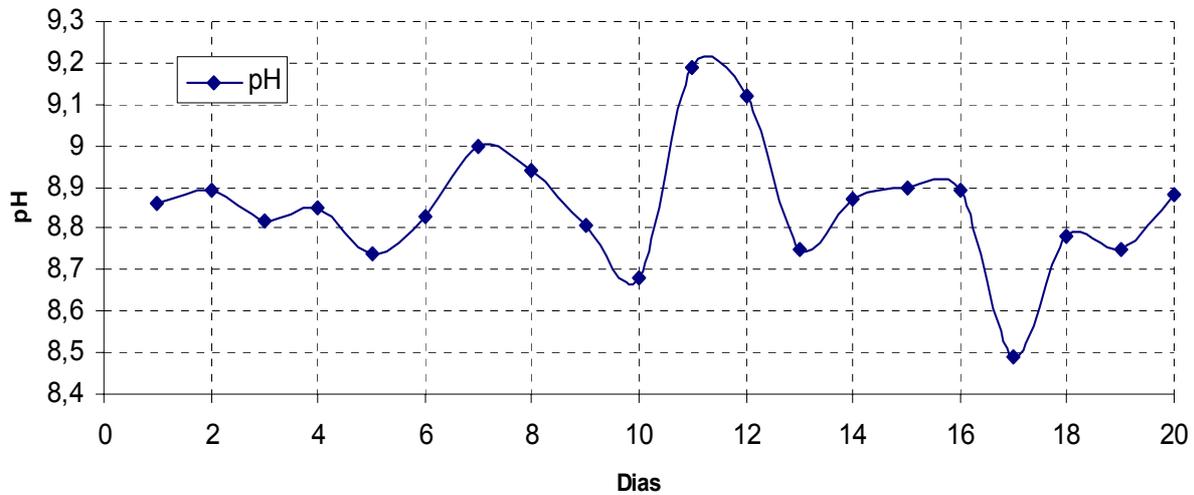


Figura 3.6 Comportamiento del pH en la pulpa estudiada

A pesar de que este parámetro presenta un comportamiento inestable, el rango en el que ocurren dichas variaciones oscila entre 8.49 y 9.19. Esta irregularidad en el pH de la pulpa como se puede observar son pequeñas y se considera que se encuentran asociadas con las características del material minado y las propiedades del medio dispersante utilizado en la preparación de la pulpa.

3.6 Análisis del proceso de sedimentación de las pulpas de Cieno Carbonatado

La curva de sedimentación fue obtenida por vía experimental como se describe en el epígrafe 2.3.6 del capítulo anterior, la curva que registra su comportamiento se muestra en la figura 3.7.

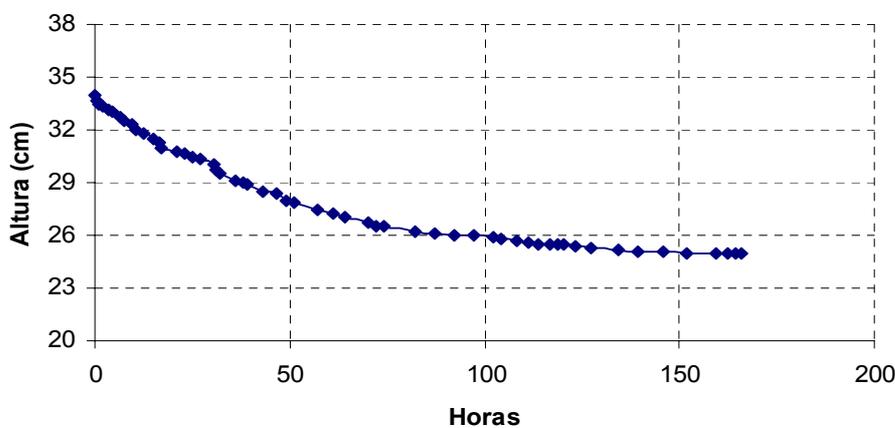




Figura 3.7 Curva de sedimentación de pulpa de Cieno Carbonatado

La curva de sedimentación de la pulpa de cieno carbonatado que se envía a la planta de Neutralización es característica de un proceso que se desarrolla en estado estacionario en un régimen de caída contrariada, para la cual, la velocidad de sedimentación es muy pequeña beneficiando con esto el proceso de hidrotransporte de la misma.

La velocidad de sedimentación de la pulpa en una tubería es calculada utilizando las expresiones (2.8, 2.9) del capítulo anterior.

Para el cálculo de la velocidad de sedimentación en la tubería se toma el valor del diámetro medio de la partícula calculada por la expresión (2.10).

$$d_{cp} = 0.083 \text{ mm} = 0.000083 \text{ m}$$

La densidad del sólido $\rho_s = 3015 \text{ kg/m}^3$

$$W = 3.12 \cdot \sqrt{d_{cp}} \cdot \sqrt[4]{(\rho_s - 1000)}$$

$$W = 0.19 \text{ m/s}$$

Este valor indica un proceso de sedimentación lento.

3.7 Análisis de Reología

Los resultados del análisis reológico de la pulpa de Cieno Carbonatado se obtuvieron mediante un reómetro rotacional, se tuvo en cuenta algunos factores como porcentaje de sólido, temperatura y pH, se comprueba su efecto sobre el comportamiento de las curvas de flujo, las cuales fueron obtenidas graficando los valores de esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), estas curvas permitirán clasificar reológicamente las pulpas y obtener el modelo reológico que la caracteriza.

3.7.1 Efecto de la concentración de sólidos

En la tabla 3.11 se relacionan los valores de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad, obtenidos en cada una de las pruebas realizadas a la pulpa de Cieno Carbonatado para diferentes valores de porcentaje de sólido 38, 41 y 45%, que a su vez permitieron determinar los valores de viscosidad aparente respectivamente.



Tabla 3.11 Resultados del análisis reológico de la muestra M-3

Gradiente de Velocidad ($\dot{\gamma}$), 1/s	% de Sólido					
	38%	41%	45%	38%	41%	45%
	Esfuerzo cortante (τ)			Viscosidad aparente (μa)		
505,73	18,3	32,5	57,3	0,03619	0,06426	0,11330
872,79	24	36,52	65,8	0,02750	0,04184	0,07539
1461,2	30,29	43,65	77,99	0,02073	0,02987	0,05337
2291,9	40	50,78	92,5	0,01745	0,02216	0,04036
3922,36	52,56	66,81	119,5	0,01340	0,01703	0,03047

En la figura 3.8 se representan las curvas de flujo obtenidas para las pulpas con diferentes % de sólidos. En cada caso se define el comportamiento de la pulpa teniendo en cuenta las curvas características de los modelos reológicos establecidos en la literatura según (Garcell, 2001 y Skelland, 1970)

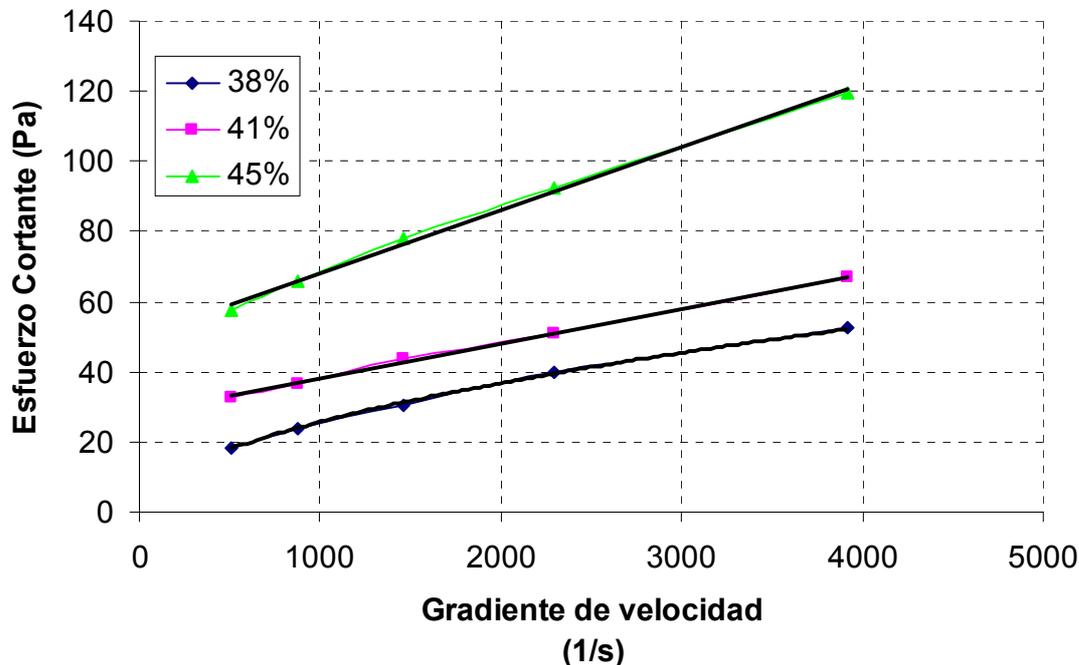


Figura 3.8 Curvas de flujo para la muestra de Cieno Carbonatado a diferente % de sólido.



Las pseudocurvas obtenidas han sido ajustadas mediante el programa profesional Excel 2004, como se observa en la figura anterior. La ecuación obtenida para el mejor ajuste de una pulpa con 38% de sólido sugiere un comportamiento pseudoplástico, cuya curva está descrita por modelo reológico de Ostwald de Waele. En el caso de pulpas con 41 y 45% de sólido manifiestan un comportamiento de plástico ideal o plásticos de Bingham dado por su ecuación de ajuste, el cual está representado por el modelo reológico de Bingham.

En todos los casos el ajuste se realizó por un análisis de regresión de mínimos cuadrados, pudiendo obtenerse las expresiones matemáticas que describen cada uno de estos comportamientos con índices de regresión por encima del 99%, como se muestra en la tabla 3.12, así como los valores de los parámetros reológicos que lo describen relacionados en la tabla 3.13.

Tabla 3.12 Modelos reológicos obtenidos

Porcentaje de sólido, (%)	Modelo matemático obtenido por regresión	Modelo reológico	Índice de regresión (R^2)
38	$y = 0.7226x^{0.5172}$	$\tau_{xy} = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$	0.9979
41	$y = 28.037 + 0.0099x$	$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy} \right)$	0.9978
45	$y = 50.036 + 0.018x$	$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy} \right)$	0.9963

Tabla 3.13 Parámetros reológicos



Concentración de Sólido (%)	Parámetros reológicos			
	Índice de consistencia (k), Pa.s	Índice de flujo n	Esfuerzo cortante inicial (τ_0), Pa	Viscosidad plástica (μ_p), Pa.s
38%	0,7226	0,5172		
41%			28,037	0,0099
45%			50,036	0,018

Como se muestra en la tabla anterior para las pulpas cuyo comportamiento reológico es característico de un plástico ideal (41 y 45% de sólido), los valores del esfuerzo cortante inicial y la viscosidad plástica muestran un incremento aproximadamente en el doble cuando se incrementa el porcentaje de sólido en un 4%, recomendamos realizar pruebas para valores superiores de porcentaje de sólido con el objetivo de establecer límites en su comportamiento, el cual influye en las ecuaciones de los parámetros de trabajo del sistema de hidrotransporte de la pulpa de Cieno Carbonatado.

Al comparar las curvas de flujo para los diferentes % de sólido (ver. Figura 3.8), se puede notar un incremento de los valores de esfuerzo cortante (τ) al incrementarse el contenido de sólido desde 38 a 45 %, de igual forma ocurre un incremento de la viscosidad aparente para un valor fijo de gradiente de velocidad y diferentes valores de porcentaje de sólido.

Como se observa en la figura 3.9 la viscosidad aparente manifiesta un comportamiento proporcional con el porcentaje de sólido, este resultado está relacionado con la composición granulométrica de la suspensión caracterizadas por el volumen de partículas finas, donde estas partículas son las que determinan, mayormente, la aparición de propiedades plásticas en la pulpa.

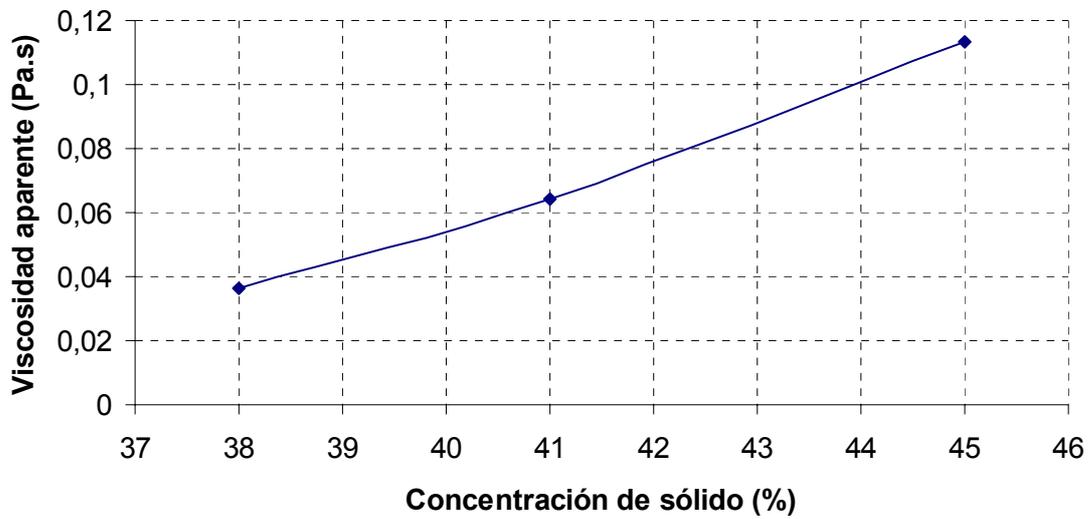


Figura 3.9 Seudocurva de viscosidad aparente de la pulpa para un gradiente de velocidad de 505.71 rpm.

3.7.2 Efecto de la temperatura

En la pulpa de Cieno Carbonatado con un porcentaje de sólido de 38%, se comprobó el efecto de la temperatura en los parámetros reológicos característicos de un comportamiento seudoplástico, representado a continuación en las figuras 3.10 a y b.

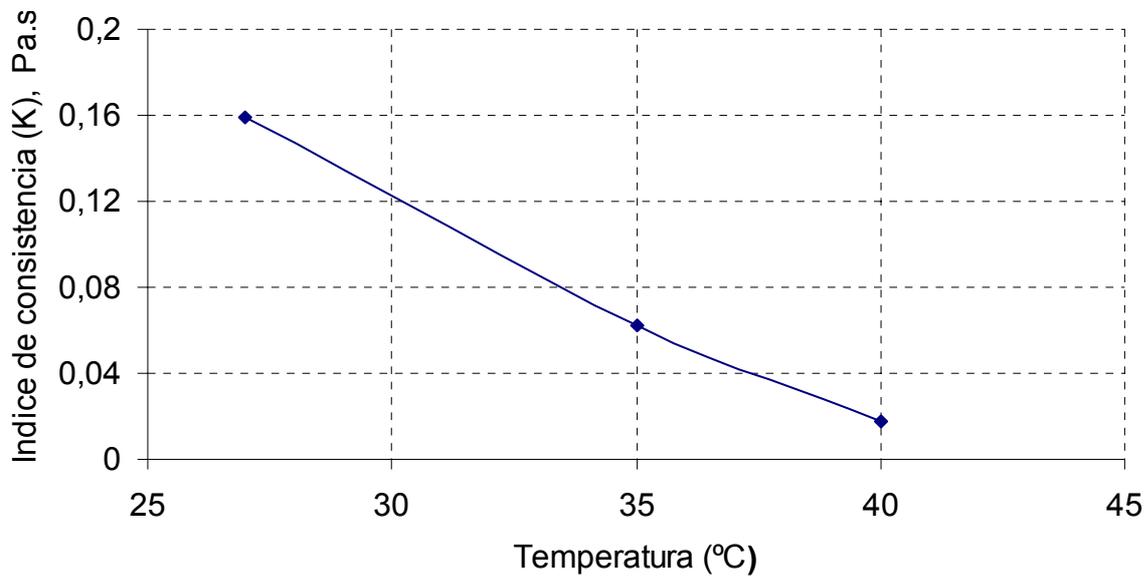


Figura 3.9 Comportamiento del índice de consistencia a diferente temperatura

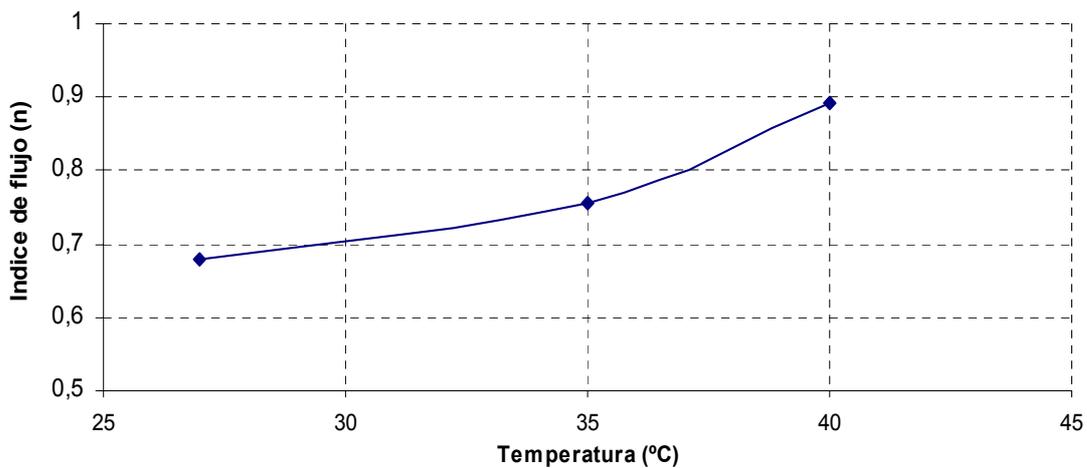


Figura 3.10 Comportamiento del índice de flujo a diferente temperatura

El valor del índice de consistencia, k disminuye con el aumento de la temperatura (Figura 3.9); por el contrario, el índice de flujo n (Figura 3.10), aumenta ligeramente con el incremento de la misma, estos resultados se encuentran en plena correspondencia con este tipo de comportamiento reológico. El anexo # 8 muestra la curva de flujo para diferente temperatura y los resultados experimentales para la obtención de la misma que confirman que no se manifiestan variaciones en el comportamiento reológico con el incremento de la temperatura.

3.7.3 Efecto del pH

Los valores de las mediciones del pH para la muestra M-3, como se muestra en la figura 3.6 mantiene un promedio alrededor de 8.9 unidades de pH, para comprobar el efecto de dicho parámetro sobre la reología de la pulpa de Cieno Carbonatado se realizaron variaciones de pH entre 8.4 y 10 unidades, considerando estos valores como límites en el rango de variación del pH de la pulpa en el período de tiempo estudiado.

De forma similar a la temperatura este parámetro no presenta una marcada influencia en el comportamiento reológico de la pulpa con 38% de sólido, como se observa en la figura 3.11 las curvas de flujo obtenidas para los diferentes valores de pH mantienen un comportamiento pseudoplástico.

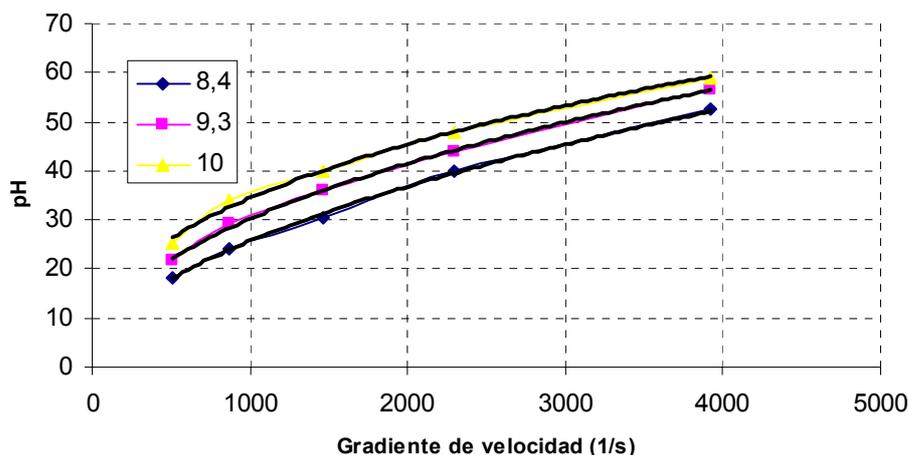


Figura 3.11 Curva de flujo para diferente pH

En el estudio del comportamiento reológico de la pulpa de Cieno Carbonatado, el factor que mayor influencia ejerce, es el porcentaje de sólido, debido a que un incremento del mismo provoca una variación en el comportamiento de la reología de la pulpa, sin embargo para las variables temperatura y pH, no se manifiestan cambios en los rangos evaluados.

3.8 Impacto medio ambiental

Los sistemas de hidrotransporte para el cieno carbonatado son regulados bajo los requerimientos ambientales dispuestos en la Ley 81 y se materializan a través de un



programa de mantenimiento planificado y financiado por la empresa encaminada a restaurar los tramos defectuosos de tuberías y soportes de este sistema, los cuales evitan procesos de derrames y como consecuencia contaminación del medio ambiente.

En la actualidad se construyen sistemas de drenajes para la evacuación de las cargas líquidas en los pipe rack, evitando el impacto visual del entorno y de los suelos respectivamente.

En los sistemas de hidrotransporte existen válvulas de seguridad, para evitar escapes y sobrecargas en las líneas, además un sistema de inspección visual por turnos de operación que garantiza la toma de decisiones rápidas ante un incidente en estos sistemas.

3.9 Conclusiones parciales del capítulo

1. El análisis químico de las muestras de Cieno Carbonatado indica que el contenido de las especies contaminantes principales como Ni, Fe, Mg, Mn no supera el 2% y prevalece el calcio con un contenido alrededor de un 30%.
2. Existe un predominio de las fracciones finas en la composición granulométrica de las pulpas de Cieno Carbonatado, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,046 mm.
3. Se obtuvo un modelo de la función de distribución diferencial másica $\bar{\gamma}(l)$ que caracteriza la pulpa tomando como propiedad de separación el tamaño de la partícula.

$$\bar{\gamma}_i(l) = 5.5281 + \frac{94.9806}{1 + \exp\left(\frac{l - 0.0390}{0.0074}\right)}$$

4. Se obtienen las curvas de flujo mediante el análisis reológico, demostrando que las pulpas de Cieno Carbonatado se comportan como plásticos ideales para un porcentaje de sólido mayor que 41 % y para valores menores como un pseudoplástico.
5. El porcentaje de sólido ejerce una influencia significativa en el comportamiento reológico de la pulpa, a diferencia de los factores temperatura y pH.



CONCLUSIONES GENERALES

1. La caracterización obtenida de las pulpas de Cieno Carbonatado permitió evaluar el comportamiento reológico de las mismas a partir de las variables estudiadas.
2. Se determina que el % de sólido presenta una marcada influencia sobre el comportamiento reológico de la pulpa por lo cual debe garantizarse que su valor responda a un modelo para evitar modificaciones en las ecuaciones de cálculo del sistema de hidrotransporte de la pulpa de Cieno Carbonatado.
3. Se obtienen los modelos reológicos que definen el comportamiento de la pulpa de Cieno Carbonatado. Para pulpas de 38 % de sólido se comporta como un material pseudoplástico modelo de Ostwald de Waele.

$$\tau_{xy} = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

Para 41 y 45 % de sólido se comporta como un plástico ideal, modelo de Bingham.

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy} \right)$$



RECOMENDACIONES

1. Evitar vertimiento en la torre de beneficio para garantizar la eficiencia del proceso de cribado.
2. Teniendo en cuenta el contenido de calcio de la fracción que en estos momentos constituye el rechazo de la planta (+ 20 mesh), realizar estudios que permitan su preparación e incorporación al proceso productivo.
3. Realizar pruebas para definir el comportamiento reológico de la pulpa para porcento de sólidos superiores a los estudiados con el objetivo de establecer límites en dicho comportamiento.
4. Realizar estudios sobre la influencia del floculante en las propiedades superficiales de las partículas de cieno carbonatado y su influencia en la reología.



BIBLIOGRAFÍA

1. Andreiev, S.E. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Editorial pueblo y educación, 1980.
2. Ramírez, S.B. Estudio de la distribución fraccional de las arenas del placer aluvial de la playa de Mejías. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002
3. Campos, G.M. Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande. Holguín. 2001.
4. Castillo. D. Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado. 1988.
5. Cerpa, A. Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloide-químicas. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997.
6. Cerpa, A.; Garcell. L .R Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. La Habana: Informe al evento Metalurgia 98, 1998.
7. Cerpa, A.; Garcell. L.R. Efecto del PH, concentración de sólidos y tamaño de partículas en las curvas de flujo de suspensiones lateríticas. Revista tecnología química. Volumen XXI, No 1, 2001
8. CEPRONIQUEL. Proyecto de extracción del fango coralino al sur de Cayo Moa Grande. 2000.
9. CESIGMA. División América. Proyecto de explotación del yacimiento de Cienos Carbonatados al sur de Cayo Moa Grande. 1997.
10. Cheng, D.C. Viscosity - concentration equations and flow curves for suspensions. Chemistry and Industry, 1980.
11. Correa. F. Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande. 1957.
12. Garcell, P.L. Sedimentación de suspensiones minerales, influencia de las propiedades superficiales y reológicas sobre el proceso. Curso de capacitación, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2004.



13. Garcell, P.L. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Trabajo investigativo. Facultad de Ingeniería química. Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella. Santiago de Cuba. 1993.
14. Garcell, P.L. Estudio reológico de las suspensiones de limonita de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Facultad de tecnología química. Santiago de Cuba. 1990.
15. Garcell, L. Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales. Revista Tecnología Química, 1984.
16. Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.
17. Heny, K.E; Fred, H.W; Stephen, R.L. Mineralogía. Edición revolucionaria. La Habana. 1959.
18. Hernández, L. R. Calculo verificativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
19. Izquierdo, P.R. Investigación de los parámetros y elaboración de los regímenes racionales del transporte hidráulico de lateritas utilizadas en las condiciones de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1989.
20. Jiménez. D.Y. calculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de neutralización de la Empresa "Pedro Soto Alba". Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2005.
21. Manual de operaciones de las plantas de Coral y Neutralización.
22. Mariño, P.A. Equipos de la metalurgia no ferrosa. Editorial Félix Varela, La Habana, 1994.
23. Martínez, R.R. Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de diploma. ISMM.2004.
24. Menéndez, H.M Conferencia sobre la naturaleza de los Cienos Carbonatados y los factores minero – ambientales que se tienen en cuenta durante el minado en la



- bahía de cayo Moa. Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa Níkel S.A. Moa 2001.
25. Menéndez, H.M. Explotación racional del yacimiento de Cienos Carbonatados en la bahía de Moa. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2001
 26. Mitrofanov, L.A. Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales, Editorial MIR, Moscú 1984.
 27. Nápoles. E. Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande. 1992.
 28. Nedved. M. Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande. 1966.
 29. Leong, Y.K; Boguer D.V: Surfase Chemistry Effects on Concentrated Suspensión Rheology. Journal. Colloid Interface Sei, 1990.
 30. Pavlov, K.F. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Editorial MIR, Moscú, 1981.
 31. Pérez. B.R. Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de las menas y concentrados en flujos de alta concentración. Tesis de Doctorado. Krivoi Rog, 1970.
 32. Rosabal, J; Garcell P.L. Mediciones directas de esfuerzos cortantes iniciales y de propiedades superficiales en suspensiones minerales. Trabajo de diploma. Facultad de Ingeniería Química. ISPJAM. Santiago de Cuba. 1998.
 33. Skelland A.H. Non Newtonian flow and heat transfer. Ediciones revolucionarias, La Habana, 1970.
 34. Suárez F.M. Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
 35. Suárez, M.; De la Cruz, R.K. Relación entre las características granulométricas, reológicas y coloidesquímicas en suspensiones de laterita y de Cieno Carbonatado. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. 2005.
 36. Tejeda, H.D. Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.



37. Tijonov, O.N. Zakonomiernosti effektivnovno razdelenia mineralov v protsessaj obogashenia polieznij oscopaemij. Nedra. Moskva. 1984.
38. Toose, E.M. A boundery integral method for two dimentional) (non) – Newtonian drops is slow visions flow. Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics, 1995.
39. Turro, B.A. Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002.
40. Turro, B.A. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (Colas) del proceso industrial CARON. Revista tecnología química. Volumen XXIII, No 2, 2003.



Anexo 1

Tabla 1 Composición química del Cieno carbonatado

Muestra	% Co	% Cu	% Zn	% Cr	% SiO ₂	% K
M -1	0,0009	0,0010	0,0023	0,031	0,027	0,027
M -2	0,0003	0,0015	0,0016	0,021	0,021	0,018
M-3	0,0004	0,0052	0,0014	0,021	0,021	0,010

Tabla 2 Composición química del Cieno carbonatado por clase de tamaño para la muestra M -1

Muestra	% Co	% Cu	% Zn	% Cr	% SiO ₂	% K
0,850	0,0010	0,0006	0,0014	0,007	0,165	0,005
0,300	0,0003	0,0005	0,0011	0,011	0,172	0,005
0,150	0,0061	0,0007	0,0027	0,014	0,164	0,004
0,075	0,0030	0,0007	0,0021	0,018	0,129	0,004
0,046	0,0031	0,0005	0,0018	0,012	0,091	0,004

Tabla 3 Composición química del Cieno carbonatado por clase de tamaño para la muestra M -2

Muestra	% Co	% Cu	% Zn	% Cr	% SiO ₂	% K
0.850	0,0001	0,0002	0,0006	0,004	0,133	0,003
0.300	0,0003	0,0005	0,0011	0,009	0,102	0,004
0.150	0,0005	0,0005	0,0010	0,010	0,129	0,005
0.075	0,0014	0,0010	0,0015	0,009	0,126	0,006
0.046	0,0016	0,0008	0,0016	0,010	0,140	0,004



Anexo 2

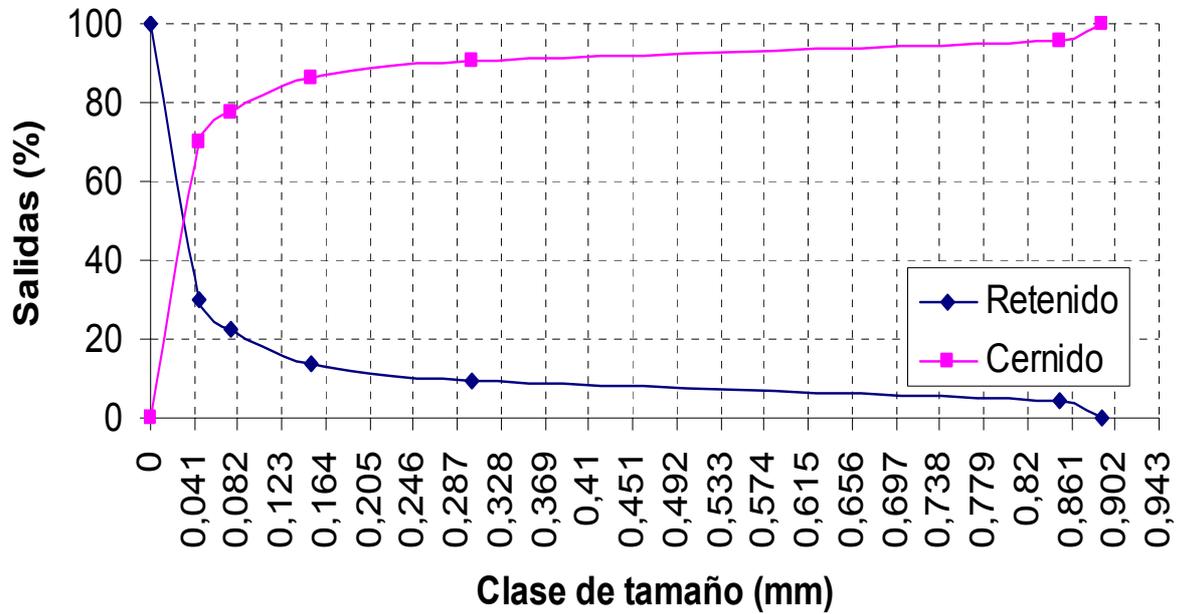


Figura 1 Curva de característica sumaria de la muestra M-1

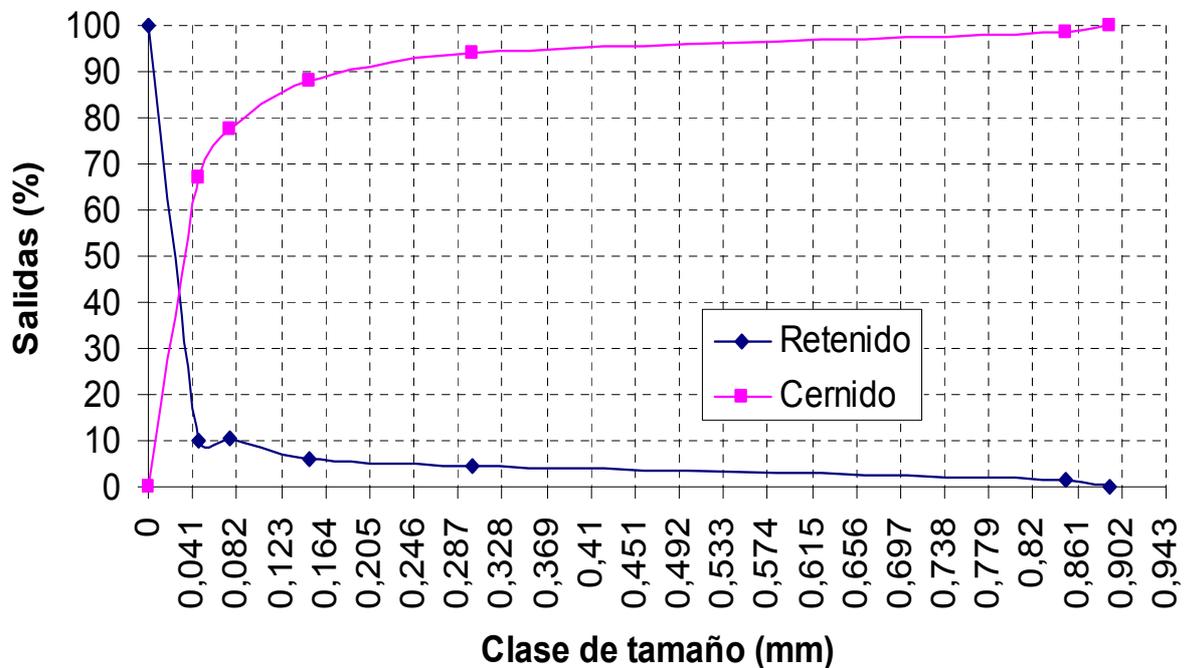


Figura 2 Curva de característica sumaria de la muestra M-2

**Anexo 3****Tabla 4** Resultados del análisis de la muestra M-3 en el Horiba

Diámetro (μm)	Frecuencia	Retenido	Cernido	Diámetro (μm)	Frecuencia	Retenido	Cernido
890,116	0	0	100	11,565	1,958	73,149	26,851
777,141	0,387	0	100	10,097	1,895	75,107	24,893
678,504	0,696	0,387	99,613	8,816	1,835	77,002	22,998
592,387	1,253	1,083	98,917	7,697	1,757	78,837	21,163
517,2	2,255	2,336	97,664	6,72	1,646	80,594	19,406
451,556	2,395	4,591	95,409	5,867	1,527	82,239	17,761
394,244	2,391	6,986	93,014	5,122	1,419	83,766	16,234
344,206	2,302	9,377	90,623	4,472	1,312	85,185	14,815
300,518	2,21	11,679	88,321	3,905	1,213	86,497	13,503
262,376	2,094	13,889	86,111	3,409	1,14	87,71	12,29
229,075	1,997	15,983	84,017	2,976	1,033	88,85	11,15
200	1,948	17,98	82,02	2,599	0,915	89,883	10,117
174,616	1,96	19,928	80,072	2,269	0,831	90,798	9,202
152,453	2,051	21,888	78,112	1,981	0,685	91,63	8,37
133,103	2,231	23,939	76,061	1,729	0,573	92,315	7,685
116,21	2,401	26,17	73,83	1,51	0,534	92,887	7,113
101,46	2,587	28,571	71,429	1,318	0,51	93,421	6,579
88,583	2,775	31,158	68,842	1,151	0,415	93,931	6,069
77,339	2,95	33,933	66,067	1,005	0,345	94,346	5,654
67,523	3,091	36,883	63,117	0,877	0,295	94,691	5,309
58,953	3,193	39,974	60,026	0,766	0,258	94,986	5,014
51,471	3,244	43,168	56,832	0,669	0,274	95,244	4,756
44,938	3,251	46,412	53,588	0,584	0,348	95,517	4,483
39,234	3,217	49,663	50,337	0,51	0,464	95,866	4,134
34,255	3,122	52,88	47,12	0,445	0,616	96,33	3,67
29,907	2,964	56,002	43,998	0,389	0,738	96,946	3,054
26,111	2,763	58,966	41,034	0,339	0,742	97,683	2,317
22,797	2,564	61,729	38,271	0,296	0,618	98,425	1,575
19,904	2,399	64,293	35,707	0,259	0,43	99,043	0,957
17,377	2,264	66,692	33,308	0,226	0,266	99,472	0,528
15,172	2,149	68,956	31,044	0,197	0,161	99,738	0,262
13,246	2,045	71,104	28,896	0,172	0,101	99,899	0,101
11,565	1,958	73,149	26,851	0,15	0	100	0
10,097	1,895	75,107	24,893				



Anexo 3 Continuación

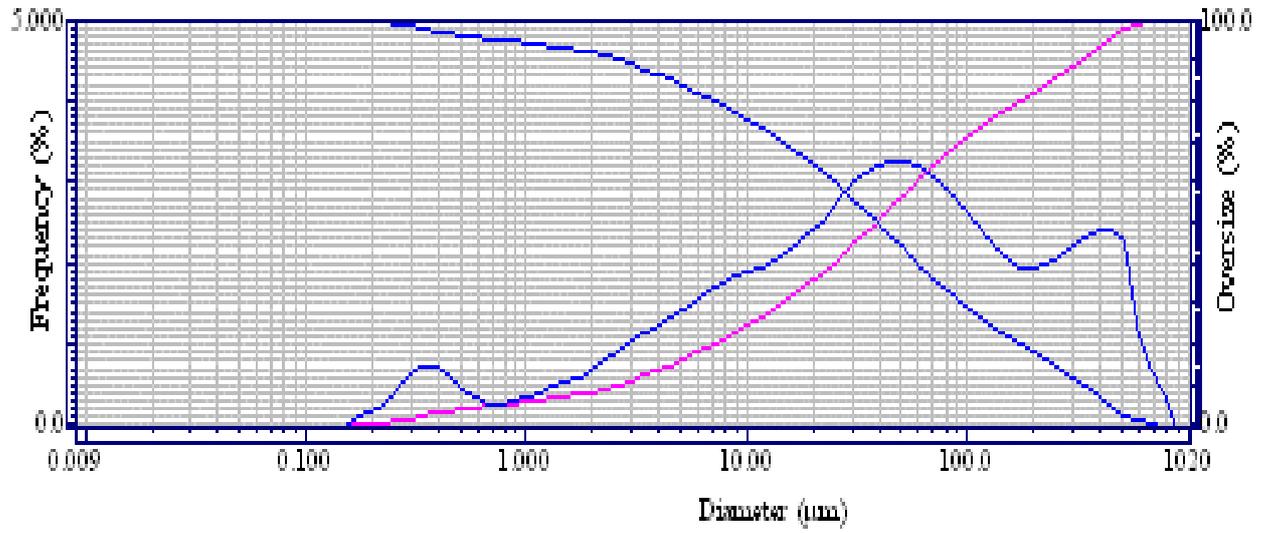


Figura 3 Curvas característica sumaria obtenida en el Horiba

**Anexo 4****Tabla 6** Resultados de las mediciones del porcentaje de sólido y PH

Días	Fechas	% Sólido		PH
		Secado	Volumétrico	
1	24/04/2008	38,05	38,6	8,86
2	25/04/2008	38,85	39,4	8,89
3	28/04/2008	37,51	37,6	8,82
4	29/04/2008	38,76	41,5	8,85
5	30/04/2008	35,22	38,6	8,74
6	02/05/2008	28,79	34,5	8,83
7	03/05/2008	31,07	32,2	9
8	05/05/2008	36,47	38,6	8,94
9	07/05/2008	31,64	32,6	8,81
10	08/05/2008	30,04	31,5	8,68
11	09/05/2008	30,83	35,3	9,19
12	15/05/2008	29,39	38,5	9,12
13	16/05/2008	34,05	37,7	8,75
14	17/05/2008	33,21	41	8,87
15	20/05/2008	39,28	39,5	8,9
16	21/05/2008	40,19	40,8	8,89
17	26/05/2008	39,9	40,5	8,49
18	27/05/2008	37,49	39,8	8,78
19	29/05/2008	38,06	39,01	8,75
20	30/05/2008	34,01	36,5	8,88

Anexo 5

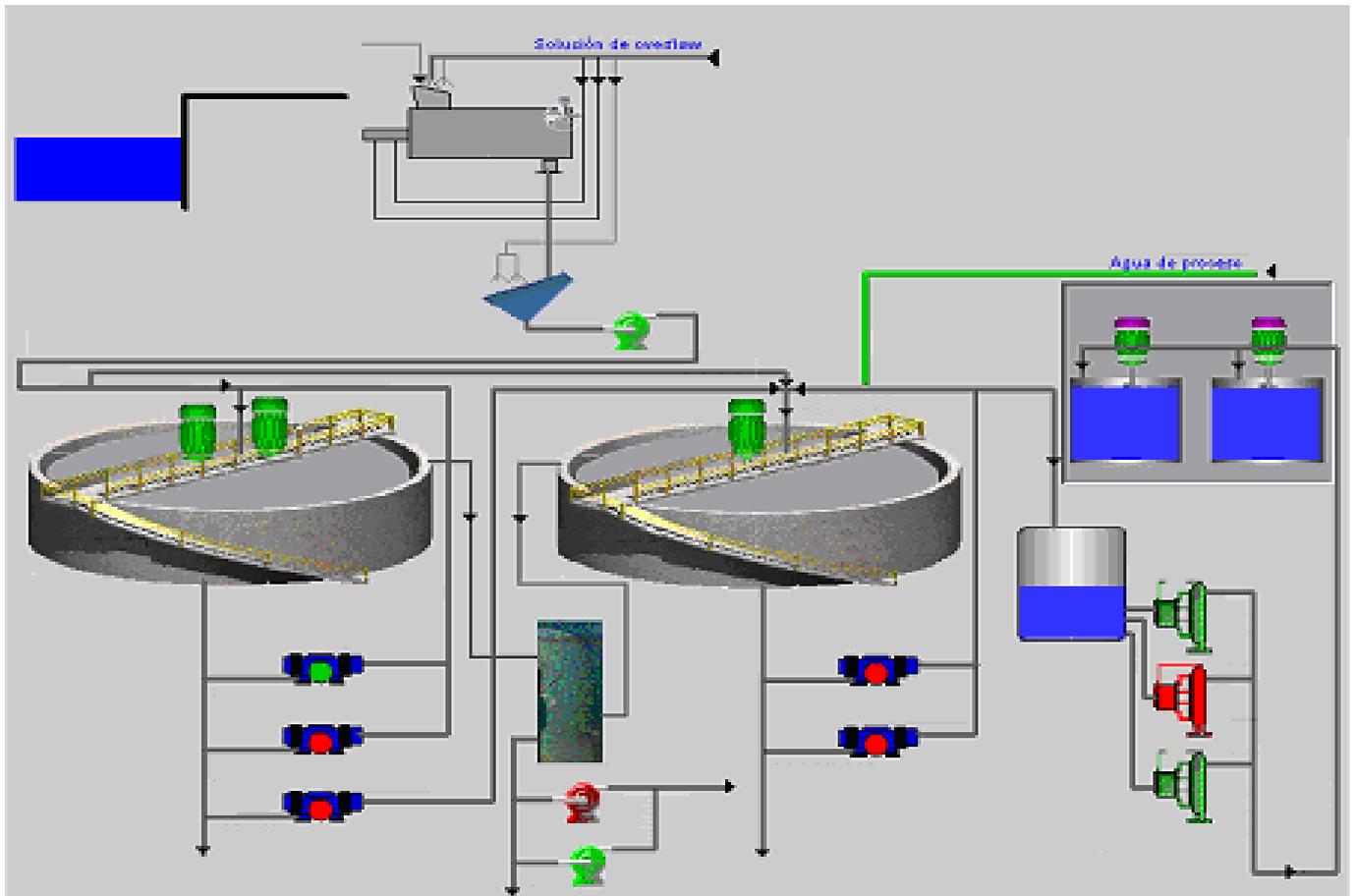


Figura 5 Esquema tecnológico de la planta de coral

Anexo 6

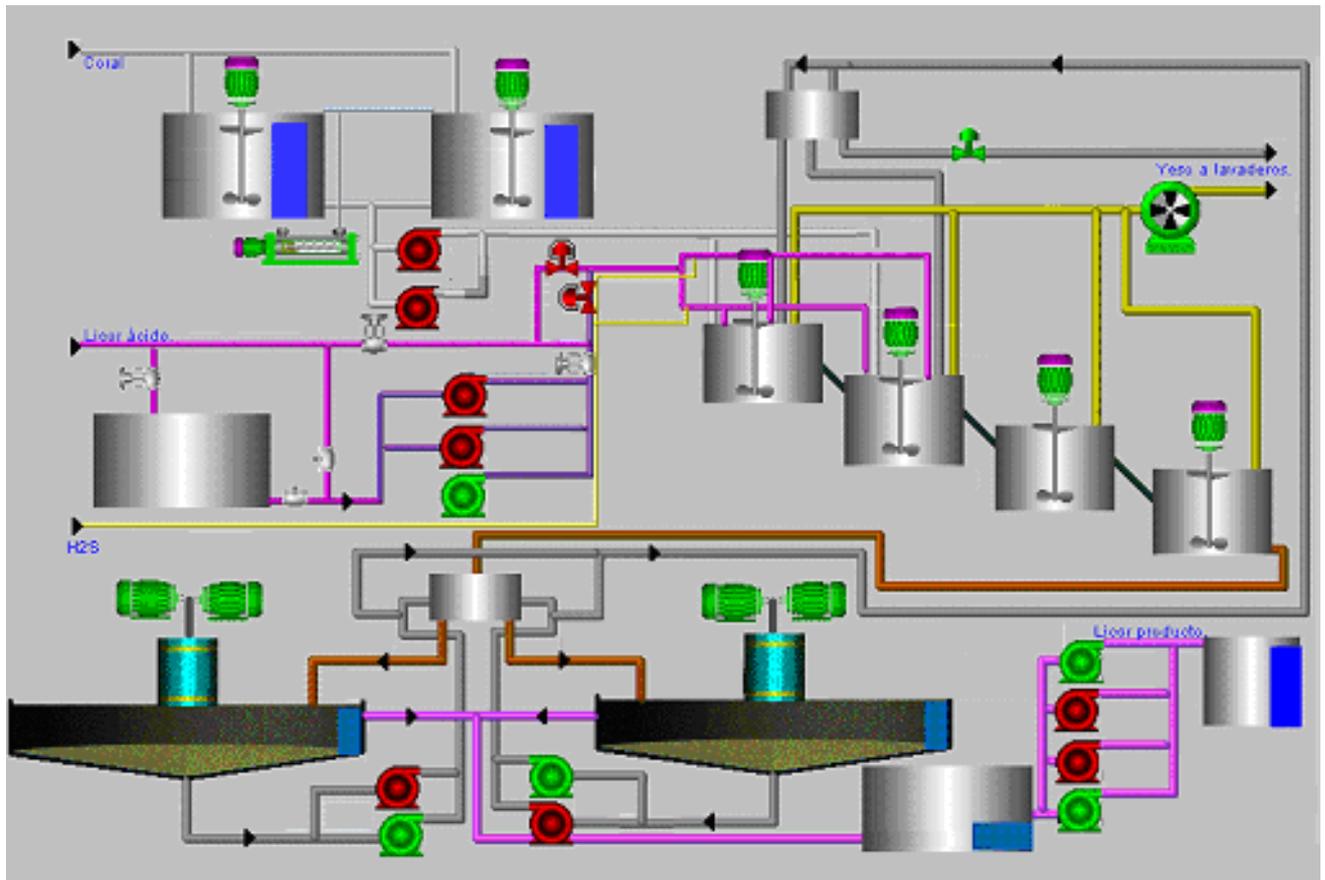


Figura 6 Esquema tecnológico de la planta de Neutralización

Anexo 7



Figura 7 Torre de beneficio para el Cieno Carbonatado.



Figura 8 Depósito de alimentación a la torre

Anexo 8

Tabla 7 Resultados del análisis reológico a diferente temperatura y 38%

	Temperatura (°C)			Viscosidad aparente		
	tamb	35	40	tamb	35	40
γ (1/s)	τ	τ	τ	μa	μa	μa
505,73	10,3	6,5	4,3	0,0204	0,0129	0,0085
872,79	16,4	10,79	7,5	0,0188	0,0124	0,0086
1461,2	23	16,3	12	0,0157	0,0112	0,0082
2291,9	31	22,6	18	0,0135	0,0099	0,0079
3922,36	41,6	30,46	26,6	0,0106	0,0078	0,0068

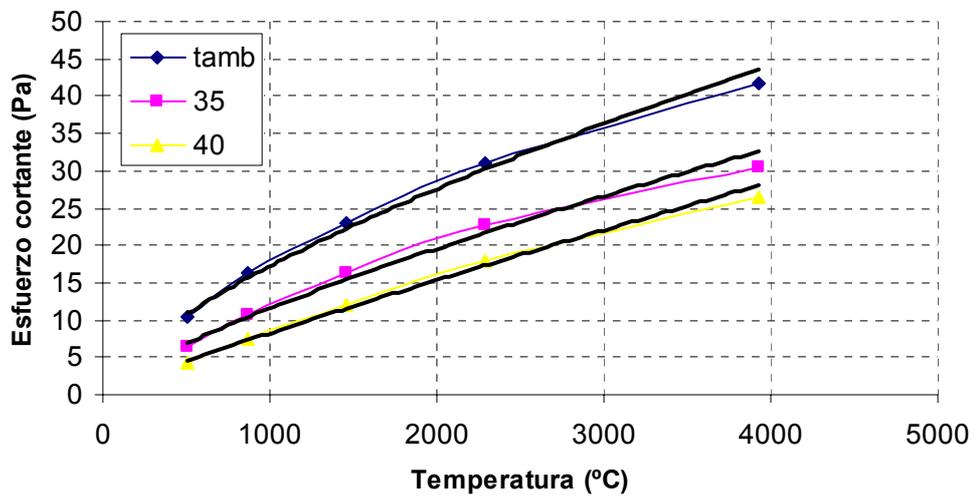


Figura 9 Comportamiento reológico de la pulpa M -3 a diferente temperaturas