

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

**MODELACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y DESCARGAS DEL TRANSPORTE DE  
CIENO CARBONATADO POR TUBERÍA.**

**Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico.**

**Autor:** Rolando Pérez Lamarque

**Tutor:** Asist., Ing. Rodney Martinez Rojas, M.Sc.

**Moa - 2015**



## **DECLARACIÓN DE AUTOR**

---

*Yo: Rolando Pérez Lamarque*

*Autor de esta Tesis de grado, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.*

-----  
*Firma del Autor*  
Rolando Pérez Lamarque

-----  
*Firma del tutor*  
Asist., Ing. Rodney Martínez Rojas, M.Sc.



## *Pensamiento*

*“El que no sea capaz de sacrificarse, que al menos tenga el pudor de callar ante el sacrificio de los demás”*

*José Martí Pérez*

*“Investigar es encontrar valores, es desarrollar una ética, una actitud ante la vida, es sembrar sentimientos, es buscar todo lo que puede estar en el alma del ser humano.”*

*Fidel Castro Ruz*

*“El desarrollo de la ciencia es un drama, un drama de ideas. Ella debe cautivar e interesar a todo aquel quien ama la ciencia”*

*Albert Einstein*

*“Si tuviera que definir mi vida, diría algo muy simple:*

*Ha sido un campo de batallas, nunca he dejado de luchar, ni en las circunstancias más adversas he perdido la fe en el futuro”*

*Blas Roca Calderío*



## **AGRADECIMIENTO**

*A mi madre Milvia Lamarque y mi hijo Eduar David, por ser la estrella guía que ilumina mi camino, además, por brindarme su comprensión y estímulo en los momentos más difíciles de estos últimos años.*

*A mi tutor M. Sc. Rodney Martínez Rojas y al profesor Dr. C. Héctor Laurencio, por la incondicional ayuda que me brindaron.*

*A mi familia, en especial a mi abuela María y Gladis, mis tíos Papito, Pupi, Lizet, mi padre, mis hermanas, mi prima y mi novia por saberme comprender durante todo este tiempo.*

*A todos mis amigos, en especial el tocayo y sus padres, Reydis y Yordi, por todo el apoyo que me brindaron a lo largo de la carrera.*

*A todos aquellos que con esfuerzo y paciencia han convertido mis sueños y anhelos en realidad, contribuyendo ya sea directa o indirectamente en la realización de este trabajo.*

*A los profesores y compañeros de estudio, con los que he tenido el gusto de compartir estos años.*

*A todos, muchas gracias.*



## ***Dedicatoria***

*La realización de este trabajo es para mi madre., mi hijo, mis familiares, mis amigos, en fin a todas aquellas personas que creyeron en mí, que cuando tropecé me dijeron levántate que tu si puedes, que me hicieron recordar que el hombre no se mide por las veces que se cae, sino por las veces que se levanta.*

*A la Revolución Cubana por haberme dado la posibilidad de poder forjarme como un buen profesional.*

*A los nombrados y a quienes imperdonablemente no he recordado, a todos les dedico este éxito.*

***El autor***



## Resumen

En la investigación se realiza un estudio, relacionado con las propiedades físico – mecánicas y de flujo de cieno carbonatado; con el fin de contribuir a las soluciones relacionadas a los métodos de cálculos aplicables a fluidos no newtonianos en específico. Con el análisis del material se obtiene que en el destaca el elemento Calcio con un 30 % y predominio en su composición granulométrica de partículas finas menores de un 0,046 mm siendo este un sistema polidisperso.

Las pruebas reológicas realizadas demuestran que el Cieno tiene un comportamiento plástico ideal modelo de Bingham, para la variación en el contenido de sólido analizado.

Se proponen modelos y procedimiento de cálculo apropiados para la selección y evaluación de sistemas de transporte, relacionado con las propiedades reológicas del fluido. Los modelos propuestos para la estimación de pérdidas de carga y potencia son válidos para fluidos Bingham.

Como propósito del efecto económico relacionado al transporte de cieno carbonatado; se concluye que durante el transporte de pulpas con un 50% de contenido de sólido se logra el mejor rendimiento (69,14 %) en el sistema de bombeo, correspondiente a un costo total de bombeo de 3,56 CUC/h.



## Summary

In the research a study is conducted, related to the physical - mechanical and carbonated mud flow; in order to contribute to solutions related to the measurement methods applicable to non-Newtonian fluids in particular. With the analysis of the material obtained in the Calcium element it stands at 30% and its prevalence in fine particle grain size of 0.046 mm under this being a polydisperse system.

The rheological tests conducted demonstrate that carbonate mud has an ideal Bingham plastic behavior model for the variation in the solids content analyzed.

Appropriate models and calculation procedure for the selection and evaluation of proposed transportation systems, related to, the rheological properties of the fluid. The models proposed for estimating power losses and are valid for Bingham fluids.

The purpose of the economic impact related to the transport of carbonate mud; it concludes that during the transport of slurries of 50% solids content the better performance (69.14%) in the pumping system corresponding to a total cost of pumping of 3.56 CUC / h is achieved.



Contenido	Págs.
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>Capítulo I MARCO TEÓRICO.</b>	5
1.1. Introducción.	5
1.2. Origen y génesis del yacimiento de cieno carbonatado.	5
1.3. Trabajos relacionados a estudios reológicos en fluidos no newtonianos.	6
1.3.1. Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de las dispersiones minerales.	12
1.3.2. Características generales de los sistemas particulados.	13
1.3.3. Clasificación reológica de los de los fluidos.	15
1.3.4. Modelos reológicos.	16
1.4. Pérdida de presión en los sistemas de transportes de hidromezclas.	17
1.5. Trabajos relacionados con los sistemas de bombeos.	21
1.5.1. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías.	23
1.6. Conclusiones del capítulo.	25
<b>Capítulo II MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	26
2.1. Introducción	26
2.2. Origen de las muestras del Cieno Carbonatado	26
2.3. Toma y preparación de las muestras.	27
2.4. Técnicas experimentales utilizadas	27
2.4.1. Caracterización granulométrica del material.	28
2.4.1.1. Proceso de reducción de tamaño para la molienda.	28
2.4.2. Análisis de las propiedades químicas.	29
2.4.3. Análisis del comportamiento reológicos.	29
2.5. Análisis de la sedimentación en las pulpas de cieno carbonatados.	30
2.6. Procedimiento experimental para la obtención de los principales parámetros de transporte del Cieno Carbonatado y los modelos teóricos que fundamentan dicho transporte.	31
2.6.1. Instrumentación utilizada para la medición y toma de datos.	52



---

2.6.2.	Metodología para la toma de datos experimentales.	55
2.7.	Procedimientos metodológicos sobre la determinación del gradiente de presión en conductos circulares.	34
2.8.	Expresiones para la determinación de pérdidas de presión por resistencias locales.	37
2.9.	Expresiones para la determinación de costos y potencia hidráulica de transporte.	38
2.10.	Procesamiento estadístico de los datos.	39
2.10.1.	Proceso de identificación del modelo del gradiente de presión.	40
2.11.	Conclusiones del capítulo.	41
<b>Capítulo III</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>	42
3.1.	Introducción.	42
3.2.	Análisis químico.	42
3.3.	Característica Granulométrica.	43
3.4.	Análisis del proceso de sedimentación de las pulpas de Cieno Carbonatado.	46
3.5.	Resultados experimentales de la reología del cieno carbonatado.	47
3.6.	Análisis de la influencia del contenido de sólido en las propiedades del cieno carbonatado.	50
3.7.	Análisis del modelo de pérdida de carga.	52
3.8.	Correlación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds	55
3.9.	Impacto Técnico- Económica.	57
3.10.	Conclusiones parciales del capítulo.	57
	<b>CONCLUSIONES GENERALES.</b>	59
	<b>RECOMENDACIONES.</b>	60
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.</b>	61
	<b>ANEXOS.</b>	



## INTRODUCCIÓN

Moa cuenta con dos empresas productoras de Nickel, una de ellas es la empresa mixta cubana canadiense, Comandante “Pedro Soto Alba”. Cuya función es producir Níquel + Cobalto. La misma cuenta con 9 plantas para el procesamiento del mineral. Una de ellas es la planta de Coral, que se diseñó con el objetivo de separar el Carbonato de Calcio existentes en los bancos de Coral de las impurezas y reducir el coral a partículas menores de 20 mesh que forman la pulpa producto de esta Planta.

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM) de Moa, existen áreas e instalaciones destinadas al estudio y comportamiento de los fluidos industriales, en especial el níquel, así como los elementos y equipos que componen dichas instalaciones. Dirigidos por profesores investigadores del área de la Mecánica de los Fluidos.

La instalación semi-industrial de hidrotransporte construida alrededor de los años 1985 y 1986 es una de estas áreas destinadas para la investigación y la docencia, la misma consta de bombas, tuberías, accesorios e instrumentación destinados al control de los parámetros de funcionamiento de estos equipos para el bombeo de diferentes fluidos. Se dispone de un sistema de redes en circuito cerrado y semi-abierto por el cual se trasiegan los fluidos en estudio (Cieno Carbonatado). Esta instalación se encuentra actualmente lista para la realización de prueba con las partículas mayores que 20 mesh que forman el rechazo.

La utilización del carbonato de calcio, ( $\text{CaCO}_3$ ) contenidos en los cienos carbonatados, constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la Planta de Neutralización de la empresa Moa Nickel S.A “Pedro Soto Alba” para lograr el pH óptimo del licor lixiviado obtenido a partir de la lixiviación del mineral con vista a su posterior procesamiento en el área de Precipitación de Sulfuros.

La pulpa de cieno carbonatado es un material de color gris y es extraído 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 a 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.

En este tipo de transporte el consumo energético depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y ésta, a su vez, depende del diámetro de la conductora, su estado de explotación, el material y tecnología de que está hecho, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades físico mecánicas del material y de la concentración (Turro 2002; Martínez, 2009).

La situación actual del transporte del cieno carbonatado, se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- Poco conocimiento de las propiedades de transporte del cieno carbonatado, y su comportamiento en función de las propiedades física mecánicas y reológicas, debido a la insuficiencia de estudios en este campo.
- Limitaciones en los métodos de cálculo disponibles para la proyección, selección y obtención de los parámetros racionales de transporte del cieno carbonatado.
- Su elevado consumo energético depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería, porcentaje de sólido de la hidromezcla y de las restantes propiedades físicas mecánicas del material y sus suspensiones.
- La no utilización del cieno carbonatado con tamaño superior a 20 mesh, que pasa a denominarse rechazo, creándose grandes depósitos.

Todos estos factores provocan dificultades en el sistema de transporte por tuberías del cieno carbonatado, dado que es una hidromezcla de comportamiento complejo (fluidos no newtonianos), insuficientemente estudiados en la actualidad.

Ante todo lo planteado, se requiere de estudios que permitan determinar las propiedades y parámetros racionales de transporte del cieno carbonatado, a partir de su naturaleza reológica y de la determinación de los gradientes de presión en las tuberías; por lo que este trabajo contribuirá al funcionamiento racional de las instalaciones de bombeo con comportamiento similares.

Se presenta como **situación problemática** que el desarrollo de la ciencia y la tecnología, no ha avanzado a profundidad en el estudio y perfeccionamiento de métodos apropiados para los diferentes sistemas de transporte en fluidos complejos (no newtonianos), lo que dificulta

en gran medida su diseño, selección y evaluación a nivel industrial. A pesar de las disímiles limitaciones se busca mejorar la eficiencia de los procesos productivos y los medios de producción relacionados con el tema en cuestión.

A partir de las deficiencias expuestas se declara como **problema** a investigar:

Insuficiente conocimiento del comportamiento de las propiedades del cieno carbonatado lo que imposibilita establecer modelos adecuados para el estudio, proyección y evaluación del sistema de bombeo, transportado por tuberías

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

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

El proceso de transporte por tuberías del cieno carbonatado

Se define como **campo de acción**

El comportamiento de la pérdida de carga en el hidrotransporte por tuberías de fluidos no newtonianos.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:

El establecimiento de las propiedades físico - mecánicas, reológicas y de flujo del cieno carbonatado, conjugado con los modelos existentes de pérdida de carga y potencia hidráulica, permitirá obtener un método de cálculo adecuado del costos de bombeo del cieno carbonatado durante el proceso de transporte por tuberías.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo general** del trabajo:

Establecer las propiedades, el comportamiento de las pérdidas de carga y los costos de bombeo del cieno carbonatado durante su transporte por tuberías.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar el cieno carbonatado atendiendo a la composición química, granulometría y propiedades reológicas de dicho material.



- Realizar investigaciones experimentales del comportamiento de las pérdidas de carga del cieno carbonatado en el hidrot transporte por tubería.
- Establecer las expresiones matemáticas de pérdida de carga y potencia hidráulica que permitan el cálculo del costo de bombeo en los sistemas de hidrot transporte de cieno carbonatado a partir de sus propiedades reológicas y de flujo.

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

- Búsqueda bibliográfica para la sistematización del conocimiento sobre la temática a tratar.
- Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para determinar el modelo que caracteriza el comportamiento reológico de las pulpas estudiadas.
- Obtención experimental del comportamiento de las pérdidas de carga en el transporte del cieno carbonatado y modelación de las características del mismo.
- Cálculo de los costos de transporte del cieno carbonatado por tubería.

### **Aportes Metodológicos**

- Se establecen expresiones matemáticas para el cálculo y evaluación de la pérdida de carga y potencia hidráulica, para el cálculo, evaluación y selección de sistemas de transporte de Cienos Carbonatados; pudiendo generalizarse la aplicación de dicha metodología a otros tipos de fluidos.
- Se ilustra la necesidad de utilizar los parámetros que caracterizan el comportamiento reológico de fluidos, en el cálculo y evaluación de problemas del transporte de materiales no newtonianos por tuberías.
- Los resultados y modelos propuestos para describir el sistema, pueden ser introducidos en temas de asignaturas afines de las carreras de Mecánica e Ingeniería Química y Metalurgia.

### **Valor práctico**

- La investigación permite disminuir los costos por transportación mediante la reducción del consumo energético y el perfeccionamiento de los métodos de cálculo para el transporte de fluidos.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Introducción

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 ambientales, no menos importante que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

El análisis riguroso de estudios en este campo, permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que se manifiestan entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos relacionados con el transporte de fluidos complejos.

En tal sentido, se declara como objetivo del capítulo

- Establecer los fundamentos teóricos y el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionadas con el material, las propiedades de fluidos y su transporte por tuberías, orientado a la fundamentación de la investigación del transporte de cieno carbonatado por tuberías como un fluido no newtoniano.

### 1.2. Origen del yacimiento de 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 una compañía Norteamérica, (*Sherritt International Corporation*); la información al respecto debió atesorarse en los archivos del entonces Servicio Geológico Norteamericano, 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.

En los primeros estudios de los que hay referencia, (Campos *et al*, 2001) se 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 Instituto Cubano de Recursos Minerales (I.C.R.M.) 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 se presentó 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) y granulométricamente por las mallas 20, 48, 100, 200 mesh, (Nedved, 1966).

Se reportan en la literatura 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 (Castillo, 1988).

En los trabajos realizados por Nápoles, (1992) se evaluó la materia prima para contenido de  $\text{CaCO}_3$  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 del Centro de Proyectos del Níquel (CEPRONI) 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 *et al* (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 interperismo laterítico vinculados a la misma.

### **1.3. Trabajos relacionados a estudios reológicos en fluidos no newtonianos**

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la mecánica de los fluidos se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseuille, interesado en la circulación de la sangre. Sobresalieron también en el aspecto teórico Julios Weibach y Gottlieb Hagen y se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Ventura y Pitot entre otros (Otero, 1989; Laurencio, 2007b; Ochoa, 2011).



El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e independientemente al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se les conoce como ecuaciones de Navier-Stokes (Laurencio, 2007b; Ochoa, 2011). En Cuba el desarrollo de los estudios de fluidos no newtonianos no se promueve hasta después del triunfo de la Revolución y han devenido una de las bases principales del progreso científico-técnico en este campo de la ciencia.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática, de vital importancia, en el desarrollo de la investigación del flujo de fluidos.

En este aspecto resultan interesantes los trabajos de De la Paz (2002); Caldiño y Salgado (2004), que presentan una metodología para obtener funciones reológicas en forma simplificada, de utilidad para ajustar modelos de cálculo para fluidos con altas concentraciones. En los mismos se observó y evaluó la influencia del componente sólido en el valor de la viscosidad, aunque en ambos casos no se tuvieron en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas, como el pH y diámetro medio de las partículas, lo que limita la aplicación de la metodología.

Se señala como principal limitación de estos trabajos, no tener en cuenta el comportamiento reológico del fluido para variaciones de la temperatura; siendo esta variable de gran influencia en la estructura y propiedades de la materia, según refieren los resultados obtenidos por diferentes investigaciones (Branco y Gasparetto, 2003; Da Silva et al., 2005; Dak et al., 2007; Sánchez et al., 2008; Andrade et al., 2009; Vandresen et al., 2009; Trapeznikov, 2011).

Khatib (2006), propuso un modelo matemático que correlaciona la viscosidad de fluidos pseudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo, ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental, nombrado como constante de tiempo de deformación; este modelo se ha relacionado con la viscosidad del fluido cuando el gradiente de velocidad tiende desde cero hasta infinito.

Trabajos realizados estudian el efecto del pH, concentración en sólidos y tamaño de partícula en las curvas de flujo de suspensiones lateríticas. Se observa que las suspensiones presentan un comportamiento variable, desde plástico hasta alcanzar flujos pseudoplásticos y newtonianos

en dependencia del pH. También se ha observado un aumento en la viscosidad de las suspensiones con el aumento de la concentración en sólidos y la disminución del tamaño de partículas. Por tanto, se ha podido determinar que estos factores ejercen una gran influencia en el comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas.

Un estudio similar es el realizado por Pérez (2006), en el que tiene en cuenta la influencia de la distribución de tamaño de las partículas y la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas obteniéndose que las suspensiones de mineral lateríticos están constituidas por partículas predominantemente menores de 50  $\mu\text{m}$  y con diferentes distribuciones de tamaño. Presentan características plásticas y pueden ajustarse al modelo de Bingham, en todos los casos, debido a la presencia de partículas finas. Al aumentar la temperatura se observó que los parámetros reológicos disminuyen apreciablemente, aunque nunca llegan a desaparecer las características plásticas de estas suspensiones en el rango de temperatura estudiado.

Estudios del efecto de la concentración de sólido, el pH y la temperatura fueron realizados a las características reológicas de los desechos lixiviados (colas) del proceso industrial CARON, (Turro, 2003). Se demuestra que las curvas de flujo de las colas con concentraciones de 30 y 35 % en peso de sólido exhiben un comportamiento pseudoplástico; mientras que las de mayores concentraciones pueden ajustarse al modelo reológico de los plásticos Bingham, la temperatura tienen poco efecto a bajas concentraciones, y son más influyentes a las concentraciones más altas debido a su mayor influencia sobre la estructura que forman las partículas sólidas. Los valores máximos de viscosidad y del esfuerzo cortante inicial, a diferentes concentraciones, se obtienen a pH para los cuales se observa la mayor estructuración de las colas, en la que se logra una mayor estabilidad de las suspensiones. Estos resultados indican que las colas poseen propiedades superficiales típicas de los sistemas coloidales, debido al alto contenido de partículas finas presentes en las mismas.

Cerpa (1997), analiza la influencia que tienen las características mineralógicas y coloidesquímicas en el diferente comportamiento de sedimentación en las suspensiones lateríticas concentradas en la que realiza una detallada caracterización química y mineralógica mediante diferentes técnicas de análisis: DRX, espectroscopía Ir, FRX, análisis granulométrico, etcétera. La influencia de las características coloidales fue estudiada a través del potencial zeta. Llegando a la conclusión de que existe una relación entre las características

de sedimentación y las propiedades mineralógicas y coloidquímicas de este tipo de suspensiones.

En Sánchez (2002), se realiza un estudio numérico de mecánica de fluidos en 2 dimensiones en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald-de-Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de potencia. Los cálculos se realizan con malla variable rectangular (método de volúmenes finitos) y con malla apegada al contorno (método elementos finitos).

Similar a los trabajos antes descritos, en Díaz y Falcón (2004a), se encuentran los resultados del estudio reológico al petróleo crudo cubano y la preparación de emulsiones, empleando productos de la pirólisis como agente emulsionante (patente de Falcón *et al.*, 1995), donde se establecen consideraciones sobre el transporte de estas emulsiones por tuberías, sus ventajas y limitaciones.

En Díaz y Falcón (2004b), se exponen los resultados del estudio reológico de un petróleo crudo cubano y sus emulsiones; se brinda información de las investigaciones llevadas a cabo en este campo así como se obtienen experimentalmente las curvas de flujo en viscosímetros rotacionales para el petróleo crudo cubano y 17 emulsiones elaboradas. De forma similar Manals y Falcón (2005), analizan la influencia que presentan los productos de pirólisis y los agentes emulsionantes sobre la tensión superficial y las propiedades del petróleo crudo cubano.

Laurencio y Delgado (2008a), efectúan el estudio reológico a un petróleo crudo cubano y sus emulsiones; se determinó que tanto el petróleo como la emulsión presentaban comportamiento pseudoplástico, por lo que se propusieron los modelos para la estimación de sus parámetros reológicos. Laurencio y Delgado (2008b), incluyen la influencia de la temperatura en los modelos antes mencionados, obteniéndose un resultado de mayor aplicabilidad práctica.

En el estudio realizado de la influencia que ejerce la temperatura en los parámetros reológicos de purés de guayaba (Sánchez, 2008). Se utilizó un reómetro oscilatorio con un baño termostático acoplado. Los purés de guayaba mostraron un comportamiento de flujo no newtoniano ajustándose a la ley de potencia y presentando un comportamiento pseudoplástico y tixotrópico. Los resultados obtenidos tras el ajuste de las curvas de flujo revelaron que el

índice de consistencia disminuyó con la temperatura, aumentando el índice de comportamiento de flujo. Los datos obtenidos revelaron que la temperatura tiene un efecto muy acusado en los parámetros reológicos de los purés de guayaba.

La mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en la industrial del níquel en Moa, Cuba (Pérez, 2010), evidencian que la laterita es una mezcla de minerales de hierro, donde la goethita es la fase mineralógica principal, con maghemita, hematita, gibbsita y serpentina como secundarias. El cieno es carbonatado, en forma de calcita y aragonito; el material de yeso se identifica como bassanita y el sulfuro de Ni+Co está constituido básicamente por millerita. La laterita, el cieno y el yeso están formados fundamentalmente por partículas finas (menores de 0,045 mm), lo que explica sus comportamientos reológicos, ajustables al modelo de Bulkley – Herschel. Por el contrario, el sulfuro de Ni+Co tiene una distribución de tamaño próxima a un material monodisperso, ajustándose bien al modelo de Newton. Además establece un modelo que describe adecuadamente la distribución de tamaño acumulativa de las partículas de lateritas, del cieno carbonatado y del yeso.

El problema de los efectos viscosos de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, independientemente en 1839 por el médico francés Jean Poiseuille.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática; de vital importancia en el desarrollo de la investigación de fluidos; trabajos como (De la Paz *et al.*, 2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la fluidez cómo se deforma el cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, así como la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas. La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales del ensayo, se encuentra como deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

A partir de 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 corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como, (pH) y diámetro medio de las partículas de arena.

Suárez (1998), hace referencia a la elaboración del modelo físico – matemático del movimiento de suspensiones de serpentinita blanda por tuberías, basado en los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas, la determinación de las regularidades de la variación de los coeficientes de resistencia hidráulica en dependencia de la concentración másica en el intervalo de 40 a 80 % en régimen laminar; la determinación de las pérdidas específicas de presión para el movimiento de dichas suspensiones en régimen turbulento; la determinación de las ecuaciones para la obtención de la velocidad crítica y la velocidad límite de caída de los granos de serpentinita dura.

En el artículo, Sánchez (2002), realiza un estudio numérico de mecánica de fluidos en 2 dimensiones en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald-de-Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de momentum lineal y de continuidad. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de potencia.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de bombas centrifugas se han reportado trabajos que han colaborado en el desarrollo de esta esfera de la ciencia. Según lo planteado por Turiño (1999), no existe una teoría que permita predecir el comportamiento exacto de una bomba centrifuga cuando manipula un fluido viscoso, pues teóricamente hasta el presente ha sido imposible tener en cuenta la influencia de la viscosidad en los parámetros de trabajo de la bomba y en la forma de sus características.

El método más simple de los parámetros de funcionamiento (Carga, Flujo, Potencia y Eficiencia) y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el

empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

Trabajos realizados por Garcell (1991,1993, 1998, 2001) sobre pulpas de minerales lateríticos, limoníticos y serpentiniticos permite establecer que la pulpa concentrada utilizada industrialmente por la empresa Moa Nickel S.A “Pedro Soto Alba” contiene un elevado porcentaje 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 poco estudiados en la actualidad.

Romero (2004), establece un modelo matemático 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.

### **1.3.1. Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de las dispersiones minerales**

Cuando un sólido es dispersado en un líquido, la viscosidad de la suspensión que se forma se incrementa. La dispersión puede exhibir comportamiento newtoniano o no newtoniano, en dependencia de las interacciones físicas y químicas que tiene 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 diferentes tipos de interacciones, los cuales han sido resumidos por Cheng (1980) dentro de tres categorías diferentes:

- Interacciones hidrodinámicas entre el líquido 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 flóculos, agregados y estructuras.
- El contacto partícula – partícula, el cual es la causa de las interacciones de fricción.

Además de estas interacciones existe un número de factores que ejercen gran influencia sobre el comportamiento de las dispersiones, tales como: tamaño y distribución de tamaño de las

partículas; composición química y mineralógica del sólido; composición iónica del medio dispersante; concentración de la fase sólida; temperatura y pH.

A continuación se analizan brevemente los efectos de algunos de los factores más importantes.

#### **Efecto de la concentración de sólidos**

En general, en las suspensiones diluidas (con valores de concentración volumétrica  $\phi$ , inferior a 10 % en peso de sólidos) el comportamiento de las suspensiones es newtoniano. A medida que aumenta la concentración de sólidos, se incrementan las interacciones de las partículas, con la tendencia a formar flóculos, agregados y estructuras. Como consecuencia de esto, a concentraciones moderadas, la suspensión puede alcanzar el comportamiento Seudoplástico. A concentraciones más altas, los efectos hidrodinámicos son menos importantes y dado que las partículas se hayan más cerca una de otras, se forman estructuras tridimensionales que le comunican a la dispersión propiedades plásticas. (Cerpa *et. al* 1999).

#### **Efecto de la granulometría**

En general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas partículas que poseen propiedades magnéticas con las que ocurre lo contrario (Garcell 1993).

#### **Efectos de la temperatura**

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos, (Sánchez, 2008; Laurencio *et al* 2009):

- disminución de la viscosidad del medio dispersante;
- debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

### **1.3.2. Características generales de los sistemas particulados**

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 (Garcell 2001).

A un sistema disperso (sólido – líquido) se le denomina suspensión si el tamaño medio de las partículas sólidas es mayor de  $0,1 \mu m$ , (sistema de dispersión gruesa); y si se encuentra dentro de los límites de  $0,001$  a  $0,1 \mu m$ , se le nombra dispersión coloidal (sistema de alta dispersión).

Los sistemas particulados pueden ser clasificados de la siguiente forma:

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

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

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

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 (Garcell 2001).

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 tamaños 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 (Cerpa *et al* 1999).

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 lo 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.

### **1.3.3. Clasificación reológica de los fluidos**

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtoniano y no newtoniano (Skelland, 1970; Tejada, 1985; Perry, 1988; Días, 1989).

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 y del gradiente de velocidad.

En este tipo de fluido la viscosidad puede considerarse constante en el tiempo y sólo depende de la temperatura.

Cumplen con la ley de Newton de la viscosidad, por lo tanto, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es lineal.

Un buen número de fluidos comunes se comportan como fluidos newtonianos bajo condiciones normales de presión y temperatura: el aire, el agua, la gasolina, el vino y algunos aceites minerales.

Los *fluidos no newtonianos* presentan como características fundamentales el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y por lo tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones de forma constantes.

Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica, no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano.

Aunque el concepto de viscosidad se usa habitualmente para caracterizar un material, puede resultar inadecuado para describir el comportamiento mecánico de algunas sustancias, en concreto, los fluidos no newtonianos. Estos fluidos se pueden caracterizar mejor mediante otras propiedades reológica, propiedades que tienen que ver con la relación entre el esfuerzo y

los tensores de tensiones bajo diferentes condiciones de flujo, tales como condiciones de esfuerzo cortante oscilatorio.

#### 1.3.4. Modelos reológicos

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas (modelos reológicos) para expresar la relación que existe en estado estacionario entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad. Todas estas ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos, cuyo valor numérico puede determinarse a partir de los datos de la curva de flujo a temperatura y presión constante. Los modelos más difundidos de acuerdo a lo reportado por (Skelland, 1970; Tejeda, 1985 y Garcell; 1988), son los siguientes:

a) Modelo de Ostwald de Waele:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (1.1)$$

$\tau$  – Esfuerzo de corte

$K$  – Índice de consistencia

$\dot{\gamma}$  – Gradiente de velocidad

$n$  – Índice de flujo

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también como Ley de Potencia. Se utiliza mucho para describir el comportamiento reológico de fluidos pseudoplásticos y dilatantes. El parámetro  $n$  es el índice de flujo, y es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para  $n < 1$ , el fluido es pseudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante. Para  $n = 1$ , se transforma en la ley de Newton, siendo  $K = \mu$  (viscosidad). 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 ( $\mu_a$ ), la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1.2)$$

$\mu_a$  – Viscosidad aparente

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (1.1) se obtiene:

$$\mu_a = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1.3)$$

b) Modelo plástico Bingham:



$$\tau = \tau_o + \mu_p(\gamma) \tag{1.4}$$

$\tau_o$  – Esfuerzo de corte inicial

$\mu_p$  – Viscosidad plastica

Este modelo se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos ideales, los cuales también se conocen como plásticos de Bingham. Para  $\tau_o = 0$  (la ecuación 1.4) se transforma en la ley de Newton, siendo  $\mu_p = \mu$ .

La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene sustituyendo la ecuación 1.4 en 1.2.

$$\mu_a = \frac{\tau_o}{\gamma} + \mu_p \tag{1.5}$$

c) Modelo de Bulkley – Herschel.

$$\tau = \tau_o + K(\gamma)^n \tag{1.6}$$

Los parámetros  $K$ ,  $n$  y  $\tau_o$  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 1.6 se transforma en el modelo de Bingham, para  $\tau_o = 0$  en el modelo de Ostwald de Waele, y para  $\tau_o = 0$  y  $n = 1$  se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan (las ecuaciones 1.6 y 1.2), se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\tau = \frac{\tau_o}{\gamma} + K(\gamma)^{n-1} \tag{1.7}$$

Los tres modelos analizados son los más difundidos en la literatura especializada y los que más se han utilizado en el diseño de sistemas de flujos. No obstante, existen otros modelos que también pueden describir el comportamiento reológico de los materiales no newtonianos con mayor o menor precisión en dependencia de las características de esos materiales.

#### 1.4. Pérdida de presión en los sistemas de transportes de hidromezclas

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Ibarz *et al.*, 2001; Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio

de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971; Foust *et al.*, 1980; Macedo *et al.*, 2001). La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe *et al.*, 1986); (Ibarz *et al.*, 2001); (Vélez, 2003); (Perona, 2003); (Sablani *et al.*, 2003).

En una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar y viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes, y/o entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme cuando se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas o láminas imaginarias en movimiento (Welty *et al.*, 1976); (Bandala, 2001).

Si el flujo en la tubería es turbulento, la variación de la velocidad a través del tubo no queda determinada únicamente por la viscosidad, sino que depende de las características que tenga la turbulencia, de las propiedades reológicas y viscoelásticas de los fluidos no newtonianos. La magnitud del esfuerzo cortante viscoso aumenta debido a los remolinos y vórtices que acompañan al flujo, además con paredes ásperas o rugosas, la turbulencia se incrementa aún más (Welty *et al.*, 1976).

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama *et al.* (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee *et al.* (1994), determina de forma experimental la pérdida de presión en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo pseudoplástico generalizado y los diferentes grados de abertura.

Izquierdo (1989), en su trabajo sobre la determinación de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de mineral laterítico aplicable a las condiciones del proceso productivo de la empresa Moa Níquel S.A. “Pedro Soto Alba” determinó las propiedades físico – mecánicas de las hidromezclas, formuló el modelo físico – matemático del flujo de las pulpas lateríticas; comprobó que durante el flujo dependiendo de la velocidad de las pulpas y de la concentración del sólido, se presentan los regímenes estructural, transitorio y turbulento, obtuvo las dependencias para determinar el coeficiente de resistencia hidráulica para el movimiento del régimen estructural y las pérdidas hidráulicas durante el movimiento de la hidromezcla en régimen turbulento.

Liu *et al.* (1998), realizaron el análisis teórico y la modelación del transporte de fluidos no newtonianos del tipo Herschel - Bulkley, tanto en conductos como a través de medios porosos, involucrando tres factores de forma y la viscosidad como necesarios para evaluar las caídas de presión durante el flujo. Adhikari *et al.* (2000), incorporaron el concepto de las redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a 5,4 % con respecto a los valores experimentales. Los coeficientes de fricción para el manejo de fluidos adelgazantes en diferentes accesorios de 25 mm, fueron medidos por Martínez *et al.* (2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Con el objetivo de determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido, Izquierdo *et al.* (2001), modeló el hidrotransporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y las propiedades reológicas de la hidromezcla. Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento y el número generalizado de Reynolds.



Turro (2002), en su tesis doctoral estudia el hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, planteando a partir del sistema de correlaciones derivado del modelo físico propuesto, su novedad para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte.

Ávila *et al.* (2007), plantea modelos matemáticos para el transporte hidráulico de café a través de tubería PVC de 75 mm, que permiten establecer el comportamiento del fluido en cuanto a la pérdida de presión a lo largo de tuberías verticales y horizontales, lo mismo que codos a 90°, dispuestos en diferentes posiciones, para rangos de velocidad de transporte entre 1,0 y 2,5 m/s y de concentración de sólidos en la mezcla agua-café entre 10 y 40 %. Se ha encontrado una nueva ecuación con relación a la pérdida de presión que incluye el efecto de cambios en la concentración de sólidos en la mezcla. Esta ecuación permite la predicción de los gradientes de pérdida de carga para un rango de velocidades y concentración en transporte de mezcla por tubería PVC de 75 mm.

Pedroso *et al.* (2000), Tomándose como base para este trabajo el modelo de Otswald de Wele; se obtuvo la expresión para el cálculo de la velocidad media de transporte de un fluido y los gradientes de velocidad a que son transportadas las mieles y meladuras en un conducto, permitiendo obtener el perfil universal de distribución de la velocidad a través de la sección de un conducto de sección circular en un fluido, independiente del valor del índice de flujo. Esto da la posibilidad de visualizar los diferentes tipos de perfiles de velocidad en el flujo laminar. Khatib, (2006), propone un modelo matemático que correlaciona la viscosidad de fluidos pseudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental nombrado como, Constante de tiempo de deformación, se ha relacionado este modelo con la viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a infinito y la viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a cero.

Haoulo *et al.* (2005) evalúan el efecto de la densidad y de la viscosidad dinámica de la mezcla en la determinación del gradiente de presión longitudinal de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales considerando un fluido pseudo homogéneo. Se evalúan 18 ecuaciones de viscosidad de mezcla y cuatro ecuaciones de densidad de mezcla. La combinación de estas ecuaciones de propiedades de mezcla generan 72 modelos, cuya única diferencia es la forma de calcular las propiedades de mezcla. La evaluación del desempeño de los diferentes modelos para determinar el gradiente de presión, se realiza comparando los resultados obtenido por

cada modelo con 93 datos experimentales que incluyen los patrones de flujo intermitente, anular, burbuja dispersa y estratificado ondulado.

Díaz y Hechavarría, (1999), presentan una metodología para el cálculo del diámetro óptimo en régimen turbulento para cualquier tipo de fluido no newtoniano. Plantean que los costos debidos a tuberías y accesorios pueden representar una parte importante de la inversión total de una planta química. En cualquier estado de las condiciones de flujo, un incremento del diámetro de la tubería para incrementar los costos fijos para el sistema de tuberías, pero disminuye los costos de bombeo, lo que implica la existencia de un costo óptimo. El valor del diámetro puede determinarse combinando los principios de la dinámica de fluidos con consideraciones acerca del costo. El valor del diámetro óptimo está determinado en el punto para el cual la suma de los costos de bombeo y los costos fijos del sistema de tubería es un mínimo.

Resultados reportados por García *et al.* (2003), muestran diferencias significativas en la predicción del gradiente de presión entre modelos homogéneos cuya única diferencia es la forma de evaluar la viscosidad de mezcla. Haoulo y García (2004), observaron un marcado efecto de la densidad de mezcla en el gradiente de presión debido a los cambios de energía cinética y adicionalmente evaluaron el efecto de la viscosidad del líquido en el gradiente de presión total. Sin embargo, no evaluaron el efecto de las propiedades de mezcla en el gradiente de presión total.

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).

### **1.5. Trabajos relacionados con los sistemas de bombeos**

Santos y Martín (1999), a partir de un análisis estadístico de la forma de la característica de trabajo de un equipo de bombeo de tipo centrífugo, obtiene modelos que recalculan los coeficientes, con la velocidad específica con un nivel de confianza de un 95 %.

Para fluidos no newtonianos la literatura científico-técnica no reporta coeficientes de corrección, por lo que se ha generalizado erróneamente la aplicación del símil de viscosidad

de estos fluidos con los newtonianos según lo refiere Turiño (1999), lo cual ocasiona errores de pronóstico de la curva de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Roque (1989), desarrollo investigaciones experimentales en relación con el bombeo de soluciones azucaradas de naturaleza no newtonianas, en equipos centrífugos y propuso coeficientes de corrección que permiten pronosticar la curva característica de estos equipos de bombeo en función de las propiedades reológicas de los fluidos ensayados.

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); 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.

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 obtienen 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.

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.

El análisis de las investigaciones realizadas por diferentes autores muestran que las mismas están dedicadas fundamentalmente a:

- Estudio de la estructura dinámica de diferentes flujos de suspensiones y de las peculiaridades de los regímenes de movimiento del flujo portador de partículas sólidas. Sobre esta base se construye el modelo físico y se deduce la ecuación de equilibrio dinámico y la obtención de la dependencia de cálculo a partir de la utilización de datos experimentales.
- Estudio de las regularidades del movimiento de los flujos con partículas en suspensión, la influencia de partículas sólidas sobre su estructura cinemática y establecer el enlace de las características locales e integrales.
- Determinar la magnitud de la energía que el líquido le trasmite a las partículas sólidas de diferentes categorías. Este método se fundamenta sobre el principio de considerar las fuerzas de interacción del líquido y las partículas sólidas suspendidas en el.

De lo explicado anteriormente se observa, que la solución teórica de los principales problemas del hidrot transporte es posible obtenerla solo de las ecuaciones de la hidrodinámica. De igual forma, en relación con la complejidad de obtención de hidromezclas, se puede utilizar la teoría semiempírica, la que se fundamenta sobre diferentes representaciones del movimiento del flujo de las hidromezclas y de la variación de la influencia de las partículas en el perfil de distribución de velocidades. Por ello, el segundo aspecto encuentra su aplicación práctica y ha obtenido desarrollo en trabajos realizados por la mayoría de los investigadores.

Las metodologías obtenidas como resultado de estas investigaciones para la evaluación y proyección de sistemas de hidrot transporte 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.

### **1.5.1. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías**

El transporte por tuberías, consiste en el traslado de un fluido, gas o partículas del mineral suspensas en un flujo de agua a través de una tubería; este tiene una gran aplicación en la industria, en el laboreo de minas, además en la industria metalúrgica tiene efectividad para la

transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos (Turro, 2002).

En la actualidad en las industrias cubanas se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge este tipo de transporte debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte (Turro, 2002).

La efectividad de este tipo de transporte crece principalmente debido a la imposibilidad de cambio por otro tipo, la posibilidad de simplificar la longitud de la vía de transporte por tuberías en comparación con el ferroviario y el automotor, debido, al relieve del lugar ante gastos no elevados en la preparación y homogenización de los materiales con una productividad anual de la instalación superior.

El transporte por tuberías de materiales líquidos, sólidos y gases en comparación con el transporte ferroviario, los transportadores y la vía automotriz está determinado por las significativas ventajas que este presenta sobre los demás tipos de transporte (Izquierdo *et. al* 2001; Martínez, 2009)

- Garantiza un proceso tecnológico continuo
- Ausencia de formación de polvo.
- Facilidad en la variación a la dirección y superación de obstáculos.
- Ausencia de vías de transporte especiales.
- Eleva la productividad del trabajo.
- No existen pérdidas del material durante su transportación.
- Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.
- El material puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.

La desventaja principal de este tipo de transporte pertenece a la necesidad de tener suficiente reserva de agua y la dependencia de la capacidad de tráfico de la tubería, gastos de energía, desgaste de la tubería debido a la granulometría y propiedades del material a transportar, sin embargo estas desventajas son compensadas con las ventajas y en el caso de transportar petróleos y emulsiones la mayoría de estas desventajas no interviene en el proceso. Martínez, (2009).

Las investigaciones dentro del transporte hidráulico, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos se han desarrollados en tres direcciones fundamentales:



- Trabajos experimentales con la posterior generalización de resultados.
- Trabajos teóricos. En ellos se trata de hallar la expresión matemática y la aplicación física de los procesos que tienen lugar cuando se trasladan partículas sólidas suspendas en fluidos líquidos.
- Trabajos que buscan el enlace de la teoría con los trabajos prácticos.

Las mediciones de los instrumentos instalados en el sistema de transporte hidráulico en el Instituto Superior Minero Metalúrgico se visualizan y registran en un SCADA, el cual tiene las siguientes ventajas:

- Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- Generación de históricos de señal, lo que permite identificar de manera inmediata cualquier anomalía.
- Ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o modificar las tareas asociadas al autómata, bajo ciertas condiciones.
- Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

#### **1.6. Conclusiones del capítulo**

- El análisis de los trabajos precedentes reportan algunas de las características del cieno carbonatado aunque estas son insuficientemente estudiadas, al mismo tiempo los datos que se obtienen no han sido actualizados.
- Es insuficiente la información acerca del flujo de cieno carbonatado a través de tuberías, no se ha tenido en cuenta las características reológicas y resulta imposible ajustar las ecuaciones de los parámetros de hidrot transporte, de ahí la necesidad del estudio experimental de este sistema y las investigaciones realizadas sobre el hidrot transporte del mineral.
- 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.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

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

Establecer propiedades del cieno carbonatado y conocimientos teóricos acerca de su comportamiento y propiedades de transporte, lo que contribuya a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación y diseño de los sistemas de transporte por tuberías de este fluido.

### 2.2. Origen de las muestras del 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 (preparación de pulpa).

El área de la concesión minera de la empresa Moa Níquel S.A. comandante Pedro Soto Alba, abarca una extensión de 8,05 km<sup>2</sup>, 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. (Menéndez, 2001)

El material minado es sometido a un proceso de lavado en una serie de tamices y agua a presión, solo siendo utilizado en el proceso las partículas finas (menores de 0,83 mm), estas son enviadas hasta la planta de cienos carbonatados donde son procesadas las pulpas, donde luego de ser beneficiado es transportado por tuberías hasta la planta de neutralización donde es utilizado para obtener el pH óptimo de los licores lixiviados. En la tabla 2.1. se muestran las características de diseño de las pulpas de cieno carbonatado utilizado en el proceso.

**Tabla 2.1.** Características de diseño de las pulpas de cieno carbonatado.

Parámetros	Unidad	Diseño
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1320 a 1340
Porcentaje de sólido	%	40 a 45
Porcentaje de arena	%	≤16
Cloruro	ppm	500 a 600
Carbonato de calcio	%	≥87
Composición granulométrica(-325 mesh)	%	≤76
pH	---	8 a 9

**Fuente:** Manual de operaciones planta de cienos carbonatados (2008).

### 2.3. Toma y preparación de las muestras

Para los estudios experimentales se tomaron muestras representativas de pulpas correspondientes al proceso en la planta cienos carbonatados que es transportado por tuberías, para ello se realizaron varias tomas en la alimentación del tanque de transferencia, hasta conformar compósitos representativo de la pulpa de cieno.

El análisis de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de las pulpas de cieno, se tomaron muestras en el depósito del material de cieno carbonatado denominado de rechazo (material de fracción de tamaño mayor de 0,83 mm), 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 almacenaje de dicho material y la dimensión de la superficie sujeta al muestreo. Esta superficie posee un área de alrededor de 4 800 m<sup>2</sup> con una reserva de aproximadamente seis millones de toneladas. El volumen tomado en cada punto es de cerca de 5 kg hasta obtener un volumen lo suficientemente representativo de toda el área del depósito y equivalentes a unas dos toneladas. El material sólido proveniente de los depósitos luego de ser homogenizado se somete a un proceso de secado, molienda y tamizado en la nave de beneficio de minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

### 2.4. Técnicas experimentales utilizadas

Se utilizaron cuatro técnicas experimentales como son, la caracterización granulométrica del material, análisis de las propiedades químicas, análisis del comportamiento reológico y análisis de la sedimentación en las pulpas de cieno carbonatados, aplicando diferentes

métodos con modernas tecnologías en el laboratorio de la empresa Moa Nickel S.A. “Pedro Soto Alba”, siendo de gran importancia el resultado de estos experimentos para la investigación.

#### **2.4.1. Caracterización granulométrica del material**

La caracterización granulométrica inicial del material se realizó mediante el análisis de tamices, donde las muestras de rechazo de cienos carbonatados fueron caracterizadas inicialmente desde el punto de vista granulométrico. Después de haber determinado el juego de tamices mediante la serie de Taylor  $\sqrt{2}$  (Mitrofanov, 1984; Laborde 2008; Coello 2001), los tamices escogidos fueron los siguientes: (25; 18; 10; 6,3; 4,75; 3,5; 2; 1,6; 1,18; 0,83) mm. La composición granulométrica del material, se realizó mediante el tamizado por vía seca de las fracciones seleccionadas: (+25; -25 +18; -18 +10; -10 +6,3; -6,3 +4,75; -4,75 +3,5; -3,5 +2; -2+1,6; -1,6 +1,18; -1,18 +0,83; -0,83).

El material obtenido por cada clase de tamaño es pesado de forma independiente para determinar los diferentes índices tecnológicos, luego se determinó un promedio del peso de las distintas clases de tamaño y se calculó el por ciento de salida sumaria de la cantidad de material cernido y retenido según los diferentes tipos de granulometrías, para determinar las características de tamaño parcial y acumulativas del material inicial.

Para el análisis granulométrico de las suspensiones de las pulpas de cieno carbonatado se usa un analizador de partículas modelo HORIBA LA – 910 con las siguientes condiciones:

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

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

##### **2.4.1.1. Proceso de reducción de tamaño para la molienda**

Después de realizar una clasificación del tamaño de la partícula inicial del material sólido de los depósitos, se seleccionaron las distintas clases de tamaño mayores de 6,3 mm y estas serán sometidas a un proceso de trituración primaria. Para esta operación se empleó una trituradora de quijada. Al producto triturado se le determinó la composición granulométrica

y para la clasificación del material triturado se utilizó el siguiente juego de tamices seleccionado por la serie de Taylor  $\sqrt{2}$  (6,3; 4,75; 3,5; 2; 1,6; 1,18; 0,83 mm).

Este material triturado al alcanzar la clase tamaño -6,3 mm es nuevamente homogenizado junto al resto del material de este tamaño, permitiendo una preparación previa de la muestra para el proceso de molienda.

Para la molienda se utilizó un molino cilíndrico de bolas de 650 x 300. Para realizar este proceso se establece un tiempo de molienda de 25 a 30 minutos en que las partículas de clase de tamaño 0,83 mm alcanzan más del 80 %.

#### 2.4.2. Análisis de las propiedades químicas

Los resultados de las principales propiedades químicas del cieno carbonatado se obtuvieron en el laboratorio químico de la empresa Moa Nickel S.A “Pedro Soto Alba”. Para la determinación del comportamiento de los diferentes elementos químicos que componen las muestras estudiadas se utiliza un espectrómetro de emisión óptica (ICP).

#### 2.4.3. Análisis del comportamiento reológico

Los resultados del estudio reológico del cieno carbonatado, se obtuvieron en los laboratorios del departamento de procesos tecnológicos de la empresa Moa Nickel S.A. “Pedro Soto Alba”, donde se determinó la relación del esfuerzo de corte ( $\tau$ ) en función del gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ), mediante el uso del viscosímetro rotacional HAAKE VT550 (figura 2.1). El gradiente de velocidad se experimentó desde 9,031 a 306,9 1/s, para los niveles de porcentaje de sólidos de 30; 35; 40; 45; 50 %, en correspondencia con porcentajes de sólidos y condiciones más frecuentes de su transporte por tuberías, según el procedimiento ASTM D 445-96.



Figura 2.1. Viscosímetro rotacional HAAKE VT550.

El sensor utilizado es el MV2 y cuenta con un procedimiento interno que contempla los factores de corrección para determinar los valores de esfuerzo de corte y de gradiente de velocidad.

Para la experimentación se introduce en el interior de la copa la muestra del cieno, la que debe ser representativa de lo que se quiere analizar, así como garantizar un volumen suficiente para cubrir totalmente el sensor, el cual no excede los 80 ml.

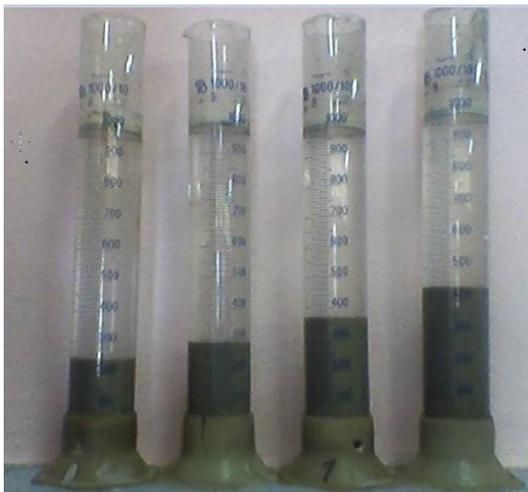
*Número de corridas experimentales.*

Para los niveles de porcentaje de sólidos programados, el número de corridas experimentales se determina en correspondencia con lo planteado en la literatura (Suárez, 1998; Turro, 2002; Laurencio y Delgado, 2008b) y los valores prefijados por el viscosímetro, la toma de datos se realiza mediante el uso del software HAAKERheoWinViscotester Version 3.22, tomándose cinco niveles de porcentos de sólidos, para tres réplicas de cada experimento.

## **2.5. Análisis de la sedimentación en las pulpas de cieno carbonatados**

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

Para la obtención de las curvas de sedimentación se toma cierta cantidad representativa de material de cieno carbonatado con una granulometría inferior a los 0,83 mm con lo que se preparan muestras de pulpas a diferentes porcentos de sólidos y densidades. Además se utilizan probetas de 1000 ml donde se vierten las pulpas homogenizadas de cieno carbonatado, como muestra la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Probetas graduadas para el análisis de sedimentación de las pulpas de cieno

carbonatado.

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, éstas alcanzarán 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.

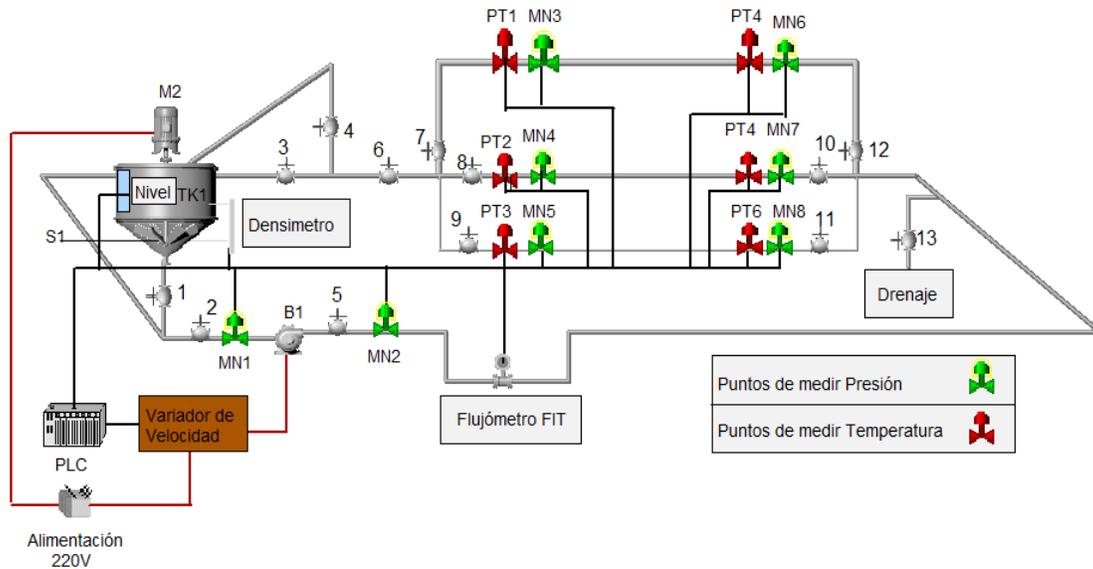
## **2.6. Procedimiento experimental para la obtención de los principales parámetros de transporte del Cieno Carbonatado y los modelos teóricos que fundamentan dicho transporte**

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó en la estación experimental de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico (Anexo 1).

La instalación consta de un tanque (TK1), para almacenar la pulpa a diferentes concentraciones de sólidos, un sedimentador acoplado a su árbol (S1) para homogenizar la mezcla, dos motores de inducción (M1) y (M2) una bomba centrífuga (B1) que forman el sistema de bombeo del fluido por toda la tubería pasando por un Flujoímetro (FIT), ocho puntos de toma de presión desde (MN1) hasta (MN8) y seis puntos de toma de temperatura desde (PT1) hasta (PT6), tres tramos de tubería para determinar las pérdidas hidráulicas, los cuales poseen un diámetro de 75 mm, 100 mm y 150 mm. El drenaje del sistema se realiza por la válvula (13).

Los puntos MN3, MN4, MN5, MN6, MN7 y MN8 (para medir la presión) se encuentran alejados de los extremos de la tubería a una distancia de 4 m, para evitar las influencias de las perturbaciones más cercanas (codos, etc.), mientras MN1 y MN2 son para la medición de presión de succión e impulsión respectivamente. La bomba B1 tiene una capacidad de 160 m<sup>3</sup>/h. Durante la toma de datos experimentales, la instalación opera en circuito cerrado (succión, impulsión y tanque). La regulación del caudal de la bomba B1 se realiza con ayuda de un variador de velocidad. El llenado del sistema se efectúa directamente en el tanque TK1. La medición del caudal del fluido se realiza con el flujoímetro

electromagnético FIT. El esquema de la instalación se muestra en la figura (2.3). la características de la instrumentación instalada en sistema se pueden ver en el anexo 2.



**Figura 2.3.** Esquema de la instalación y su sistema de mediciones.

Las pérdidas de presión en la zona a investigar se miden con transmisores de 4 a 20 mA, los cuales captan la presión, la transforman en energía eléctrica, y envían la señal para el autómatá programable (PLC), el cual registra la información de los valores de presión medido en cada punto (ver anexo 3).

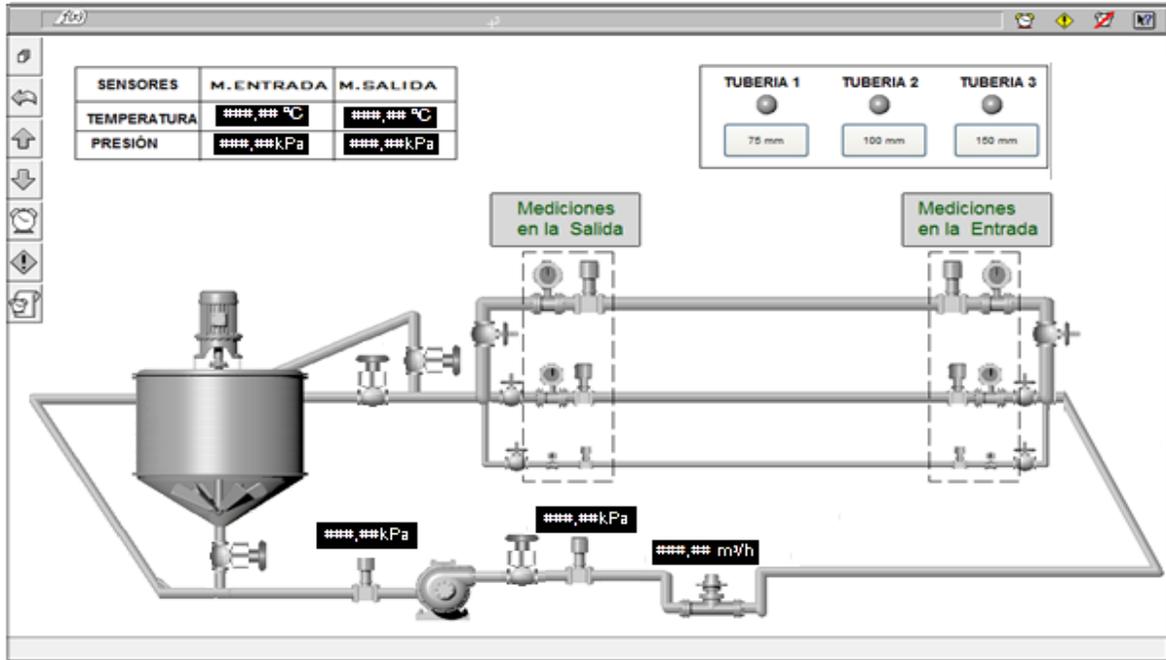
Para esta prueba se realizaron una serie de mediciones de parámetros como caída de presión (Pa) en una sección recta de tubería, velocidad (m/s), caudal ( $m^3/s$ ), con el objetivo de conocer la relación entre los gradientes de presión ( $\Delta P/L$ ), requeridos para lograr flujos volumétricos (Q), en un diámetros (D), de tubo determinado (Garcell, 2001).

Las expresiones que relacionan las variables señaladas, para los modelos reológicos más difundidos en la literatura, así como sus limitaciones que puedan tener implicación en los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes. De ahí, en los cálculos de ingeniería, se prefiera hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción con el número de Reynolds y con otros números adimensionales, tanto en régimen laminar como en turbulento.

La investigación se realizó para un porcentaje de sólido de pulpa de un 25 %, en un diámetro de tuberías 100 mm. La variación de la velocidad del fluido se realizó mediante el método

de regulación de frecuencia (variador de velocidad).

La instalación consta de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos CitectSCADA (figura 2.4).



**Figura 2.4.** Esquema del sistema CitectSCADA para la estación experimental de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

### 2.6.1. Metodología para la toma de datos experimentales

Mediante la obtención de los gradientes de presión se elaboró el gráfico de la pendiente hidráulica ( $i = f(v)$ ) para el flujo de cieno carbonatado durante el transporte por tuberías; la misma se determinó por la expresión.

$$\frac{\Delta p}{L} = i \quad (2.1)$$

El factor de fricción quedará determinado por la relación:

$$\lambda = i \cdot \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot v^2} \quad (2.2)$$

Donde:

$i$  - pendiente hidráulico (Pa/m)

$\Delta p$  - pérdida de presión (Pa/m)

$\rho$  - densidad ( $\text{kg/m}^3$ )

$\lambda$  - coeficiente de fricción (adimensional)

$v$  - velocidad (m/s)

Con la obtención del gráfico  $\lambda = f(\text{Re})$  se estableció la correlación entre el factor de fricción con el aumento del número de Reynolds. El número de Reynolds se determinó en dependencia del modelo reológico del fluido estudiado.

Número de corridas experimentales.

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial. En correspondencia con los niveles determinados de cada variable se establecen como mínimo ocho niveles del flujo volumétrico en la tubería de diámetro 100 mm, para tres réplicas de los experimentos.

### **2.7. Procedimientos metodológicos sobre la determinación del gradiente de presión en conductos circulares**

En los cálculos de ingeniería, se prefiere hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción de Fanning o el factor de fricción de Darcy con el número de Reynolds y con otros números adimensionales, tanto en régimen laminar como en turbulento, los cuales son correlacionados de forma experimental.

Las expresiones más difundidas en la literatura para el régimen laminar, las cuales relacionan los parámetros antes señalados, presentan ciertas limitaciones que se manifiestan en desviaciones de su predicción en los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes (Laurencio *et al.*, 2011). Es por ello que se hace evidente la necesidad de determinar expresiones y métodos apropiados para la evaluación del transporte de hidromezclas, como es el caso específico de la pulpa que constituye el cieno carbonatado. En general, las pérdidas de presión en las tuberías deben determinarse mediante experimentación. Esto implica que parte de la energía disponible se convierte en energía intrínseca durante un proceso irreversible. Las pérdidas ocurren cuando parte de la energía disponible durante el flujo de un fluido se convierte en energía térmica a través de esfuerzo cortante viscoso y turbulencia (Streeter *et al.*, 2000; Moring, 2006).

Para la obtención del modelo teórico-experimental en el transporte de pulpas y suspensiones por tuberías como es el caso del cieno carbonatado, se tienen en cuenta los estudios realizados por (Skelland, 1970; Garcell, 2000 y Darby, 2001).

El componente  $[(dp/dx)]$  es el gradiente de presión en la tubería, que puede estimarse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, ajustada mediante el factor de fricción adicional ( $\lambda$ ).

$$\left(\frac{dp}{dx}\right) = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.3)$$

Donde:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right) = \text{gradiente de presión; (Pa)}$$

Donde:  $\lambda$ - coeficiente de fricción por rozamiento adicional del fluido; (adimensional).

En este caso  $\lambda$  representará los efectos adicionales del gradiente de presión en régimen laminar y turbulento, manifestados con mayor incidencia en tuberías de gran diámetro y se determina por experimentación. El coeficiente de fricción por rozamiento suele expresarse en términos de un factor de fricción de Fanning ( $f$ ).

$$\lambda = 4 \cdot f \quad (2.4)$$

En trabajos como Skelland (1976); Garcell (2001); Darby (2001), dicho factor de fricción en tubos circulares depende del régimen de flujo y el modelo reológico que describe la curva de flujo y es función, a su vez, de magnitudes adimensionales, tales como: los números de Reynolds y Hedstrom.

El número de Re y He se definen según la naturaleza reológica del fluido, para los plásticos ideal ó Bingham (Martínez, 2009; 2014).

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu_a} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu_a} \quad (2.5)$$

$$He = \frac{D^2 \cdot \tau_0 \cdot \rho}{\mu_p^2} \quad (2.6)$$

Donde:  $\mu_a$  y  $\mu_p$  - son la viscosidad aparente y viscosidad plástica respectivamente

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + \mu_p \quad (2.7)$$

El factor de fricción de Fanning en el caso específico de los fluidos plásticos Bingham en régimen laminar, está dado por la expresión siguiente:

$$f_L = \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} - \frac{1}{3} \cdot \frac{He^4}{f_L^3 \cdot \text{Re}^7} \right] \quad (2.8)$$

Como la ecuación 2.14 es implícita en  $f_L$ , el último término dentro de los corchetes por lo general es pequeño comparativamente con los restantes términos, por lo que este, en un inicio, puede ser despreciado y hallar un valor inicial de  $f_L$  que permita mediante una interacción obtener el valor que converge rápidamente.

En el caso del régimen turbulento, el factor de fricción de Fanning en plásticos Bingham, está dado según Darby (2001) por la expresión 2.10:

$$f = (f_L^\beta + f_T^\beta)^{1/\beta} \quad (2.9)$$

Donde:

$$f_T = \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \quad (2.10)$$

$$C = -1,378 \cdot \left[ 1 + 0,146 \cdot e^{-2,9 \cdot 10^{-5} \cdot He} \right] \quad (2.11)$$

$$\beta = 1,7 + \frac{40000}{\text{Re}} \quad (2.12)$$

Para el factor de fricción en régimen laminar se usa la ecuación 2.8. Sustituyendo las ecuaciones 2.8 y 2.10 en la ecuación 2.9 se obtiene el factor de fricción total, en función de los números adimensionales de Reynolds y Hedstrom quedando expresada de siguiente forma:

$$f = \left( \left( \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} \right] \right)^\beta + \left( \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \right)^\beta \right)^{1/\beta} \quad (2.13)$$

Al sustituir la ecuación 2.13 en la 2.3 y expresándola en función del flujo volumétrico (Q), se obtiene la ecuación 2.14, la cual muestra la expresión del gradiente de presión para el transporte de cieno carbonatado por tuberías. El modelo cumple con el comportamiento de un fluido plástico Bingham, lo que queda explícito como:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right) = \frac{32 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \left[ \left( \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} \right] \right)^\beta + \left( \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \right)^\beta \right]^{1/\beta} \quad (2.14)$$

Al expresar la ecuación 2.14, en diferencia de presión, la ecuación queda como:

$$\Delta p = \left[ \frac{32 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \left[ \left( \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} \right] \right)^\beta + \left( \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \right)^\beta \right]^{1/\beta} \right] \quad (2.15)$$

El modelo general obtenido (ecuación 2.15), principal aporte de este trabajo, una vez identificado y validado, tienen aplicación práctica en la obtención de las caídas de presión en tuberías que transportan fluidos con comportamiento plástico Bingham. Al calcular los sistemas de transporte con el referido modelo se minimizan los errores de escalado, pues el mismo tiene en cuenta los efectos reales de flujo en las tuberías.

## 2.8. Expresiones para el cálculo de potencia hidráulica de transporte

Para un sistema de transporte de cieno carbonatado, es importante considerar los porcentajes de sólidos y presión de operación, la configuración del sistema de impulsión, la longitud y diámetro de la tubería, relacionados estos factores con la velocidad del fluido y sus propiedades físicas y reológicas.

Para cualquier fluido, la potencia hidráulica necesaria para su transporte por una tubería será:

$$N_h = Q \cdot \Delta p \quad (2.16)$$

Donde:

$N_h$  – potencia hidráulica; (kW)

$Q$  – flujo; ( $m^3/h$ )

La potencia hidráulica, para el transporte de un fluido plástico Bingham (cieno carbonatado), está dada por la combinación de la ecuación 2.15 y la 2.16, donde se obtiene que:

$$N_h = \left[ \frac{32 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} \left[ \left( \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} \right] \right)^\beta + \left( \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \right)^\beta \right]^{1/\beta} \right] \quad (2.17)$$

Mediante la ecuación 2.17, obtenida en este trabajo, se determina la potencia que se necesita para transportar un fluido del tipo plástico Bingham, como es el caso del cieno carbonatado.

## 2.9. Expresiones para la determinación de los costos

El análisis de los costos de operación del sistema de transporte bajo los factores antes mencionados (epígrafe 2.8.), conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación, ya sea, la velocidad racional, el diámetro económico de la tubería o el porcentaje de sólido racional de transporte, para el caso del trasiego de hidromezclas bifásicas como es el caso del cieno carbonatado.

Son característicos en la formulación del problema de racionalización del transporte de fluidos, el costo atribuible a las tuberías (costos fijos) y el costo energético en cuanto a costos de explotación (costos variables) (Aguirre et al., 1996; Martínez et al., 2007; Hechavarría, 2009). El costo de bombeo y el costo del agua en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante las siguientes ecuaciones (Laurencio 2010):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3} \quad (2.18)$$

Donde:  $C_{bom}$  - costo de bombeo de la instalación; (CUC/h).  $N_h$  - potencia hidráulica; (W).  
 $t_{el}$  - tarifa eléctrica; (CUC/ kW·h).  $t_t$  - tiempo de trabajo del equipo; (h/año).  $\eta_b$  - rendimiento de la bomba; (adimensional).  $\eta_m$  - rendimiento del motor eléctrico; (adimensional).

$$C_{agua} = Q_{agua} \cdot t_{agua} \cdot t_{trab} \cdot 3600 \quad (2.19)$$

Donde:  $C_{agua}$  - costo del agua, (CUC/h).  $t_{agua}$  - tarifa del agua, (CUC/h).  $t_{trab}$  - tiempo de trabajo, (h).

La ecuación general del costo total de transporte del combustible, ajustada según los parámetros característicos obtenidos del cieno carbonatado, para la cual se buscan los valores mínimos, queda expresada de la siguiente manera:

$$C_{total} = C_{bom} + C_{agua} \quad (2.20)$$

### 2.9.1. Costo de consumo energético para transportar un m<sup>3</sup> de cieno carbonatado

Se define como costo de transporte, el costo en el que se incurre al transportar un metro

cúbico de fluido, una distancia determinada en un tiempo de trabajo. El mismo se expresa por la siguiente ecuación.

$$C_{trans} = \left( \frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \quad (2.22)$$

Donde:  $C_{trans}$  - Costo de transportación, (CUC/m<sup>3</sup>m).  $G_b$  - Gasto de transportación de una bomba, (CUC/año).  $Q$  - Caudal del fluido transportado, (m<sup>3</sup>/año).  $L$  - Longitud de la línea, (m).

Gastos de transportación de una bomba

$$G_b = V + F \quad (2.23)$$

Donde:  $V$  - Gastos variables que tienen en cuenta los gastos por consumo de energía eléctrica y mantenimiento.  $F$  - Gastos globales fijos (CUC/año).

$$V = G_{elec} + G_{mant} \quad (2.24)$$

Donde:  $G_{elec}$  - Gasto por consumo de energía eléctrica (CUC/año).  $G_{mant}$  - Gasto por mantenimiento (CUC/año).

El gasto eléctrico tiene en cuenta la tarifa de corriente eléctrica, la potencia necesaria para transportar el fluido, entregado por la bomba, coeficiente de pérdida y la cantidad de hora en funcionamiento afectado por el rendimiento del motor.

$$G_{elec} = \frac{T \cdot N \cdot k_p \cdot t_p}{\eta} \quad (2.25)$$

Donde:  $T$  - Tarifa de corriente eléctrica, (0.072 CUC/kWh).  $N$  - Potencia necesaria para transportar el fluido, entregado por la bomba.  $k_p$  - Coeficiente de pérdida, 1.04.  $t_p$  - Cantidad de hora en funcionamiento. (min).  $\eta$  - Rendimiento del motor.

Tiene en cuenta los gastos por amortización de las bombas y de las tuberías y soportes

$$F = G_{amor1} + G_{amor2} \quad (2.26)$$

Donde:  $G_{amor1}$  - Gastos de amortización de las bombas, (CUC/año).  $G_{amor2}$  - Gastos por amortización de las tuberías y soportes, (CUC/año).

## 2.10. Procesamiento estadístico de los datos

El procesamiento de los datos se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son:

Media aritmética:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{np} X_i \quad (2.27)$$

Donde:  $X_i$  - elementos de la serie;  $np$  – número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta X = \frac{\sum |X_i - X|}{n} \quad (2.28)$$

Varianza muestral:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{n-1} \quad (2.29)$$

La confirmación de la validez de los valores experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental “ $X_{\text{exp}}$ ” de la caída de presión y el valor teórico “ $X_{\text{teo}}$ ” obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento.

El error relativo puntual se calcula por la expresión 2.29:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad (2.30)$$

En la literatura (Torres, 2003, Laurencio, 2012) se hace un examen de los errores y sus posibles fuentes, se especifican los valores satisfactorios de desviación en cálculos de ingeniería, pues en cada error influyen los siguientes factores:

- ✓ Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser de menor precisión.
- ✓ Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- ✓ Los valores experimentales son promedios de las réplicas.

### 2.10.1. Proceso de identificación del modelo del gradiente de presión

Para realizar el ajuste del modelo que estima la caída de presión durante el transporte por tuberías (ecuación 2.23), se seleccionan los parámetros reológicos del cieno carbonatado, para lograr la identificación de los coeficientes del modelo al simular el proceso de transporte por las tuberías.

Según Torres (2003), Martínez (2009) y Laurencio (2012), se hace necesario comparar los valores de las características del proceso tecnológico real  $\left[ \left( \frac{dp}{dx} \right)_{\text{exp}} \right]$  con las magnitudes

calculadas  $\left[ \left( \frac{dp}{dx} \right)_{\text{teórico}} \right]$  por el modelo propuesto (ecuación 2.23). El mejor ajuste de los

factores lo proporciona el juego de coeficientes donde se garantiza el error mínimo.

En el proceso de identificación del modelo, se varían los parámetros del modelo en dependencia de la medida de diferencia de los componentes, donde se utiliza el procedimiento iterativo a partir del estado de referencia de los datos. El proceso se utiliza para encontrar los valores de los coeficientes característicos del modelo.

### 2.11. Conclusiones del capítulo

- 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.
- Los modelos matemáticos del gradiente de presión y la potencia hidráulica, obtenidos para la simulación operacional, tienen aplicación en tuberías que transportan fluidos con comportamiento plásticos Bingham
- El análisis de los costos de operación del sistema de transporte está calculado teniendo en cuenta la potencia hidráulica bajo los siguientes factores, porcentos de sólidos y presión de operación, la configuración del sistema de impulsión, la longitud y diámetro de la tubería, relacionando estos factores con la velocidad del fluido y sus propiedades físicas y reológicas.

### 3. ANALISIS DE LOS REUSLTADOS

#### 3.1. Introducción

Los estudios experimentales de las características y propiedades de transporte del cieno carbonatado utilizado industrialmente en la empresa Moa Nickel S.A “Pedro Soto Alba” contribuyen a una mejor selección de modelos para la adecuación de los métodos de cálculo y toma de decisiones en la solución de problemas asociados al transporte del fluido en estudio.

Relacionado con este planteamiento, se proponen como objetivos del capítulo:

- ✓ Establecer las propiedades físicas y reológicas del cieno carbonatado, así como los parámetros adecuados en el transporte de cieno carbonatado por tuberías, en cuanto a potencia hidráulica y costo de bombeo.

#### 3.2. Análisis químico

**Tabla 3.1.** Composición química del cieno carbonatado.

Muestra	% Ni	% Fe	% Mg	% Mn	% Al	% Na	% Ca	% CaCO <sub>3</sub>	Cl (ppm)
Cieno de los depósitos	0,119	1,45	1,80	0,046	0,609	0,306	27,80	90,34	502,64
Pulpas obtenidas en el ISMM	0,118	1,43	1,79	0,043	0,578	0,286	28,02	90,01	410,75
Pulpas del proceso	0,114	1,15	1,73	0,028	0,470	0,200	29,14	87,93	397,07

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos por el método de ICP, mediante una comparación de los principales elementos químicos que caracterizan al cieno carbonatado con sus valores promedio, obtenidos a partir del procedimiento planteado en el capítulo 2, de las muestras tomadas del depósito del material denominado de rechazo (material sólido), de las pulpas obtenidas en las instalaciones del Instituto Superior Minero Metalúrgico y del tanque de alimentación de las bombas en la planta de preparación de pulpa (pulpas). El objetivo de esta comparación, es la validez de la posible reutilización del material

denominado de rechazo en el proceso de neutralización de los licores ácidos derivados del proceso de lixiviación ácida y la preparación de pulpas con dicho material para la obtención experimental de los parámetros de transporte del cieno carbonatado en la estación experimental de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

Como los resultados indican, la muestra tomada del depósito posee valores máximos comparadas con las otras muestras, para los elementos: hierro, magnesio, manganeso, Níquel, aluminio y sodio, lo cual se debe a que en ella se incluye la fracción mayor de 0,85 mm, el elemento calcio es predominante, así como el carbonato de calcio contenido en estas, alcanzando valores de hasta un 27,80 % y 90,34 % respectivamente, validando la posibilidad de la utilización de este material en la preparación de pulpa para la fase experimental de los parámetros de transporte de este material por tuberías y su utilización en el proceso de neutralización. En las muestras de pulpas tanto de las preparadas en el Instituto Superior Minero Metalúrgico, como las de proceso el contenido de sodio con respecto a las del depósito disminuye debido al proceso de lavado, al cual es sometido el material, esta disminución sugiere que durante la preparación de estas pulpas ocurre una disolución parcial del cloruro de sodio contenido en la muestra. El enriquecimiento de la muestra de las pulpas de proceso en cuanto al contenido de calcio, es de 29,14 % 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.

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 a 600 ppm con el objetivo de evitar procesos corrosivos. Como se observa la muestra de pulpas tanto del Instituto Superior Minero Metalúrgico como las de proceso tienen un valor inferior a dicho rango.

### **3.3. Característica granulométrica**

La caracterización granulométrica inicial del material tomado de los depósitos se realizó por vía seca según el procedimiento establecido en el capítulo 2, obteniendo el resultado mostrado en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Resultados del análisis granulométrico del material de los depósitos.

Clases (mm)	Peso (kg)	%	Sumaria por más %	Sumaria por menos %
+25	3,50	4,9	4,9	100
-25 +18	4,50	6,3	11,2	95,1
-18 +10	4,85	6,8	18,0	88,8
-10 + 6,3	6,60	9,2	27,2	82,0
-6,3 + 4,75	3,45	4,8	32,0	72,8
-4,75 +3,5	7,00	9,7	41,7	68,0
-3,5 + 2	1,50	2,1	43,8	58,3
-2 + 1,6	9,50	13,2	57,0	56,2
-1,6 + 1,18	9,50	13,2	70,2	43,0
-1,18 + 0,83	5,40	7,5	77,7	29,8
-0,83+0	16,00	22,3	100	22,3
Total	71,8	100		

El análisis de los resultados muestra que en el material denominado de rechazo obtenido de los depósitos, las partículas menores de 0,83 mm representan el 22,3 % de la masa total del material, fracción de tamaño necesaria para la utilización en el proceso y su transportación. Las partículas superiores a esta fracción de tamaño representan un 77,7 % por lo que el  $d_{80}$  se encuentra aproximadamente ubicado en el orden del diámetro de partículas igual a 6,3 mm.

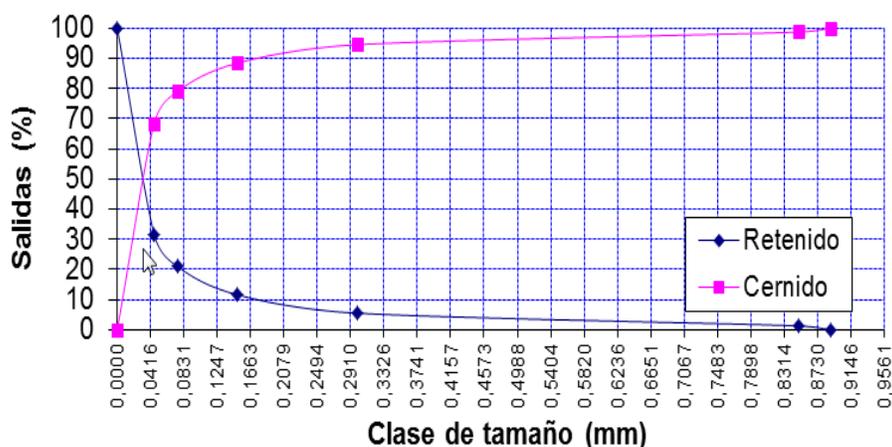
Este material de tamaño de fracción de partículas superior a los 0,83 mm es sometido a un proceso de trituración y molienda permitiendo obtener la fracción de tamaño de partícula necesaria para su transportación.

Una vez sometido al proceso de molienda se realiza una nueva caracterización granulométrica por vía seca del material, cuyos resultados se muestran la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Resultado del análisis granulométrico del material sometido al proceso de molienda.

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

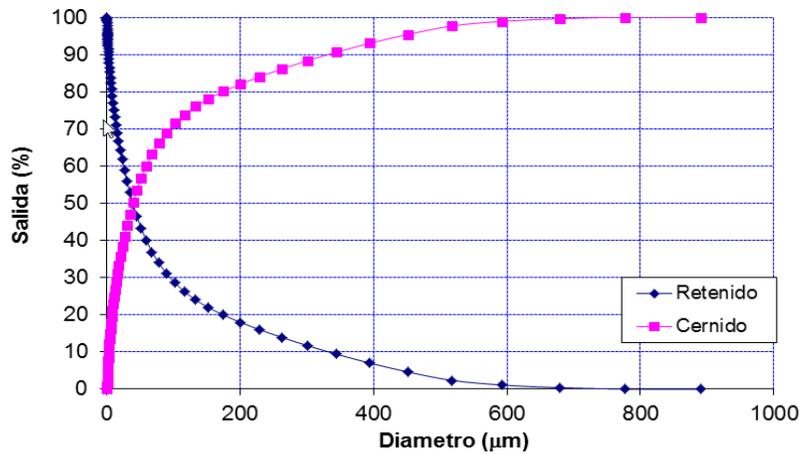
La clasificación por clases de tamaño realizada a este material demuestra que estas pulpas forman sistemas polidispersos, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,046 mm, constituyendo el 68,31 % en peso de las fases sólidas en la muestra. Como puede apreciarse en la figura 3.1 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 las pulpas de cieno carbonatado que se obtendrán para el análisis de su transporte por tuberías, presentan un predominio de la fracción menor de 0,046 mm, que representa aproximadamente el 70 % del sólido, se realizó un análisis de

esta fracción en el analizador de partículas Horiba, figura 3.1, estos resultados se pueden observar además a través de la característica sumaria representada en la figura 3.2

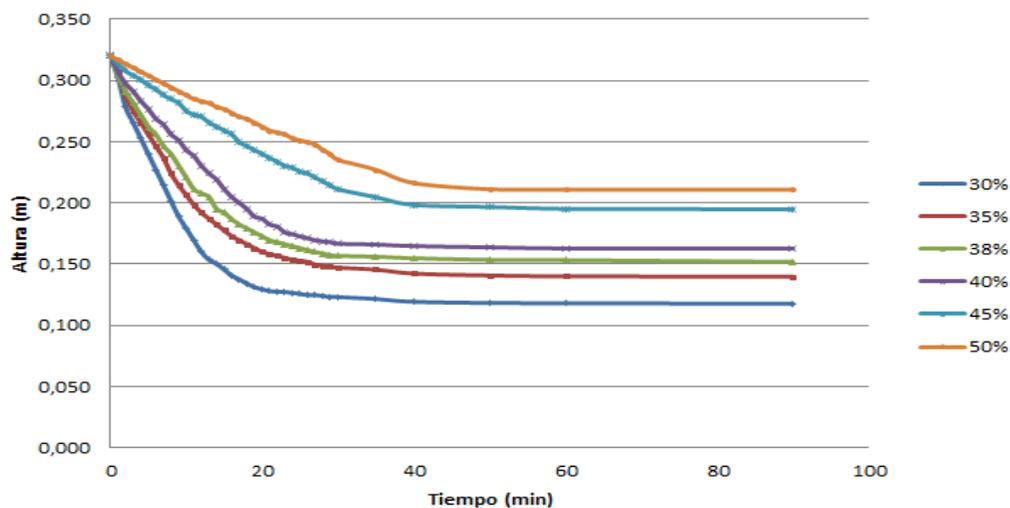


**Figura 3.2.** Curva de característica sumarias.

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 . Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas coloidales. Del análisis se deriva que las muestras de sólido constituyen sistemas altamente polidispersos con características plásticas.

#### 3.4. Análisis del proceso de sedimentación de las pulpas de Cieno Carbonatado

La curva de sedimentación fue obtenida por vía experimental, la curva que registra su comportamiento se muestra a continuación.



**Figura 3.3.** Curva de sedimentación de pulpa de cieno carbonatado.

Como se observa las curvas de sedimentación en las pulpas de cieno carbonatado son características de un proceso que se desarrolla en estado estacionario en un régimen de caída contrariada, para la cual, la velocidad de sedimentación es aproximadamente 0,11 m/s beneficiando con esto el proceso de hidrotransporte de la misma.

### 3.5. Resultados experimentales de la reología del cieno carbonatado

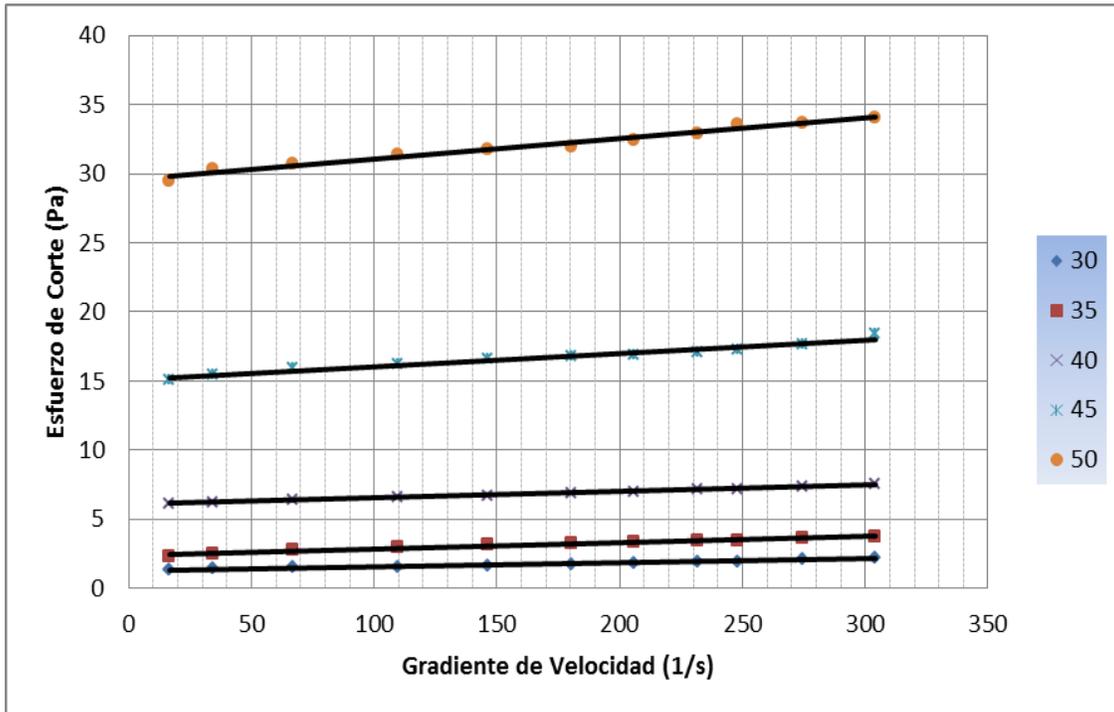
La comprensión de la reología del cieno carbonatado tiene gran uso práctico en relación con sus parámetros de flujo al transportarlos a través de las tuberías. La obtención de los resultados implicó modelos experimentales, además de la obtención de un modelo específico en la interpretación del efecto del contenido de sólido y el gradiente de velocidad sobre la viscosidad del cieno carbonatado.

A partir del estudio reológico, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.4, en la misma se recoge la dependencia entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para los contenidos de sólidos experimentados. Con los resultados experimentales, se construyeron las curvas de flujo mediante el empleo de software (tabulador Microsoft Excel 2010), donde se identificaron los parámetros del modelo matemático que relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, así como su coeficiente de correlación.

**Tabla 3.4.** Resultados obtenidos del estudio reológico al cieno carbonatado.

	Gradiente de velocidad $\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo de corte $\tau$ (Pa)				
		30%	35%	40%	45%	50%
1	16,640	1,339	2,330	6,090	15,090	29,500
2	34,190	1,430	2,530	6,250	15,460	30,300
3	67,080	1,498	2,740	6,417	15,900	30,700
4	109,500	1,583	2,940	6,630	16,180	31,350
5	146,300	1,674	3,125	6,720	16,560	31,740
6	180,400	1,731	3,236	6,863	16,760	32,000
7	205,600	1,842	3,330	6,980	16,930	32,400
8	231,500	1,890	3,420	7,150	17,090	32,900
9	248,100	1,972	3,490	7,200	17,300	33,600
10	274,500	2,140	3,620	7,340	17,670	33,700

Al representar gráficamente los datos experimentales de  $\tau$  en función de  $\dot{\gamma}$ , se trazaron las curvas de flujo (figura 3.4), las mismas permiten realizar el ajuste de los datos mostrados en la tabla 3.4.



**Figura 3.4.** Curvas de flujo del cieno carbonatado en función del contenido de sólido.

En la figura 3.4 se observa que para el rango de porcentaje de sólidos desde 30 hasta 50 %, el cieno carbonatado muestra un comportamiento no newtoniano plástico ideal y el mejor ajuste para el modelo de Bingham, corroborándose lo planteado por Martínez, (2009 y 2014). El comportamiento manifestado, está caracterizado por los parámetros reológicos, esfuerzo de corte inicial ( $\tau_0$ ) y viscosidad plástica ( $\mu_p$ ). En cuanto a los parámetros reológicos, fue posible identificar la tendencia respecto a la dependencia de cada factor con el contenido de sólido. Los modelos ajustados para cada porcentaje de sólido se exponen en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

Contenido de sólido	Modelo ajustado
30%	$\tau_{xy} = 1,2835 + 0,0029 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
35%	$\tau_{xy} = 2,3771 + 0,0046 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
40%	$\tau_{xy} = 6,0539 + 0,0048 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
45%	$\tau_{xy} = 15,061 + 0,0097 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
50%	$\tau_{xy} = 29,553 + 0,015 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$

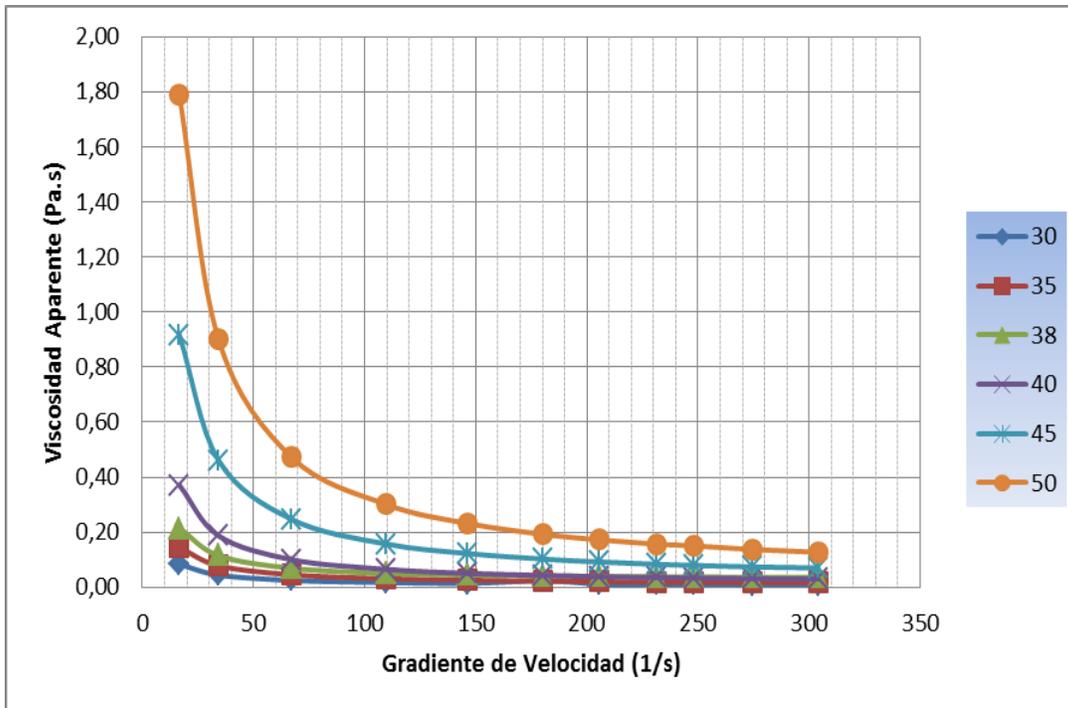
En la tabla 3.6, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

**Tabla 3.6.** Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple.

No	Parámetros	Contenido de sólido				
		30%	35%	40%	45%	50%
1	$\tau_0$ (Pa·s)	1,2835	2,3771	6,0539	15,061	29,559
2	$\mu_p$ (adim.)	0,0029	0,0046	0,0048	0,0097	0,015
3	$R^2$	0,974	0,985	0,989	0,967	0,980

El coeficiente de correlación múltiple ( $R^2$ ) en todos los casos fue superior a 0,967; por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales, indicativo de que se experimenta un fluido estable. Con el empleo de los resultados mostrados en la tabla 3.4 y sustituyéndolos en la ecuación 1.3, se graficó el comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad (figura 3.5), a partir de los resultados mostrados en el anexo 6. Los resultados obtenidos posibilitan visualizar el grado de variabilidad de la viscosidad aparente ante variaciones del contenido

de sólido y el gradiente de velocidad, observándose en todo caso un comportamiento no newtoniano.

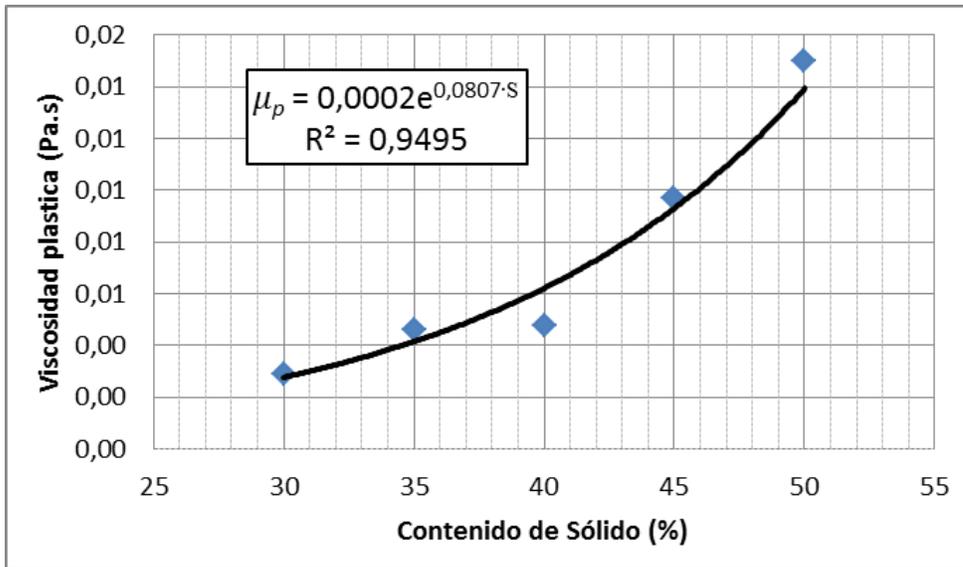


**Figura 3.5.** Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

En la figura 3.5, se resalta que la viscosidad aparente del cieno carbonatado aumenta de forma potencial con el aumento del contenido de sólido. En la misma se puede apreciar que para los valores menores del gradiente de velocidad se manifiesta un mayor cambio de la viscosidad, asociado a cambios de estructuración en el comportamiento de las partículas dispersas en las pulpas de cieno. Los resultados obtenidos justifican la necesidad de conocer los parámetros reológicos del cieno carbonatado para diseñar y evaluar su sistema de transporte, aspecto muy importante al trabajar con este tipo de fluido.

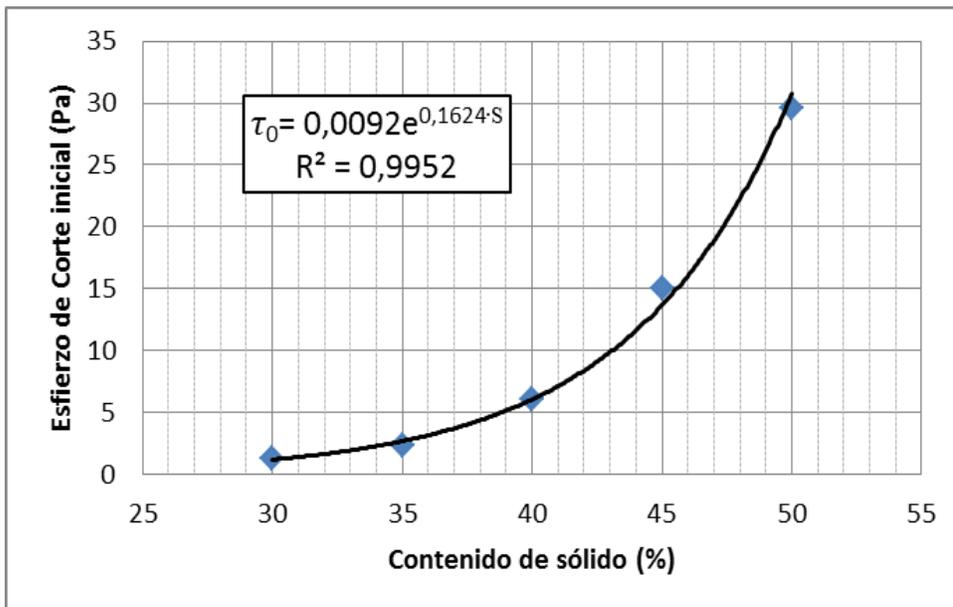
### 3.6. Análisis de la influencia del contenido de sólido en las propiedades del cieno carbonatado

Al aumentar el contenido de sólido, se observó que tanto los valores de esfuerzo de corte inicial como los de viscosidad plástica aumentan (figura 3.6 y 3.7).



**Figura 3.6.** Comportamiento de la viscosidad plástica  $\mu_p$  en función del contenido de sólido.

Este aumento de la viscosidad plástica en función del contenido de sólido está dado por la composición y tamaño de las partículas de sistemas coloidales y polidisperso, que le confieren a las pulpas de cieno carbonatado un alto grado de plasticidad.



**Figura 3.7.** Comportamiento del esfuerzo cortante inicial  $\tau_0$  en función del contenido de sólido.

Realizando el ajuste del comportamiento del esfuerzo de corte inicial y la viscosidad plástica a la ley exponencial, se obtuvo la correlación en función del contenido de sólido (ecuación 3.1 y 3.2) con un coeficiente de correlación múltiple de 0,9495 y 0,9952 respectivamente. El grado de adecuación del modelo con los datos experimentales se confirma en el análisis de Fisher donde el valor crítico fue menor que el valor calculado ( $F_{crit} < F$ ) (ver anexos 7 y 8), por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa.

$$\mu_p = 0,0002e^{0,0807 \cdot S} \quad (3.1)$$

$$\tau_0 = 0,0092e^{0,1624 \cdot S} \quad (3.2)$$

Las funciones obtenidas posibilitan simular el comportamiento de los parámetros reológicos, esfuerzo de corte inicial y la viscosidad plástica al variar el contenido de sólido (S), teniendo como recomendación que la misma es válida sólo para las condiciones experimentales en la que fue ajustada.

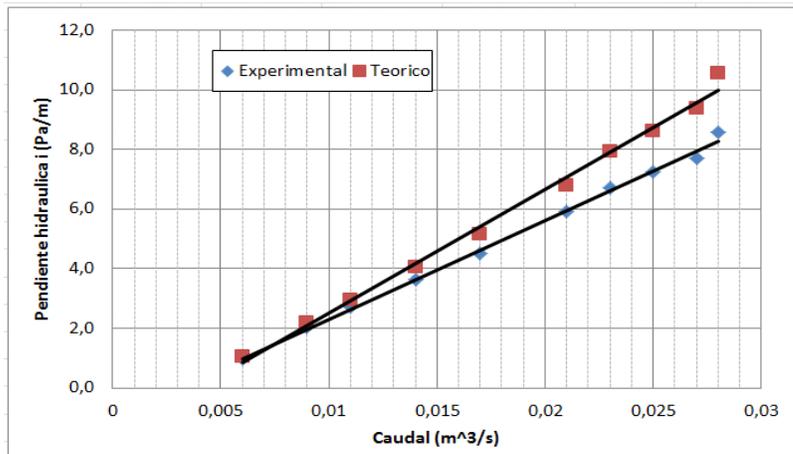
### 3.7. Análisis del modelo de pérdida de carga

El análisis del modelo de pérdida de carga (ecuación 2.15), se realiza a partir de conocer las propiedades reológicas del cieno carbonatado, donde se garantiza la adecuación del modelo que describe el proceso de transporte según las características del sistema. De ahí que se hace necesario comparar los valores de las simulaciones y del proceso de transporte. Los parámetros de ajuste seleccionados, serán los que garantizan la condición del error mínimo. Los resultados de las pérdidas de carga para la identificación del modelo se experimentaron en la instalación de hidrot transporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa a escala industrial. En la tabla 3.5 aparecen los valores de los datos experimentales, los cuales fueron obtenidos a partir de la relación de pendiente hidráulica y el flujo volumétrico [ $i = f(Q)$ ] para la tubería de 0,1 m de diámetro; para cada resultado se determinó el factor de fricción y el número generalizado de Reynolds.

**Tabla 3.7.** Resultados experimentales de identificación del modelo para un contenido de sólido de un 30 %.

D (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	v (m/s)	Re	He	i <sub>exp</sub> (Pa/m)	i <sub>teo</sub> (Pa/m)	Error (%)
0,1	0,006	0,764	1,862,874	1859472,5	1,387	1,452	4,511
	0,009	1,146	3,249,060		2,043	2,178	6,191
	0,011	1,401	4,220,859		2,724	2,947	7,581
	0,014	1,783	5,718,878		3,640	4,030	9,685
	0,017	2,166	7,247,148		4,506	5,028	10,389
	0,021	2,675	9,313,328		5,904	6,627	10,907
	0,023	2,930	10,354,609		6,718	7,740	13,204
	0,025	3,185	11,399,861		7,256	8,601	15,636
	0,027	3,439	12,448,325		7,708	9,369	17,728
	0,028	3,567	12,973,574		8,599	10,541	18,422

Para el análisis de los valores de la pendiente hidráulica, se compararon los valores experimentales con los resultados teóricos obtenidos mediante el empleo de la ecuación 2.15. En la figura 3.8, se muestran los resultados de pendiente hidráulica (teórica y experimental) para el diámetro de tubería examinado, observándose la tendencia a desviaciones entre el modelo y los resultados experimentales.



**Figura 3.8.** Pérdidas específicas de presión en función del flujo volumétrico del cieno carbonatado.

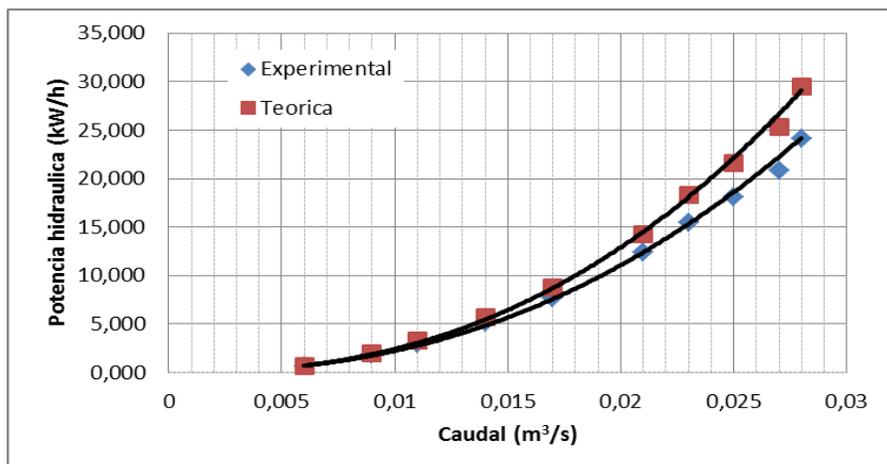
En las figuras 3.8 se observa que durante el transporte del cieno carbonatado por la tubería, a partir del análisis del error puntual de cada experimento, relacionado con la simulación del modelo para el régimen laminar y turbulento establecido, se resalta que a medida que

aumenta la velocidad del fluido en la tubería el error tiende a ser mayor; Darby (2001); Gardea (2008), no incluyen este efecto. El error se le atribuye al efecto viscoso del fluido que manifiesta el cieno al fluir por la tubería; este resultado permite corroborar los planteamientos de las literaturas (Vennard y Streeter, 1986; Nekrasov, 1990; Streeter *et al.*, 2000; García, 2003) descritas en el capítulo 2.

Resultados similares a los de pérdidas de presión en las tuberías, pueden observarse en las figuras 3.9 para el análisis de la potencia que se necesita para transportar el cieno carbonatado por tuberías (ver anexo 9), lo que constituye el indicador económico principal en un sistema de transporte. Los valores teóricos de la potencia hidráulica se determinaron a partir de los resultados de simulación obtenidos por la ecuación 2.22, conociéndose las propiedades reológicas y las condiciones de las tuberías.

Debido a que los errores de las simulaciones (desviaciones entre los valores teóricos y los experimentales) son significativos, se deben minimizar estos para poder tomar decisiones adecuadas en materia de la selección de criterios para la racionalización del consumo de energía en el transporte del cieno carbonatado.

Se determinó que para tuberías horizontales en el sistema general de experimentación se debe tener en cuenta no solo las pérdidas de presión debido al efecto de mezclado del cieno carbonatado sino también las pérdidas de presión debido al efecto viscoso del mismo, por lo que se hace necesario considerar todos los efectos en el cálculo del gradiente de presión total en las tuberías.



**Figura 3.9.** Potencia de fluido en función del flujo volumétrico del cieno carbonatado.

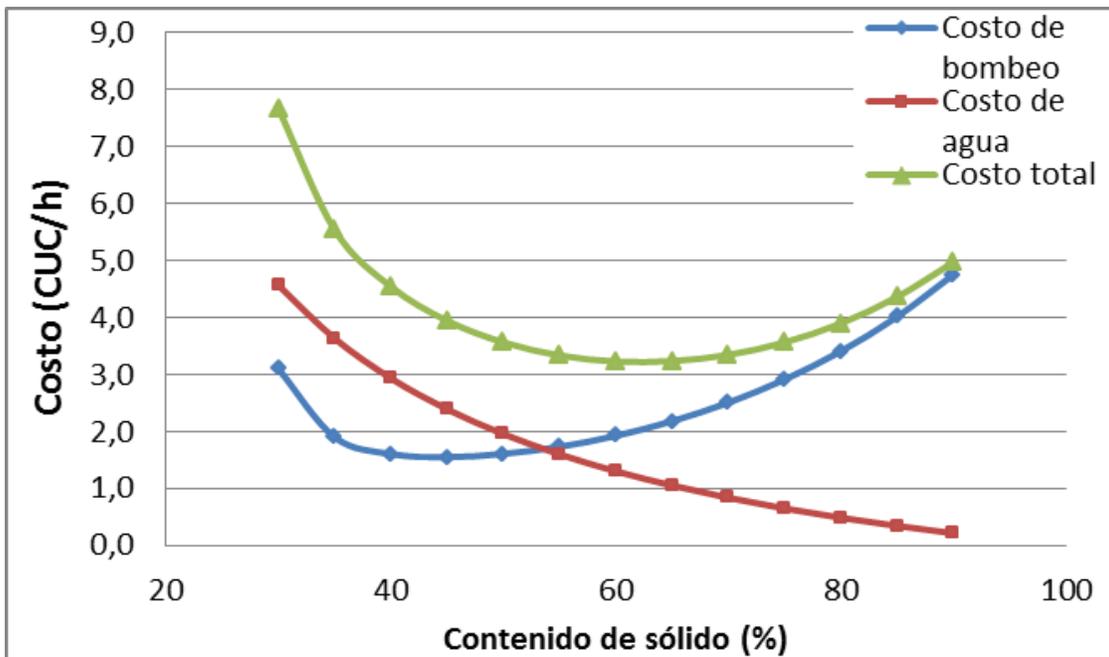
### 3.8. Análisis de los resultados de los costos

En la tabla 3.8 se muestran los resultados de los principales costos que se tuvieron en cuenta para la determinación del costo total de bombeo, comprobándose que en el máximo rendimiento de la bomba se logra un costo de 3, 56 CUC/h para 50 % de contenido de sólido, aunque no es el menor valor de costo, la planta trabaja en su máxima eficiencia transportando un flujo estable.

**Tabla 3.8.** Resultados del cálculo del costo.

Contenido de sólido (%)	$\dot{m}$ (kg/s)	$C_{\text{agua}}$ (CUC/h)	$C_{\text{bombeo}}$ (CUC/h)	$C_{\text{total}}$ (CUC/h)	$\eta$ (%)
30		4,56	3,10	7,66	35,96
35		3,63	1,90	5,53	54,78
40		2,93	1,61	4,54	63,81
45		2,39	1,55	3,94	67,83
<b>50</b>		<b>1,96</b>	<b>1,61</b>	<b>3,56</b>	<b>69,14</b>
55		1,60	1,73	3,33	68,96
60	0, 0194	1,30	1,92	3,23	67,95
65		1,05	2,18	3,23	66,48
70		0,84	2,51	3,34	64,78
75		0,65	2,91	3,56	62,97
80		0,49	3,41	3,90	61,13
85		0,35	4,01	4,36	59,31
90		0,22	4,75	4,97	57,54

Al representar gráficamente los resultados del costo en función del contenido de sólido, se trazaron las curvas de costo de agua, costo de bombeo y el costo total (figura 3.9), las mismas permite determinar el costo para su máximo rendimiento.



**Figura 3.9.** Costo en función del contenido de sólido.

En relación con los resultados de simulación de costos, en la figura 3.9 se muestra la tendencia decreciente del costo del agua al aumentar el contenido de sólido, comportamiento relacionado con la disminución del agua en la pulpa; no siendo así el comportamiento del costo de bombeo, influenciado por la caída de presión.

La combinación del costo de agua con el costo de bombeo, asociado con el costo fijo, posibilitó la búsqueda de los valores mínimo de operación.

#### **Costo de consumo energético para transportar un m<sup>3</sup> de cieno carbonatado**

En la tabla 3.9 se muestran los resultados de los principales indicadores tomados en cuenta en la determinación de los gastos de explotación de la instalación actual, comprobándose que con las modificaciones de las ecuaciones y el perfeccionamiento en el conocimiento de las propiedades del Cieno Carbonatado para la evaluación del sistema actual, se obtienen ahorros en la transportación del metro cúbico de Cieno Carbonatado, pues se logra disminuir el costo de la transportación de un 0,81 CUC a un 0,73 CUC, con un ahorro en los gastos de explotación de 1043,08 CUC anualmente.

**Tabla 3.9.** Principales indicadores del costo de transportación de un m<sup>3</sup> de Cieno Carbonatado.

Indicadores	Unidad	Actual	Propuesta
Gastos por consumo de energía eléctrica	CUC/año	2861.22	2448.67
Gastos por mantenimiento	CUC/año	1965.34	1335.81
Gastos por amortización de las bombas	CUC/año	12.07	12.07
Gastos de amortización de las tuberías y los soportes	CUC/año	173.7	173.7
Gastos de transportación de una bomba	CUC/año	5013.33	3970.25
Costo por transportar un m <sup>3</sup> de cieno carbonatado	CUC/m <sup>3</sup> m	0.81	0.73

Teniendo en cuenta el análisis de lo ilustrado en la tabla 3.9, acerca de la situación actual de la instalación, se concluye que, aplicando los resultados obtenidos en la presente Tesis, es posible, lograr mejoras favorables a la producción y a la economía de la planta.

### 3.9. Impactos Técnico- Económico

Una gran parte de los gastos durante el hidrotransporte lo constituyen los gastos de energía eléctrica, por lo que su economía es una de las direcciones estratégicas de la producción en la actual etapa. Una correcta selección y organización en la explotación del equipamiento de bombeo en régimen económico permite el ahorro de energía eléctrica y aumentar la efectividad del transporte hidráulico.

Dentro de los indicadores técnico-económicos principales de la instalación de hidrotransporte se encuentran: productividad anual de la instalación por el sólido transportado, en m<sup>3</sup>/año; potencia instalada sumaria del motor, en kW.; gasto anual de energía eléctrica kWh/año; gasto específico de energía eléctrica por un metro cubico de material transportado, kWh/m<sup>3</sup>; costo de energía eléctrica gastado en la transportación de un metro cubico de material sólido \$/m<sup>3</sup>. Por otra parte los costos de mantenimiento decrecen al disminuir las fallas y averías del equipamiento. También disminuye el costo total de los descuentos anuales de los activos fijos tangibles al incrementarse el tiempo de vida útil de la instalación.

### 3.10. Conclusiones parciales del capítulo

- El análisis químico de las muestras del cieno carbonatado denominado de rechazo 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 %. Demostrando esto la validez de la utilización de este material de los depósitos.

- 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. Comportándose como un sistema polidisperso.
- Para variaciones de contenido de sólido en el rango experimentado, el cieno carbonatado presentó un comportamiento del tipo plástico ideal, ajustándose al modelo plástico Bingham, un índice de regresión superior al 96 %.
- Para el cieno carbonatado con las características y propiedades analizadas, las caídas de presión pueden ser estimadas por medio de la ecuación 2.15. se obtiene un error puntual máximo del modelo de un 18,4 % debido a que no se tiene en cuenta el efecto viscoso de fluido, no obstante este valor confirma la validez del mismo.

## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ El análisis reológico del cieno carbonatado para una variación del contenido de sólidos entre 30 a 50 %, presentó un comportamiento del tipo plástico ideal ajustándose al modelo de Bingham, notándose que los parámetros reológicos esfuerzo de corte inicial y viscosidad plástica aumentan con el aumento del contenido de sólido en el rango dado.
- ✓ De acuerdo con los resultados del análisis de las pérdidas de carga experimentales y teóricas, el modelo de pérdida de carga y potencia hidráulica para el cieno carbonatado con las características estudiadas, se estiman mediante las ecuaciones:

$$\Delta p = \left[ \frac{32 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \left( \left( \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} \right] \right)^\beta + \left( \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \right)^\beta \right)^{1/\beta} \right]$$

$$N_h = \left[ \frac{32 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} \left( \left( \frac{16}{\text{Re}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{He}{\text{Re}} \right] \right)^\beta + \left( \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \right)^\beta \right)^{1/\beta} \right]$$

- ✓ Mediante el análisis de los costos de transportación del cieno carbonatado por tubería se determinó que el máximo rendimiento del sistema se obtiene durante el transporte de pulpas de un 50% de contenido de sólido, lo cual representa un costo de bombeo de 3, 56 CUC/h y el costo de transportar un metro cúbico del material analizado en un metro de tubería es de 0, 73 CUC/m<sup>3</sup>·m.



## RECOMENDACIONES

1. Emplear el modelo propuesto en la ecuación 2.15, para estimar pérdidas de carga en tuberías que transporta Cieno Carbonatado.
2. Valorar el empleo de la ecuación 2.17, en los cálculos de la potencia necesaria del transporte de otro tipo de fluido de comportamiento Bingham.
3. Valorar el establecimiento de un modelo general de cálculo de pérdida de carga en el que se tenga en cuenta no solo el efecto de mezclado del flujo, se le adicione los componente de pérdida de presión por los esfuerzos de corte en las tuberías y la variación de nivel.
4. Transportar un 50 % de contenido de sólido para que las bombas trabaje en su máximo rendimiento.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Adhikari, B. y Jindal, V., "Artificial neural; a new tool for prediction of pressure drops of non-newtonian fluid foods through tubes". Journal of Food Engineering. 21(6) 43-51, 2000.
2. Aguirre, A. Pérez, R. y Martínez, D., Mecánica de Fluidos, Editorial Universo Sur, Cuba 1996.
3. Andrade, R., Torres, R. y Montes, E., "Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas". Revista de la Facultad de Agronomía. 26(3) 599-612, 2009.
4. Ávila, N., Becerra Lotero, C., Iza Mustafá, Y., Sanz Uribe, J., "Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería PVC". Ciencia y técnica. 12(4) 23-31, 2007.
5. Bandala, M., Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos. Tesis de Especialidad, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. 71p
6. Banerjee, T., Ma, D. y Das, K., "Non-newtonian liquid flow through globe and gate valves". Canadian Journal of Chemical Engineering. 72(8) 207-211, 1994.
7. Branco, I. y Gasparetto, C., "Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices". Science and Alimentary Technologic. 23(1) 166-171, 2003.
8. Caldiño, V. y Salgado, M., "Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris", 7mo Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México, 2004.
9. Campos, G., 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.
10. 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. 99p

11. Cerpa, A. y Garcell, L., "Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas", Evento Metalurgia 98, La Habana, 1998.
12. Cerpa, A. y Garcell, L., "Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions". Clays and Clay Minerals. 47(4) 515-521, 1999.
13. 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
14. Cerpa, A., Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloido-químicas. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997. 99p
15. Costa, N., Fenómenos de transporte, Editorial Alambra S.A., Madrid, España, 1984.
16. Dak, M., Verma, R. y Jaaffrey, S., "Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar". Journal of Food Engineering. 28(4) 1011-1015, 2007.
17. Darby, R., "Take the mystery out of non-newtonian fluids". Chemical Engineering. 9(3) 66-73, 2001.
18. Davidson, R., Nguyen, D. y Chang, C., "A model for the pressure drop in the pipeline for the non-newtonian crude oil". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 43(3) 102-121, 2004. [www.sciencedirect.com/science](http://www.sciencedirect.com/science) [Consultada: 6 de junio de 2009]
19. De la Paz, N., "Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida". Revista Cubana de Farmacia. 36(1) 21-27, 2002.
20. Díaz, A., Hechavarría, T., "Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento". Tecnología Química. 19(3) 22-36, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de marzo de 2007]
21. Doron, P. y Barnea, D., "Pressure drop and limit deposit velocity for solid-liquid flow in pipes". Journal of Multiphase Flow. 15(3) 231-243, 1995.
22. Garcell L., Díaz, A. y Surís, G., Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1988.

23. Garcell, L., Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
24. Garcell, L., Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.
25. García, E. y Steffe, J., "Comparison of friction factor equations for non-newtonian fluids in pipe flow". Journal of Food Process Engineering. 2(9) 93-120, 1987.
26. García, F. y Haoulo, M., "Estudio experimental de patrones de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas", 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Perú, 2007. [www.revele.com.ve/programas/](http://www.revele.com.ve/programas/) [Consultada: 3 de enero de 2008]
27. García, F., Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, 2003. 121p
28. Gardea, H., "Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos". Ingeniería, Investigación y Tecnología. 9(2) 17-26, 2008.
29. Gillies, G., Shook, A., y Wilson, K., "An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow". Canadian Journal Chemical Engineer. 8(69) 173-178, 1991.
30. Haoulo, M., García, F. y Soto, J., "Gradiente de presión de flujo de gas y líquido en tuberías horizontales considerando el efecto de las propiedades de mezcla". Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 20(4) 102-113, 2005.
31. 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.
32. Ibarz, J., Vélez y Barbosa, G., Transporte de alimentos fluidos a través de tuberías. Tesis de Especialidad, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. 60p
33. Izquierdo, R., "Estudio de la instalación de hidrot transporte a presión de la pulpa laterítica de la Empresa Cmdte Pedro Soto Alba". Minería y Geología. 2(3) 16-22, 1989.
34. Izquierdo, R., Turro, A. y Nikolaev, A., "Hidrot transporte del mineral laterítico en régimen estructural". Minería y Geología. 18(2) 53-59, 2001.

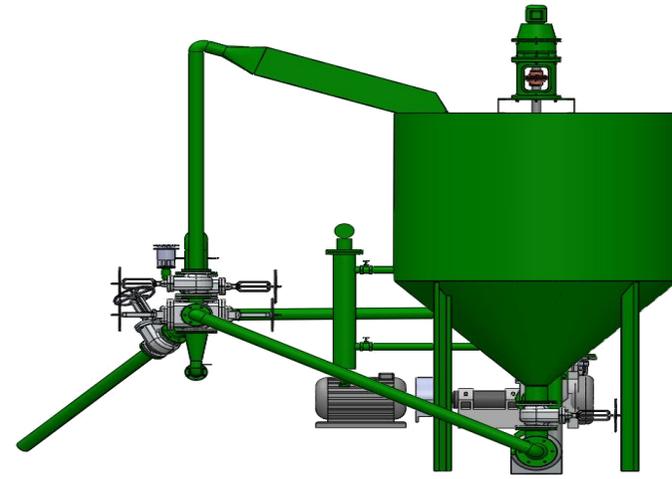
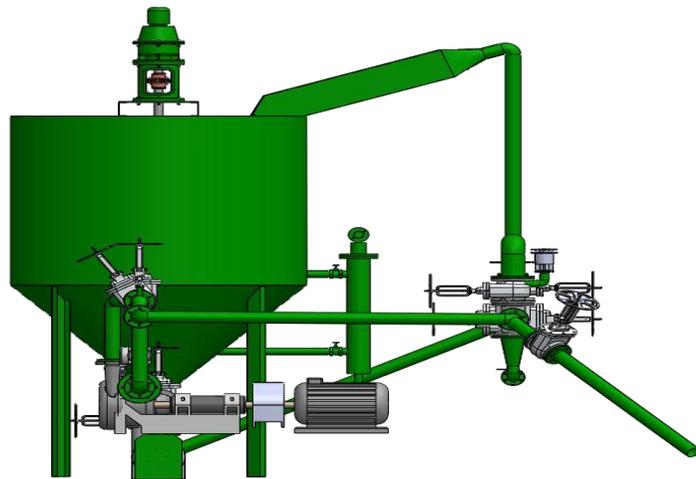
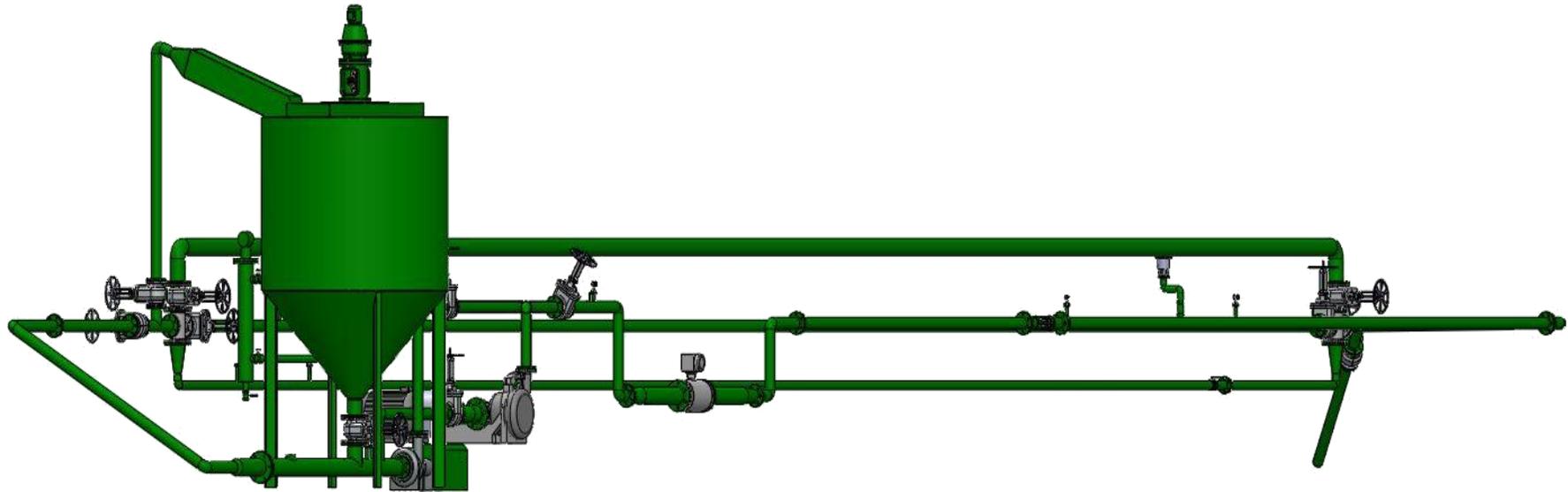
35. Japper, A., Escudier, P. and Poole, J., "Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 48(5) 43-55, 2009. [www.sciencedirect.com/science](http://www.sciencedirect.com/science) [Consultada: 30 de octubre de 2009]
36. Jiménez. D.Y. Cálculo verificativo 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.
37. Khatib, M., "The development of poiseuille flow of a pseudoplastic fluid". *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 31(1) 102-117, 2006. [www.sciencedirect.com/science](http://www.sciencedirect.com/science) [Consultada: 30 de mayo de 2007]
38. Laurencio, H. y Delgado, Y., "Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua". *Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería*. 16(2) 244-250, 2008. <http://redalyc.uaemex.mx>. [Consultada: 15 de diciembre de 2009]
39. Laurencio, H. y Delgado, Y., "Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado". *Minería y Geología*. 24(2) 56-77, 2008. [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg). [Consultada: 15 de diciembre de 2009]
40. Laurencio, H., "Estudio reológico de petróleo pesado de 11° API", IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2009.
41. Laurencio, H., "Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados", ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2010.
42. Laurencio, H., Delgado, Y., Falcón, J., "Modelo para la estimación de pérdidas de presión en el transporte de petróleos pesados por tuberías", V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2011.
43. Laurencio, H., Método de cálculo para el transporte de emulsiones de petróleo pesado por tuberías. Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2007. 87p
44. Levenspiel, O., *Engineering flow and heat exchange*. New York, London, Plenum Press, 1986.

45. Macedo, C., Manual de prácticas de operaciones unitarias I. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2000.
46. Macedo, C., Martínez, J. y Vélez, J., "Diseño, construcción y validación de una unidad piloto para el manejo de fluidos no newtonianos". Información Tecnológica. 12(6) 169-176, 2001.
47. Manssur, R. y Rajie, T., "Generalized explicit equation for de friction factor for de newtonian and non newtonian fluids in tooth circular and non circular ducts". Chemical Engineer Technique. 53(4) 89-103, 1988.
48. Martinez y Izquierdo R., 2014. Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. Revista Minería y Geología / v.30 n.1 /enero-marzo/ p.80-94.
49. Martínez, R., Caracterización de las propiedades físico mecánico del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrot transporte por tuberías. Tesis de Maestría. ISMM 2009.
50. Menéndez, H.M. *Explotación racional del yacimiento de Cienos Carbonatados en la bahía de Moa*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2001
51. Mitrofanov, L.A. Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales, Editorial MIR, Moscú 1984.
52. Nedved. M. Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande. 1966.
53. Nakayama, T., Niwa, E. y Hamada I., "Pipe transportation of minced fish paste". Journal of Food Science. 45(4) 844-847, 1980.
54. Nekrasov, B., Hidráulica. Editorial MIR, Moscú, Rusia, 1990.
55. Newitt, M., Richardson, F., Abbott, M. y Turtle, B., "Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes". Transport Institute Chemical Engineer. 33(7) 93-113, 1955.
56. Ochoa, O., Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados, Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2011. 85p
57. Otero, L., Fenómenos de transporte en metalurgia extractiva, Editorial Alambra, Madrid, España, 1989.

58. Pedroso, I., Turiño, I., Jáuregui, S. y González, G., "Gradiente de velocidad para la transportación de mieles y meladuras en conductos circulares". *Centroazucar*, 2(3) 53-68, 2000. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 5 de febrero de 2006]
59. Pérez, 2010. Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Revista Minería y Geología/ v.26 n.4 / octubre-diciembre / p. 16-35*.
60. Pérez, R., Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de las menas y concentrados en flujos de alta concentración. Tesis de Doctorado, URSS, 1979. 95p
61. Perona, P., "An experimental investigation of laminar-turbulent transition in complex fluids". *Journal of Food Engineering*. 23(9) 137-145, 2003.
62. Roque, D., "Método de recalcado de la característica de funcionamiento de las bombas centrifugas que manipulan soluciones azucaradas", VI encuentro Nacional de Jefes de Maquinarias, MINAZ, Santa Clara, 1989.
63. Sablani, S. y Shayya, H., "Neural network based non-iterative calculation of the friction factor for power law fluids". *Journal of non Newtonian fluid*. 57(2) 327-335, 2003.
64. Sánchez, C., Oria, R. y Sánchez, A., "Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés", Simposio Poscosecha, Orihuea, Valencia, España, 2008.
65. Santos, F. y Martín, M., "Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrifuga". *Centro azúcar*. 1(3) 58-67, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 4 de junio de 2008]
66. Skelland, H., *Non-newtonian flow and heat transfer*, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 1970.
67. Steffe, M. y Morgan, G., "Pipeline design and pump selection for non-newtonian fluid Foods". *Food Technology*. 11(7) 78-85, 1986.
68. Streeter, V., Benjamin, E. y Bedford, K., *Mecánica de fluidos*. Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 2000.
69. Suárez, M., Determinación de los parámetros del hidrot transporte de las pulpas del mineral serpentínico. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1998. 98p

70. Televantos, Y., Shook, C., Carleton A., y Streat, M., "Flow of slurries of coarse particles at high solids concentrations". *Canadian Journal Chemical Engineer.* 57(6) 255-262, 1979.
71. Torres, E., Modelación y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2003. 98p
72. Turian, M. y Yuan, F., "Flow of slurries in pipelines". *AIChE Journal.* 23(9) 232-243, 1977.
73. Turiño, I., "Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga". *Centro azúcar.* 3(1) 58-73, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 10 de febrero de 2008]
74. Turro, A., Estudio del hidrot transporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2002. 114p
75. 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.
76. Vélez, J., Apuntes de ingeniería de alimentos I. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2003.
77. Vennard, J. y Streeter, V., *Elementos de mecánica de los fluidos.* Edición
78. Welty, R., Wilson, E. y Wicks, E., *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer,* Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA, 202-219, 1976.
79. Wilson, C., "Evaluation of interfacial friction for pipeline transport models", *Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, U.K.,* 107-116, 1988.
80. Wojs, K., "Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes". *Journal of non Newtonian fluid mechanise.* 48(2) 337-355, 1993.

Anexo # 1 Esquema de la instalación semiindustrial de hidrotransporte del ISMM



---

**Anexo # 2****Instrumentación utilizada para la medición y toma de datos**

La definición de la instrumentación está referida a un grupo de elementos que sirven para medir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos utilizados en éste.

La instalación experimental de hidrotransporte cuenta con los instrumentos que se relacionan a continuación, (ver certificaciones de calibración en el anexo V):

➤ Sensor de presión (SITRANSP)

Estos transmisores, poseen una membrana separadora que transmite la presión por el líquido de relleno, al censor de presión de silicio. La presión actuante provoca la deflexión de la membrana de medida. Esta variación de resistencia genera una tensión de salida del puente que es proporcional a la presión de entrada que es amplificada en un amplificador y digitalizada en un convertidor analógico-digital. Esta señal es evaluada en un microcontrolador y corregida con respecto a linealidad y comportamiento frente a la temperatura. La señal de medida, es transformada, en un convertidor digital-analógico, en la corriente de salida de 4... 20 mA.

➤ Termorresistencia PT-100 (SA TERMIBEL N.V)

Para la medición de temperatura se utilizaron termorresistencia PT-100, cuya medición está basada en la propiedad que poseen todos los conductores de variar su resistencia en función de la temperatura.

La PT-100 está disponible en forma prácticamente pura, comparados con otros metales, la relación resistencia v/s temperatura es predecible y estable. Ofrecen la posibilidad de fabricación en forma de alambre muy delgado. Tienen estabilidad en el tiempo

➤ Flujómetro Electromagnético

En la instalación semi-industrial de hidrotransporte hemos utilizado para el tema de

investigación un flujómetro electromagnético KROHNE, modelo OPTIFLUX 2100 /4100. Tiene una exactitud de 0.2 %, grado de la protección IP 65, consumo de energía 0.65W

Se basa en la Ley de Faraday la cual expresa que al pasar un fluido conductivo a través de un campo magnético, se produce una fuerza electromagnética (F.E.M.), directamente proporcional a la velocidad del mismo, de donde se puede deducir también el caudal.

Está formado por un tubo, revestido interiormente con material aislante. En dos puntos diametralmente opuestos de la superficie interna se colocan dos electrodos metálicos, entre los cuales se genera la señal eléctrica de medida.

La diferencia de potencial entre los electrodos es del orden de milivoltios, por lo que dicha señal tiene que ser amplificada mediante un dispositivo secundario denominado convertidor, que proporciona una señal de salida en miliamperios, en voltios o en impulsos.

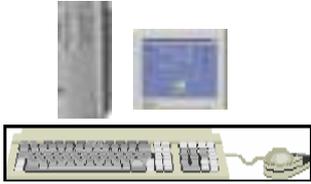
➤ **Densímetro DT 301 (DensityTransmitter)**

El instrumento empleado para medir la densidad del material a utilizar en la investigación es el DT 301, con una exactitud de  $\pm 0.1$  %. Este transmisor es un instrumento desarrollado para la medición continua, en una línea de concentración líquida y densidad, directamente en el proceso industrial. Su tecnología consiste en la diferencia de presión a través de sensores capacitivos sumergidos en el proceso. Un software especializado, por medio de un algoritmo, calcula la densidad del fluido.

Está diseñado para las aplicaciones de mando de proceso, los transmisores generan una señal de 4-20 mA proporcional a la concentración de la densidad.

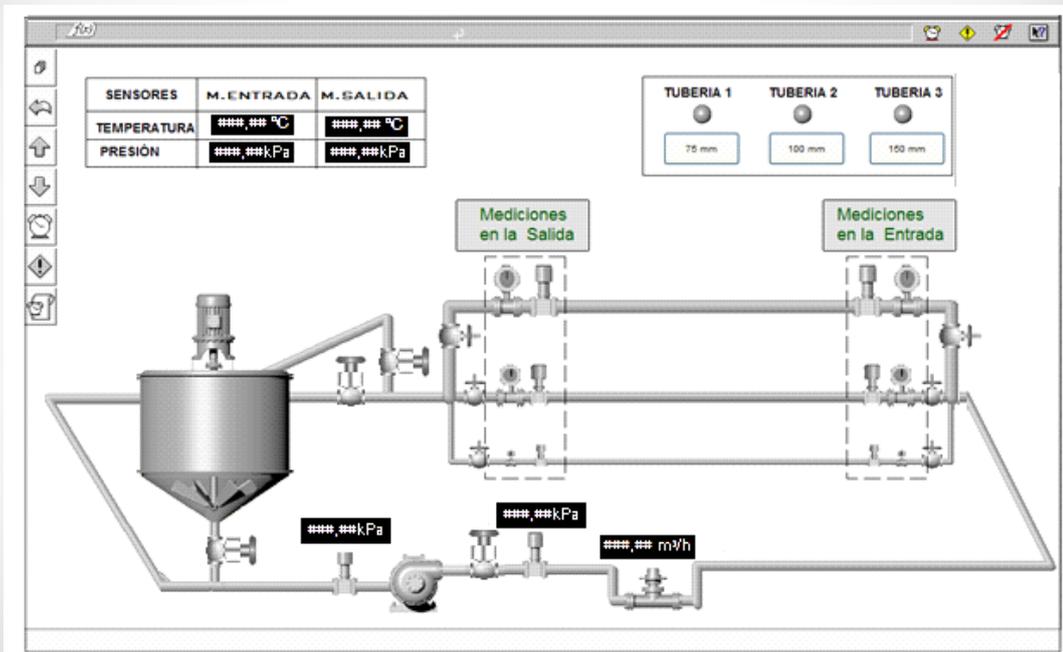
Magnitud	Instrumento	
Presión	SITRANS P serie DS III. Alcance de medida mín. y máximo: 0,16 a 16 bar. 7MF4033-1DY00-1AA6-Z+B13+Y15	
Flujo	Caudalímetros magnéticos OPTIFLUX 4300. Rango de Medición: Desde 0.1 m3/h hasta 5000 m3/h. Precisión: ±0.15%. Conductividad del líquido del proceso (agua) ≥ 20 µS/cm. Material del recubrimiento del tubo de medida: PTFE. Protección: IP 66/67. Alimentación: 220 VAC 60 Hz.	
Temperatura	Termorresistencia Pt 100 con convertidor programable. Longitud de inmersión: 200 mm Diámetro de la funda: 12 mm Material de la funda: Acero Inoxidable Características del Convertidor: Universal programable. Rango: 0-100 °C	
Densidad	Transmisor de densidad industrial DT 301. Rango de 0.1 A 2.5 G/CM3 alida de 4-20mA. Ref: DT3011-2H S-101-5 1/H1/110	
Nivel	BM 700 A Transmisor de nivel por radar. Salida 4 a 20 mA. Rango de medida: de 0 a 20 m Temperatura del proceso: < 80 °C Alimentación: 220 VDC Grado de protección: IP 66	



	Programable en sitio mediante teclado incorporado.	
PLC	Simatic S7-300 de SIEMENS	
Scada	CitectScada	

Anexo 3. Esquema del CITEC.

### Visualización y registro de las variables



## Anexo # 4

Tabla A4.1. Ecuaciones de cálculo de la pulpa

Parametros	Ecuaciones
Caudal de agua	$Q_{agua} = \frac{\dot{m} \cdot \%_{agua}}{\%_{sólido}}$
Caudal de solido	$C_{sólido} = Q_{pulpa} \cdot \dot{m}$
Caudal de la pulpa	$Q_{pulpa} = m + \dot{Q}_{agua}$

Tabla A4.2. Resultados del cálculo de la pulpa

% sólido	C sólido (CUC/h)	% agua	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pulpa</sub> (m <sup>3</sup> /h)
30	0,0453	70	0,0453	0,0647
35	0,0360	65	0,0360	0,0554
40	0,0291	60	0,0291	0,0485
45	0,0237	55	0,0237	0,0431
50	0,0194	50	0,0194	0,0388
55	0,0159	45	0,0159	0,0353
60	0,0129	40	0,0129	0,0323
65	0,0104	35	0,0104	0,0298
70	0,0083	30	0,0083	0,0277
75	0,0065	25	0,0065	0,0259
80	0,0049	20	0,0049	0,0243
85	0,0034	15	0,0034	0,0228
90	0,0022	10	0,0022	0,0216

**Anexo 5. Calculo de los parámetros de la instalación**
**Tabla A5.1 Ecuaciones de parámetros**

Parámetros	Ecuaciones
Viscosidad plástica	$\mu_p = 0,0002 \cdot 2,71^{(0,0807 \cdot \%s)}$
Velocidad	$v = \frac{4 \cdot Q}{D^2 \cdot 3,14}$
Gradiente de velocidad	$\gamma = \frac{32 \cdot Q}{3,14 \cdot D^3}$
	$\mu_a = \frac{\tau_o}{\gamma} + \mu_p$

**Tabla A5.1. Calculo de los parámetros de instalación.**

% Sólido	$\rho$	$\mu_p$	$\tau_o$	Q (m <sup>3</sup> /h)	v (m/h)	$\gamma$
30	1226	0,002	1,18	0,065	8,238	659
35	1274	0,003	2,66	0,055	7,061	564,9
40	1325	0,005	5,98	0,049	6,178	494,3
45	1382	0,007	13,43	0,043	5,492	439,3
50	1443	0,011	30,16	0,039	4,943	395,4
55	1492,6	0,017	67,78	0,035	4,493	359,5
60	1546,8	0,025	152,28	0,032	4,119	329,5
65	1601	0,037	342,15	0,03	3,802	304,2
70	1655,2	0,056	768,75	0,028	3,53	282,4
75	1709,4	0,083	1727,24	0,026	3,295	263,6
80	1763,6	0,125	3880,83	0,024	3,089	247,1
85	1817,8	0,187	8719,59	0,023	2,907	232,6
90	1872	0,279	19591,47	0,022	2,746	219,7

% Sólido	$\mu_a$	Re	He	$\lambda$	$\Delta P$	N
30	0,004	250554	2905410	0,014	5883	380,4
35	0,008	111754,1	3034249	0,017	5496	304,6
40	0,0171	47913,8	3171484	0,021	5408	262,3
45	0,038	19958,2	3324448	0,027	5548	239,2
50	0,0875	8155,2	3488531	0,033	5869	227,7
55	0,2052	3267,7	3626474	0,042	6306	222,4
60	0,4871	1307,9	3776941	0,053	6903	223,2
65	1,1622	523,8	3928820	0,066	7653	228,4
70	2,7776	210,4	4082124	0,083	8570	237,5
75	6,6358	84,9	4236861	0,104	9674	250,2
80	15,8282	34,4	4393043	0,131	10992	266,6
85	37,6747	14	4550680	0,163	12561	286,7
90	89,4632	5,7	4709783	0,204	14423	310,9

Anexo. 6. Calculo de la reología

	Grad	Esfuerzo de corte						Visc Plast.	Viscosidad aparente					
		30%	35%	38%	40%	45%	50%		0,0029	0,0046	0,0128	0,0048	0,0097	0,015
1	16,640	1,339	2,330	3,360	6,090	15,090	29,500		0,0838	0,1446	0,2147	0,3708	0,9166	1,7878
2	34,190	1,430	2,530	3,510	6,250	14,460	30,100		0,0447	0,0786	0,1155	0,1876	0,4326	0,8954
3	67,080	1,498	2,740	3,800	6,417	15,900	30,700		0,0252	0,0454	0,0694	0,1005	0,2467	0,4727
4	109,500	1,583	2,940	4,129	6,630	16,180	31,350		0,0174	0,0314	0,0505	0,0653	0,1575	0,3013
5	146,300	1,674	3,125	4,687	6,720	16,560	31,740		0,0143	0,0260	0,0448	0,0507	0,1229	0,2320
6	180,400	1,731	3,236	5,280	6,863	16,760	32,000		0,0239	0,0225	0,0421	0,0428	0,1026	0,1924
7	205,600	1,842	3,330	5,520	6,980	16,930	32,400		0,0119	0,0208	0,0396	0,0387	0,0920	0,1726
8	231,500	1,890	3,420	5,880	7,150	17,090	32,900		0,0111	0,0194	0,0382	0,0357	0,0835	0,1571
9	248,100	1,972	3,490	6,090	7,200	17,300	33,600		0,0108	0,0187	0,0373	0,0338	0,0794	0,1504
10	274,500	2,140	3,620	6,530	7,340	17,670	33,700		0,0107	0,0178	0,0366	0,0315	0,0741	0,1378
11	304,100	2,210	3,750	7,030	7,590	18,400	34,080		0,0102	0,0169	0,0359	0,0298	0,0702	0,1271