



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

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO: SIMULACIÓN Y CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE TRANSPORTACIÓN
DE PULPA DE CARBÓN ANTRACITA POR TUBERÍA

AUTOR: Yoandri Carballo Mecias

TUTOR(ES): Ms.C. Benigno Leyva De la cruz

Ms.C Roilbert Lambert Sánchez

CURSO 2015-2016

“AÑO 58 DE LA REVOLUCIÓN”

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Yoandri Caraballo Mecias

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Yoandri Caraballo Mecias

Ms.C Roilbert Lambert Sánchez

Ms.C. Benigno Leyva De la cruz

PENSAMIENTO

Vladímir Ilich Uliánov, «Lenin»
Владимир Ильич Ленин



La práctica sin teoría es ciega y la práctica es fuente de teoría.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional y me enseñaron que para triunfar en la vida se requiere de mucho sacrificio, dedicación y apoyo de personas sinceras y respetuosas, es por eso que agradezco en primer lugar a:

- ❖ *A Dios por brindarme la oportunidad de hacer un sueño realidad.*
- ❖ *A la revolución, por permitirme forjarme como profesional en estos tiempos de lucha y sacrificios.*
- ❖ *A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el aprendizaje como estudiante en toda la carrera.*
- ❖ *A mis tutores y en especial al Ms.C. Benigno Leyva De la cruz por apoyarme durante la realización en este trabajo de diploma ya que sin su supervisión y dedicación no se habría podido desarrollar dicho trabajo.*
- ❖ *A mi madre Magdelin Mecias Frómeta, A mis abuelos Esteban Mecias y Candida Frómeta, A mis tíos Wilmer, Wilmanis, Elvis, a mi Padrastro Juan José Beneguí. Que han dado todo para obtener el triunfo y objetivo de mi vida.*
- ❖ *A mis compañeros de estudio que me brindaron su amistad.*
- ❖ *A todos mis amigos como Ernesto Tang, Rodney Correa, Charles Popi, Albert, Rodney Martínez, Geobanis, Rene, Javier, Salvador, Patao, Arienis y A mi querida amiga Marta Frómeta por apoyarme y recibir consejos como una madre, y muchos más que me brindaron su amistad incondicional.*

DEDICATORIA

El autor de este trabajo de diploma le quiere dedicar, a todas aquellas personas que de una forma u otra fueron partícipes de la realización del mismo:

A Dios el padre todo poderoso.

*A mi madre, en especial a mis abuelos y toda mi familia que con sus principios revolucionarios, me guiaron por el camino correcto en la formación profesional.
A los tutores, por el buen desarrollo de mi tesis de grado y su ayuda incondicional.*

A todos mis amigos

A nuestra Revolución, por las posibilidades que me ofrece.

Al 90 cumpleaños de nuestro comandante en jefe Fidel Castro Ruz.

A todos los vecinos de mi barrio que siempre estuvieron atento y preocupados por mí.

SÍNTESIS

Este trabajo surgió debido a la situación problemática asociada a la contaminación ambiental y el uso racional del agua en el proceso de lavado de carbón de la Planta de Benéfico ubicada en el Puerto Moa. El objetivo que se trazó consistió en efectuar la simulación y el cálculo de los parámetros de transportación por tubería de la pulpa para el tramo comprendido desde el sedimentador hasta el tanque de sedimentación. Se efectuó muestreo, medición de la densidad de la pulpa, cálculo del porcentaje de sólido, determinación de la viscosidad con un viscosímetro Brookfield DV-II+Pro y de la velocidad de sedimentación gravitatoria, estimación de la pérdida de presión y de la velocidad crítica de transportación por dos métodos diferentes y, cálculo económico. Se obtuvo como resultados principales que la pulpa muestra un comportamiento pseudoplástico para un 28 % de sólido; la pérdida de presión calculada fue de $-91\,559,25\text{ Pa}$, lo que indica que la pulpa puede evacuarse por gravedad desde el sedimentador; la velocidad crítica de transportación determinada indicó que no debe haber sedimentación en la tubería de descarga; la valoración de los resultados permitió plantear que por concepto de los ensayos realizados se genera un costo de 1 219,14 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales que se presentan en la instalación están dada por sobreconsumo de agua, generación de polvo, y descarga de partículas de carbón antracita al mar.

SYNTHESIS

This work happened due to the situation associated to environmental contamination and the rational use of the water in the process of washing of coal of the Beneficent Plant located in Puerto Moa. The objective that was drawn consisted in simulation and calculation of the parameters of transportation for piping of the pulp for the stretch understood from the settler tank to the settling tank. Sampling, measurement of the density of the pulp, calculation of the percent of solid, determination of the viscosity with a viscosimeter Brookfield DV-II+Pro were made, as well as of the gravitational settling rate, estimate of the pressure loss and of the critical speed of transportation for two different methods and the cost-reducing calculation. It was obtained as main results that the pulp shows a pseudo plastic behavior for 28 % of solid; the calculated pressure loss was of -91 559,25 Pa, which indicates that the pulp can empty out for gravity from the settler tank; the critical speed of determined transportation indicated that there should be no settling in the piping of unloading; the valuation of the results allowed putting forward that by way of the sold off essays generates a cost of 1 219,14 CUC plus 379,75 CUP and that the main environmental affectations that are presented in the installation are given by sorbet consume of water, power generation, and discharge of particles of coal anthracite to the sea.

Índice	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Introducción	4
1.2. Trabajos precedentes realizados en la instalación	4
1.3. Fundamentos teóricos sobre reología.....	5
1.3.1. Clasificación reológica general de los fluidos	8
1.3.2. Curvas de flujo.....	9
1.3.3. Factores que influyen en el comportamiento reológico.....	10
1.4. Revisión bibliográfica sobre transporte de hidromezcla por tubería	12
1.5. Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación	18
1.5.1. Antecedentes históricos del Método de Elementos Finitos.....	19
1.6. Proceso tecnológico de la planta de beneficio de carbón	20
1.6.1. Características de la materia prima	21
1.6.2. Característica del producto utilizable por la planta de sínter	21
1.6.3. Características del material desechado	22
1.7. Conclusiones del capítulo 1	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Introducción	24
2.2. Origen de las muestras de pulpas	24
2.3. Característica del sistema de sedimentación.....	25
2.4. Características granulométricas de la muestra.....	26
2.5. Densidad de la pulpa y porcentaje de sólido	27
2.6. Determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria	28
2.7. Determinación de los parámetros reológicos de la pulpa	30
2.8. Elaboración de los resultados	32

2.9. Determinación de la pérdida de presión y de la velocidad crítica de transportación	35
2.10. Procedimiento para la simulación de los parámetros de transportación de la pulpa por tubería en el ANSYS v 12.1	38
2.11. Análisis económico	39
2.12. Conclusiones del capítulo 2	40
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1. Introducción	41
3.2. Obtención de la traza de la tubería de descarga de la pulpa.....	41
3.3. Determinación de la densidad de la pulpa y del % de sólido	42
3.4. Determinación del comportamiento reológico y los parámetros reológicos de la pulpa.....	44
3.5. Análisis de la velocidad de sedimentación gravitatoria	46
3.6. Evaluación de la pérdida de presión que se produce en la tubería	49
3.7. Verificación de la velocidad crítica de transportación de la pulpa	50
3.8. Simulación de la pérdida de presión que se produce en la tubería	51
3.9. Valoración económica.....	53
3.10. Efectos ambientales.....	56
3.11. Conclusiones de capítulo 3.....	58
CONCLUSIONES GENERALES.....	60
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS	68

INTRODUCCIÓN

Con más de cincuenta años de experiencia en operaciones portuarias, la Empresa Puerto Moa "Comandante Raúl Díaz Argüelles" se encuentra localizada en la costa norte oriental de la isla de Cuba, en la provincia de Holguín. Está ubicada en una dársena artificial al sur de la ensenada de Yaguasey, Bahía de Cayo Moa, en los 20° 39' 30" de latitud Norte y a 74° 55' 40" de longitud Oeste. El canal y la dársena tienen una profundidad de 11,3 m por diseño mínimo. Este puerto, consta con varias plantas dentro de sus instalaciones como son: base de petróleo que abastece a todas las empresas del territorio, base de almacenamiento de amoníaco para el proceso CARON de la Empresa "Ernesto Che Guevara", planta de procesamiento de coral, tanques de almacenamiento y planta de azufre para el suministro de los diferentes procesos de la empresa "Comandante Pedro Soto Alba", además de realizar el secado del producto final de esta empresa. Esta instalación, cuenta con un campo de boyas para la recepción de combustibles y posee áreas de almacenamientos de petróleo, amoníaco y carbón, así como medios para la transportación terrestre y marítima.

La referida empresa está enfrascada en estos momentos en un proceso de ampliación de sus capacidades de producción y modernización de sus tecnologías para incrementar sus aportes económicos al estado. Posee un sistema de gestión de la calidad certificado acorde a los requisitos de la norma internacional para los procesos de manipulación de mercancías en puertos y almacenes, consolidación y desconsolidación de cargas e inspección de mercancías, así como las direcciones funcionales de apoyo a estos procesos.

Tiene aprobada la aplicación del perfeccionamiento empresarial y actualmente es una de las empresas que marchan a la vanguardia en la Provincia Holguín en la consolidación de los cuatro nuevos sistemas del perfeccionamiento empresarial tales como el Sistema de Gestión del Capital Humano, Sistema de Gestión de la Comunicación Empresarial, Sistema de Gestión de la Innovación y Sistema de Gestión Ambiental.

Actualmente la Empresa “Comandante Raúl Díaz Argüelles” suministra el carbón beneficiado a la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para el proceso de sinterización. Teniendo en cuenta los posibles incrementos productivos en los años venideros de la industria se requiere, la remodelación y la modernización del equipamiento para aumentar la eficiencia de esta planta, además de la automatización del proceso para que se realice un uso más racional de los recursos.

A este trabajo le es de importancia la investigación de la propuesta de un sistema eficiente de tratamiento de las aguas de lavado del carbón para ser utilizadas nuevamente en el proceso, el cual permitiría la disminución de la contaminación ambiental y el uso racional del agua, un recurso natural importante para la vida humana. La planta de beneficio de carbón requiere de una innovación en su tecnología para poder aumentar su competitividad, puesto que en la misma se ha evidenciado la siguiente **situación problemática**, de acuerdo a lo reportado por Matos (2015).

- ❖ Elevados volúmenes de agua que se vierten al mar, sin una valoración de la posibilidad de su reincorporación al proceso.
- ❖ Pérdida de carbón antracita que es arrastrado con el agua suministrada en el lavado del carbón, pues gran parte de la pulpa residual desemboca al mar.
- ❖ Afectaciones ambientales por el proceso de lavado de carbón mineral, pues la piscina de descarga de la pulpa se desborda, lo que tiene como consecuencia generación de polvos en los alrededores y la posibilidad de alteración del ecosistema.

Teniendo en cuenta los criterios expuestos se define como **problema a investigar**: insuficiente conocimiento del comportamiento reológico de la pulpa en relación con la variación de la concentración de sólido y de los parámetros de transportación en el lavado de carbón antracita de la UEB ubicada en el Puerto Moa.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: si se realiza la caracterización de propiedades de la pulpa es posible identificar los

modelos para la estimación de los parámetros de trasportación y fundamentar una propuesta tecnológica para la evacuación de éste.

Se establece como **objeto de la investigación**: La pulpa de la UEB ubicada en el Puerto Moa, y como **campo de acción**: las propiedades de la pulpa y los parámetros de transportación, se define como **objetivo general**: Realizar la simulación y el cálculo de los parámetros de transportación por tubería de la pulpa para el tramo que abarca desde el sedimentador hasta el tanque de sedimentación.

Objetivos específicos:

1. Fundamentar el desarrollo de la caracterización reológica y la simulación de los parámetros de transportación de la pulpa por tubería.
2. Caracterizar los materiales y procedimientos a emplear en la determinación de la reología y la simulación de los parámetros de transportación de la pulpa.
3. Efectuar un análisis de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta criterios técnicos, económicos y ambientales.

Tareas:

1. Realizar una revisión bibliográfica y sistematización sobre la reología, simulación y los parámetros de transportación de pulpa por tubería.
2. Caracterización de los materiales y procedimientos a emplear en la determinación de la reología de la pulpa y simulación de los parámetros de transportación.
3. Determinación de la reología de la pulpa que se genera en el sedimentador propuesto para la Planta de Beneficio ubicada en el Puerto Moa.
4. Efectuar el cálculo y simulación de los parámetros de transportación de la pulpa concentrada en el sedimentador de la Planta de Beneficio ubicada en el Puerto Moa.
5. Valoración económica y ambiental de los efectos asociados a los resultados esperados de la investigación.

CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Desde hace más de dos décadas se viene trabajando en Cuba en la introducción de nuevas técnicas para la optimización de los recursos en explotación con el objetivo de lograr el ahorro de recursos naturales garantizando un mejor aprovechamiento de los mismos; disminuir los consumos de energía eléctrica, sustituir importaciones e implementar mejoras en la calidad de los diferentes sistemas que componen a una instalación.

En la actualidad es muy necesaria la herramienta computacional para el cálculo de los parámetros de diseños, puesto que permiten diagnosticar posibles fallas, disminuir costos y optimizar procesos.

El objetivo de este capítulo es:

Realizar una revisión bibliográfica para mostrar fundamentos teóricos de la reología y la simulación de los parámetros de trasportación de la pulpa por tubería, para la UEB ubicada en el Puerto de Moa.

1.2. Trabajos precedentes realizados en la instalación

Noa (2011) realizó los cálculos del diseño de un transportador de banda, para su posible utilización en la planta de trituración de carbón ubicada en la Empresa Puerto Moa, después de obtener su productividad, seleccionar los elementos estandarizados del transportador y estandarizar las piezas de los otros transportadores. También determina las dimensiones necesarias de la tolva de alimentación considerando un procesamiento anual de 11 000 t, ya que se quería aprovechar el transportador existente.

Noa (2012) realizó una investigación en la instalación objeto de estudio donde efectúa la determinación de los parámetros tecnológicos de la planta, el cual analiza la capacidad de producción de la planta que limitan la eficiencia y rendimiento de los diferentes equipos montados debido a que se producen pérdidas económicas y contaminación en el medio circundante de la Empresa Puerto de Moa.

Existe un trabajo realizado por la Empresa de proyecto CEPRONIQUEL en la cual se realiza la ingeniería de detalle de la planta de carbón, para su modernización en la Empresa Puerto de Moa, así como un listado de materiales necesarios para la realización de proyecto, también presenta datos técnicos y productivos de la planta, sin la presentación de los cálculos de los principales parámetros de la planta, es decir, sin tener en cuenta la productividad del molino, los transportadores y la criba existente, además no tienen en cuenta otros parámetros del proceso como es la granulometría del carbón, consumo de agua y demás. Tampoco tiene presente el equipamiento ya existente para la realización de un análisis que le permita mejorar el rendimiento de la planta (Noa, 2012).

Matos (2015a) determinó la evaluación del sistema de bombeo de agua, en la planta de beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa (EPM) y brinda una propuesta de bomba para utilizar en el proceso, realizando una comparación técnico – económica entre la bomba que opera en la instalación y la bomba propuesta, donde el procedimiento empleado recoge los parámetros de costo de inversión y costo de bombeo entre ambas bombas.

Matos (2015b), en su tesis efectúa la propuesta de un sedimentador para la recuperación del agua de la planta de beneficio Puerto Moa. Recomendando la determinación de las propiedades reológicas de la pulpa para un 26 % de sólido.

De la revisión bibliográfica efectuada a trabajos precedentes realizados se determina que en ninguno de ellos se efectúa la simulación de los parámetros de transporte de la pulpa que se generaría en el sedimentador propuesto para la recuperación del agua que posee la pulpa que se desecha en el proceso de trituración y lavado de carbón en la planta de beneficio ubicada en la empresa Puerto Moa.

1.3. Fundamentos teóricos sobre reología

Para expresar la relación existente en estado estacionario entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad se han propuesto varias relaciones empíricas (modelos reológicos). Existen en la literatura una gran variedad de modelos propuestos. Los más difundidos son los siguientes de acuerdo con Garcell (1990).

Modelo de Oswald de Waele:

$$\tau_{yx} = K \frac{dV_x}{dy}^n \quad (1.1)$$

Esta expresión se conoce también como ley de potencia; se utiliza para describir el comportamiento de fluidos pseudoplásticos y dilatantes. En esta ecuación, n es el índice de flujo, el cual es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para $n < 1$ el fluido es pseudoplástico; para $n > 1$ el fluido es dilatante; y para $n = 1$ la ecuación se transforma en la ley de la viscosidad de Newton, siendo $K = \mu$.

K - es el índice de consistencia y constituye una medida del grado viscoso del material.

En general n varía poco con los cambios de temperatura y concentración; en cambio, K es muy afectado por las variaciones de estas variables.

Modelo de Bingham:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta_p \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) \quad (1.2)$$

Dónde: η_p es la viscosidad plástica y τ_0 es el esfuerzo cortante inicial.

Este modelo se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos ideales.

El esfuerzo cortante inicial y la viscosidad plástica cambian apreciablemente con la variación de la temperatura y de la concentración.

Para $\tau_0 = 0$, la expresión anterior se transforma en la ley de Newton, siendo

$$\eta_p = \mu$$

Modelo de Bulkley – Herschell:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.3)$$

Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales.

τ_0 , K y n tiene los mismos significados descritos en los modelos anteriores.

El modelo reológico que se ajusta al petróleo pesado según Laurencio y Delgado, (2008) es la ley de potencia (ecuación 1.4). Su viscosidad disminuye con el incremento del gradiente de velocidad y comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante.

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad (1.4)$$

Donde:

n - índice de flujo, adimensional.

K - índice de consistencia másica, Pa.s.

Según Turro (2002) la composición química de los elementos predominantes en la cola, son el hierro y la sílice con valores medio de 47,6 % y 12,45 % respectivamente. En los resultados obtenidos se observa que las partículas de tamaños menores de 44 μm , son mayoritarias y constituyen más del 60 % del volumen de la fase sólida, por lo que se puede decir que estamos en presencia de un comportamiento no newtoniano.

El comportamiento reológico depende fundamentalmente de la concentración de sólido y de las propiedades superficiales, dado el alto contenido de partículas finas. A concentraciones de 25 a 35 % en peso de sólidos el comportamiento es pseudoplástico, mientras que para concentraciones mayores fluyen como plásticos Bingham. Como la concentración de sólido de la cola excede al 35 % las curvas de fluido obtenidas se comportan similar a un plástico ideal Bingham (Garcell, 2001).

La estructura del modelo de Bingham es el siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1.5)$$

Donde: τ es el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 el esfuerzo cortante límite o inicial (Pa) que es necesario vencer para que el fluido fluya, μ_p es la viscosidad plástica (Pa.s) y $\dot{\gamma}$ el gradiente de velocidad de deformación.

1.3.1. Clasificación reológica general de los fluidos

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtonianos y no newtonianos, según Skelland (1970), Tejeda (1985), Perry (1988) y Díaz (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 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.

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

A su vez los fluidos no newtonianos se clasifican en tres grupos:

1. Viscosidad invariable con el tiempo

- a) Seudoplástico.
- b) Dilatantes.
- c) Plásticos reales.
- d) Plástico ideal.

2. Viscosidad dependiente del tiempo

- a) Tixotrópicos.
- b) Reopécticos.

3. Materiales viscoelásticos (líquidos de Maxwell)

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas. Las sustancias viscoelásticas fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, pero, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo cortante, el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos.

1.3.2. Curvas de flujo

A continuación en las figuras 1.1 y 1.2 se muestran las curvas de flujo que se representan gráficamente, al relacionar valores experimentales de τ contra $(-dv/dy)$. Así, se obtendrán curvas de flujo de diferentes formas en dependencia de la naturaleza reológica de los fluidos, según Turiño (1994) y Tejeda (1985).

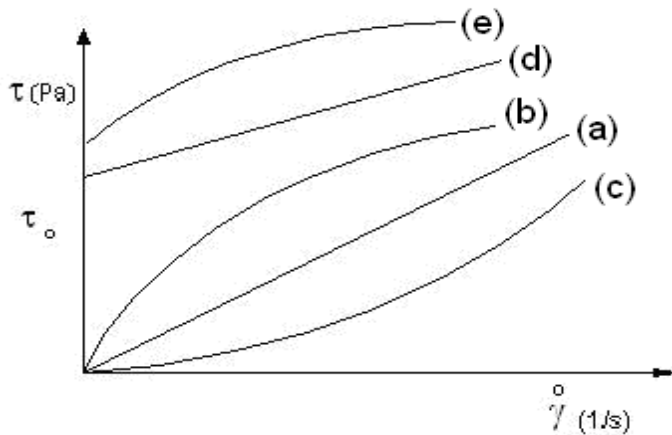


Figura 1.1. Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell (2001).

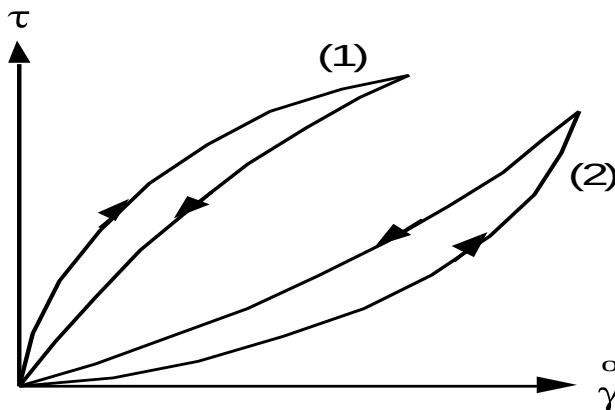


Figura 1.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo: 1- Tixotrópico; 2- Reopéctico.

Fuente: Garcell (2001).

1.3.3. Factores que influyen en el comportamiento reológico

La velocidad de sedimentación de los cuerpos depende considerablemente de la forma de los granos y de la temperatura del medio.

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, como es el caso de las pulpas de maghemita, según lo expresado por Garcell (1984).

En un trabajo realizado por Garcell (1992), se confirmó que las pulpas acuosas de laterita (limonita) preparadas con partículas mayores de 90 μm no logran formar una estructura y muestran un comportamiento newtoniano; en cambio, las preparadas con mezclas de partículas inferiores a 50 μm forman estructuras que comunican a la suspensión de propiedades plásticas, pudiendo ajustarse su curva al modelo de los plásticos Bingham.

Las pulpas de lateritas industriales muestran una distribución granulométrica en la que predominan las partículas con tamaños inferiores a 43 μm , de ahí el comportamiento típico de los plásticos Bingham de éstas.

Efecto 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, según Garcell (1993a), a) disminución de la viscosidad del medio dispersante; b) debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

Efecto de la composición mineralógica

Se ha comprobado que las pulpas de mineral laterítico pueden presentar un amplio rango de los valores del punto iso eléctrico (i.e.p.) o de su punto de carga cero (p.z.c)

en la dependencia de su composición mineralógica, según lo expresado por Garcell (1993b).

Este hecho hace que la viscosidad y estructuración de las pulpas de laterita sean, a su vez, una función del pH. Los cambios de la composición mineralógica, también influyen sobre las características de sedimentación de las suspensiones de laterita y sobre la estabilidad de las pulpas.

Efecto de la concentración de sólidos

Por lo general, en las suspensiones diluidas (con valores de concentración volumétrica ϕ inferior a 10 %) 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 pseudoplástico. 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 (Garcell 1993a).

En trabajos realizados por Garcell (1993) y Cerpa y Garcell (1998) con pulpas de lateritas pudo determinarse que, para concentraciones menores de 18 % en peso de sólidos, estas pulpas exhiben un comportamiento pseudoplástico que es prácticamente independiente de su composición mineralógica y para contenidos de sólidos en el orden de 22 % en peso se manifiestan propiedades plásticas, y a medida que se incrementa la concentración hasta 45 %, las viscosidades aumentan, dependiendo cada vez más de la mineralogía del sólido. En estas condiciones, las curvas de flujo, pueden ser ajustadas, en algunos casos, al modelo de Bingham, o al de Buckley – Herschel, en otros.

Efecto del pH

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas

finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoeléctrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas. Es por ello que las partículas se dispersan más fácilmente, y la suspensión adquiere más estabilidad y exhibe menores valores de viscosidad.

Otro aspecto importante está relacionado con la adsorción de iones en la superficie del sólido, lo cual provoca variación de la carga superficial de las partículas y desplazamiento del i.e.p. y de p.z.c, según Garcell (1994). En general, cuando no hay adsorción específica de iones, los valores del i.e.p y de p.z.c coinciden, sin embargo, cuando se adsorben cationes y aniones los valores del i.e.p y p.z.c experimentan desplazamiento hacia pH más ácidos o más básicos, trayendo consigo cambios en el comportamiento de la suspensión.

1.4. Revisión bibliográfica sobre transporte de hidromezcla por tubería

En el trabajo de Iakovlev *et al.* (1961), se exponen los resultados de estudios experimentales, los cuales demuestran que el movimiento de líquidos estructurales por tuberías se caracteriza por la presencia de un núcleo del flujo, que se mueve con velocidad constante como un cuerpo compacto.

Nedved (1966) presentó el informe final de los trabajos de búsqueda de fangos coralinos, donde se tomaron diferentes muestras para evaluar el contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), y granulométricamente por las mallas 20, 48, 100 y 200mesh.

Un importante aporte fue dado por Welty (1976) y Bandala (2001), al efectuar una evaluación del flujo del tipo laminar o viscoso, donde plantean que la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con

diferentes velocidades y además 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 y la aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la succión, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas.

Izquierdo (1989), Suárez (1998) y Turro (2002) han estudiado sistemas de hidrotransporte 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-matemáticos del movimiento de suspensiones minerales y su comportamiento en el movimiento de estas por tuberías, a partir del análisis experimental de las propiedades físicas, químicas y mecánicas, composición granulométrica y mineralógica, comportamiento reológico y factores que influyen sobre este. Nakayama (1980) realizó un estudio de las caídas de presión en una tubería para el transporte de pasta de pescado estableciendo valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham.

De tal manera para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados y diferentes factores han sido analizados. La caída de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama *et al.* (1980).

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.

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 “Pedro Soto Alba”. Moa Nickel SA contiene un elevado por ciento de partículas muy finas, lo que aporta cierta plasticidad,

comprobando que se puede clasificar como sólidos en suspensión con un comportamiento de fluidos no newtonianos, los cuales han sido pocos estudiados en la actualidad.

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 (1994), lo cual ocasiona errores de pronóstico de la curva de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de bombas centrífugas se han reportado numerosos trabajos que han colaborado en el desarrollo de esta esfera de la ciencia. Según lo planteado por Turiño (1994) no existe una teoría que permita predecir el comportamiento exacto de una bomba centrífuga 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.

Smoldiev, (1997) sobre el transporte hidráulico por tuberías para hidromezclas concentradas profundiza en aspectos que influyen en la destrucción de las tuberías y sus accesorios, entre los cuales se encuentra el pH, el proceso de elongación de las tuberías producto de la dilatación térmica de las mismas y la influencia que tienen la granulometría, la concentración de sólidos en la hidromezcla y la velocidad del fluido en la durabilidad.

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 a , b y c de la ecuación anterior con la velocidad específica con un nivel de confianza de un 95 %.

Díaz y Echavarría, (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 usar; incrementa 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.

Pérez, (2000), analiza procedimientos que permiten valorar y consecuentemente elegir las bombas centrífugas a partir de los datos técnicos aportados por el fabricante. La cavitación es un fenómeno frecuente en el trabajo de estas máquinas, influye considerablemente en los indicadores técnicos - económicos y depende no sólo del sistema, sino también de la calidad del diseño y construcción del equipo.

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.

Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudoplástico o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por los dispositivos de transporte. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden

ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológicas según Darby (2002).

Adhikari *et al.* (2000), incorporaron el concepto de 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 un 5,4 % con respecto a los valores experimentales.

Turro (2002) efectúa la caracterización granulométrica, química, mineralógica y magnética de la fase sólida de muestras industriales de la cola producida, mediante el proceso CARON, en la Empresa Niquelífera "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa, así como la caracterización reológica, de sedimentación y de estabilidad de las hidromezclas en medio amoniacal.

Hernández (2003) contribuye a realizar el gráfico que relaciona el factor de fricción en función del número de Reynolds y Hedstron.

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.

Laurencio *et al.* (2004) calculan y proyectan el esquema del transporte de hidromezclas de alta densidad (cola) en el proceso de carbonato amoniacal atendiendo a sus propiedades físico-mecánicas y de composición.

Martínez (2004) realiza un estudio sobre el estado actual del hidrotransporte de fluidos. Analiza, además, las propiedades físico mecánicas de las colas, se propone una metodología que permite determinar el régimen de trabajo del sistema actual de transporte de cola, así como el cálculo y proyección de las nuevas variantes determinadas para la hidrotransportación.

Jiménez (2005) enfoca su trabajo relacionado con el tema al caracterizar el cieno carbonatado con muestras industriales tomadas a la entrada de los reactores en la Planta de Neutralización. Las muestras fueron caracterizadas químicamente, mostrando una composición química media del 89,32 % de carbonato de calcio.

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 4 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.

Ávila *et al.* (2007) plantean modelos matemáticos para el transporte hidráulico de café a través de tubería PVC de 88,9 mm (3 pulg.), 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 hallado 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 88,9 mm.

Según Betancourt (2012) aportaron considerablemente los trabajos de Nekrasov (1986), que aborda la temática relacionada con la teoría general de la hidráulica, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con el transporte hidráulico y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de movimientos

hidráulicos con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como, en otras empresas donde se aplica este método de transporte.

Besio (2014) realizó una caracterización de la fluidodinámica que rige el transporte de pulpa de cobre a través de simulaciones computacionales que permiten comparar distintos modelos. El principal criterio de comparación entre modelos utilizado fue la pérdida de carga por unidad de longitud resultante. Obtiene como resultado una curva de pérdida de carga versus velocidad, de un caso particular, determinó a partir de un análisis de sensibilidad que el parámetro más influyente en los cálculos es el tamaño de partículas y que el modelo de mezcla simple es el único que se acerca a los resultados obtenidos en el análisis teórico previo. La curva obtenida fue validada con resultados reales de un sistema de tuberías existente. Recomienda para futuras investigaciones realizar análisis más específico de los coeficientes que rigen los modelos con el objetivo de poder adaptar los otros modelos de cálculo.

De la revisión bibliográfica efectuada de los trabajos precedentes anteriormente citados se determina que en ninguno de ellos se efectúa, una simulación de los parámetros de transportación de la pulpa que se generaría en el sedimentador propuesto para la Planta de Beneficio de Carbón ubicada en la Empresa Puerto Moa.

1.5. Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación

La combinación de la computadora y los software profesionales conforman la simulación digital, que es una herramienta capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Actualmente se han obtenido experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: Ansys, Cosmos Design y Matlab. La simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente (Boada, 2003).

Simulación: es el estudio de un sistema mediante un modelo. Si se refiere a un modelo matemático en general, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico.

Modelo matemático: es una representación simplificada de los aspectos del proceso real que está siendo investigado en términos de ecuaciones matemáticas u otras formulaciones de esta naturaleza que permiten llegar a resultados cuantitativos precisos.

Para construir un modelo matemático que represente el proceso bajo estudio se hace uso de los principios físicos y químicos así como de otras relaciones no fundamentales basadas en la experimentación para obtener las ecuaciones que constituyen el modelo. Estas ecuaciones son luego trabajadas para predecir qué efecto se logrará sobre el proceso al tomar los valores deseados en las variables de interés.

Para obtener el modelo matemático que represente el proceso que está siendo investigado es necesario seguir una trayectoria bien definida y desglosada en diferentes pasos adecuadamente ordenados los cuales constituyan un enfoque lógico y consistente. El tipo de estructura matemática se utilizará acorde al nivel de detalles del proceso que se representa, y debe ser el resultado de un compromiso entre la complejidad que tenga dicha descripción matemática al abarcar numerosos detalles del proceso y la simplicidad matemática requerida para un fácil y adecuado trabajo del modelo en su aplicación (Pero-Sanz et al. 2000).

1.5.1. Antecedentes históricos del Método de Elementos Finitos

El desarrollo y éxito del Método de Elementos Finitos se expande con el creciente desempeño de las computadoras digitales. En la antigüedad ya se habían empleado los “Elementos Finitos” para determinar un valor aproximado de π . Arquímedes usó ideas similares para determinar el área de figuras planas. Este hecho dio una premisa para el desarrollo del cálculo integral por Newton y Leibniz dos mil años después. Walter Ritz (1878–1909), físico suizo fue el primero en formalizar el Método de Elementos Finitos. Él propuso que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un relativamente pequeño número de “elementos”. Ritz desarrolló la formulación matemática del Método de Elementos Finitos, con base en el cálculo variacional. El método de Ritz es también

conocido como variacional o formulación clásica. La incorporación del cálculo matricial al Método de Elementos Finitos fue propuesta por el ingeniero ruso Boris G. Galerkin (1871-1945). Galerkin publicó sus primeros trabajos en base al método clásico durante su prisión en 1906 por orden del zar en la Rusia prerrevolucionaria. En muchos textos rusos el Método de Elementos Finitos de Galerkin se conoce como método de Bubnov-Galerkin. Él publicó un trabajo usando esta idea en 1915. El método también fue atribuido a Bubnov en 1913. La aplicabilidad del Método de Elementos Finitos fue detenida por lo extenso de los cálculos necesarios para resolver un sistema de un considerable número de elementos finitos. El desarrollo de los ordenadores digitales durante la década de 1950, permitió la aplicación del Método de Elementos Finitos a la solución de ecuaciones diferenciales (Pero-Sanz et al. 2000).

1.6. Proceso tecnológico de la planta de beneficio de carbón

El carbón llega al puerto de Moa a través de barcos provenientes de Viet Nam y otros países sudamericanos, estos barcos son descargados y la materia prima almacenada en las instalaciones del puerto de Moa. El flujo tecnológico de la planta (figura 1, Anexo 1) comienza después de la descarga del carbón en la plazoleta de recepción donde es trasegado por un cargador frontal hasta la tolva de alimentación. Desde esta tolva el carbón cae por gravedad en el transportador número 001, que es el encargado de alimentar la criba vibratoria SN-001, a este equipo se le inyecta agua a presión por medio de rociadores para eliminar todas las partículas menores a 1,19 mm evitando que las partículas más pequeñas ingresen a la atmósfera producto del aire de la costa, esta criba posee dos secciones de malla con aberturas cuadradas. Una sección con malla de dimensión menor a 1,19 mm y una segunda sección con malla de dimensión 2,5 a 4,75 mm y las fracciones mayores a 5 mm pasan al triturador de rodillo ML-001, aquí se reduce su tamaño hasta los 4,0 mm, donde son recirculadas nuevamente al proceso productivo por medio del transportador de banda 002 y de ahí a la criba vibratoria.

El carbón con granulometría inferior a 1,19 mm es arrastrado y descargado por una tubería hasta una caja colectora que lo suministra a una piscina donde se separa del

agua, este proceso ocurre por decantación, el agua con este carbón fino en cierta cantidad cae por reboso a las demás secciones de la piscina, donde se termina de descartar el carbón fino.

El producto clasificado (+2,5 ÷ 4,75 mm) es evacuado por medio del transportador de banda TR- 003 y este a su vez es el encargado de alimentar el producto final a la tolva de recepción o silos de almacenaje, la cual cuando se llena es abierta por la parte inferior, cayendo el material en los camiones que transportan el material hasta la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

1.6.1. Características de la materia prima

Según Noa (2012) la materia prima de esta planta, es el carbón de piedra, fundamentalmente antracita, que es importado desde Viet Nam y países latinoamericanos, es de alta calidad debido a su utilización en el flujo productivo (sínter) de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Esta materia prima tiene procedencia de la Corporación “COALIMEX” Viet Nam y sus características se muestran a continuación en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características de la materia prima.

Descripción del Material	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje %
Carbón Antracita No.4 ASTM Std	Dimensiones	15 ÷ 35	mm.	-
	Cenizas	-	-	4,68
	Material Volátil	-	-	6,87
	Contenido de azufre	-	-	0,50
	Valor Calórico	8 090	kCal/kg	
	Carbón fino			8,45
	Temperatura de fusión de la ceniza	1 400	°C	-
	Gravedad específica	-	-	0,950

1.6.2. Características del producto utilizable por la planta de sínter

A continuación, en la tabla 1.2 se muestra el producto utilizable por la planta de sínter de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” el cual debe poseer las siguientes características:

Tabla 1.2. Características del material utilizable.

Descripción del Material	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje %
Carbón Antracita No.4 ASTM Std	Granulometría	>2,5	mm	74
	Grueso	4,75	mm	5,0
	Fino	<1,19	mm	7,0
	Fino	>1,19	mm	14
	Humedad	-	-	2,0
	Gravedad específica	-	-	1,10

1.6.3. Características del material desechado

La planta de beneficio en el proceso de obtención de trituración y lavado del carbón desecha una granulometría del carbón que no se puede utilizar en el proceso de sinter de la industria ya que es rechazado por ser partículas muy finas que rápidamente se queman, se disuelven y se convierten en cenizas. A continuación la tabla 1.3 muestra las características de este material.

Tabla 1.3. Características del material desechado.

Descripción del Material	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje (%)
Carbón Antracita No.4 ASTM Std	Granulometría	1,19	mm	8,45
	Grueso	>1,19	mm	1,45
	Fino	<1,19	mm	7,0
	Humedad	-	-	4,0
	Gravedad específica	-	-	1,10

1.7. Conclusiones del capítulo 1

1. Se efectuó una revisión de trabajos precedentes realizados en la Unidad Empresarial de Base (UEB) ubicada en la “Empresa Puerto Moa”, determinándose que en ninguno de ellos se efectúa la simulación de los parámetros de transportación de la pulpa del sedimentador propuesto para la recuperación del agua que posee la pulpa.
2. Se exponen fundamentos teóricos referidos a la reología de un fluido, una revisión bibliográfica sobre el transporte de hidromezcla por tuberías, y principios básicos sobre la simulación de procesos con el empleo del Método de Elementos Finitos que sirven de base al análisis, explicación y simulación de los parámetros de transportación del fluido objeto de estudio.
3. Se desarrolló una descripción del flujo tecnológico de la UEB objeto de estudio, lo que permite dar una panorámica de la instalación y facilita la contextualización del conocimiento.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La fundamentación teórica acerca de los conocimientos del comportamiento y propiedades de transporte de la pulpa, contribuyen 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 fluidos en la industria cubana.

En este capítulo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan la simulación del proceso teniendo en cuenta el material, 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 los métodos y procedimientos experimentales para la obtención de las principales propiedades y modelos matemáticos que permitan la simulación del transporte eficiente por tubería de la pulpa residual objeto de estudio a partir de la propuesta del sistema de sedimentación efectuada.

2.2. Origen de las muestras de pulpas

En el análisis experimental se utilizó muestra de polvo tomados en el proceso de lavado de carbón del proceso tecnológico de la planta de beneficio de carbón ubicada en la “Empresa Puerto Moa”, y en el área de sedimentación de la pulpa. A continuación en la tabla 2.1 se relacionan los puntos de toma de muestras utilizados para el análisis.

Tabla 2.1. Puntos de toma de muestras.

Muestras	Punto de toma de muestra
M - 1	Tubería de descarga de la pulpa
M - 2	Área de sedimentación de la pulpa

❖ Toma y preparación de las muestras

Para la toma de la muestra 1 se hizo un compósito de la pulpa evacuada por la tubería de descarga, este compósito se obtuvo con tomas realizadas cada 2 horas

Trabajo de Diploma en Opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Yoandri Caraballo Mecias

por un período de 2 días, esta pulpa se homogenizó y almacenó en una cantidad de 5 litros para la realización de los experimentos.

Para realizar el estudio se tomaron muestras de polvo representativas en el lugar señalado en la tabla 2.1. Del polvo que llega al área de sedimentación contenida en el rechazo del proceso, se tomó la muestra 2 y para ello se aplicó el método de puntos propuesto por Mitrofanov (1984). El número de puntos de obtención de muestra dependió de la regularidad del área de origen de la muestra y la dimensión de la superficie sujeta al muestreo. Esta última tiene un área de aproximadamente 150 m². La masa que se tomó en cada punto es de aproximadamente 60 kg, hasta obtener una cantidad lo suficientemente grande, la cual posteriormente se sometió a un proceso de homogenización y cuarteo como se muestra el esquema de la figura 2.1.

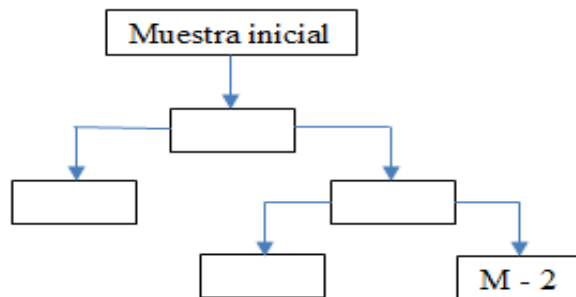


Figura 2.1. Esquema de preparación de la muestra 2

Al finalizar el proceso se seleccionó una muestra de aproximadamente 4 kg, la cual se almacenó en jaba de nailon teniendo en cuenta la reserva necesaria para el desarrollo de los experimentos.

En este trabajo se utilizó la muestra M2, pues se trabajó sobre la base de los resultados obtenidos por Matos (2015) que empleó la muestra M1.

2.3. Característica del sistema de sedimentación

El sistema de sedimentación propuesto para la reutilización del agua que contiene la pulpa residual, que se genera producto al lavado del carbón antracita en la Planta de Beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa, posee la característica estructural que se muestran en los anexos 2, 3, 4 y 5.

La figura 2 se refiere a la tubería definida para el transporte de la pulpa desde la criba hasta el sedimentador, mientras que la mostrada en la figura 3 caracteriza la tubería para la recirculación del agua de rebozo del sedimentador hacia la criba.

La tabla 2.2 muestra las características de operación de la instalación que fueron tenidas en cuenta para el cálculo de los parámetros de trasportación de la pulpa y la simulación, según lo reportado por Matos (2015).

Tabla 2.2. Características de operación de la instalación.

Parámetros	Valor	Unidad de medida
Gasto de la pulpa espesada	9,81	m ³ /h
Porcentaje de sólido de la pulpa en la tubería de entrada al sedimentador	3	%
Porcentaje de sólido de la pulpa en la salida del sedimentador	26	%
Altura del orificio de salida de la pulpa	1,5	m
Altura del sedimentador	6,100	m
Diámetro del sedimentador	5,740	m

2.4. Características granulométricas de la muestra

La pulpa que se evacua en la planta de benéfico objeto de estudio posee la granulometría que se refiere en la figura 2.2, de acuerdo a lo reportado por Matos (2015). Se determina que la pulpa presenta una granulometría de 0,15 mm en el diámetro de la clase de 80 % cernido. Este tamaño de partícula da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas de hidromezclas dispersas gruesa según Turro (2002).

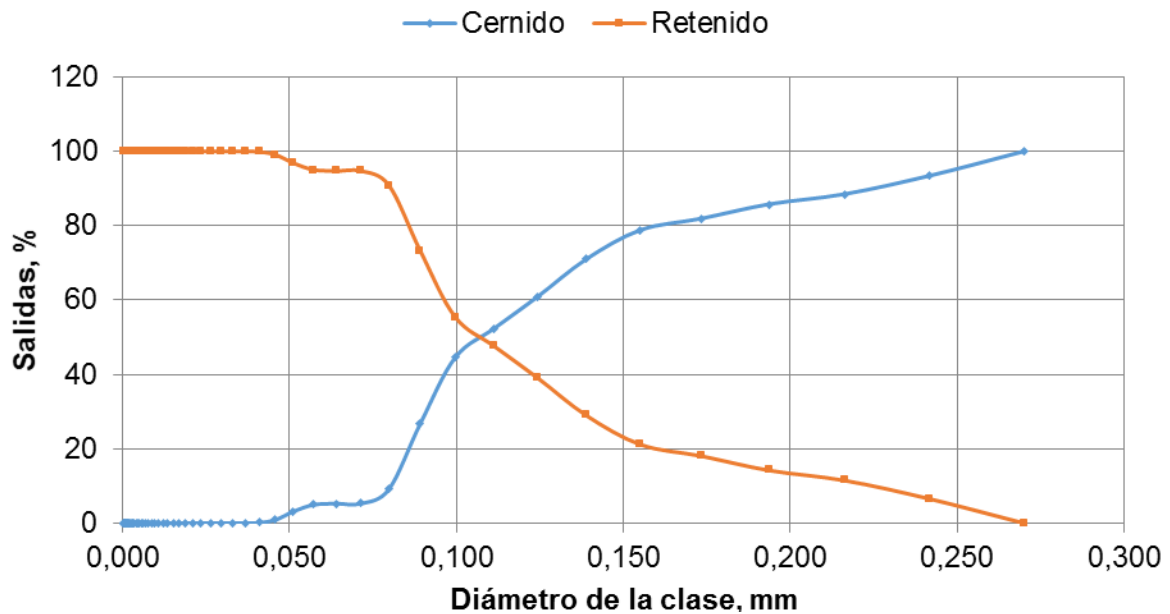


Figura 2.2. Curvas de características sumarias de la pulpa analizada, con el analizador de partículas.

Fuente: Matos (2015).

2.5. Densidad de la pulpa y porcentaje de sólido

Para determinar la densidad de la pulpa se utilizó el método volumétrico, a través del procedimiento siguiente: Se tomó una probeta de capacidad 250 ml y se pesó; se cogió la muestra de la pulpa y se homogenizó mediante agitación; se vertió la pulpa en la probeta hasta el volumen de 25 ml y se pesó la probeta con la pulpa, obteniéndose los resultados en gramos.

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

$$\rho_l = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde:

m – Es la masa total de la pulpa, g.

V – Es el volumen total de la pulpa, g.

ρ_l – Es la densidad de la pulpa, g/cm^3 .

Por ciento de sólido

Con los datos obtenidos de la densidad de la pulpa se calculó el por ciento de sólido por la fórmula expuesta en Martínez (2009), la cual se muestra a continuación.

$$S = \frac{\rho_l - \rho_{H_2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \quad (2.2)$$

El cálculo del por ciento de sólido permitió definir la concentración en peso y volumétrica de la pulpa. Las expresiones que se utilizaron en el cálculo de ambas concentraciones son las que se refieren a continuación, de acuerdo con Turro (2002); García *et al.* (2014); Mariño *et al.* (2009).

$$C_v = S \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (2.3)$$

$$C_p = \frac{m_s}{m_T} = S \quad (2.4)$$

Donde:

C_v – Es la concentración volumétrica de la suspensión.

C_p – Es la concentración en peso de la suspensión.

m_s – Es la masa del sólido, g.

m_T – Es la masa total de la suspensión, g.

2.6. Determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria

La curva de sedimentación se realizó de forma experimental, según norma EN-14702-1-2007, y para ello se toma una probeta de 1 000 ml, muestras de pulpa, y un reloj. Las figuras 2.3 y 2.4 muestran la probeta y el reloj utilizado en la prueba efectuada para la determinación de la velocidad de sedimentación que caracteriza a la pulpa objeto de estudio.



Figura 2.3. Probeta.



Figura 2.4. Reloj.

La probeta permitió observar el comportamiento de la altura de la interface sólido-líquido en cada instante de tiempo, mientras que el reloj propició registrar el tiempo transcurrido entre cada una de las observaciones realizadas.

El comportamiento de la sedimentación de la pulpa objeto de estudio se caracterizó por medio de la velocidad de sedimentación, la cual puede ser definida desde el punto de vista matemático como la rapidez con que varía la altura de la interface en la unidad de tiempo (ecuación 2.5). El análisis matemático de la velocidad de sedimentación incluyó el ajuste de modelos matemáticos a la curva de altura de la interface (Z) contra tiempo (t).

$$v_{sed} = \frac{dZ}{dt} \quad (2.5)$$

Para el análisis físico matemático del proceso de sedimentación se tuvo en cuenta lo estudios realizados por Pavlov (1981), Mariño *et al.* (2009). El modelo propuesto para la determinación de la velocidad de sedimentación, el cual se conoce como la Ley de Velocidad de Stokes, es el que se refiere a continuación:

$$\omega_{sed} = \frac{d^2(\rho_s - \rho_m)g}{18\mu_m} \quad (2.6)$$

Donde:

ω_{sed} — Es la velocidad de sedimentación en caída libre, cm/s

d — Es el diámetro medio de las partículas de mayor tamaño, cm

ρ_s – Es la densidad aparente del sólido, g/cm³

ρ_m – Es la densidad del medio dispersante, g/cm³

μ_m - Es el coeficiente dinámico de viscosidad del medio dispersante, Pa*s

g – Es la aceleración de caída libre, cm/s².

Los resultados obtenidos de la velocidad de sedimentación con arreglo a la ecuación 2.5 fueron contrastados con los que se predicen por medio de la ecuación 2.6, para determinar el margen error.

2.7. Determinación de los parámetros reológicos de la pulpa

Reología utilizando el viscosímetro brookfield DV-II + Pro

La prueba reológica de la pulpa objeto de estudio se realizó en el laboratorio perteneciente a la empresa del CEDINIQ con asistencia de sus técnicos brindando un mayor garantía del ensayo realizado, utilizando el viscosímetro Brookfield DV-II + Pro, que se muestra en la figura 2.5, con un husillo LV1 61 y baso de precipitado de 600 ml.



Figura 2.5. Viscosímetro programable Brookfield DV-II + Pro.

Fuente: Matos (2015).

El DV-II+Pro puede utilizarse como un viscosímetro Brookfield tradicional para la recogida de datos de viscosidad a una sola velocidad a través de su sencillo teclado;

tan sólo es necesario seleccionar el husillo y la velocidad y leer el valor en la pantalla.

Datos del husillo utilizado en la prueba

Los datos fundamentales del husillo que se utilizó en la prueba reológica realizada al a la pulpa objeto de estudio se muestra a continuación en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros del husillo.

Parámetros	Valor
Código en pantalla	61
TK	0,09373
SMC	6,4
SRC	0

Las siguientes fórmulas se utilizan para calcular y mostrar los datos del viscosímetro después de obtener cada paquete de datos del DV-II+Pro (Manual M/03-165, 2006).

Viscosidad

$$cP = 100 \cdot TK \cdot SMC \cdot \text{Par de torsión}/n \quad (2.7)$$

$$\text{Velocidad de corte (1/seg)} = \text{RPM} \cdot \text{SRC} \quad (2.8)$$

$$\text{Tensión de corte (Dina/cm}^2\text{)} = TK \cdot SMC \cdot \text{SRC} \cdot \text{Par de torsión} \quad (2.9)$$

Donde:

RPM = Velocidad actual del husillo del viscosímetro en RPM.

TK = Constante del par de torsión del viscosímetro del Apéndice D, tabla D2.

SMC = Constante actual de multiplicación del husillo del Apéndice D, tabla D1.

SRC = Constante actual de la velocidad de corte del husillo del Apéndice D, tabla D1.

Par de torsión = Par de torsión actual (%) del viscosímetro expresado como un número entre 0 y 100.

Prueba reológica:

Para la construcción de la curva de flujo se utilizó las ecuaciones 2.8 y 2.9, pues se despejo en la 2.8 el código SRC del husillo y se sustituyó el resultado en la ecuación 2.9, llegando a la siguiente ecuación, que permite el trazado de la curva de flujo y la clasificación reológica de la pulpa.

$$\tau = \frac{TK \cdot SMC \cdot \text{Par}}{n} \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.10)$$

Los resultados que se obtuvieron por medio de la ecuación 2.11 permitieron determinar la viscosidad aparente de la pulpa. La ecuación que sirvió de base al cálculo es la que se muestra a continuación.

$$\mu_a = \mu_{mezcla} = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy}\right)} \quad (2.11)$$

Los resultados obtenidos de la viscosidad fueron contrastados con los que se predicen por medio de la ecuación que se muestra a continuación en la tabla 2.4, para determinar el margen error.

Tabla 2.4. Modelos para la estimación de la viscosidad dinámica.

Modelos	Parámetros	V, %	Ec.
$\mu_{mezcla} = \mu \cdot (1 + 4,5 \cdot Cv)$ Frente: Kasatkin(1985)	μ_{mezcla} -viscosidad de la mezcla, Pa*s. μ -viscosidad del medio dispersante, Pa*s. Cv-concentración en volumen, %	Cv > 10	(2.12)

2.8. Elaboración de los resultados

Determinación de la cantidad de mediciones

La cantidad de mediciones a realizar se determinaron sobre la base del sentido común y el modelo matemático propuesto por Miller *et al.* (2005). Comúnmente se efectúan tres mediciones de una cierta cantidad de magnitud para evaluar la medida de la tendencia central y, para determinar el tamaño de una muestra en un muestreo aleatorio simple se ha propuesto el siguiente modelo:

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (2.13)$$

Donde:

Trabajo de Diploma en Opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Yoandri Caraballo Mecias

n - Es el tamaño de la muestra.

$Z_{\alpha/2}$ - Es el estadístico de la distribución probabilística de Gauss. Se determinó en la tabla 3 de Miller *et al.* (2005).

σ - Es la desviación típica poblacional.

E - Es el error máximo de estimación. Se determinó despejando en la ecuación 2.13.

Verificación de la normalidad

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectuó aplicando las expresiones matemáticas que se referencian a continuación, (Miller *et al.*, 2005).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.14)$$

$$LX, \text{máx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.15)$$

$$LX, \text{mín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.16)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.17)$$

Donde:

$\bar{X}$ – Es la media aritmética de las mediciones realizadas del correspondiente parámetro.

$LX, \text{máx}$ – Es el límite superior de tolerancia para el correspondiente parámetro.

$LX, \text{mín}$ – Es el límite inferior de tolerancia para el correspondiente parámetro.

t - Es el estadístico de la distribución probabilística de student.

S - Es la desviación típica.

n - Es el total de observaciones.

Se tuvo en cuenta que las expresiones anteriores son válidas si la muestra es pequeña, esto es menor que 30. En caso contrario se debe cambiar el estadístico t por el estadístico Z de la distribución de Gauss.

En caso que existieron valores anormales, los mismos se eliminaron procediendo como se indica a continuación, de acuerdo con Hernández (1986):

1. Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan $\bar{X}$ y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).
2. Se establece el intervalo dado por la ecuación: $LT = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$ y, se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido.
3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar como es lógico, los valores anormales.

Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, el cual se basa en el ajuste de una curva al conjunto de puntos ordenados, tal que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller *et al.* 2005).

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el del coeficiente de determinación, de Student, y el de Fisher. Se consideró que el ajuste es significativo: según el criterio de Student, cuando se cumplió que p-Valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher crítico o tabulado y según el criterio del coeficiente de determinación, cuando el valor de este estuvo próximo a 1 o - 1.

En el Software Excel se utilizó la herramienta para análisis de datos que contiene programado la opción regresión. La instrucción regresión permitió realizar el ajuste de curva con el método de mínimo cuadrado y chequear los tres criterios de bondad del ajuste.

Determinación del error relativo

Esto se aplica para determinar la validez de los resultados que se obtienen cuando se aplica el procedimiento utilizado y los que son universalmente reconocidos como correctos, se expresa como la diferencia porcentual entre el valor obtenido y el "valor correcto" (Hernández, 1986).

El error relativo puntual se calculó a través de la siguiente expresión, la cual fue tomada de Hernández (1986).

$$E_{rel} = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_2} \right| \cdot 100\% \quad (2.18)$$

Donde:

X_1 - Valor obtenido.

X_2 - Valor correcto.

X_2 - Error relativo puntual, %.

2.9. Determinación de la pérdida de presión y de la velocidad crítica de transportación

Pérdida de presión

La pérdida de presión que se produce en la tubería durante el transporte de la pulpa, se determinó considerando el modelo que se elaboró a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, momento y energía y los efectos de los esfuerzos de mezclado entre capaz de fluidos, de acuerdo con lo expuesto por García (2003); Mansoori (2005) y Japper *et al.* (2009). El modelo que se utilizó en el cálculo es el que se expone a continuación.

$$\Delta P = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right) \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{Re^b} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \right] \quad (2.19)$$

Donde:

K - Es el índice de consistencia, $Pa \cdot s$

L - Es la longitud de la tubería, m.

n - Es el índice de flujo.

Trabajo de Diploma en Opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Yoandri Caraballo Mecias

D- Es el diámetro de la tubería, m.

Q- Es el gasto volumétrico que fluye por la tubería, m³/s.

a y b – Son coeficientes que dependen del régimen de flujo y de la característica propia de este. Para el caso del petróleo cubano adquieren los valores de 0,14 y 0,2 respectivamente (Laurencio *et al.* 2012).

ρ – Es la densidad del fluido a la temperatura y presión de referencia, kg/m³.

ρ_f – Es la densidad final del fluido, kg/m³.

ρ_i – Es la densidad inicial del fluido, kg/m³.

g- Es la aceleración de un cuerpo en caída libre, m/s².

ΔZ – Es la diferencia de nivel entre la entrada y la salida, m.

Re– Es el número de Reynold.

El modelo anterior una vez identificado y validado, tienen gran aplicación práctica en la obtención de la variación de presión en tuberías que transportan fluidos con comportamiento pseudoplástico, de acuerdo a lo reportado por Laurencio *et al.* (2012).

El número de Reynolds se determinó utilizando la siguiente ecuación, de acuerdo a lo expuesto en Laurencio *et al.* (2012).

$$Re = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \cdot \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (2.20)$$

La pérdida de presión debido a resistencias locales se determinó utilizando la expresión expuesta en Nekrasov (1986), la cual se muestra a continuación.

$$\Delta P_{Local} = \sum \zeta_{Local} \cdot \left(\frac{v^2}{2} \right) \cdot \rho \quad (2.21)$$

Donde:

ΔP_{Local} – Es la pérdida local, Pa.

$\sum \zeta_{Local}$ – Es la sumatoria de los coeficientes de pérdida local.

v – Es la velocidad media del fluido, m/s.

ρ – Es la densidad del fluido que se transporta, kg/m^3 .

Integrando la ecuación 2.21 con la 2.19 se obtiene la ecuación general para la determinación de las pérdidas totales que se producen en la tubería, tal como se indica a continuación.

$$\Delta P_{\text{Total}} = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right) \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{\text{Re}^b} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \right] + \sum \zeta_{\text{Local}} \cdot \left(\frac{v^2}{2} \right) \cdot \rho \quad (2.22)$$

Se asumió la condición para la cual la pulpa puede evacuarse a gravedad sobre la base del criterio de que las pérdidas totales en la tubería sean negativas.

Velocidad crítica de transportación

La velocidad crítica de transportación se determinó usando una correlación para la velocidad crítica de deposición que obtuvieron Oroskar y Turian para la data de 864 experimentos de diferentes características, incluyendo el efecto de la viscosidad del flujo de transporte (Turian y Hsu, 1987), la cual se muestra a continuación.

$$\frac{V_D}{\sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot (S_s - 1)}} = X_1 \cdot C_v^{X_2} \cdot (1 - C_v)^{X_3} \cdot \left(\frac{\rho_l \cdot D \cdot \sqrt{g \cdot D \cdot (S_s - 1)}}{\mu_l} \right)^{X_4} \cdot \left(\frac{dp}{D} \right)^{X_5} \quad (2.23)$$

$X_1 = 1,795 \ 1$, $X_2 = 0,108 \ 7$, $X_3 = 0,250 \ 1$, $X_4 = 0,001 \ 79$, $X_5 = 0,066 \ 23$

Donde:

μ_L - Viscosidad dinámica del líquido, Pa.s.

C_v - Concentración de sólidos en volumen.

dp - Diámetro de la partícula, m.

D - Diámetro de la tubería, m.

ρ_L - Densidad del líquido, kg/m^3 .

S_s - Densidad específica de los sólidos.

g - Gravedad, m/s^2 .

Además, teniendo en cuenta que la ecuación 2.23 fue determinada para un fluido particular, se decidió verificar la velocidad crítica de transportación con el empleo de la ecuación 2.24 que se plantea a continuación, la que también es válida para un fluido particular. La determinación de la velocidad crítica por las indicaciones metodológicas para el cálculo técnico económico de los sistemas de transporte por tuberías se efectúa por medio de la siguiente expresión (Martínez 2004; García *et al* 2014).

$$V_{Crit} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w} \cdot \sqrt{\rho_{polvo} - 1} \cdot \sqrt[6]{S} \quad (2.24)$$

Donde:

g – Aceleración de la gravedad, m/s^2 .

D – Diámetro de la tubería, m.

w – Grosor hidráulico o velocidad transitoria, m/s.

ρ_{polvo} – Densidad del polvo, kg/m^3 .

S – Concentración de peso en sólido, %.

K_d – Coeficiente empírico corregido, que depende de la granulometría.

$V_{Crít.}$ – Velocidad crítica de transportación, m/s.

El coeficiente empírico que tiene en cuenta la influencia de la granulometría del material se determina utilizando la tabla 2.5, que se muestra a continuación.

Tabla 2.5. Coeficiente empírico, que depende de la granulometría del material (d_{cp}).

$d_{cp}(mm)$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
K_d	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,83	0,77	0,73	0,74

2.10. Procedimiento para la simulación de los parámetros de transportación de la pulpa por tubería en el ANSYS v 12.1

Teniendo en cuenta que la ecuación 2.19 requiere de ajuste para cada fluido en particular para asegurar su validez, se decidió efectuar una simulación con el Método de Elementos Finitos programado en el Software de diseño ANSYS v 12.1. El resultado obtenido en la simulación se comparó con lo que se predican cuando se emplea la referida ecuación (ecuación 2.19), mediante la ecuación 2.18 de cálculo del error relativo puntual.

Para la comparación de la pérdida de presión que se calcula por medio de la ecuación 2.19 y la que se determina a través de la simulación se consideró igualdad de condiciones, esto es: igual propiedades del material que se transporta, igualdad de condiciones de flujo, e igualdad de geometría. Sobre esto último, la geometría, cabe destacar que se modeló un tramo de tubería recto en aras de cumplir con el objetivo y facilitar el proceso de simulación.

Para poder llevar a cabo de una manera organizada la obtención de los resultados de la simulación y su análisis, el proceso de simulación se desarrolló siguiendo los pasos lógicos del procedimiento que se refiere a continuación, en orden cronológico.

1. Se construyó un modelo geométrico de un tramo horizontal de tubería. Esto incluyó la introducción del valor del diámetro de la tubería y su longitud.
2. Se especificó las propiedades del material que se transporta a través de la tubería, lo que implicó definir el modelo reológico y los parámetros reológicos que lo caracterizan, el porcentaje de sólido que contiene la mezcla, la granulometría y la densidad del sólido.
3. Se especificó una superficie de referencia.
4. Se aplicó la presión en cada extremo del tubo.
5. Se definió el mallado del elemento.
6. Se ejecutó el cálculo de la simulación según el modelo definido para la situación estudiada.
7. Análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

2.11. Análisis económico

El objetivo de este análisis consistió en determinar el desembolso de efectivo que se debe hacer para lograr la realización de los experimentos e indicar el valor práctico directo de los resultados obtenidos. Esto constituye un punto de partida importante para evaluar la factibilidad económica de la presente investigación. El costo total de los experimentos se determinó a través de la siguiente expresión.

$$CT = C\rho + CR + Cs \quad (2.25)$$

Donde:

Trabajo de Diploma en Opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Yoandri Caraballo Mecias

CT – Es el costo total.

$C\rho$ – Es el costo de la determinación de la densidad de la pulpa.

CR – Es el costo del ensayo reológico.

Cs – Es el costo de la prueba de sedimentación.

El benéfico de los resultados de la investigación se puede apreciar en el hecho de que la administración de la Planta de Beneficio de Carbón puede disponer de los resultados alcanzados, sin haber realizado ningún desembolso de efectivo al respecto.

2.12. Conclusiones del capítulo 2

1. Se plantean las características de los medios e instrumentos utilizados en la determinación de la densidad, la reología de la pulpa y la velocidad de sedimentación; así como las características del sistema de sedimentación objeto de estudio, lo que constituye la base técnico material para el cálculo y simulación de los parámetros de transportación de la pulpa de la planta de beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa.
2. Se determinan las expresiones matemáticas y procedimientos a emplear en la determinación de la densidad, la reología de la pulpa, la velocidad de sedimentación gravitatoria, el cálculo y simulación de los parámetros de transportación y la valoración económica, lo que permitió obtener y analizar de manera organizada los resultados.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

El estudio de las propiedades físicas y reológicas de la pulpa residual generado en la Planta de Beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa es de importancia para la caracterización del material objeto de estudio y la evaluación de los parámetros de transportación con vista al posterior perfeccionamiento de su hidrotransporte por tubería. Los estudios experimentales de las propiedades de transporte de la pulpa residual, posibilitan una mejor selección de modelos para la adecuación de los métodos de cálculo.

El método de correlación, aplicado en parte de los resultados del trabajo, tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase en procesos físicos. Sin embargo, su precisión es adecuada si se utilizan dentro del intervalo de aplicación en el cual fueron desarrollados.

Relacionado con el planteamiento anterior, se propone como **objetivo del capítulo**: Realizar un análisis de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los procedimientos y expresiones que se plantearon en el capítulo anterior, con vista a sustentar el conocimiento adquirido sobre las propiedades de la pulpa residual objeto de estudio, el cálculo y simulación de los parámetros de transportación por tubería.

3.2. Obtención de la traza de la tubería de descarga de la pulpa

La figura 3.1 muestra el esquema de la tubería de descarga de la pulpa que se genera en la Planta de beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa. La misma se construyó a partir de la proyección realizada en el trabajo de Matos (2015), (Ver Anexo 4). Los datos que se indican en el esquema constituyen fuente de información para la posterior evaluación de la pérdida de presión que se produce en la tubería durante el transporte de la pulpa.

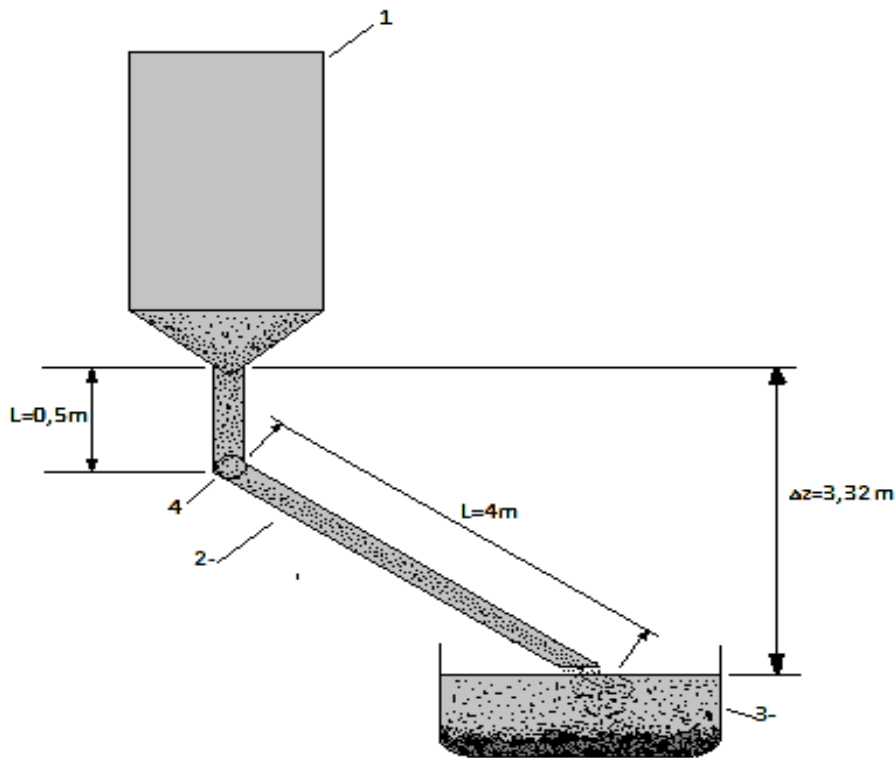


Figura 3.1. Esquema de la tubería para la evacuación de la pulpa.

En la tabla 3.1 se refieren datos de interés relativo a la figura 3.1 y a la instalación objeto de estudio, que unidos a los ya planteados anteriormente contribuyen a la determinación de la velocidad crítica de transportación que caracteriza a la pulpa objeto de estudio.

Tabla 3.1. Datos de la tubería de evacuación.

Indicación	Denominación
4	Codo de 45°
2	Tubería
1	Sedimentador
3	Laguna de sedimentación

3.3. Determinación de la densidad de la pulpa y del % de sólido

Densidad de la pulpa

La aplicación del procedimiento para la determinación de la densidad de la pulpa permitió obtener con el empleo de la ecuación 2.1 y las 2.13 a la 2.17 que la densidad media de la pulpa es de 1 004,06 kg/m³ y que el proceso de medición se

efectuó bajo control estadístico, puesto que al repetir el experimento no se manifiestan diferencias entre los resultados obtenidos. Esto indica que existe una probabilidad del 95 % de que si se efectúan las mediciones de la densidad de la pulpa bajo circunstancias similares a las que se efectuó este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 999,54 58 kg/m³ a 1 008,58 kg/m³.

La tabla 3.2 muestra el valor obtenido en la comparación de la pulpa preparado con arreglo las ecuaciones 2.1 a la 2.4 para un 28 % de sólido y una densidad aparente del carbón antracita de 1 026 kg/m³ y, el obtenido para verificación con arreglo a la ecuación 2.1. El cálculo del error relativo se realizó aplicando la ecuación 2.18.

Tabla 3.2. Resultado del porcentaje de sólido.

Parámetro	Real	Teoría	Error relativo, %
Densidad de la pulpa, kg/m ³ , para un S= 28 %	1 004,06	1 007,15	0,3

En la tabla anterior se observa que hay alta coincidencia entre los resultados obtenidos en la determinación de las densidades en este trabajo según el procedimiento descrito y el que se obtuvo operando de conjunto con las expresiones desde la 2.1 a la 2.4, pues el margen de error es de 0,3 %.

Determinación del % de sólido

La tabla 3.3 muestra los valores de la densidad de la pulpa, de la concentración volumétrica y en peso obtenidos para el porcentaje de sólido analizado, utilizando la ecuación 2.2 a la 2.4 expuesta anteriormente.

Tabla 3.3. Densidad de la pulpa, concentración volumétrica y en peso para el porcentaje de sólido.

Porcentaje de sólido(S),%	Densidad de la pulpa, kg/m ³	Concentración volumétrica, %	Concentración en peso, %
28	1 004,06	27	28

3.4. Determinación del comportamiento reológico y los parámetros reológicos de la pulpa

La curva de flujo de la pulpa pronosticada y los modelos matemáticos ajustados para el 28 % de sólido se muestran a continuación en la figura 3.2. Esto se elaboró a partir del ploteo de los datos obtenidos en la prueba reológica y utilizando la instrucción línea de tendencia programada en el software Excel. La gráfica permite visualizar el comportamiento del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

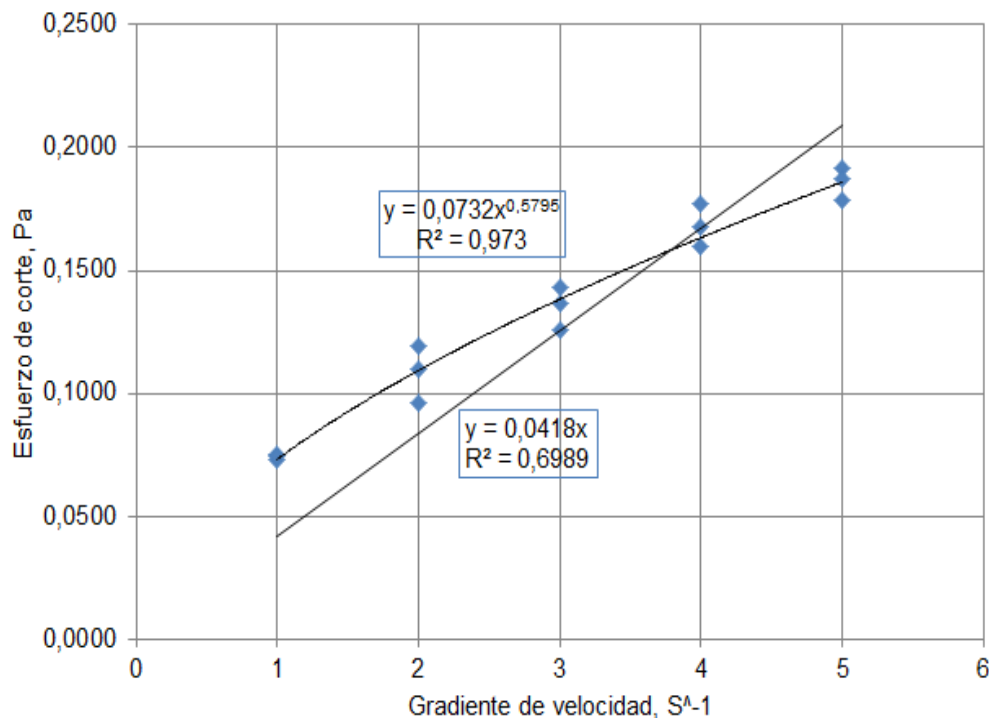


Figura 3.2. Curva de flujo de la pulpa para un 28 % de sólido.

En la figura 3.2 se aprecia que el esfuerzo de corte de la pulpa objeto de estudio no puede ser determinado a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal (una recta), puesto que el coeficiente de determinación difiere considerablemente de la unidad (0,70); en cambio el modelo de potencia es adecuado pues posee un coeficiente de determinación de 0,97.

Los resultados obtenidos en el cálculo del modelo exponencial por línea de tendencia se realizaron utilizando la instrucción regresión, indicándose que la representación de la curva de flujo por un modelo de potencia es significativa, puesto que el criterio de Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Yoandri Caraballo Mecias

Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 ($7,67 \cdot 10^{-21}$), el de Fisher un valor de cálculo (8 356,69) superior que el Fisher crítico ($1,20E-19$) y el coeficiente de correlación de 0,98. A partir de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra a continuación.

$$\tau_{x,y} = 0,0732 \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{0,5795} \quad (3.1)$$

Donde:

$\tau_{x,y}$ — Es el esfuerzo de corte, en Pa.

$\frac{\partial v_x}{\partial y}$ — Es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Por lo tanto se indica que la pulpa residual objeto de estudio muestra un comportamiento reológico pseudoplástico, ya que puede ser representada la curva de flujo de este por un modelo de potencia, significativamente. El índice de consistencia (K) según lo planteado anteriormente es entonces de $0,0732 \text{ Pa} \cdot s$ y el índice de flujo(n) es igual a 0,579 5.

Determinación del error relativo

La tabla 3.4 muestra los resultados de las viscosidad aparente determinado por medición y la calculada por medio del modelo propuesto por Einstein en 1911(Kasatkin, 1985), así como el error relativo calculado con arreglo a la ecuación 2.18. Se observa que al aplicar la referida ecuación se incurre en un error relativo puntual de 60 %, lo que demuestra la necesidad de hacer mediciones de viscosidad para este caso particular y evaluar la posibilidad de adecuar el modelo propuesto en Kasatkin (1985).

Tabla 3.4. Comparación de valores de viscosidad.

Viscosidad calculada, cP Ecuación 2.12, Kasatkin (1985)	Viscosidad medida, cP	Error relativo, %
123,725	49,280	60

La viscosidad medida que se indicó en la tabla anterior fue determinada a partir del promedio de las viscosidad aparentes obtenidas en la experimentación. Se verifica que todos los puntos que se promedian estén incluidos en el rango de normalidad que se estableció por medio de las ecuaciones 2.14 a la 2.17. El rango de normalidad calculada para la viscosidad aparente es el siguiente: 19,15 a 79,42 cP, para un nivel de confianza del 95 % y 14 grados de libertad.

El bajo valor de la viscosidad aparente de la pulpa puede estar dado por el tamaño de las partículas presentes en la suspensión, pues la composición granulométrica en el d_{80} cernido es de 0,15 mm (150 μ m), según lo reportado por Matos (2015).

3.5. Análisis de la velocidad de sedimentación gravitatoria

Se efectúan tres mediciones de la altura de la interface en cada instante de tiempo para considerar el tratamiento de la incertidumbre en las mediciones con arreglo a la ecuación 2.13 a la 2.17; se decide el intervalo de 0 a 20 minutos para efectuar las observaciones. Se determina el valor promedio de las alturas y se calcula el rango de normalidad para cada experimento desarrollado, todo lo cual estuvo bajo control estadístico al no mostrarse diferencias significativas entre los resultados obtenidos. Esto indica que existe una probabilidad del 95 % que si se llevan a cabo las mediciones de la altura de la interface del proceso de sedimentación en situación similar a la que estuvo presente en este ensayo el resultado se obtenga en los rangos de normalidad establecidos.

La curva de sedimentación de la pulpa se muestra a continuación en la figura 3.3, la cual se elaboró a partir de los datos obtenidos en la prueba de velocidad de sedimentación y utilizando el tabulador Microsoft Excel. La ilustración permite visualizar el comportamiento de la altura de la interface generada en el proceso de sedimentación de la pulpa.

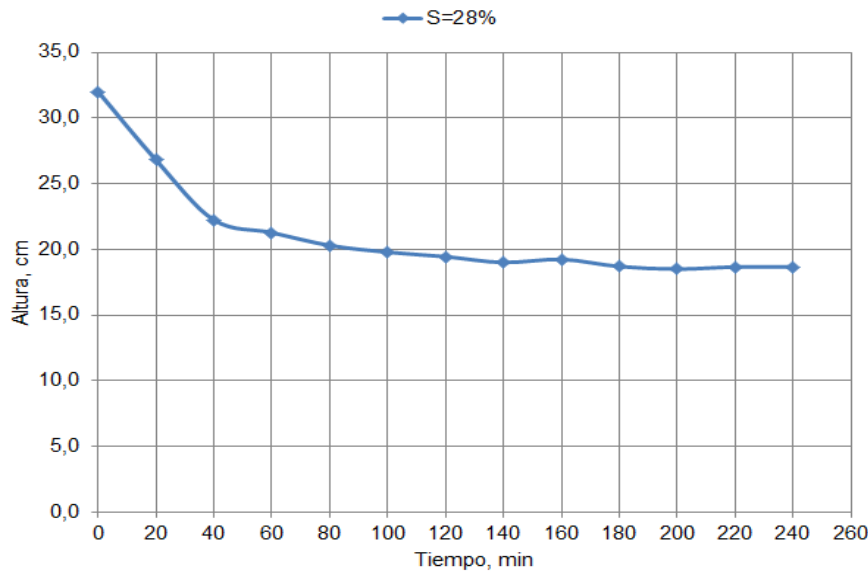


Figura 3.3. Curva de sedimentación de la pulpa.

El comportamiento de la altura de la interface refleja las tres fases por las que transita el proceso de sedimentación, la fase de sedimentación libre que se manifiesta durante los 40 primeros minutos de iniciado el proceso, la fase de sedimentación contrariada que se extiende desde 40 minutos hasta 200 minutos luego de iniciado el proceso y la fase compresiva que se estudia en el tiempo que media desde 200 hasta 240 minutos.

La velocidad de sedimentación de la pulpa objeto de estudio puede ser determinada a partir del ajuste de la curva de altura de la interface contra el tiempo. La primera derivada del modelo obtenido será la velocidad de sedimentación, tal como se define en la ecuación 2.5.

Los resultados del cálculo realizado para el ajuste indican que la representación de la curva de la figura 3.3 por un modelo lineal es significativa si se considera el criterio de Student y el de Ficher, pero la correlación es baja ya que el coeficiente de correlación difiere considerablemente de la unidad. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la intersección ($7,87E-10$) y para la variable ($1,42E-03$), el de Ficher un valor de cálculo (17,860) mayor que el Ficher crítico (0,001) y el coeficiente de correlación de 0,79.

Determinación de la velocidad de sedimentación de caída libre

El cálculo realizado para el ajuste, indica que la sección de la curva de la figura 3.3 correspondiente a la etapa de sedimentación libre puede ser representada por un modelo lineal significativamente, considerando el criterio de Student, el de Fisher y el del coeficiente de correlación. El criterio de Student indica una probabilidad menor a 0,05 para la intersección (0,004 8) y en cuanto a la variable (0,0242), el de Fisher un valor de cálculo (690,95) superior a el Fisher crítico (0,02) y el coeficiente de correlación de 0,999. Los cálculos efectuados permiten definir el siguiente modelo para la fase de caída libre.

$$Z = 31,89 - 0,24 \cdot t \quad (3.2)$$

Donde:

t – Es el tiempo que se considera después de iniciado el proceso, min.

Z – Es la altura de la interface, cm.

El criterio de la primera derivada aplicado a la ecuación 3.2 permite obtener la velocidad de sedimentación que caracteriza a la pulpa objeto de estudio en la fase libre. La velocidad de sedimentación según lo planteado anteriormente es de -0,24 cm/min.

Determinación del error relativo

La tabla 3.5 muestra los resultados de la velocidad de sedimentación obtenida por medición y la calculada por medio del modelo de la Ley de Velocidad de Stokes, así como el error relativo calculado con arreglo a la ecuación 2.18. Se observa que al aplicar la referida ecuación se incurre en un error de 87 %, lo que demuestra la necesidad de hacer mediciones de velocidad de sedimentación para este caso particular y evaluar la posibilidad de adecuar el modelo propuesto en Pavlov (1981), Mariño *et al.* (2009).

Tabla 3.5. Comparación de valores de velocidad de sedimentación.

Velocidad estimada, cm/s (Ecuación 2.6)	Velocidad medida, cm/s	Error relativo, %
0,032 cm/s	0,004	87

El resultado mostrado en la tabla anterior indica que este caso la ecuación que expresa a la Ley de Velocidad de Stokes no es aplicable para la estimación de la velocidad de sedimentación.

3.6. Evaluación de la pérdida de presión que se produce en la tubería

En la figura 3.1 se mostró el esquema de instalación que trasiega la pulpa generada en la Planta de Beneficio objeto de estudio, desde el sedimentador hasta la laguna de sedimentación. Como se puede observar se indica con un número cada uno de los componentes que constituyen a la instalación y las cotas de dimensiones fundamentales. La tabla 3.6 refiere los datos de la instalación y de la pulpa que sirven de base al cálculo de la pérdida de presión que se produce durante el transporte. Los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los accesorios se escogieron a partir de las recomendaciones dadas en Nekrasov (1986).

Tabla 3.6. Datos de la instalación y de la pulpa.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
D	0,100	m
L	4,50	m
n	0,579 5	-
K	0,073 2	Pa*s
ρ	1 004,06	kg/m ³
a	0,14	-
b	0,2	-
g	9,81	m/s ²
ΔZ	-9,32	m
$\zeta_{codo - 45^\circ}$	0,35(1 codo)	-
$\zeta_{est.b}$	0,5	-
$\zeta_{ens.b}$	1	-
Q	0,0027	m ³ /s
v	0,344	m/s

En la tabla 3.7 se muestra los resultados del cálculo realizado para la determinación de la pérdida de presión. En la misma se muestra las referencias de las ecuaciones utilizadas, los parámetros involucrados, los valores numéricos determinados y las unidades de medidas en que se expresa cada parámetro.

Tabla 3.7. Resultados del cálculo de la pérdida de presión.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de medida
2.19	Re	1 727	-
2.18	ΔP	-91 669	Pa
2.20	ΔP_{Local}	109,905	Pa
2.21	ΔP_T	-91 559,25	Pa

Los resultados mostrados en la tabla anterior muestran el cálculo realizado para un transporte de pulpa por tubería que posee un número de Reynolds de 1 727, por lo que el régimen de flujo es laminar. Se infiere que no es necesario utilizar una bomba para la evacuación de la pulpa de la instalación, puesto que el valor de las pérdidas de presión total es negativo, que significa una potencial de presión hidrostático disponible en la instalación superior a las pérdidas necesarias en la tubería.

El cálculo realizado de la pérdida de presión que se produce en la tubería de descarga de la pulpa es un referente numérico importante para la toma de decisiones, pero se requiere de ser consecuente con la decisión final a tomar pues las expresiones utilizadas poseen coeficientes que son válidos para fluidos distintos al de este trabajo.

3.7. Verificación de la velocidad crítica de transportación de la pulpa

En la tabla 3.8 se muestra los resultados de la determinación de la velocidad de la velocidad crítica de transportación que caracteriza a la pulpa objeto de estudio sobre la base de las ecuaciones 2.23 y 2.24. La velocidad crítica calculada según la ecuación 2.23, es inferior a la que se transporta la pulpa por lo que existe garantía de que no haya sedimentación en la tubería durante el transporte (0,0804 es inferior a 0,344). Por otra parte la determinación de la velocidad critica a través de la ecuación 2.24 también indica que la velocidad crítica calculada es inferior a la que se transportará la pulpa, por lo que existe garantía de que no haya sedimentación en la tubería durante el transporte (0,06 es inferior a 0,344); para el cálculo de la velocidad crítica de transportación se escogió un valor de K_d igual a 0,15, extrapolando a partir de los valores contenidos en la tabla 2.5, ya que el diámetro de las partícula de la pulpa esta fuera del rango contemplado en la referida tabla.

Tabla 3.8. Resultados del cálculo de la velocidad crítica de transportación.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de medida
2.23	V_D	0,0804	m/s
2.24	$V_{\text{Crít.}}$	0,06	m/s
2.18	Error relativo	34	%

En la tabla anterior se observa la falta de coincidencia entre los resultados que se obtienen cuando se calcula la velocidad crítica de transportación con los dos modelos propuestos, lo cual está dado en el hecho que las expresiones matemáticas definidas fueron obtenidas para fluidos con características particulares, por lo que al ser extendida a otros fluidos introducen imprecisiones en el resultado. Todo lo cual sugiere la necesidad de realizar adecuaciones o correcciones a las referidas ecuaciones para este caso.

3.8. Simulación de la pérdida de presión que se produce en la tubería

La tabla 3.9 refiere los datos del modelo que se construyó para la simulación del transporte de la pulpa. El análisis se efectúa considerando un tramo recto horizontal, se calcula la pérdida de presión por dos procedimientos, y se determina el margen de error en el que se incurre con vista a determinar la validez de los resultados alcanzados sobre la base de la coincidencia del cálculo y la simulación.

Tabla 3.9. Datos para el modelo.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
D	0,100	m
L	5	m
S	28	%
n	0,579 5	-
K	0,073 2	Pa*s
d_{80}	0,150	mm
ρ	1 004,06	kg/m ³
a	0,14	-
b	0,2	-
g	9,81	m/s ²
Q	0,0027	m ³ /s
v	0,344	m/s

En la tabla 3.10 se muestra los resultados del cálculo realizado para la determinación de la pérdida de presión. En la misma se muestra las referencias de las ecuaciones

utilizadas, los parámetros involucrados, los valores numéricos determinados y la unidad de medida en que se expresa cada parámetro.

Tabla 3.10. Resultados del cálculo de la pérdida de presión.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de medida
2.20	Re	1 727	-
2.21	ΔP	144	Pa

El resultado de la pérdida de presión mostrado en la tabla 3.10 indica que se requiere de una presión superior a 144 Pa para provocar el flujo de pulpa, según las condiciones definidas para el modelo utilizado en el cálculo.

Resultado de la simulación

La figura 3.4 muestra los resultados de la simulación realizada con el empleo del software de diseño ANSYS v 12.1. Se observa que la presión varía desde un valor máximo de 1,440e+02 Pa a un mínimo de 9,320e-01 Pa, lo que indica que en el extremo de la salida de la tubería (extremo derecho de la figura) se predice un exceso de presión por encima de la presión atmosférica. Se infiere que bajo las condiciones definidas, la pulpa fluye a lo largo de los 5 metros de tubería.



Figura 3.4. Comportamiento de la presión en el interior de la tubería.

Los resultados de la simulación indican que se genera una variación de la presión entre los dos extremos de la tubería de 143,07 Pa, el cual muestra coincidencia con el que se calculó a través de la ecuación 2.18, lo cual da validez y otorga garantía en cierta medida a los resultados obtenidos en el cálculo.

Determinación del error relativo

La tabla 3.11 muestra los resultados de pérdida de presión determinado por medio de la ecuación 2.19 y la obtenida por simulación, según el modelo creado al respecto, así como el error relativo calculado con arreglo a la ecuación 2.18. Se observa que entre los dos métodos aplicados existe un error relativo puntual de 0,65 %.

Tabla 3.11. Comparación de los valores de la pérdida de presión.

Pérdida de presión, Pa Ecuación 2.18	Pérdida de presión, Pa Simulación	Error relativo, %
144	143,07	0,65

No obstante a los resultados mostrados en la tabla anterior es adecuado realizar una validación de los resultados obtenidos aplicando un método experimental, puesto que en los dos métodos utilizados en el presente trabajo se parte de un modelo que introduce simplificaciones de la realidad.

3.9. Valoración económica

El contenido profesional del ingeniero lo constituye la solución de problemas ingenieriles. La esencia de la tarea o del problema ingenieril es el cambio o transformación de una situación o estado, o de la forma y el contenido a otro. En cualquier caso, para que haya problema ingenieril es imprescindible que existan múltiples variantes, las cuales no son igualmente ventajosas o evidentes, es decir, es necesario que exista más de una solución posible y que estas no sean evidentes. Al mismo tiempo, debe ser no sólo técnicamente correcta, sino económicamente racional y segura desde el punto de vista de la protección del individuo contra daños que limiten la integridad física, la salud, o provoquen accidentes fatales y por extensión del medio que le rodea. Queda claro que además de los conocimientos

técnicos, el ingeniero no puede prescindir de los conocimientos económicos que hacen de sus soluciones, la solución de un problema.

En la valoración económica pueden existir elementos perceptibles por una comunidad como perjuicio o beneficio, pero que al momento de su ponderación en unidades monetarias, sea imposible o altamente difícil materializarlo. En la economía contemporánea se hacen intentos, para llegar a aproximarse a métodos de medición que aborden los elementos cualitativos, pero siempre supeditados a una apreciación subjetiva de la realidad.

No contemplar lo subjetivo o intangible presente en determinados impactos de una inversión puede alejar de la práctica la mejor recomendación para decidir, por lo que es conveniente intentar alguna metodología que inserte lo cualitativo en lo cuantitativo.

En este trabajo se realiza la determinación de propiedades de la pulpa, la simulación y cálculo de los parámetros de transportación por tubería para la Planta de Beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa. La metodología desarrollada permite realizar la valoración del estado del arte relativo al tema en cuestión, considerando los trabajos precedentes y tratando de poner de relieve los aspectos más distintivos de cada uno para aplicar la sugerencia oportuna. Se hace una caracterización de los materiales y métodos a emplear para la producción del conocimiento científico, teniendo como punto de referencia las normas y los principios científicos de la interrelación dialéctica teoría-práctica. Se plantea una valoración de los resultados obtenidos, poniendo de manifiesto la importancia de estos tanto en el plano conceptual como práctico y es posible la utilización de la metodología para otras instalaciones similares.

Las curvas de flujo elaborada es importante para el diseño y selección de los equipos a emplear para la evacuación y/o tratamiento de la pulpa o en la evaluación de la instalación existente, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que el material fluya por la tubería de diámetro conocido; para la clasificación de la pulpa reológicamente y encontrar el modelo adecuado; para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin

producciones “batch” y que hayan sido fabricadas sustituyendo algún componente por otro, de acuerdo a lo reportado por Toose (1995).

La prueba de sedimentación permitió construir la curva del comportamiento de la interface de la pulpa en función del tiempo, para poder luego calcular la velocidad de sedimentación como la tangente a cada punto de la referida curva. Dicha curva posibilitó evaluar una expresión matemática para la estimación del parámetro de transportación conocido como velocidad crítica de transportación, lo que permite conformar un criterio de garantía para el funcionamiento normal de la instalación.

El cálculo realizado de los parámetros de transportación tributa a ofrecer una garantía sobre el funcionamiento normal de la instalación, ya que se maneja el criterio de que exista el potencial hidráulico adecuado para efectuar el flujo a gravedad y que no haya obstrucción de la sección transversal de la tubería por el fenómeno de la sedimentación.

Sobre la base de la ecuación 2.25 se efectúa el análisis económico del costo en el que se incurre por concepto de los experimentos realizados. En la tabla 3.12 se muestra el resultado de la evaluación del modelo para estimación del costo de la investigación. En la tabla el valor de la investigación está dado por el costo en el que se incurre por concepto de realizar los ensayos para determinar las propiedades de la pulpa. El establecimiento de las cifras referidas a los ensayos realizados se efectuó sobre la base de los precios otorgados por el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) que realiza dichos trabajos.

Tabla 3.12. Costo de la investigación.

Parámetros	Valor, CUC	Valor, CUP	Proveedor
Valor de la investigación($I_{inv.}$)			
Pruebas realizadas:			
Ensayos de densidad de la pulpa	552,44		ISMM
Ensayos de reología	112,65	379,75	CEDINIQ
Ensayos de sedimentación	554,05		ISMM
Costo total de la investigación	1 219,14	379,75	

Se debe señalar que lo expuesto anteriormente se hace a manera de mostrar una referencia sobre la implicación económica asociada a los resultados directos de la investigación. La valoración económica comprende todos los gastos en lo que se incurre, algunos de los cuales son difíciles de cuantificar, así como el análisis de la factibilidad económico financiera, lo que no solo se limita al estimado del costo de la inversión inicial sino también a considerar los criterios de recuperación de la inversión y las ganancias que se obtienen.

3.10. Efectos ambientales

Se entiende por impacto ambiental el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad, a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base, debido a la acción antrópica o a eventos naturales (Kramer, 2012).

Las acciones humanas, motivadas por la consecución de diversos fines, provocan efectos colaterales sobre el medio natural o social. Mientras los efectos perseguidos suelen ser positivos, al menos para quienes promueven la actuación, los efectos secundarios pueden ser positivos y, más a menudo, negativos. La evaluación de impacto ambiental (EIA) es el análisis de las consecuencias predecibles de la acción; y la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) es la comunicación previa, que las leyes ambientales exigen bajo ciertos supuestos, de las consecuencias ambientales predichas por la evaluación.

A esta investigación le es de vital importancia la zona costera adyacente a la instalación objeto de estudio la cual ha recibido durante varios años, el vertimiento de estos contaminantes sin tratar, eliminando la posibilidad de explotación por otros sectores como la pesca y la recreación, por solo citar dos ejemplos. El tratamiento de residuales es de vital importancia para el medio ambiente, ya que brinda la eliminación de efectos contaminantes en el mismo con la implementación del presente trabajo; donde se elimina la carga contaminante que impacta al litoral costero adyacente. Por otra parte, brinda la posibilidad de la reutilización del agua

tratada en instalación dentro de la empresa donde no se requiera índice de calidad de agua superiores.

Desde el punto de vista social, el concepto de optimización de consumo de agua se transcribe a la formación de capacidades de agua potable que puede estar disponible a la población o a nuevos proyectos en desarrollo en el territorio garantizando una mayor disponibilidad de la misma en el municipio alegando al uso racional de la misma.

El uso de floculante para los parámetros de explotación por diseño del sedimentador en el proceso de sedimentación de la pulpa estudiada, no tiene incidencias en el medio ambiente el cual es un producto soluble sin la presencia de ningún químico contaminante (Matos, 2015). Las soluciones no son más corrosivas que el agua el cual es benéfico en cualquier proceso de separación sólido-liquido.

El análisis de las implicaciones ambientales de las acciones del hombre conjunto al desarrollo industrial y la sociedad, permite trabajar al mismo en énfasis de disminuir la contaminación circunstancial. Donde mantiene estrictamente relacionado el factor económico ya que se ve comprometido en desarrollar nuevas técnicas que permitan la disminución de efectos contaminantes para la capa de ozono.

UEB de beneficio de ubicada en la EPM

La UEB de beneficio de carbón ubicada en la EPM actualmente tiene incidencia perjudicial en relación al medio ambiente, debido a las afectaciones que se producen, tala como: Impactos nocivos al ambiente por el proceso de lavado de carbón mineral, pues la piscina de descarga del agua utilizada en el proceso se desborda, lo que tiene como consecuencia generación de polvo y el agua residual desemboca al mar con partículas que deja el proceso.

Se estima la posibilidad de disminuir las afectaciones que se producen en la UEB, debido a que se prevé:

- ❖ Disminuir los volúmenes de pulpa a evacuar desde la instalación, ya que con el sistema de sedimentación propuesto gran parte del agua contenida en la pulpa se reincorpora al proceso.
- ❖ Aumentar la disponibilidad de agua para la instalación y la comunidad, ya que gran parte del agua que posee la pulpa es reincorporada al proceso.
- ❖ La instalación proyectada debe garantizar que no exista la sedimentación de la pulpa en la tubería.

De todo lo planteado anteriormente se infiere que la propuesta de un sistema de sedimentación para la UEB es una solución tecnológica que se proyecta como posible desde el punto de vista técnico y razonable desde el punto de vista económico, social y ambiental.

3.11. Conclusiones de capítulo 3

1. Se realiza la caracterización reológica y la determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria de la pulpa objeto de estudio para un 28 por ciento de sólido, obteniéndose como resultado que su curva de flujo se ajusta significativamente a un comportamiento pseudoplásticos, los modelos que describen la curvas, y se demuestra la necesidad de realizar correcciones a modelos propuestos por otros autores para el cálculo de la viscosidad aparente y la velocidad de sedimentación gravitatoria.
2. Se calculó la pérdida de presión que se produce en la tubería de descarga de la pulpa y, la velocidad crítica de transportación por dos métodos. El cálculo de la pérdida de presión indicó que la pulpa puede evacuarse de la instalación a gravedad puesto que la pérdida de presión total ofreció un valor negativo de -91 559,25 Pa y, el de la velocidad crítica de transportación que no debe haber sedimentación en la tubería de descarga debido a que la pulpa se prevé transportar a velocidad superior a la velocidad crítica.
3. Se efectuó la simulación de la pérdida de presión en el Software ANSYS v 12.1, sobre la base de un modelo creado para comparar la idoneidad de la fórmula

utilizada en el cálculo de la pérdida de presión, determinándose un error relativo de 0,65 % entre los resultados obtenido por ambos métodos.

4. Se efectúa una valoración de los resultados obtenidos, de las implicaciones económicas y ambientales asociadas al desarrollo del tema de investigación, determinándose que por concepto de los ensayos realizados se incurre en un costo de 1 219,14 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales que se presentan en el tubo de descarga de la pulpa están dada por sobreconsumo de agua, generación de polvo, y descarga de partículas de carbón antracita al mar.

CONCLUSIONES GENERALES

1. La revisión bibliográfica en los trabajos precedentes realizados sobre el transporte de hidromezcla permitió determinar que en ninguno de ellos se hace una simulación a partir de la determinación de propiedades físicas y reológica para la pulpa de la UEB ubicada en el Puerto Moa.
2. La determinación de las propiedades físicas y reológica de la pulpa indica que la densidad de la pulpa es de $1\,004,06\text{ kg/m}^3$ para el 28 % porciento de sólido, la curva de flujo reflejó un comportamiento pseudoplástico con un coeficiente de correlación del 97,3 %, y se obtuvo una velocidad de sedimentación gravitatoria de 0,24 cm/min.
3. El cálculo de la pérdida de presión indicó que la pulpa puede evacuarse de la instalación a gravedad puesto que la variación de la presión total ofreció un valor negativo de -91 559,25 Pa y, el de la velocidad crítica de transportación que no debe haber sedimentación en la tubería de descarga debido a que la pulpa se prevé transportar a velocidad superior a la velocidad crítica.
4. La simulación del comportamiento de la pérdida de presión en el Software ANSYS v 12.1 sobre la base de un modelo creado para comparar la idoneidad de la fórmula utilizada en el cálculo de la pérdida de presión, permitió determinar un error relativo de 0,65 % entre los resultados obtenido por ambos métodos, lo que indica un aumento de la garantía de los resultados obtenidos en el cálculo.
5. La valoración de las implicaciones económicas y ambientales relacionadas con los resultados del tema de investigación, permitió plantear que por concepto de los ensayos realizados se genera un costo de 1 219,14 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales que se presentan en el tubo de descarga de la pulpa, están dada por sobreconsumo de agua, generación de polvo, y descarga de partículas de carbón antracita al mar.

RECOMENDACIONES

1. Elaborar una propuesta de filtros para el sistema de sedimentación que permita la recuperación del agua y las partículas de carbón antracita que contiene la pulpa generada en la Planta de beneficio ubicada en el Puerto Moa.
2. Diseñar y realizar experimentos para la caracterización reológica y la determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria de la pulpa objeto de estudio, considerando el rango de variación del porcentaje de sólido.
3. Efectuar experimentos para la validación de modelos propuestos en la determinación de la pérdida de presión y la velocidad crítica de transportación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adhikari B., Jindal V.K. *Artificial Neural: A New Tool for Prediction of Pressure Drop of Non-Newtonian Fluid Foods through Tubes. Journal of Food Engineering: 46, 43-51, 2000.*
2. Ávila Jiménez N. E., Becerra Lotero C., Iza Mustafá Y., Sanz Uribe J. R., *Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería pvc de 88 mm., Scientia et Técnica, Universidad Tecnológica de Pereira, Año XII, No 34, ISSN 0122-1701, Mayo de 2007.*
3. Bandala, M.:*“Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos”* Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
4. Besio F. J. *Caracterización del transporte de pulpa de cobre en tuberías, mediante simulación.* Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención mecánica. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2014.
5. Betancourt. *Análisis del comportamiento de proceso de secado mineral por el método de Elementos Finitos utilizando las herramientas del ansys12.1 Trabajo de Diploma.* ISMM. Moa. 2012.
6. Boada, O, Díaz, S., Campos, Y. *“Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial”, Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo-Agosto 2003, Cuba. ISSN1029-516X.*
7. Cerpa A. y L. R. Garcell.1998: *“Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas”, Informe al evento Metalurgia, 98, Ciudad de la Habana. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa - 56-Cornell, R. M. and U. Schwertmann. 1996.: “The Iron Oxid.*
8. Darby R, *Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids, in Flow Dynamics and Transport Phenomena.* 2002.
9. Díaz A., Hechavarría T., *Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento, Tecnología química vol. xix, no. 3, 1999.*

10. Díaz, A., *Manual de hidráulica aplicada*. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1989.
11. Garcell, L. *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía*, 2001.
12. Garcell, L., *Características reológicas y mineralógicas de las pulpas limoníticas de Moa en períodos de sedimentación crítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería Química., 1984.
13. Garcell, L., *Caracterización reológica de la pulpa de limonita de Moa*. Revista Tecnología química, 1992, (1): 5-9.
14. Garcell, L., *Comportamiento reológico de la pulpa laterítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.
15. 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.
16. Garcell, L., *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía*, 2001, (2): 1 – 40.
17. Garcell, P.L. *Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Trabajo investigativo. Facultad de Ingeniería química. Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella. Santiago de Cuba. 1993*.
18. Garcell, P.L. *Estudio reológico de las suspensiones de limonita de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Facultad de tecnología química. Santiago de Cuba. 1988*.
19. Garcell. L. R. Y Col.: *“Estudio Reológico de las Suspensiones de Limonita de la Empresa CMDTE Pedro Soto Alba de Moa”*. Facultad de Tecnología Química. Departamento de Procesos Químicos. Santiago de Cuba. 1991.
20. Garcia, E., Leyva, B., y Laurencio, H. 2014. *“Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo”*. (Ciencia y Futuro / v.4 n.4 / Febrero-Septiembre / p. 22-41 ISSN 2306-823x.

21. García, F., *Factor de Fricción para Flujo Bifásico de Gas y de Líquido en Tuberías Horizontales para Régimen Laminar y Turbulento*. Proyecto de Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 2003
22. García, F., *Factor de Fricción para Flujo Bifásico de Gas y de Líquido en Tuberías Horizontales para Régimen Laminar y Turbulento*. Proyecto de Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 2003
23. Haoulo M., García F., 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 v.20 n.4 ISSN 0798-4065 versión impresa Caracas oct. 2005.
24. Hernández, L. R. *Calculo verifcativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado*. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
25. Hernández, S. *Metrología dimensional*. Editorial ISPJAE.1986.
26. Iakovlev, S.V y Dalkov Y.M., Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p
27. Izquierdo, P.R. *Investigación de los parámetros y elaboración de los regímenes racionales del transporte hidráulico de lateritas utilizadas en las condiciones de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba*. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1989.
28. Japper, A.; Escudier, P. Andpoole, J. 2009: *Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 35(5). Disponible en: www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de octubre de 2009].
29. Jiménez. D.Y. *calculo verifcativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de neutralización de la Empresa "Pedro Sotro Alba"*. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2005.

30. Kasatkin, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág. 262-366.
31. Kramer García F, (2012) *Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible*.
32. Laurencio Alfonso, H.L. Martínez Rojas, R. “Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad (cola) en el proceso carbonato amoniaco”. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, 2004.
33. Laurencio, H. y Delgado, Y., “Comportamiento reológicos de la emulsión de petróleo pesado”. Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. 16(2) 244-250, 2008. <http://redalyc.uaemex.mx>. [Consultada: 15 Diciembre 2008]
34. Laurencio-A.; Falcón, H.; Retirado M. Pérez M., 2012. *Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11° API)*. Minería y Geología / v.28 n.3 / julio-septiembre / 2012 / p. 70-86. ISSN 1993 8012.
35. Mansoori, G.2005: *Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in Oil–SPE*. 27070.
36. Mariño, A. Mora, L. Chang, A. 2009. *Equipos de la metalurgia no ferrosa*. Editorial Felix Varela. La Habana. Cuba. 238 p.
37. Martínez Rojas, R: “Caracterización de las propiedades físico mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tuberías.”. Tesis en opción al título de Master en Electromecánica. ISMM. Moa, 2009.
38. Martínez, R.R. *Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad en el proceso carbonato amoniaco*. Tesis de diploma. ISMM. 2004.
39. Matos L, A. “Evaluación del sistema de bombeo de agua en la planta de beneficio de la Empresa Puerto Moa “Raúl Díaz Argüelles”, Proyecto de Ingeniería Mecánica III. Moa, 2015.
40. Matos, L. A. “Propuesta de un sistema de sedimentación para la recuperación

- de agua residual en el proceso de lavado de carbón mineral.”. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico. ISMM. Moa, 2015.70p.*
41. Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. 2005. *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba pp 25 – 30.
 42. Mitrofanov, L. 1984. *Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales*, Editorial MIR, Moscú 1984.
 43. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada. *Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food Science*: 45 (4), 844-847 (1980).
 44. Nedved. M. *Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande*. 1966.
 45. Nekrasov, B. “Hidráulica”, editorial PAZ, Moscú. (1986)
 46. Noa, O, A. “*Diseño de un transportador para la planta de carbón de la Empresa Puerto Moa “Raúl Díaz Argüelles”*”, Proyecto de Ingeniería Mecánica III. Moa, 2011.
 47. Noa.O.A. *Determinación de los parámetros tecnológicos de la planta de preparación mecánica de Carbón de la Empresa Puerto Moa.*, Trabajo de diploma, ISMM, 2012.
 48. Pavlov, K.1981 *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Editorial MIR, Moscú.
 49. Pedroso I., Turiño I., Jáuregui S., González G., *Gradiente de velocidad para la transportación de mieles y meladuras en conductos circulares*, Centro azúcar, volumen2, 2000.
 50. Pérez, R. “Equipos de bombeo” 3ra Edición, Tercera Reimpresión, editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana. (2000)
 51. Pero-Sanz, J. A et al: *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Madrid: DOSSAT, 2000.
 52. Perry J.H., *Chemical engineers handbook*. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1988.

53. Roque, D., *Método de recalcu de la característica de funcionamiento de las bombas centrifugas que manipulan soluciones azucaradas*, Memorias del VI encuentro Nacional de Jefes de Maquinarias. MINAZ. Santa Clara, 1989.
54. Santos, F.: Martín, M., *Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrifuga*; Centro azúcar, N 1, 1999.
55. Skelland A.H. *Non Newtonian flow and heat transfer*. Ediciones revolucionarias, La Habana, 1970.
56. SMOLDRIEV, A.E. Transporte Neumo - Hidráulico. Moscú: Metalurgia, 1997.
57. Suárez F.M. *Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito*. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
58. Tejeda, H.D. *Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales*. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
59. Turian, R. M. y F. L, Hsu. 1987. *Estimation of the Critical Velocity in Pipeline Flow of Slurries*. Chicago: Universidad de Illinios.
60. Turiño, I. M. *Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrifuga*. Centro azúcar, No.1, 1994.
61. Turro B. A., *Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaca*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154
62. *Viscosímetro programable Brookfield DV-II+ pro manual M/03-165 Edición Noviembre' (2006)*.
63. Welty. *Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos*. "Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 1976.

ANEXOS

ANEXO 1



Figura 1. Planta de Beneficio de Carbón ubicada en la Empresa Puerto Moa.

Fuente: Matos (2015).

ANEXO 2

Tramo 1: Criba- Sedimentador

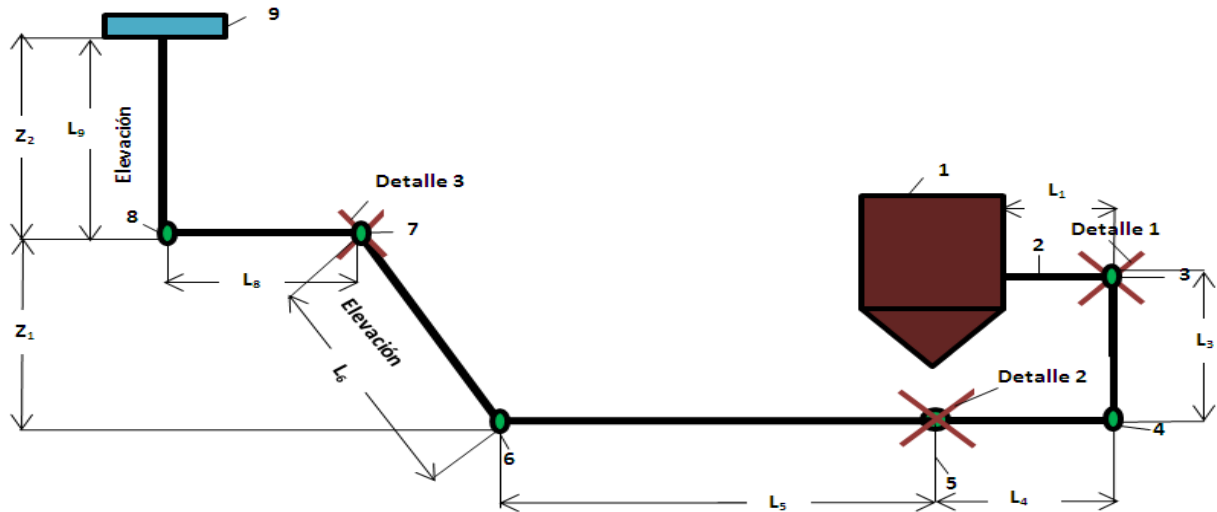


Figura 2. Esquema de la instalación.

Fuente: Matos (2015).

1-Sedimentador (1).

2-Tuberías (2).

3-Codos (3, 4, 6, 7,8).

4- Bomba centrífuga (5).

5- Criba (9).

Z₁- Altura de la tubería con relación al eje de la bomba.

Z₂- Altura de la tubería de entrada del agua en la criba con relación al eje de la bomba.

L₁ -Distancia entre el orificio de salida del agua del tanque al eje del codo 3.

L₂- Distancia entre el eje del codo 2 y el codo 3.

L₃- Distancia entre el eje del codo 3 y el codo 4.

L₄- Distancia entre el eje del codo 4 y el codo 5.

L₅- Distancia entre el eje de la bomba y el codo 6.

L₆- Distancia entre el eje del codo 6 y el codo 7.

L₇- Distancia entre el eje del codo 7 y el codo 8.

L₈- Distancia entre el eje del codo 8 y el codo 9.

L₉- Distancia entre el eje del codo 9 y la criba.

Detalle1: Tubería de 3 m en profundidad con una (T flujo desviado 90⁰) en el extremo y una válvula.

Detalle2: Tubería de 2 m en profundidad con un codo de 90 ° en el extremo y una válvula.

Detalle 3: Tubería de 6 m en profundidad con un codo de 90 ° en el extremo.

Tabla 1. Accesorios necesarios para el tramo 1.

Tramo 1			
Succión 356PU 1A/B/C	Cantidad	Parámetro	Valor
Codos 90 °	3		
Codos 45 °	2		
Válvula mariposa 18"	1		
Diámetro de la tubería	-	d	100 mm
Largo de la tubería	-	L	29 m
Altura	-	ΔZ	6 m

ANEXO 3:

Tramo 2: Sedimentador-Criba.

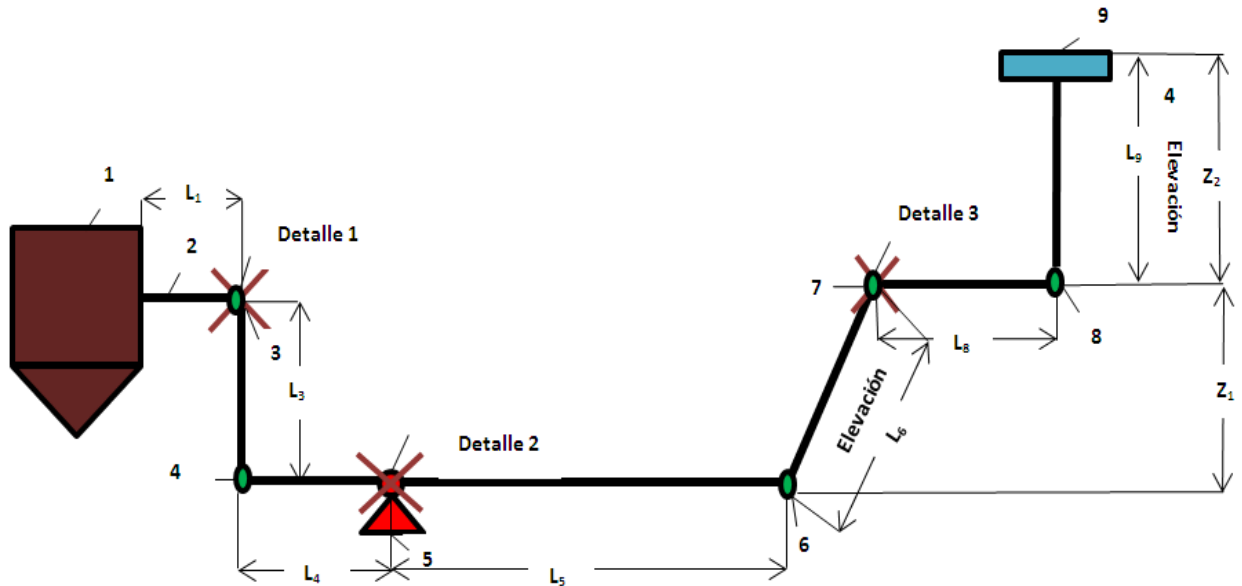


Figura 3. Esquema de la instalación.

Fuente: Matos (2015).

1-Sedimentador (1).

2-Tuberías (2).

3-Codos (3, 4, 6, 7,8).

4- Bomba centrífuga (5).

5- Criba (9).

Z_1 - Altura de la tubería con relación al eje de la bomba.

Z_2 - Altura de la tubería de entrada del agua en la criba con relación al eje de la bomba.

L_1 -Distancia entre el orificio de salida del agua del tanque al eje del codo 3.

L_2 - Distancia entre el eje del codo 2 y el codo 3.

L_3 - Distancia entre el eje del codo 3 y el codo 4.

L_4 - Distancia entre el eje del codo y el eje de la bomba.

L_5 - Distancia entre el eje de la bomba y el codo 6.

L₆- Distancia entre el eje del codo 6 y el codo 7.

L₇- Distancia entre el eje del codo 7 y el codo 8.

L₈- Distancia entre el eje del codo 8 y el codo 9.

L₉- Distancia entre el eje del codo 9 y la criba.

Detalle1: Tubería de 3 m en profundidad con una (T flujo desviado 90°) en el extremo y una válvula.

Detalle2: Tubería de 2 m en profundidad con un codo de 90 ° en el extremo y una válvula.

Tabla 2. Accesorios necesarios para el tramo 2.

Tramo 2			
Succión 356PU 1A/B/C	Succión 356PU 1A/B/C	Succión 356PU 1A/B/C	Succión 356PU 1A/B/C
Codos 90 °	Codos 90 °	Codos 90 °	Codos 90 °
Codos 45 °	Codos 45 °	Codos 45 °	Codos 45 °
Válvula mariposa 18"	Válvula mariposa 18"	Válvula mariposa 18"	Válvula mariposa 18"
Diámetro de la tubería	Diámetro de la tubería	Diámetro de la tubería	Diámetro de la tubería
Largo de la tubería	Largo de la tubería	Largo de la tubería	Largo de la tubería
Altura	Altura	Altura	Altura

ANEXO 4



Figura 4. Área de ubicación del sedimentador.

Fuente: Matos (2015).