Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad Metalurgia Electromecánica
Departamento de Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÌTULO: Cálculo de los parámetros de transportación de lodo por tubería para la Planta de Beneficio de Miguel de Sagua.

AUTOR: Alexeis Cruz García

TUTOR: Ms.C Benigno Leyva De la cruz

Moa, 2016
"Ano 58 del triunfo de la Revolución"

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Alexeis Cruz García

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.

_____

Alexeis Cruz García

_____

Ms.C. Benigno Leyva De la cruz

PENSAMIENTOS

Recibid mi enseñanza, y no plata; y ciencia antes que el oro escogido. Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas.

Prov. 8:10-11a

El alma sin ciencia no es buena, y aquel que se apresura con los pies peca.

Prov. 19:2

El corazón del entendido adquiere sabiduría, y el oído de los sabios busca la ciencia.

Prov. 18:15

AGRADECIMIENTOS

- *A Dios por darme los conocimientos necesarios para llegar al final de la carrera y tener la oportunidad de poder graduarme como técnico superior.*
- *A mi padre por el esfuerzo de cada día, transmitiéndome lo necesario que es ser un profesional.*
- *A mi madre, a pesar de no vivir cerca de mí por el gran apoyo transmitido.*
- *A mi esposa y mis hijas, por su apoyo y amor en todo momento.*
- *A mi familia que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional.*
- *En el lugar donde trabajo a mis compañeros, por el gran apoyo transmitido.*
- *A la revolución y a la universidad que me permitieron estudiar esta carrera.*
- *A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el aprendizaje como estudiante de la carrera que me ocupa.*
- *A mi tutor por no escatimar tiempo ni esfuerzo en este trabajo de diploma ya que sin su supervisión y dedicación no se habría podido desarrollar dicho trabajo.*

A mis amigos y todos aquellos que de alguna manera u otra colaboraron para poderme graduar.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre y mi padre, que con tanto esfuerzo siempre estuvieron dándome fuerzas para seguir, a mi querida esposa e hijas por su dedicación y cariño, y a toda mi familia en general.

SÍNTESIS

Este trabajo surgió motivado por la situación problémica asociada a la rotura y cambio del diámetro del tubo de descarga del lodo de la Planta Procesadora de Árido en la UEB del Miguel de Sagua de Tánamo. El objetivo que se trazó consistió en efectuar una estimación de los parámetros de transportación del lodo por tubería para la nueva condición de flujo. Se efectuó muestreo, determinación de la granulometría con el analizador de partícula 22, medición de las densidades y de la viscosidad, cálculo del porciento de sólido, determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria, estimación de la pérdida de presión y de la velocidad crítica de transportación y, cálculo económico. Se obtuvo como resultados principales que el lodo muestra un comportamiento seudoplástico para un 12 % de sólido; la pérdida de presión calculada fue de -1 351 921,96 Pa para el gasto de 108 m^3/h y diámetro de tubería de 8 in (0,203 2 m), y de – 1 351 425,57 Pa para el gasto de 138 m^3/h, lo que indica que el lodo puede evacuarse por gravedad desde la instalación; la velocidad crítica de transportación indicó que existe la posibilidad de que haya sedimentación en la tubería de descarga del lodo, se sugiere para evitar la sedimentación aumentar el gasto de lodo a un valor superior a 138 m^3/h; la valoración de los resultados permitió plantear que por concepto de los ensayos realizados se genera un costo de 1 824,13 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales que se presentan en el tubo de descarga del lodo están dada por generación de polvo, alteración en el ecosistema y disminución de la calidad del agua del Río Miguel de Sagua.

SUMMARY

This work happened motivated for the situation polemical once the breaking was associated to and change of the diameter of the discharge tube of the mud of the processing plant of arid in Tánamo UEB of Sagua's Miguel. The objective that was drawn involved making an esteem of the parameters of transportation of the mud for piping for the new condition of flow. Took effect sampling, determination of the classification by size of particles, measurement of densities, calculation of the percent of solid, measurement of the viscosity with a meter of viscosity Brookfield DVII + Profit, determination of the velocity gravitational sedimentation, esteem of the loss pressure and of the critical speed transportation and cost-reducing calculation. It was obtained like principal results than the mud pseudoplastic for 12 % of solid shows a behavior; the loss of calculated pressure went -1 351 425,57 Pa for the expense of 108 m^3/h and 0,203 2 m diameter of piping and of - 1 351 921,96 Pa for the expense of 138 m^3/h, what you indicate that the mud can issue itself for gravity from the installation; the critical speed of transportation suggested the possibility of beech existing sedimentation in the piping of unloading of the mud, is suggested to avoid the sedimentation to increase the expense of mud to a superior value to 138 m^3/h; the assessment of the results allowed presenting than by way of the sold off essays generates him a cost of 1 824,13 CUC plus 379,75 CUP and then the principal environmental affectations that present itself in the mud's discharge tube are once generation was taken for of dust, alteration in the ecosystem and decrease of the quality of the water of Sagua's Río Miguel.

ÍNDICE Pág.

Introducción 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción 6

1.2. Trabajos precedentes sobre los parámetros de hidrotransporte en el flujo de hidromezclas por tuberías 6

1.3. Clasificación reológica 15

1.3.1. Curvas de flujo 16

1.3.2. Modelos reológicos 17

1.4. Instrumentos de medición para prueba de reología 20

1.5. Teoría básica de la velocidad de sedimentación 21

1.6. Procesos de sedimentación 21

1.6.1. Sedimentación de partículas floculentas 22

1.6.2. Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación 23

1.7. Descripción del flujo tecnológico de la Planta de Beneficio de Miguel de Sagua de Tánamo 24

1.8. Conclusiones del capítulo 1 25

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción 26

2.2. Toma y preparación de las muestras 26

2.3. Determinación de la granulometría con el analizador de partículas compacto 22 27

2.4 Determinación de la traza de la tubería de descarga del lodo 27

2.5. Determinación de la densidad aparente del sólido, del lodo y del % de sólido 28

2.6. Determinación del comportamiento reológico y los parámetros reológicos del lodo 31

2.7. Determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria 33

2.8. Elaboración de los resultados 35

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

transportación 38
2.10. Análisis económico 42
2.11. Conclusiones del capítulo 2 43
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
3.1. Introducción 44
3.2. Determinación de la granulometría 44
3.3. Obtención de la traza de la tubería de descarga del lodo 46
3.4. Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido 47
3.5. Determinación del comportamiento reológico y los parámetros reológicos del lodo 48
3.6. Análisis de la velocidad de sedimentación gravitatoria 51
3.7. Evaluación de la pérdida de presión que se produce en la tubería 54
3.8. Verificación de la velocidad crítica de transportación del lodo 56
3.9. Valoración económica 57
3.10. Efectos ambientales 60
3.11. Conclusiones de capítulo 3 62
CONCLUSIONES GENERALES 64
RECOMENDACIONES 66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67
ANEXOS 75

INTRODUCCIÓN

El tercer milenio ya es una realidad y brinda la perspectiva de un mundo globalizado donde cada país debe luchar por ganarse una parte del mercado. Las estrategias a consolidar deben lograr un nivel de eficiencia, eficacia y efectividad acordes con los impuestos en el ámbito internacional. Cuba no está ajena a esta situación y debe llevar a cabo acertados métodos y técnicas para lograr la competitividad de sus entidades teniendo en cuenta que el éxito empresarial es multicausal y es necesario mantener elevados niveles de satisfacción de los clientes por lo que la excelencia se perfila como el camino a seguir (Matos, 2015).

Los sistemas de gestión de la calidad en los momentos actuales se han convertido en el mundo globalizado de hoy, en una necesidad insoslayable para permanecer en el mercado a partir del hecho de que un producto o servicio que no satisfaga los requerimientos de calidad del mercado no se logra comercializar, y si no son estables a largo plazo, las empresas llegan a perder su competitividad y prestigio por lo que no sobreviven en el mercado. Los técnicos involucrados en el proceso de tratar los lodos, bien proyectando nuevas instalaciones y equipos, como operando plantas de tratamiento deben conocer las características más importantes del mismo y cómo influyen cada una sobre el sistema de tratamiento a emplear (Leyva *et al*. 2014).

En los lineamientos del VI Congreso del Partido Comunista de Cuba (2011), se plantea las aspiraciones en materia de política para la ciencia, tecnología, innovación y medio ambiente; el lineamiento 129 refiere el diseño de una política integral y el 133 el sostener y desarrollar investigaciones integrales; en tal sentido, se debe plantear que la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesaria. Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos existentes en los yacimientos en Cuba y se perfeccione el sistema de transportación lo que garantizará la existencia de un

proceso productivo continuo.

El transporte hidráulico por tubería juega un rol fundamental en el transporte de suspensiones, debido a su efectividad económica y medioambiental respecto a los demás tipos de transporte, el mismo ha tomado mayor auge con el estudio de estos sistemas(Martínez, 2009). En este tipo de transporte el consumo energético depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y ésta, a su vez, depende del diámetro de la conductora, su estado de explotación, el material y tecnología de que está hecho, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades físico mecánicas del material y de la concentración. Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia del proceso tecnológico. Cualquier investigación encaminada a perfeccionar el sistema de evacuación de suspensiones implicaría el análisis de estos factores en el proceso. El orden de la realización de los análisis no está relacionado obligatoriamente con el grado de incidencia, sino con la obtención organizada de los datos que se requieren.

Para fundamentar y proyectar una instalación de transporte hidráulico, es necesario determinar la velocidad crítica, las pérdidas específicas de carga, la densidad o concentración de las mezclas, el diámetro del conducto que permita la determinación del régimen racional del trabajo y elegir los equipos adecuados para el caso concreto, lo que están influidos por las propiedades físico – mecánicas del fluido. Estos parámetros tienen incidencia en la magnitud de las inversiones, en los gastos de explotación y en la fiabilidad del trabajo de la instalación.

Las metodologías de cálculo y evaluación disponible para el estimado de los parámetros indispensables para proyectar una instalación de transporte hidráulico, han sido elaboradas a partir de los datos experimentales obtenidos para sistemas particulares y no existe una metodología única para determinar los parámetros (Turro, 2002). Por ello se requiere de la adecuación de las metodologías disponibles a cada caso concreto a partir de los resultados experimentales.

En Cuba existen en todas las provincias, plantas procesadoras de áridos, donde juegan un papel decisivo en la efectividad de dichas máquinas, las propiedades físicas-mecánicas de los materiales extraídos de las canteras y yacimientos y, la correcta selección y diseño del equipamiento tecnológico.

El lodo producto al lavado de la arena, es una suspensión sólido- líquido, donde el sólido depende fundamentalmente de la fuente o cantera de la cual se extrae la materia prima, de la tecnología utilizada para la clasificación, la parte líquida, de las condiciones técnicas para el lavado y los requerimientos del producto (Leyva *et al.* 2014).

En Miguel de Sagua de Tánamo se encuentra ubicada una Planta de Beneficio de Árido, en la zona montañosa (Figura 1, Anexo). La misma dentro de su fuerza de trabajo consta con un jefe de planta, de un operador, dos ayudantes del proceso tecnológico, el operador del cargador frontal, el operador del buldózer, el operador de la retrocavadora y dos técnicos eléctricos. Su objetivo social se basa en la elaboración de diferentes tipos de medidas de graba y arena para la construcción.

A este trabajo le es de importancia la investigación de la no existencia de un sistema eficiente de evacuación del lodo que se genera en el lavado de árido de la UEB Miguel de Sagua de Tánamo, el cual permitiría la disminución de la contaminación ambiental, un recurso natural que cada día cobra más importancia para la supervivencia de las distintas especies. Dicha planta de beneficio de árido requiere de una inversión en su tecnología para poder aumentar su competitividad, puesto que en la misma se ha evidenciado la siguiente **situación problémica:**

Situación problémica:

1. El tubo que posee la planta para el drenaje no cuenta con la longitud total que tenía inicialmente, lo que provoca que el lodo se derrame en lugares no adecuados.
2. La propuesta de cambio de diámetro del tubo de descarga del lodo, de 6 in a 8 in, lo que genera la necesidad de verificar los parámetros de transportación.

3. Afectaciones ambientales, debido a que el lodo al ser vertido en las proximidades de la planta altera la vegetación y la fauna.
4. El elevado consumo de energía producto a que el agua que se utiliza en la instalación procede de un pozo que se encuentra distante de la planta, además se le suministra agua a la comunidad lo que incrementa la demanda de esta.

Teniendo en cuenta los criterios expuestos se define como **problema a investigar:**

La insuficiente caracterización de las propiedades del lodo generado en el lavado de árido de la UEB de Miguel de Sagua.

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

Si se realiza la caracterización de las propiedades del lodo (granulometría, densidad del lodo y de la arcilla, viscosidad aparente y velocidad de sedimentación), es posible identificar los modelos para la estimación de los parámetros de trasportación y fundamentar una propuesta tecnológica para la evacuación del lodo.

Se establece como o**bjeto de estudio** el lodo de la UEB de Miguel de Sagua y como c**ampo de acción** los parámetros de transportación de lodo.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como o**bjetivo general:** Efectuar una estimación de los parámetros de transportación del lodo por tubería para la UEB de Miguel de Sagua de Tánamo.

Objetivos específicos:

1. Fundamentar el desarrollo del cálculo de los parámetros de transportación de lodo por tubería, a partir de una revisión bibliográfica y sistematización del conocimiento.
2. Caracterizar los materiales y procedimientos a emplear en la determinación de los parámetros de transportación del lodo.
3. Efectuar un análisis de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta criterios técnicos, económicos y ambientales.

De acuerdo con los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas:**

1. Revisión bibliográfica y sistematización sobre la determinación de los parámetros de transportación de lodo para la fundamentación de la investigación.
2. Caracterización de los materiales y procedimientos a emplear en la determinación de las propiedades del lodo y cálculo de los parámetros de transportación del lodo.
3. Determinación de las propiedades físicas y reológica del lodo generado en el lavado de áridos.
4. Cálculo de los parámetros de transportación del lodo a gravedad en la UEB de Miguel de Sagua de Tánamo.
5. Valoración económica y ambiental de los efectos asociados a los resultados esperados de la investigación.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

Cuando se hace un estudio es de vital importancia conocer hasta donde ha llegado la humanidad en la temática analizada y lo que se ha aportado a la ciencia a través de los tiempos. Lo cual permite aprovechar de manera eficiente los conocimientos heredados, evitando así llegar a conclusiones erróneas acerca de hechos y cuestiones analizadas por otros autores.

El **objetivo** de este capítulo es:

Realizar una revisión bibliográfica para la exposición de un fundamento teórico y las peculiaridades en cuanto a las propiedades y la determinación de los parámetros de transportación del lodo generado en la UEB de Miguel de Sagua de Tánamo.

1.2. Trabajos precedentes sobre los parámetros de hidrotransporte en el flujo de hidromezclas por tuberías

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

A partir de los trabajos descritos por Caldiño *et al.* (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales

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

Pakrovskaya (1985), realiza un amplio estudio técnico – práctico donde abarca temas muy importantes y novedosos entre los que se destacan; características, parámetros y regímenes de transportación de hidromezclas de diferentes grados de saturación; métodos para la preparación de pulpas para el hidrotransporte, desgaste hidroabrasivo de los sistemas de tuberías durante la transportación de materiales abrasivos; fiabilidad del trabajo de las instalaciones de hidrotransporte; métodos de control y regulación de los parámetros de hidrotransporte de los golpes hidráulicos; valoración económica de la efectividad del transporte hidráulico.

El coeficiente de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto (Ibarz *et al*. 2001). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Macedo *et al.* 2001). La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe *et al*. 1986; Ibarz *et al*. 2001; Perona 2003).

En una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar y viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes, y/o entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme cuando

se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas o láminas imaginarias en movimiento (Welty *et al*. 1976 y Bandala 2001).

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

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama *et al.* (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia (t_0) en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee *et al.* (1994), determinaron de forma experimental la pérdida de presión (ΔP) en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo seudoplástico generalizado (Re) y los diferentes grados de abertura.

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

de dichas suspensiones en régimen turbulento; la determinación de las ecuaciones para la obtención de la velocidad crítica y la velocidad límite de caída de los granos de serpentinita dura.

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

Liu *et al.* (1998), realizaron el análisis teórico y la modelación del transporte de fluidos no newtonianos del tipo Herschel - Bulkley, tanto en conductos como a través de medios porosos, involucrando tres factores de forma y la viscosidad como necesarios para evaluar las caídas de presión durante el flujo. Adhikari *et al*. (2000), incorporaron el concepto de las redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a 5,4 % con respecto a los valores experimentales. Los coeficientes de fricción para el manejo de fluidos adelgazantes en diferentes accesorios de 1 pulgada, fueron medidos por Martínez *et al.* (2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Con el objetivo de determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido,

Izquierdo *et al.* (2001), modeló el hidrotransporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y las propiedades reológicas de la hidromezcla. Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (l) y el número generalizado de Reynolds (Re).

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

Ortega (1995), presenta en su tesis doctoral, un estudio teórico de algunos sistemas de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de ciertas clases de fluidos no newtonianos; considera un modelo para fluidos de bingham, seudoplasticos y dilatantes en densidad variable. Para estos modelos, se obtienen resultados de existencia de solución global en tiempo en varios sentidos: solución muy débil, débil y medida-valuada.

Turro (2002), en su tesis doctoral estudia el hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, planteando a partir del sistema de correlaciones derivado del modelo físico propuesto, su novedad para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte, a partir de los resultados de la caracterización realizada y del sistema de ecuaciones producto del modelo físico – matemático.

Ávila *et al.* (2007) plantea modelos matemáticos para el transporte hidráulico de café a través de tubería PVC de 88 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 90º, 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 mm.

Pedroso *et al.* (2000), tomando como base para su trabajo el modelo de *Otswald de Wele*; obtuvieron 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 seudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental nombrado como, Constante de tiempo de deformación, se ha relacionado este modelo con la viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a infinito y la viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a cero.

Haoulo *et al*. (2005) evalúan el efecto de la densidad y de la viscosidad dinámica de la mezcla en la determinación del gradiente de presión longitudinal de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales considerando un fluido pseudo homogéneo. Se evalúan 18 ecuaciones de viscosidad de mezcla y 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.

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.

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. Por ejemplo, los modelos de McAdams *et al.* (1942) y de Cicchitti *et al*. (1960), presentan errores porcentuales absolutos promedios de 38 % y 275 %, respectivamente, al comparar los valores de gradiente de presión calculados con los experimentales. 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.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de bombas centrifugas se han reportado 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 centrifuga cuando manipula un fluido viscoso, pues teóricamente hasta el presente ha sido imposible tener en cuenta la influencia de la viscosidad en los parámetros de trabajo de la bomba y en la forma de sus características.

El método más simple de los parámetros de funcionamiento (Carga, Flujo, Potencia y Eficiencia) y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

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 %.

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 centrifuga.

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, limoniticos y Serpentiníticos permite establece que la pulpa concentrada utilizada industrialmente por la empresa “Pedro Soto Alba”. Moa Nickel SA contiene un elevado por ciento de partículas muy finas, lo que aporta cierta plasticidad, comprobando que se puede clasificar como sólidos en suspensión con un comportamiento de fluidos no newtonianos, los cuales han sido pocos estudiados en la actualidad.

La necesidad de determinar con más precisión los parámetros para la transportación por tuberías de estas mezclas concentradas, es evidente durante la manipulación de los materiales en operaciones y procesos tecnológicos, en diferentes ramas de la

economía nacional (metalurgia, petróleo, construcción, industria química y la agricultura).

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

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

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

De lo explicado anteriormente se observa, que la solución teórica de los principales problemas del hidrotransporte es posible obtenerla solo de las ecuaciones de la hidrodinámica. De igual forma, en relación con la complejidad de obtención de hidromezclas, se puede utilizar la teoría semiempírica, la que se fundamenta sobre diferentes representaciones del movimiento del flujo de las hidromezclas y de la variación de la influencia de las partículas en el perfil de distribución de velocidades.

Por ello, el segundo aspecto encuentra su aplicación práctica y ha obtenido desarrollo en trabajos realizados por la mayoría de los investigadores.

Las metodologías obtenidas como resultado de estas investigaciones para la evaluación y proyección de sistemas de hidrotransporte de suspensioness, no pueden ser generalizadas para todo tipo de sistemas, y solo se asegura una alta precisión para el material que ha sido objeto de estudio. Por lo que se hace necesario un estudio para la caracterización del lodo que permita obtener expresiones matemáticas de su comportamiento en el movimiento por tuberías para la evaluación de dicho sistema, insuficientemente estudiado hasta la actualidad.

1.3. Clasificación reológica

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

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

Se clasifican en dos grupos:

- Newtonianos.
- No Newtonianos.

O también en:

- Líquidos.
- Gases.

Incluso el plasma puede llegar a modelarse como un fluido, aunque este contenga cargas eléctricas.

1.3.1. Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad; se obtienen curvas (figura 1.1 y 1.2) que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo según Turiño (1984) y Tejeda (1985).

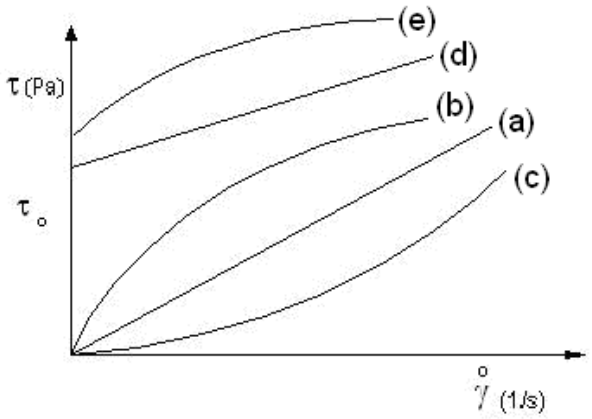

Figura 1.1. Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplástico; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell (2001).

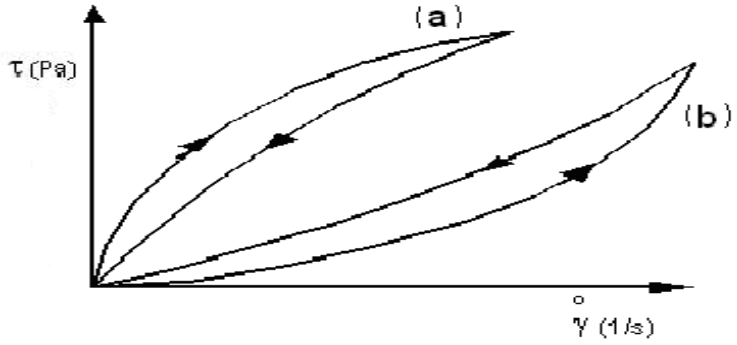

Figura 1.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

Fuente: Garcell (2001).

1.3.2. Modelos reológicos

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

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 constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos:

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 constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos:

De viscosidad independiente del tiempo

- **Seudoplásticos:** sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante (n > 0). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para n < 1), (figura 1.1-b).

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n \qquad (1.1)$$

Donde:

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

K - índice de consistencia, (Pa. s).

El parámetro n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para n < 1 el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante. Para n = 1, la ecuación 1.1 se transforma en la ley de Newton, siendo K = μ. El parámetro K es el índice de consistencia, el cual da una

medida del grado de viscosidad del material.

Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente. La viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \tag{1.2}$$

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

$$\mu_a = K \cdot \left(\overset{o}{\gamma} \right)^{n-1} \tag{1.3}$$

- **Dilatantes:** sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante (n > 0). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para n > 1), (figura 1.1-c).
- **Plásticos ideales:** se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial, que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe (figura 1.1-d).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \tag{1.4}$$

Donde:

Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

Viscosidad plástica.

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

- **Plásticos reales:** sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo

cortante mayor que τ_o. Siguen el modelo de Herschel – Bulkley (figura 1.1-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_o + K \cdot (\gamma)^n \quad (1.6)$$

Los parámetros k, n y τ_o, tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para n = 1, la ecuación 1.6 se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_o = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_o = 0$ y n = 1 se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 1.5 y 1.6, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_o}{\overset{o}{\gamma}} + K \cdot \left(\overset{o}{\gamma}\right)^{n-1} \quad (1.7)$$

De viscosidad dependiente del tiempo

-Tixotrópicos: la viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidos a un gradiente de velocidad determinado. Se comportan reológicamente como seudoplásticos, plásticos ideales y reales (figura 1.2 -a).

-**Reopécticos:** la viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes (figura 1.2-b).

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. Este comportamiento se ha observado en NAPALM, en soluciones de polímeros, en masas cocidas de la industria azucarera con altos contenidos de gomas (polisacáridos), en ciertas resinas y en emulsiones de crudo cubano, de acuerdo a lo reportado por Toose (1995).

1.4. Instrumentos de medición para prueba de reología

Un reómetro es un instrumento de laboratorio que se usa para medir la forma en que fluyen un líquido, mezcla o suspensión bajo la acción de fuerzas externas. Se emplea para fluidos que no pueden definirse con un único valor de viscosidad y por tanto requieren más parámetros que los que puede proporcionar un viscosímetro. Mide la reología del fluido.

Existen numerosos tipos de reómetros que se han diseñado y comercializado, solo cuatro de ellos, reúnen las condiciones necesarias para ser usados en la determinación de propiedades reológicas, estas son: a) el de tubo capilar, b) el rotacional de cilindros concéntricos(figura 1.3), c)el rotacional en medio infinito, d) el rotacional de cono y plato según , Díaz (1989), Garcell (1988), Perry (1988), Rosabal (1988), Skelland (1970), Tejeda (1985). Los viscosímetros rotacionales (reómetros) son los más difundidos para realizar estudios reológicos.

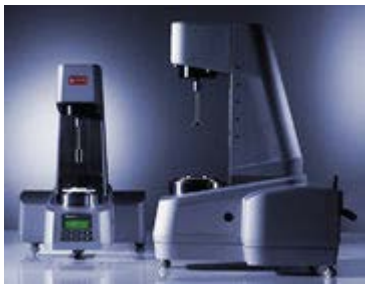

Figura 1.3. Reómetro con cilindro de medida (izquierda) y cono de medida (derecha).

La propiedad más relevante de la mayoría de hidrocoloides que ha conducido a que su uso sea muy extendido en diferentes tipos de industrias es su capacidad para modificar significativamente el flujo de sistemas acuosos con pequeñas concentraciones de polímero, debido a su alto peso molecular. La cuantificación de estos efectos en la viscosidad, en las propiedades viscoelásticas y la microestructura, se ha investigado a través de técnicas de viscosimetría, reología y microscopía. En particular, el desarrollo de reómetros de esfuerzo y deformación controlada en los últimos 20 años ha significado un gran avance en la comprensión del comportamiento reológico, puesto que permiten la exploración a bajos valores de

“torque” a frecuencias y velocidades de cizalla muy bajas (Williams y Phillips, 2000).

1.5. Teoría básica de la velocidad de sedimentación

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

1.6. Procesos de sedimentación

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

Durante la sedimentación tiene lugar un desplazamiento mecánico relativo de las fases, en la cual se haya implicado un mecanismo de transferencia de cantidad de

movimiento por flujo viscoso (Zelikman *et al*. 1982; Gutiérrez y Bueno 2004). Como regla, ella no van acompañada de reacciones químicas; sus leyes se determinan por las leyes de la hidrodinámica, que depende en sumo grado de la construcción de los aparatos y de las condiciones de su explotación.

1.6.1. Sedimentación de partículas floculentas

La velocidad de las de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencias de velocidades de sedimentación de los flóculos, influencia de la turbulencia y variación de gradientes de velocidad; factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general (Mular y Bhappu 1982). Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorios o plantas pilotos con el propósito de predecir la eficiencias teóricas remocionales en función de las cargas superficiales o velocidades de asentamiento preseleccionadas (figura 1.4).

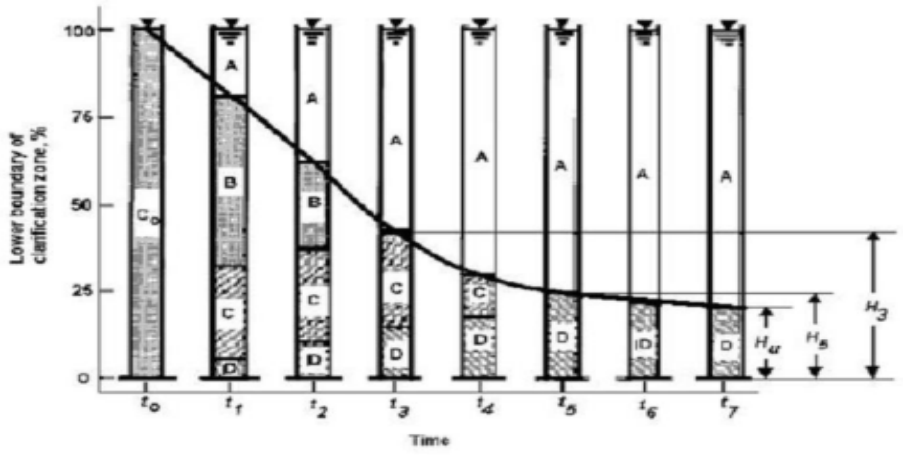

Figura 1.4. Cinética de la sedimentación

Fuente: Mular y Bhappu (1982)

Varios autores describieron la sedimentación de suspensiones mediante variaciones de la ecuación de Stokes o por modelos empíricos (Egolf y McCabe 1937), pero sin contribuciones realmente importantes en la modelación de la sedimentación. El desarrollo del conocimiento en sedimentación por Coe y Clevenger (1916) hasta la

mitad del siglo 20 fue basado en balances macroscópicos del sólido y el fluido en sedimentación en probetas y sobre la observación de diferentes concentraciones establecidas en el sedimentador.

1.6.2. Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación

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

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

Por efecto del floculante se puede obtener, más rápidamente, no sólo un sedimentado de mayor concentración en sólidos (menos líquido) sino también en clarificado (rebose) más limpio (menor contenido en sólidos), pero un sistema coloidal la floculación no se puede aumentar indefinidamente (Svarosvsky 2000, Wills 1985, Truscott, 1978). Porque por encima de una concentración óptima la adición de un polímero es contraproducente.

1.7. Descripción del flujo tecnológico de planta de beneficio de Miguel de Sagua de Tánamo

Se hace la extracción del yacimiento con una retroexcavadora y se traslada hasta el patio del material bruto, con un cargador se le suministra a la torva primaria a través de un alimentador de movimiento horizontal llevándola al llamado molino de mandíbula (primario) donde se tritura el material hasta un diámetro regulado, luego se traslada por el transportador primario a la zaranda y la separa con agua a presión comenzando el proceso de lavado separando la arena (0 - 5,5 mm) y la grava tres octavos (5 - 10 mm) del resto del material, cayendo la arena en el sinfín lavador el cual separa la arcilla del material útil, la misma se desecha a través de un tubo hasta una laguna de oxidación, la arena como producción terminada se deposita en una torva para su paso de almacenamiento.

La grava tres octavos luego de su clasificación va una torva de producción terminada para su posterior almacenamiento. El material superior a los once milímetros se deposita en el transportador de elevación hacia una criba de clasificación separando las gravas tres cuartos (11-20 mm) y la de una y media (21-58 mm) las que transportan hacia una torva para su almacenamiento. Las piedras que superan los 38 mm caen en un molino de cono el cual la tritura en fragmentos de diferentes tamaños y a través de un transportador se incorporan al proceso inicial junto con el material bruto comenzando el proceso tecnológico.

Al finalizarse el proceso se coloca un camión debajo de las torvas de producción terminada para el traslado hasta el lugar de almacenamiento (figura 2, Anexo), según su clasificación.

1.8. Conclusiones del capítulo 1

1. Del análisis realizado de los trabajos precedentes en el transporte de hidromezcla se determinó que en ninguno de ellos se lleva cabo una estimación de los parámetros de transportación (pérdida de presión y velocidad crítica) del lodo que se genera en la UEB de Miguel de Sagua, a partir de la determinación de propiedades del fluidos tales como la densidad aparente, viscosidad aparente, y el porciento de sólido.
2. Se exponen fundamentos teóricos relativos a la reología y la velocidad de sedimentación gravitoria, tales como la clasificación reológica, los modelos reológicos, la clasificación de los instrumentos de medición para la realización de pruebas reológicas; la teoría básica de la sedimentación y elementos característicos de procesos de sedimentación.
3. Se efectúa una descripción del flujo tecnológico de la Planta de Beneficio de Miguel de Sagua, lo que permitió dar una visión panorámica del proceso que se lleva acabo, del cual se genera como material residual el lodo objeto de estudio de la presente investigación.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Para el desarrollo de toda investigación se necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. Los conocimientos teóricos acerca de las características y propiedades de lodos, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación, selección y diseño de las instalaciones en la industria cubana de la construcción. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validarán los resultados que se obtengan, 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 propiedades del lodo objeto de estudio y la determinación de los parámetros de transportación.

2.2. Toma y preparación de las muestras

En el análisis experimental se utilizaron muestras de lodo y arcilla tomadas en el proceso tecnológico de la Planta Procesadora del Árido de Miguel de Sagua de Tánamo, en la entrada de la tubería de descarga del lodo. A continuación en la tabla 2.1 se relaciona el punto de toma de muestra utilizado para el análisis.

Tabla 2.1. Puntos de toma de muestras.

Muestra	Punto de toma de muestra
M - 1	Tubería de descarga del lodo.

Para la toma de la muestra 1 se hizo un compósito del lodo evacuado por la tubería de descarga, este compósito se obtuvo con tomas realizadas en operación de la planta, este lodo se homogenizó y almacenó en una cantidad de 5 litros para la realización de los experimentos.

2.3. Determinación de la granulometría con el analizador de partículas compacto 22

El análisis de la composición granulométrica se realizó en unos de los laboratorios pertenecientes a la empresa Ernesto Che Guevara (ECG). La determinación de la granulometría se efectuó con un analizador de partículas compacto 22. Dicho analizador posee un rango de medición de 0,3 a 300 µm, el cual se muestra a continuación en la figura 2.1.

Figura 2.1. Equipo láser para el análisis de partículas pequeñas.

Ventajas del analizador de partículas pequeñas

1. El modelo es económico, y poderoso para empezar con la sucesión de la medición totalmente automática.
2. El equipo es individualmente programable.
3. Rápido para cambiar el líquido para secar la dispersión.
4. Plantea una medición desde el principio y graba del rango de la medición entero usando un solo método de medida.

2.4 Determinación de la traza de la tubería de descarga del lodo

En la instalación no se contó para la realización del estudio de los parámetros de transportación del lodo con un plano o esquema que mostrará las dimensiones de los elementos que se prevén ensamblar, por lo que se hizo necesaria la determinación de las medidas de la tubería de descarga del lodo, la cual se realizó con el empleo

de una cinta métrica y un distanciómetro infrarrojo.

La figura 2.2 y 2.3 muestran los instrumentos de medición utilizados en la determinación de las dimensiones de la tubería de descarga del lodo. El distanciómetro posibilitó la cuantificación de las distancias en línea recta inclinada existente desde la cima de la colina hasta el lugar donde se ha decidido descargar el lodo y, desde la planta hasta el codo de inicio del descenso de la tubería, así como otras medidas de interés. La cinta métrica se utilizó en la determinación del diámetro de la tubería.

Figura 2.2 Distanciómetro infrarrojo.

Figura 2.3. Cinta métrica.

2.5. Determinación de la densidad aparente del sólido, del lodo y del % de sólido

Densidad del sólido

Para la determinación de la densidad aparente del sólido se utilizó el método del picnómetro, siguiendo el procedimiento propuesto por Heny *et al*. (1959). Dicha prueba se realizó en el laboratorio de química de la Facultad de Metalurgia Electromecánica, utilizando un juego de picnómetros de 25 ml, una pipeta de 25 ml, una balanza digital con precisión ± 0,000 1 g(figura 2.4 y 2.5) y una estufa de temperatura hasta 100 ºC.

Figura 2.4. Picnómetro

Figura 2.5. Balanza digital

El procedimiento consistió en el desarrollo de los siguientes pasos: Se tomó un picnómetro vacío y se pesó (peso B); se le añadió agua destilada y se volvió a pesar (peso A); se vacío y secó el picnómetro minuciosamente y se le introdujo el material para ser pesado (peso C); el material con agua se puso en una estufa a calentar para que escaparan las burbujas de aire, se enfrío y cuando el agua estuvo encima del material se tapó y se pesó (peso D).

Luego se determina la densidad del sólido como el producto del peso específico relativo del sólido por la densidad del agua.

El peso específico se determinó por la expresión siguiente:

$$\delta_e = \frac{C - A}{B + C - A - D} \tag{2.1}$$

Entonces la densidad aparente del sólido fue calculada utilizando la fórmula que se muestra a continuación:

$$\rho_s = \delta_e \cdot \rho_{H2O} \tag{2.2}$$

Densidad del lodo

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

La densidad del lodo en g/cm^3 se obtiene por la siguiente expresión.

$$\rho_l = \frac{m}{V} \tag{2.3}$$

Dónde:

m– Es la masa total del lodo, g.

V – Es el volumen total del lodo, g.

ρ_l – Es la densidad del lodo, g/cm^3.

Porciento de sólido

Con los datos obtenidos de la densidad de la arcilla y del lodo se calculó el porciento de sólido por la fórmula expuesta en Martínez (2009), la cual se muestra a continuación.

$$S = \frac{\rho_l - \rho_{H2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H2O}} \tag{2.4}$$

El cálculo del porciento de sólido permitió definir la concentración en peso y volumétrica del lodo. 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).

$$C_v = S \cdot \frac{\rho l}{\rho s} \tag{2.5}$$

$$C_p = \frac{m_s}{m_T} = \cdot S \tag{2.6}$$

Dónde:

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.

Para aplicar la ecuación 2.6 se pesó la muestra de lodo en dos momentos diferente, antes de someterla al proceso de secado artificial en una estufa y después de haber sido secada durante un tiempo de 40 minutos, hasta que se evaporó el agua contenida en el lodo.

2.6. Determinación del comportamiento reológico y los parámetros reológicos del lodo

Reología utilizando el viscosímetro brookfield DV-II + Pro

La prueba reológica del lodo objeto de estudio se realizó en el laboratorio perteneciente a la empresa del CEDINIQ con asistencia de sus técnicos brindando una mayor garantía del ensayo realizado, utilizando el viscosímetro Brookfield DV-II + Pro, que se muestra en la figura 2.6, con un husillo LV1 61 y baso de precipitado de 600 ml.

Figura 2.6. Viscosímetro programable Brookfield DV-II + Pro.

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 lodo objeto de estudio se muestra a continuación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. 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 * TK * SMC * Par de torsión/n (2.7)

Velocidad de corte (1/seg) =RPM* SRC (2.8)

Tensión de corte (Dina/cm^2)=TK*SMC*SRC * Par de torsión (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 del lodo.

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

Los resultados que se obtuvieron por medio de la ecuación 2.11 permitieron

determinar la viscosidad aparente del lodo. La ecuación que sirvió de base al cálculo es la que se muestra a continuación.

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

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 2.3, para determinar el margen error.

Tabla 2.3. Modelos para la estimación de la viscosidad dinámica.

Modelos	Parámetros	V, %	Ec.
$\mu_{mezcla} = \mu \cdot (1 + 2{,}5 \cdot Cv)$ **Fuente:** 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)

2.7. 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 lodo, y un reloj. Las figuras 2.7 y 2.8 muestran las probetas y el relot utilizado en la prueba efectuada para la determinación de la velocidad de sedimentación que caracteriza al lodo objeto de estudio.

Figura 2.7. Probeta.

Figura 2.8. Reloj.

La probeta permitió observar el comportamiento de la altura de la interface sólido-líquido en cada instante de tiempo, mientras que el relot propició registrar el tiempo

transcurrido entre cada una de las observaciones realizadas.

El comportamiento de la sedimentación del lodo 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 2.13). 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).

$$v_{sed} = \frac{dZ}{dt} \tag{2.13}$$

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:

$$\omega_{sed} = \frac{d^2(\rho_s - \rho_m)g}{18\,\mu_m} \tag{2.14}$$

Dónde:

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/cm^3

ρ_m – Es la densidad del medio dispersante, g/cm^3

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

g – Es la aceleración de caída libre, cm/s^2.

Los resultados obtenidos de la velocidad de sedimentación con arreglo a la ecuación 2.13 fueron contrastados con los que se predicen por medio de la ecuación 2.14, para determinar el margen error.

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:

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \qquad (2.15)$$

Dónde:

n- Es el tamaño de la muestra.

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

σ- Es la desviación típica poblacional.

E- Es el error máximo de estimación. Se determina despejando en la ecuación 2.15.

Verificación de la normalidad

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

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \qquad (2.16)$$

$$LX,máx = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \qquad (2.17)$$

$$LX,mín = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \qquad (2.18)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(X_i - \bar{X} \right)^2}{n-1}} \qquad (2.19)$$

Donde:

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

$LX, máx$ – Es el límite superior de tolerancia para el correspondiente parámetro.

$LX, mín$ – 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).

$$E_{rel} = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_2} \right| \cdot 100 \quad \% \qquad (2.20)$$

Dónde:

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 del lodo 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.

$$\Delta P = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right) \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{\mathrm{Re}^b} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot \left(\rho_f - \rho_i \right) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \right] \quad (2.21)$$

Donde:

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

L- Es la longitud de la tubería, m.

n- Es el índice de flujo.

D- Es el diámetro de la tubería, m.

Q- Es el gasto volumétrico que fluye por la tubería, m^3/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/m^3.

ρ_f –Es la densidad final del fluido, kg/m^3.

ρ_i –Es la densidad inicial del fluido, kg/m^3.

g- Es la aceleración de un cuerpo en caída libre, m/s^2.

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

Re– Es el número de Reynolds.

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

$$\mathrm{Re} = \frac{8^{1-n} \cdot D^{n} \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \cdot \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^{n} \qquad (2.22)$$

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 seudoplástico, de acuerdo a lo reportado por Laurencio *et al.* (2012).

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

$$\Delta P_{Local} = \sum \zeta_{Local} \cdot \left(\frac{v^{2}}{2} \right) \cdot \rho \qquad (2.23)$$

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 2.22 con la 2.23 se obtiene la ecuación general para la determinación de las pérdidas totales que se producen en la tubería, tal como se indica a continuación.

$$\Delta P_{Total} = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^{2}} \right) \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{\mathrm{Re}^{b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^{2}}{\pi^{2} \cdot D^{5}} + \frac{16 \cdot Q^{2}}{\pi^{2} \cdot L \cdot D^{4}} \cdot \left(\rho_{f} - \rho_{i} \right) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \right] + \sum \zeta_{Local} \cdot \left(\frac{v^{2}}{2} \right) \cdot \rho \qquad (2.24)$$

Se asumió la condición para la cual el lodo 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 del lodo se determinó utilizando el modelo de Durand y Condolios. Este modelo se basa en experiencias con grava y arena de tamaño uniforme. Los autores definen la “velocidad límite de deposición” como un estado en la tubería para el cual, se logra apreciar un régimen de deposición o lecho móvil. Se determina mediante la ecuación 2.25 (Abulnga, 2002)

$$V_D = F_L \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot (\rho_s - 1)} \qquad (2.25)$$

Donde:

V_D- Es la velocidad crítica de transportación, m/s.

F_L- Es el factor de Durand, que depende de la concentración en volumen y el diámetro de las partículas en d_{50}.

g- Es la aceleración de un cuerpo en caída libre, m/s^2.

D- Es el diámetro de la tubería, m.

ρ_s –Es la densidad del sólido, g/cm^3.

El factor de Durand F_L, no es más que el número de Froude pero modificado para condiciones de sedimentación. El número de Froude se define como el ratio entre las fuerzas inerciales en el flujo y las fuerzas gravitacionales que mantienen a las partículas suspendidas en el flujo.

El factor de Durand se determinó por medio del gráfico de Mc Elvain y Cave, el cual se muestra a continuación en la figura 2.9.

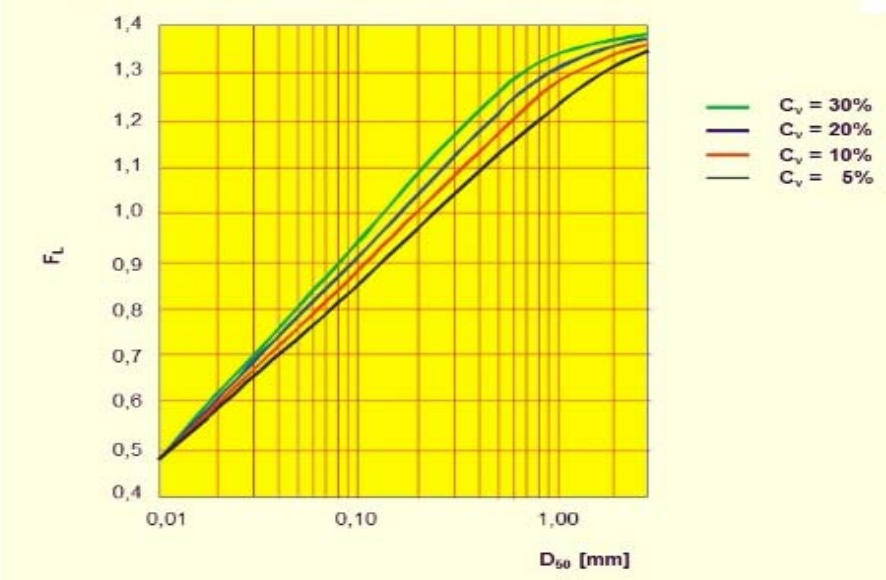

Figura 2.9. Gráfico de Mac-Elvain y Cave para F_L.

Además teniendo en cuenta que la ecuación 2.25 fue determinada para un fluido particular, suspensión de grava y arena, se decidió verificar la velocidad crítica de transportación con el empleo de la ecuación 2.26 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).

$$V_{Crit} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w} \cdot \sqrt{\rho_{polvo} - 1} \cdot \sqrt[6]{S} \qquad (2.26)$$

Donde:

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

D – Diámetro de la tubería, m.

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

P_s – Densidad del polvo, kg/m^3.

S – Concentración de peso en sólido, adimensional.

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 2.4, que se muestra a continuación.

Tabla 2.4. 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

El flujo de lodo que se sugiere para la transportación del lodo evitando la sedimentación se determina a través de la siguiente expresión, la cual se dedujo a partir del análisis de continuidad de un fluido.

$$Q = (1{,}1 \div 1{,}2) \cdot vcrít. \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \qquad (2.27)$$

Donde:

Q- Es el gasto que fluye a través de la tubería, m^3/s.

D- Es el diámetro de la sección transversal del conducto, m.

$V_{crit.}$- Es la velocidad crítica de transportación, m/s.

2.10. 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.

Costo de los experimentos

$$CT = CR + Cg\,1 + Cg\,2 \qquad (2.28)$$

Donde:

CT – Es el costo total.

$Cg1$ – Es el costo de la prueba granulométrica con el analizador de partícula 22.

$C\rho -$ Es el costo de la determinación de la densidad del sólido.

$CR.$ – 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 Procesadora de Árido de Miguel de Sagua de Tánamo puede disponer de los resultados alcanzados, sin haber realizado ningún desembolso de efectivo al respecto.

2.11. Conclusiones del capítulo 2

1. Se plantean las características de los medios e instrumentos utilizados en la determinación de las propiedades del lodo y las dimensiones de la tubería de descarga, lo que constituye la base técnico material para la estimación de los parámetros de trasportación del lodo de la UEB de Miguel de Sagua de Tánamo.
2. Se determinan las expresiones matemáticas y procedimientos a emplear en la determinación de las propiedades del lodo, las dimensiones de la tubería, la estimación 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 del lodo residual generado en la Planta Procesadora de Árido Miguel de Sagua de Tánamo es de importancia en la caracterización del material objeto de estudio para la evaluación de los parámetros de transportación y el posterior perfeccionamiento de su hidrotransporte por tubería, lo que incluye la realización de muestreo con vista al aseguramiento de la representatividad y objetividad en los resultados, el análisis de la granulometría, de la densidad del sólido y del lodo, el cálculo de los porciento de sólidos y del comportamiento reológico.

Los estudios experimentales de las propiedades de transporte del lodo 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 del lodo residual objeto de estudio y el cálculo de los parámetros de transportación por tubería.

3.2. Determinación de la granulometría

Se realizan tres repeticiones del experimento en el *Analizador de Partícula 22* para determinar la tendencia en el comportamiento del diámetro de las partículas en la muestra analizada, con arreglo a la ecuación 2.15.

La tarea consistió en definir la especificaciones de precisión y exactitud tal que se asegure un tamaño de la muestra igual 3. Para un nivel de confianza del 90 %($Z\alpha_{/2}$=

1,96) y asumiendo una desviación típica igual al error máximo de estimación, se obtiene que el tamaño de la muestra necesario es de 3 unidades.

Al aplicar las ecuaciones 2.16 a la 2.19 se observa que el proceso de medición estuvo bajo control estadísticos, puesto que todos los valores estuvieron contenidos en los rangos de normalidad calculados, al nivel de confianza del 95 %, o sea no se observó valor alejado de la tendencia. La figura 3.1 muestra el comportamiento de la masa retenida y la cernida en función del diámetro de la clase.

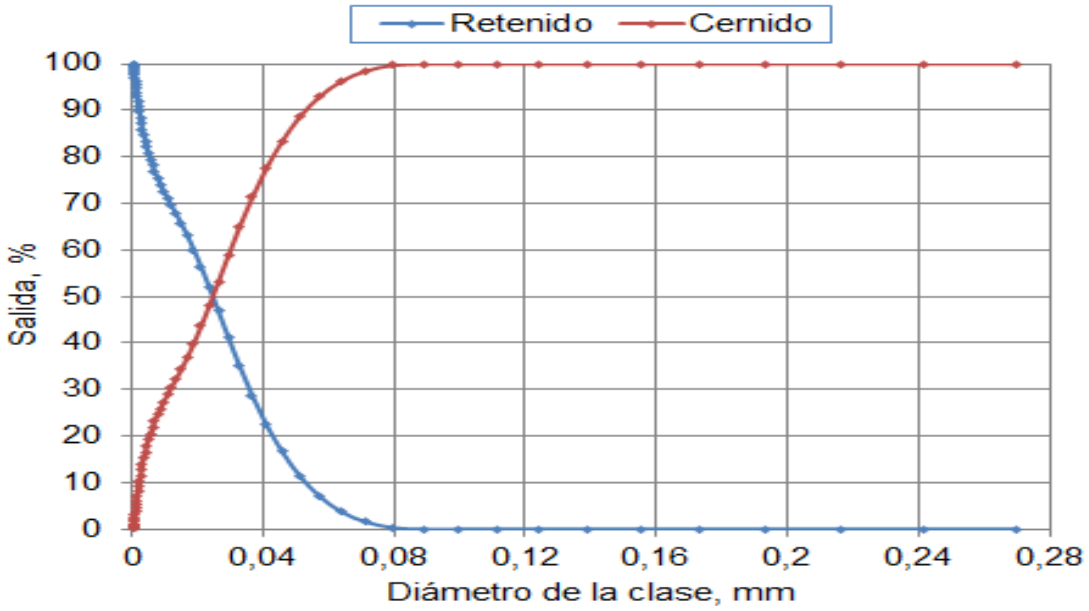

Figura 3.1. Curva de característica sumarias de la arcilla analizada, con el analizador de partícula.

Como puede apreciarse en la figura 3.1 el d_{80} se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0,043 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor.

La clasificación por clases de tamaño realizada a la muestra de lodo indica que este forma sistemas estructurales. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas de hidromezclas estructurales de acuerdo con Turro (2002). De acuerdo con Lambe y Whitman (1997) la muestra se clasifica como limo de tamaño medio.

3.3. Obtención de la traza de la tubería de descarga del lodo

La figura 3.2 muestra el esquema de la tubería de descarga del lodo que se genera en la Planta Procesadora de Arido de Miguel de Sagua de Tánamo. La misma se construyó a partir de mediciones físicas realizadas sobre el terreno, con el empleo del distanciómetro infrarrojo y la cinta métrica mostrada en la figura 2.2 y 2.3 respectivamente. 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 del lodo.

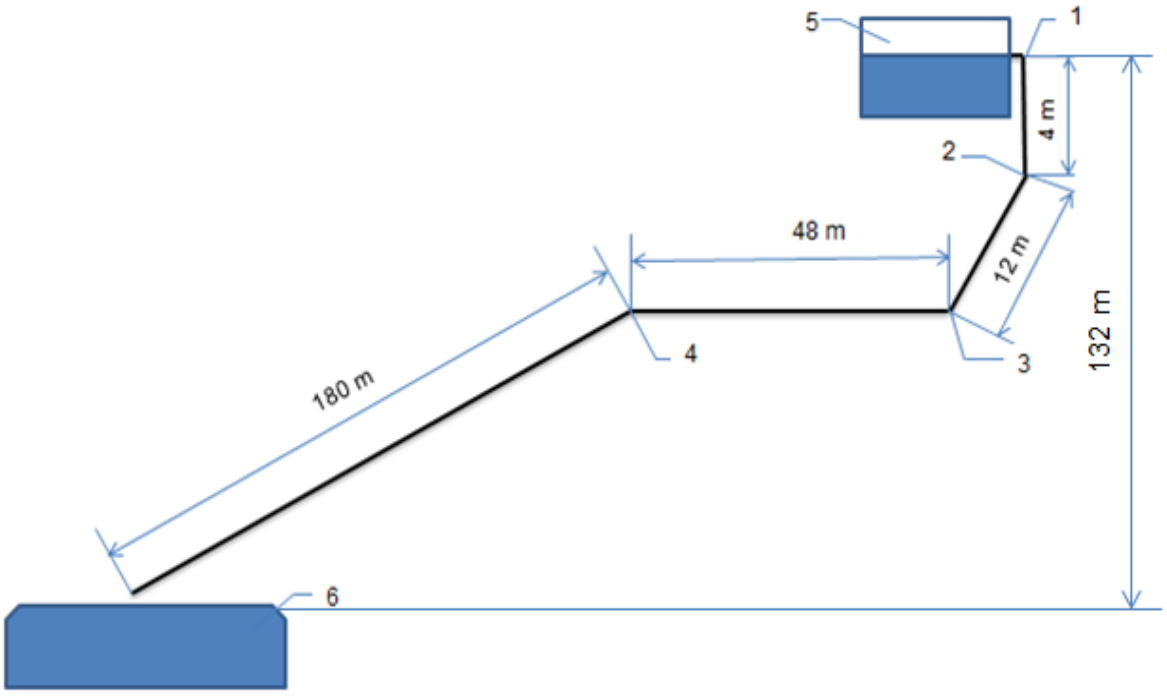

Figura 3.2. Esquema de la tubería para la evacuación del lodo.

En la tabla 3.1 se refieren datos de interés relativo a la figura 3.2 y a la instalación objeto de estudio, que unido a los ya planteados anteriormente contribuyen a la determinación de la velocidad crítica de transportación que caracteriza al lodo objeto de estudio. Además se determinó que el diámetro de la tubería es de 8 in (203 mm) y está construida de plástico.

Tabla 3.1. Datos de la tubería de evacuación.

Indicación	Denominación
1	Codo de 90^0
2	Codo de 90^0
3	Codo de 90^0
4	Codo de 45^0
5	Sinfín lavador
6	Laguna de sedimentación

3.4. Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido

Densidad del sólido

Al aplicar el método del picnómetro se obtienen los valores de la densidad aparente del polvo, con arreglo a la ecuación 2.1 y 2.2. El tratamiento de la incertidumbre de los resultados, con el empleo de las ecuaciones 2.16 a la 2.19, indica que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, puesto que al replicar el experimento no se muestran diferencias significativas entre los resultados obtenidos para un nivel de confianza del 95 %. Se indica que existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la densidad del sólido bajo condiciones similares a las que existieron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,347 a 2,060 g/cm^3, con valor promedio de 1,704 g/cm^3.

Densidad del lodo

La aplicación del procedimiento para la determinación de la densidad del lodo permitió obtener con el empleo de la ecuación 2.3 y las 2.16 a la 2.19 que la densidad media del lodo es de 1 045,19 g/cm^3 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 del lodo

bajo circunstancias similares a las que se efectuó este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,003 a 1,087 g/cm^3.

Determinación del % de sólido

La tabla 3.2 muestra el valor del porciento de sólido calculado a partir de la ecuación 2.4 y la 2.6 y el resultado del error relativo puntual con arreglo a la ecuación 2.20. Se observa que hay alta coincidencia entre los resultados obtenidos en la determinación del porciento de sólido por métodos diferentes, pues el margen de error es inferior a 0,67 %. Esto indica que se puede asumir que la muestra posee un 12 % de sólido y que las densidades implicadas en los cálculos fueron determinadas correctamente.

Tabla 3.2. Resultado del porciento de sólido

Parámetros	Ecuación 2.2	Ecuación 2.6	Error relativo, %
Porciento de sólido	11,95	12,03	0,67

La tabla 3.3 muestra los valores de la densidad del lodo, de la concentración volumétrica y en peso obtenidos para el porciento de sólido analizado, utilizando la ecuación 2.4, 2.5 y 2.6 expuesta anteriormente.

Tabla 3.3. Densidad del lodo, concentración volumétrica y en peso para el porciento de sólido.

Porciento de sólido(S),%	Densidad del lodo, kg/m^3	Concentración volumétrica,%	Concentración en peso,%
12	1 045,19	6	12

3.5. Determinación del comportamiento reológico y los parámetros reológicos del lodo

La curva de flujo del lodo pronosticada y los modelos matemáticos ajustados para el 12 % de sólido se muestran a continuación en la figura 3.3. 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.

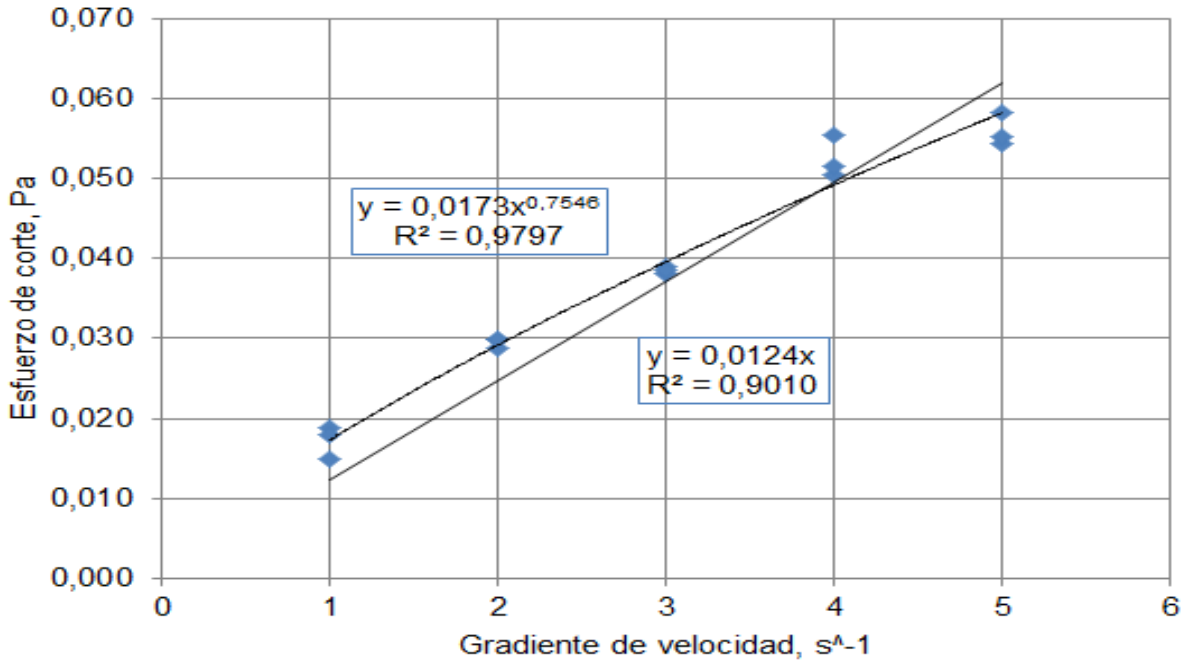

Figura 3.3. Curva de flujo del lodo para un 12 % de sólido.

En la figura 3.3 se aprecia que el esfuerzo de corte del lodo objeto de estudio puede ser determinado a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal (una recta), puesto que el coeficiente de determinación está próximo a la unidad (0,901); pero el modelo de potencia es más adecuado pues posee un mayor coeficiente de determinación (0,98).

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 Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 ($7{,}8806 * 10^{-19}$), el de Ficher un valor de cálculo (4 305,62) superior que el Ficher crítico ($8{,}8732*10^{-18}$) y el coeficiente de correlación de 0,99. A partir de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra a continuación.

$$\tau_{x,y} = 0{,}0173 \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{0{,}7546} \tag{3.1}$$

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 el lodo residual objeto de estudio muestra un comportamiento reológico seudoplástico, 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 0,017 3 $Pa \cdot s$ y el índice de flujo(n) es igual a 0,754 6.

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(Kasatin, 1985), así como el error relativo calculado con arreglo a la ecuación 2.20. Se observa que al aplicar la referida ecuación se incurre en un error relativo puntual de 7,20 %, lo que demuestra la necesidad de hacer mediciones de viscosidad para este caso particular y evaluar la posibilidad de adecuar el modelo propuesto en Kasatin (1985).

Tabla 3.4. Comparación de valores de viscosidad.

Viscosidad calculada, cP Ecuación 2.12, Kasatin (1985)	**Viscosidad medida, cp**	**Error relativo, %**
16,160	17,324	7,20

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 2.16 a la 2.19. El rango de normalidad calculada para la viscosidad aparente es el siguiente: 14,274 a 20,347

cP, para un nivel de confianza del 95 %.

3.6. 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 2.15 a la 2.19; se decide en el intervalo de 0 a 10 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 del lodo se muestra a continuación en la figura 3.4, 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 del lodo.

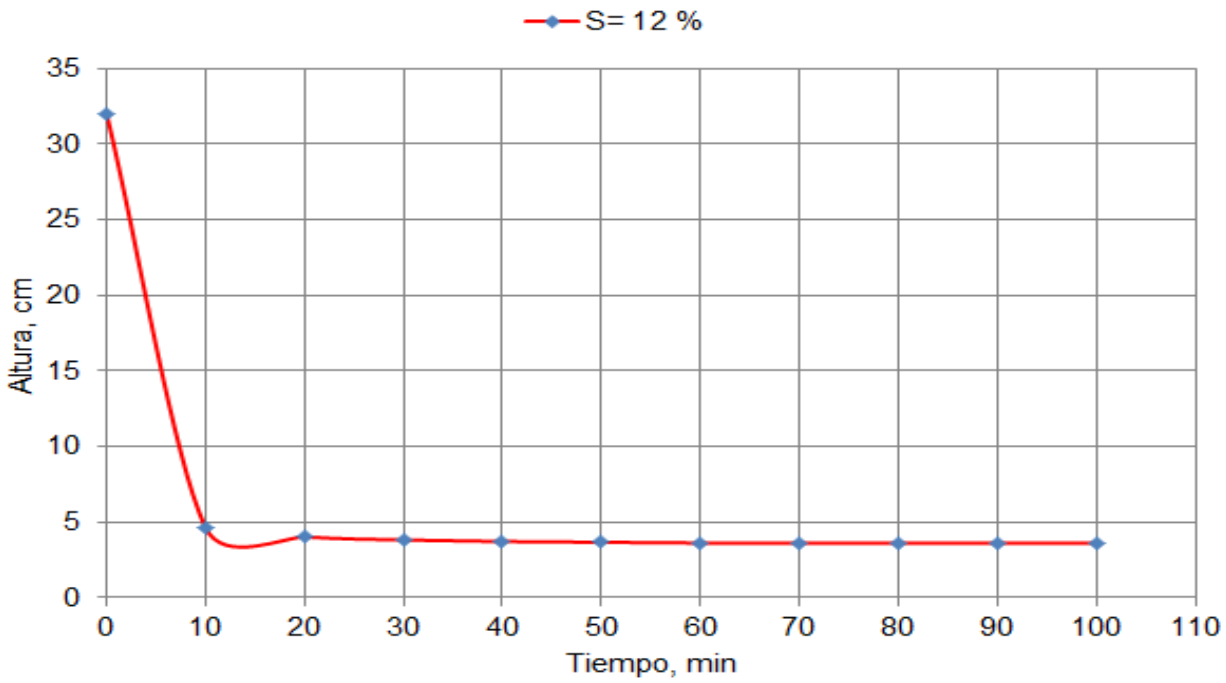

Figura 3.4. Curva de sedimentación del lodo.

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 10 primeros minutos de iniciado el proceso, la fase de sedimentación contrariada que se extiende desde 10 minutos hasta 50 minutos y la fase compresiva que se estudia en el tiempo que media desde 50 hasta 100 minutos. La velocidad de sedimentación del lodo 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 2.13.

Los resultados del cálculo realizado para el ajuste indican que la representación de la curva de la figura 3.4 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 (0,014) y para la variable (0,099), el de Ficher un valor de cálculo (3,39) mayor que el Ficher crítico (0,10) y el coeficiente de correlación de 0,52.

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 3.4 correspondiente a la etapa de sedimentación libre puede ser representada por un modelo lineal significativamente, considerando el criterio de Student, el de Ficher y el del coeficiente. El criterio de Student indica una probabilidad menor a 0,05 para la intersección (0,001254) y en cuanto a la variable (1,89E-13), el de Ficher un valor de cálculo (5,63E+06) superior a el Ficher crítico (1,89E-13) y el coeficiente de correlación de 0,999. Los cálculos efectuados permiten definir el siguiente modelo para la fase de caída libre.

$$Z = 32 - 2{,}74 \cdot t \qquad (3.2)$$

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 al lodo objeto de estudio en la fase de caída libre. La velocidad de sedimentación según lo planteado anteriormente es de -2,74 cm/min.

Determinación del error relativo

La tabla 3.5 muestra los resultados de la velocidad de sedimentación obtenida por medición y el calculado por medio del modelo de la Ley de Velocidad de Stokes, así como el error relativo calculado con arreglo a la ecuación 2.20. Se observa que al aplicar la referida ecuación se incurre en un error de 35 %, 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 2.14	**Velocidad medida, cm/s**	**Error relativo, %**
0,071 cm/s	0,046	35

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.

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

En la figura 3.2 se mostró el esquema de instalación que trasiega el lodo generada en la Planta de Beneficio objeto de estudio, desde el sinfín lavador 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 del lodo 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 del lodo.

Parámetro	**Valor**	**Unidad de medida**
D	0,2032	m
L	244	m
n	0,754 6	-
K	0,017 3	Pa*s
ρ	1 045,19	kg/m^3
a	0,14	-
b	0,2	-
g	9,81	m/s^2
ΔZ	-132	m

Tabla 3.6. Datos de la instalación y del lodo (Continuación).

Parámetro	Valor	Unidad de medida
$\zeta codo - 90^0$	1(3 codos)	-
$\zeta codo - 45^0$	0,35(1 codo)	-
$\zeta est.b$	0,5	-
$\zeta ens.b$	1	-
Q	0,0302	m^3/s
v	0,9304	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
2.22	Re	26 055	-
2.21	ΔP	-1 353 437,43	Pa
2.23	ΔP_{Local}	1 515,47739	Pa
2.24	ΔP_T	-1 351 921,96	Pa

Los resultados mostrados en la tabla anterior muestran el cálculo realizado para un transporte de lodo por tubería que posee un número de Reynolds de 26 055, por lo que el régimen de flujo es turbulento. Se infiere que no es necesario utilizar una bomba para la evacuación del lodo 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 de presión necesaria en la tubería.

3.8. Verificación de la velocidad crítica de transportación del lodo

En la tabla 3.8 se muestra los resultados de la determinación de la velocidad crítica de transportación que caracteriza al lodo objeto de estudio sobre la base de las ecuaciones 2.25 y 2.26. La velocidad crítica calculada según la ecuación 2.25, es superior a la que se transporta el lodo por lo que no existe garantía de que no haya sedimentación en la tubería durante el transporte (1,072 es superior a 0,9304). Por otra parte la determinación de la velocidad critica a través de la ecuación 2.26 indica que la velocidad crítica calculada según la ecuación 2.26, es inferior a la que se transportará el lodo por lo que en este caso existe garantía de que no haya sedimentación en la tubería durante el transporte (0,26 es inferior a 0,9304), para el cálculo de la velocidad crítica de transportación se escogió un valor de K_d igual a 0,42, extrapolando a partir de los valores contenidos en la tabla 2.4, ya que el diámetro de las partícula del lodo 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
2.25	V_D	1,072	m/s
2.26	$V_{Crít.}$	0,26	m/s
2.20	Error relativo	76	%

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 propuesto, 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 otro fluidos introducen imprecisiones en el resultado. Todo lo cual sugiere la necesidad de realizar adecuaciones o correcciones a las referidas ecuaciones para este caso.

Por otra parte se tiene el conocimiento de que cuando la tubería de descarga del

lodo era de diámetro 6 in no se presentaba el fenómeno de la sedimentación en la tubería, por lo que es razonable hacer tal verificación para ver si los modelos predicen tal realidad. La tabla 3.9 muestra el resultado del cálculo realizado para la condición de diámetros de la tubería de 6 in (0,1524 m).

Tabla 3.9. Resultados del cálculo de la velocidad crítica de transportación con diámetro de 6 in

Ecuación	Parámetros	Valor	Unidad de medida
2.25	V_D	0,928	m/s
2.26	$V_{Crít.}$	0,20	m/s

Se observa que ambos modelos predicen adecuadamente lo realidad que se observó, pues se obtienen velocidades inferiores a la que se transportaba el lodo, lo cual es indicativo de la no existencia del fenómeno de la sedimentación. Por lo que se acentúa la sospecha de que exista sedimentación en la tubería de descarga del lodo.

Sobre la base de la ecuación 2.27, y considerando como válido el modelo dado por la ecuación 2.25 se determina que para evitar el fenómeno de la sedimentación durante la transportación del lodo, el gasto de lodo debe aumentarse de 108 m^3/h a 138 m^3/h. Lo cual es posible ya que la bomba de suministro de agua a la instalación es capaz de desarrollar un gasto máximo de 144 m^3/h.

Para la nueva condición de la instalación se determina por la ecuación 2.24 que es posible efectuar la evacuación del lodo de la instalación a gravedad, puesto que la presión dada por el potencial hidrostático es superior en -1 351 425,57 a la sumatoria de todas las pérdidas de presión que se producen en la tubería.

3.9. Valoración económica

Todo proyecto genera efectos o impactos de naturaleza diversa, directos, indirectos, externos e intangibles. Estos últimos rebasan con mucho las posibilidades de su

medición monetaria y sin embargo no considerarlos resulta pernicioso por lo que representan en los estados de ánimo y definitiva satisfacción de la población beneficiaria o perjudicada.

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, por 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 metódica que inserte lo cualitativo en lo cuantitativo.

En este trabajo se expone la caracterización del lodo generado en la Unidad Empresarial de Base Miguel de Sagua de Tánamo. 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.

La caracterización de la granulometría efectuada contribuye a explicar el comportamiento reológico del lodo. Ya que según lo expresado por Garcell (1984) 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.

Las curvas de flujo elaborada es importante para el diseño y selección de los equipos a emplear para la evacuación y/o tratamiento del lodo 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 del lodo 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 del lodo 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, además se sienta base para evaluar la posibilidad de recuperación del agua que posee el lodo que se evacúa de la instalación, lo que permitiría aumentar la disponibilidad de agua.

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. Se pone de manifiesto las limitaciones de la teoría existente.

Sobre la base de la ecuación 2.28 se efectúa el análisis económico del costo en el que se incurre por concepto de los experimentos realizados. En la tabla 3.10 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 del lodo. 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 3.10. Costo de la investigación.

Parámetros	Valor, CUC	Valor, CUP	Proveedor
Valor de la investigación(I_{inv}.)			
Pruebas realizadas:			
Ensayos granulométricos con *Analizador de partícula 22*	22,5		ECCG
Ensayos de densidad de la arcilla	582,49		ISMM
Ensayos de densidad del lodo	552,44		ISMM
Ensayos de reología	112,65	379,75	CEDINIQ
Ensayos de sedimentación	554,05		ISMM
Costo total de la investigación	1824,13	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

Analizar el factor ambiental en la industria y en general en la sociedad es un objetivo de especial relevancia en el mundo, de ahí que sea importante hacer el mayor énfasis en mantener un estricto control del proceso, lo cual se debe ver muy unido al factor económico directo.

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.

❖ **UEB de Miguel de Sagua de Tánamo**

La UEB de Miguel de Sagua de Tánamo actualmente tiene incidencia perjudicial en relación al medio ambiente, debido a las afectaciones que se producen, algunas de las cuales se refieren a continuación:

1. Afectaciones por el proceso de lavado de áridos, pues el tubo de descarga del lodo no cumple plenamente las funciones asignadas por diseño, el mismo no presenta la longitud total que tenía inicialmente, en consecuencia el lodo se descarga en lugares no adecuados, provocando alteraciones en el ecosistema.
2. Necesidad de realizar operaciones de mantenimiento para restituir la capacidad de trabajo de la instalación, incrementando los costos por este concepto.
3. La necesidad de disponer de mayores volúmenes de agua para poder satisfacer la demanda actuales y futura del proceso y la comunidad. En lo adelante se prevé aumentar los volúmenes de producción de árido, lo que incrementará la demanda de agua.

Las afectaciones que se presentan debido a el tubo de descarga del lodo han provocado que la administración de la Planta Procesadora de Árido haya sido objeto de sanciones por organismo del CITMA, lo que provoca que se intensifiquen la

búsqueda de soluciones que tributen a mitigar las afectaciones ambientales.

La presente investigación debe conducir a ofrecer garantía relativa al funcionamiento normal de la tubería de descarga del lodo, lo cual se expresa en el cumplimento de las siguientes exigencias:

1. Efectuar la trasportación del lodo a gravedad, desde el sinfín lavador (figura 3, Anexo) hasta la laguna de sedimentación (figura 4, Anexo), evitando de esta manera el uso de energía eléctrica para el accionamiento de bombas.
2. Realizar la descarga del lodo en el lugar adecuado, evitando las afectaciones a la flora, la fauna y a la calidad del agua del Rio Miguel de Sagua.
3. Disminuir las interrupciones que se producen en el proceso debido a la necesidad de realizar operaciones de mantenimiento para restituir la capacidad de trabajo de la instalación, afectada por el fenómeno de la sedimentación y/o la rotura del tubo de descarga del lodo.

Los resultados de la presente investigación no logran que se materialicen las exigencias que se le plantean al proceso de evacuación del lodo, pero contribuye a la formación de criterios para la toma de decisiones racionales.

3.11. Conclusiones de capítulo 3

1. Se efectúa la determinación de la granulometría del lodo generado en el proceso de lavado de la UEB de Miguel de Sagua de Tánamo, utilizando el analizador de partícula 22, obteniéndose como resultado que el diámetro medio correspondiente al 80 % cernido es de 0,043 mm, lo que indica un tamaño de partículas que da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas de hidromezclas estructurales y la muestra se clasifica como limo de tamaño medio.
2. Se realiza la caracterización reológica y la determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria del lodo objeto de estudio para un 12 porciento de sólido, obteniéndose como resultado que su curva de flujo se ajusta significativamente a un comportamiento seudoplásticos, 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.

3. Se calculó la pérdida de presión que se produce en la tubería de descarga del lodo y, la velocidad crítica de transportación por dos métodos. El cálculo de la pérdida de presión indicó que el lodo puede evacuarse de la instalación a gravedad puesto que la pérdida de presión total ofreció un valor negativo y, el de la velocidad crítica de transportación que se requiere de un gasto superior a 138 m^3/h en la instalación para que no exista sedimentación en la tubería con el nuevo diámetro, no obstante se sugiere una validación de los métodos propuestos puesto que no se obtuvo coincidencia en los resultados al obtenerse un error relativo puntual del 76 %.
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 1 824,13 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales que se presentan en el tubo de descarga del lodo, están dada por generación de polvo, alteración en el ecosistema y disminución de la calidad del agua del Río Miguel de Sagua.

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 determinación de propiedades físicas y reológica para el lodo de la UEB de Miguel de Sagua de Tánamo; ni una estimación de los parámetros de transportación.

2. La determinación de las propiedades físicas y reológica del lodo indica que el diámetro medio de las partículas correspondiente al 80 % cernido es de 0,043 mm, la densidad aparente del sólido de 1 706 kg/m^3, el porciento del sólido presente en el lodo homogenizado es de 12 %, la curva de flujo reflejó un comportamiento seudoplástico con un coeficiente de correlación del 98 %, y se obtuvo una velocidad de sedimentación gravitatoria de 2,74 cm/min.

3. El cálculo de la pérdida de presión que se produce durante el transporte del lodo ofreció como resultado un valor de -1 351 921,96 Pa para el gasto de 108 m^3/h y un diámetro de tubería de 8 in (0,203 2 m), y de – 1 351 425,57 Pa para el gasto de 138 m^3/h, lo que indica que el lodo puede evacuarse por gravedad desde la instalación.

4. La estimación de la velocidad crítica de transportación utilizando dos métodos diferentes indicó como resultados que existe la posibilidad de que haya sedimentación en la tubería de descarga del lodo cuando se evacúe un gasto de 108 m^3/h en el diámetro de tubería de 8 in (0,2032 m) ya que la velocidad crítica de transportación, según uno de los métodos, es superior a la velocidad de transportación(1,072 m/s es mayor que 0,9304 m/s); además se sugiere que para evitar la sedimentación en la tubería debe aumentarse el gasto de lodo a un valor superior a 138 m^3/h considerando como válidos los modelos matemáticos utilizados.

5. La valoración de las implicaciones económicas y ambientales relacionadas con los resultadas del tema de investigación, permitió plantear que por concepto de los ensayos realizados se genera un costo de 1824,13 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales que se presentan en el tubo de descarga del lodo, están dada por generación de polvo, alteración en el ecosistema y disminución de la calidad del agua del Río Miguel de Sagua.

RECOMENDACIONES

1. Determinar el rango de variación del porciento de sólido que contiene el lodo que se evacúa en la Planta Procesadora de Árido de Miguel de Sagua de Tänamo, puesto que se ha observado que no es una magnitud constante en el tiempo.
2. Diseñar y realizar experimentos para la caracterización reológica y la determinación de la velocidad de sedimentación gravitatoria del lodo objeto de estudio, que considere el rango de variación del porciento de sólido.
3. Realizar una validación del modelo propuesto para la determinación de la pérdida de presión que se produce durante el transporte de fluidos por tubería con comportamiento seudoplástico.
4. Efectuar una validación de los modelos propuestos para la determinación de la velocidad crítica de transportación de fluidos por tubería.
5. Elaborar una propuesta de sedimentadores para la recuperación del agua que contiene el lodo que se evacúa desde la instalación, para aumentar la disponibilidad de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abulnaga, Baha [1] 2002 *Slurry Systems Handbook*, New York: McGraw-Hill.
2. 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.
3. 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.
4. Bandala M. *Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
5. Banerjee T.P., M.Das y S.K. Das. *Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves*. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211
6. Cabrejos Guillén, Crispin. “*Evaluación del efecto de la floculación química a pulpas de carbonato de níquel en la Empresa Comandante René Ramos Latour”. Etapas 01 y 02.* Trabajo de diploma. Dpto. Ing. Mecánica, Facultad Metalurgia y Electromecánica, ISMM. 2011.
7. Caldiño V. I., Salgado M. G. *Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. (2004).
8. Coe, H. S.; Clevenger, G. H. 1916: *Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. Trans. Am.* Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum. Engrs., 55, 356.
9. Corral, Martínez, C. C. 2009: *Velocidad de sedimentación de óxido de zirconio dispersado en alginato de sodio adicionado con goma gelan*. Dr.C. Carlos Francisco Cruz Fierro (Tutor). Tesis de Residencia Profesional. Instituto Tecnológico de Durango. 52 p.

10. De la Paz N. *Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida. Centro de Investigación y Desarrollo de Medicamentos,* Rev. Cubana Farm 2002; 36(1):21-7.
11. 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.
12. Díaz, A., *Manual de hidráulica aplicada*. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1989.
13. Egolf, C.B.; McCabe, W.L. *Rate of Sedimentation of Flocculated Particles*.Trans. Alche. Vol 33. 1937. P 620.
14. Ferrer Carbonell E. A. y G. Rosario Acosta. 1991: *Estudio de la sedimentación del mineral laterítico en los espesadores de la fábrica “Comandante Pedro Sotto Alba”.* Revista Minería y Geología, Nº3.
15. Garcell, L. *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía, 2001.
16. 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.
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, P.L. *Sedimentación de suspensiones minerales, influencia de las propiedades superficiales y reológicas sobre el proceso*. Curso de capacitación, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2004.

20. García E.J. y. Steffe J.F., *Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow.* Journal of Food Process Engineering: 9, 93-120, 1987.
21. García, 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.
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. GARCÍA, F.2003: *Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento.* Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de ingeniería. 121 p.
24. Gutiérrez. O, Bueno. A. 2004: “*Estudio de la Sedimentación de las pulpas lateríticas y de los factores que la afectan”*. Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
25. 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.
26. Heny, K.; Fred, H.; Stephen, L. 1959. *Mineralogía.* Edición revolucionaria. La Habana.
27. Hernández, S. 1986. *Metrología dimensional*. Editorial ISPJAE.
28. Ibarz A., J. Vélez y G. Barbosa. *Transporte de Alimentos Fluidos a Través de Tuberías*. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
29. Izquierdo P. R., Turro B. A., Nikolaev A., *Hidrotransporte del mineral lateritico en regimen estructural*. Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez, Revista MinerÌa y GeologÌa Vol . XVII I, No. 2, 2001, ISSN 0258 5979 pag. 53 – 59.

30. 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.
31. 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].
32. Kasatin, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
33. Khatib, M.A.M. Al., *The development of poiseuille flow of a Pseudoplastic fluid*, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 31, Number 1ª, January, 2006.
34. Kramer García F, (2012) *Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible*.
35. Laguarda, Martínez, E. 2012: *Investigation of sedimentation behaviour of Microcrystalline cellulose: Relating particle-to-particle interaction to sedimentation behavior*. Dr.C. Tuve Mattsson (Tutor). Tesis de Maestría. Chalmers University of Technology. 44 p.
36. Laurencio-A.; Falcón, H.; Retirado M. Pérez M., 2012. *Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (*11º API). Minería y Geología / v.28 n.3 / julio-septiembre / 2012 / p. 70-86. ISSN 1993 8012.
37. Leyva, B., Guillen, Y., Torres, E., y Laurencio, H. 2014. *Pronóstico de la velocidad critica de transportación de lodo residual*. Enermoa. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
38. Macedo C., Martínez J. y Vélez. J., *Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto Para el Manejo de Fluidos Newtonianos.* Información Tecnológica: 12 (6), 169-176, 2001.
39. Mansoori, G.2005: *Modeling and prevention of asphaltene and other heavy*

organic deposition in Oil–SPE. 27070.

40. Mariño, A. Mora, L. Chang, A. 2009. *Equipos de la metalurgia no ferrosa*. Editorial Felix Varela. La Habana. Cuba. 238 p.
41. Mariño-Pérez, A.; Falcón-Hernández J.; Sales, Valadao, G., E.,(2010): *Correlación teórica entre las concentraciones de sólidos en el lodo sedimentado por gravedad y en la torta sin escurrir*. Minería y Geología 26 (4): 79-103.
42. Martínez L.P. y Linares J.A., *Resistance Coefficients of Fittings for Power-Law Fluids in Laminar Flow. Journal of Food Process Engineering:* 24, 135-144, 2001.
43. Martínez Rojas, R y Laurencio Alfonso, H.L. *“Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad (cola) en el proceso carbonato amoniacal*”. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, 2004.
44. 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.
45. Matos, L. A. *“Caracterización reológica y granulométrica del lodo generado en la planta de beneficio del Jobo de Sagua de Tánamo*. ISMM. Moa, 2015.66p.
46. Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. 2005. *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba pp 25 – 30.
47. Mitrofanov, L. 1984. *Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales*, Editorial MIR, Moscú 1984.
48. Mular y Bhappu 1982; Mular J. R., Bhappu P. M,. 1982. *A one-dimensional model of sedimentation using darcys law*. Separation science and Technology, 14(4): 291-304.
49. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada., *Pipe Transportation of Minced Fish Paste*. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980).

50. Nekrasov B. “*Hidráulica”*. Editorial Pueblo y Educación, 1986.
51. Núñez, M.R. *Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMMM, 2004. 75 h.
52. Orozco Suárez, Leonel. *Determinación de los Parámetros de Sedimentación en la planta de Lixiviación de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara* .Trabajo de diploma. Dpto. Ing. Mecánica, Facultad Metalurgia y Electromecánica, ISMM. 2009.
53. Pakrovskaya, V.I., *El transporte hidráulico en la industria minera*. Moscú: Niedra, 1985, 192 p.
54. Pavlov, K.F. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Editorial MIR, Moscú, 1981.
55. Pedroso I., Turiño I., Jáuregui S., González G., *Gradiente de velocidad para la transportación de mieles y meladuras en conductos circulares,* Centroazucar, volumen2, 2000.
56. Perona P., an *Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids*. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
57. Perry J.H., *Chemical engineers handbook.* 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1984.
58. Perry, Ch. K. 2000 Perry`s *Chemical engeneer`s handbook*. Ed. Revolucionaria, La Habana, 2t.
59. Rabinóvich, E. Z. 1987: “*Hidráulica”*. Editorial MIR, Moscú.
60. Ranjan, Rout, J. 2011: *Study of the settling characteristics of fly ash-water slurry and designing of a settling pond.* Dr.C. P. Rath (tutor). Tesis de Grado. National Institute of Technology. 54 p.
61. Roque, D., *Método de recalculo 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.

62. Rosabal, J. y Garcell L., *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. Tomo I.

63. Sánchez M.G., *Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos*, Revista facultad de ingeniería, U.T.A. (CHILE), VOL 10, 2002, pp. 23-34

64. Santos, F.: Martín, M., *Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrifuga;* Centro azucar, N 1, 1999.

65. Skelland A.H. *Non Newtonian flow and heat transfer*. Ediciones revolucionarias, La Habana, 1970.

66. Steffe J.M. y R.G. Morgan., *Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods*. Food Technology. Dic.: 78-85, 1986.

67. Suárez F.M. *Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito*. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.

68. Svarovsky, L.: *Separation Solid-Liquid Chem*. Eng., vol. 86, 2000; (a) núm. 14, p. 62; (b) núm. 15, p. 93; (c) núm. 16, p. 69.

69. T. William Lambe. Robert V. Whitman. *Mecánica de suelos*. Editora Limusa. México. 1997. ISBN 968-18-1894-6 Massachusetts. Editora Limusa. México 1997.

70. Tejeda, H.D. *Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales*. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.

71. Toose, E.M. *A boundery integral method for two dimentional) (non) – Newtonian drops is slow visions flow*. Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics, 1995.

72. Truscot, F, M. 1978. *What the filter man should Know About Theory, Filtration and Separation*, July/August.

73. Turiño, I. M. *Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrifuga*. Centro azúcar, No.1, 1994.

74. Turro, B.A. *Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002.

75. Vega, Guzmán, C; J, Villacreses-Zambrano, A, J. 2006: *Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio*. Dr.C. David Matamoros (Tutor). Trabajo de Diploma. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 182 p.

76. *Viscosímetro programable Brookfield DV-II+ pro manual M/03-165* Edición Noviembre’ (2006).

77. Welty J.R., R.E. Wilson y Wicks C.E., *Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer*, Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA. pp. 202-219, 1976.

78. Wills .B.A, 1985, Gupta. A. M, 2006. *Mineral Processing Technology.* Pergamon Press, Oxford, Third Edition, 1985.

79. Zelikman .N. A.; M. G. Voldman; V. L. Beliaeuskaya. *Teoría de los mecanismos hidrometalúrgicos*. Moscú. 1982.

Anexos

Figura 1. Planta de Beneficio de Áridos de Miguel de Sagua de Tanamo.

Figura 2. Área de almacenamiento del árido ya clasificado.

Figura 3. Sinfín lavado y tubo de descarga del lodo.

Figura 4. Antigua área de sedimentación del lodo.