



INSTITUTO SUPERIOR
MINERO METALÚRGICO DE MOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO
FACULTAD DE METALÚRGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

en opción al título de Ingeniero Mecánico

TÍTULO: Caracterización reológica y granulométrica del lodo generado en la planta de beneficio del Jobo de Sagua de Tánamo.

Autor: Eglis Matos Pupo

Tutor(es): Ms.C. Benigno Leyva de la Cruz.

Dr.C Héctor Luis Laurencio Alfonzo.

**“Año 57 de la Revolución”
Moa - 2015**



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Eglis Matos Pupo

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.

Ms.C. Benigno Leyva De la cruz

Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonzo

Eglis Matos Pupo



PENSAMIENTOS

Cuando la sabiduría entrare en tu corazón, y la ciencia fuere grata a tu alma, la discreción te guardará, te preservará la inteligencia, para librarte del mal camino.

Prov. 2:10-12a

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 la oportunidad de vivir y ser lo que soy.
- ❖ A mi madre y mi padre, por aconsejarme y motivarme siempre a lograr mis metas.
- ❖ A mi esposa, por su apoyo y amor en todo momento.
- ❖ A mi padrastro que siempre me aconsejó y apoyó.
- ❖ A mi familia que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional.
- ❖ A mi suegro y mi suegra por su ayuda incondicional.
- ❖ 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 mis tutores 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, que con tanto esfuerzo siempre estuvo dándome fuerzas para seguir, a mi querida esposa por su dedicación y cariño, y a toda mi familia en general.

SÍNTESIS

Este trabajo surgió motivado por la problemática asociada a la disponibilidad de agua para el proceso de lavado de árido en la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo. El objetivo que se trazó consistió en caracterizar el comportamiento reológico del lodo con diferentes porcentos de sólido, para el cálculo de la viscosidad aparente y, posterior evaluación de los parámetros de trasportación de la instalación. Para cumplir con el objetivo propuesto se efectuó muestreo, determinación de la granulometría por dos métodos diferentes (analizador de partícula 22 y tamizado por vía húmeda), medición de las densidades, cálculo del porciento de sólido y de la concentración en volumen, medición de la viscosidad y calculo económico. Se obtuvo que el diámetro medio correspondiente al 80 % cernido es de 0,037mm y 0,043 mm para los respectivos métodos, lo que indica un error relativo del 16 % y la no existencia de diferencia significativa al nivel de confianza del 95 %. La curva de flujo se ajusta significativamente a un comportamiento pseudoplásticos, y se demuestra la necesidad de realizar correcciones a los modelos propuestos por otros autores para el cálculo de la viscosidad aparente. Se determinó que por concepto de los ensayos realizados se incurre en un costo de 1 844,99 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 que trae consigo la contaminación de la UEB, sus alrededores y al ser humano.



SYNTHESIS

This work arose motivated by the problem associated to the readiness of water for the laundry process of arid in the UEB of the Jobo of Sagua of Tanamo. The objective that was traced consisted on characterizing the behavior rheological of the mud with different solid percent, for the calculation of the apparent viscosity and, later evaluation of the parameters of transportation of the installation. To fulfill the proposed objective sampling, determination of the grain for two different methods it was made (particle analyzer 22 and sifted for via humid), mensuration of the densities, calculation of the solid percent and of the concentration in volume, mensuration of the viscosity and I calculate economic. It was obtained that the diameter half corresponding to 80 sifted% it is of 0,037 mm and 0,043 mm for the respective methods, what not indicates a relative error of 16 % and the existence of significant difference to the confidence level of 95 %. The flow curve is adjusted significantly to a behavior pseudoplastic, and the necessity is demonstrated of carrying out corrections to the models proposed by other authors for the calculation of the apparent viscosity. It was determined that for concept of the realized rehearsals it is incurred in a cost of 1 844, 99 CUC more 379, 75 CUP and that the main environmental affectations that are presented in the outlet pipe of the mud, are given by powder generation that brings I get the contamination of the UEB, their surroundings and to the human being.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	5
1.1. Introducción	5
1.2. Trabajos precedentes realizados en la instalación	5
1.3. Trabajos precedentes sobre los parámetros de hidrotransporte en el flujo de hidromezclas por tuberías.....	6
1.4. Propiedades de fluidos	11
1.4.1. Propiedades reológica.....	12
1.5. Clasificación reológica	13
1.5.1. Curvas de flujo	13
1.5.2. Modelos reológicos	14
1.5.3. Factores que influyen en el comportamiento reológico	17
1.6. Instrumentos de medición.....	19
1.7. Propiedades granulométricas	20
1.8. Conclusiones	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Introducción	25
2.2. Determinación de la cantidad de mediciones	25
2.3. Toma y preparación de las muestras.....	26
2.4. Determinación de la granulometría.....	27
2.4.1. Determinación de la granulometría con el analizador de partículas compacto 22.....	27
2.4.2. Método de los tamices	29
2.5. Determinación de la densidad aparente del sólido, del lodo y del % de sólido	



.....	30
2.5.1. Densidad del sólido	30
2.5.2. Densidad del lodo.....	31
2.5.3. Porciento de sólido.....	32
2.6. Características del instrumento de medición para la prueba reológica.....	32
2.7. Diseño del experimento	35
2.7.1. Selección de las variables de entradas y sus niveles.....	36
2.7.2. Caracterización de las variables de salida	36
2.7.3. Matriz de planificación del experimento	39
2.8. Elaboración de los resultados.....	40
2.9. Análisis económico	44
2.9.1. Costo - beneficio	44
2.10. Conclusiones del capítulo 2	45
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1. Introducción	46
3.2. Determinación de la granulometría.....	46
3.3. Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido	49
3.4. Determinación del comportamiento reológico del lodo	50
3.5. Análisis de variancia de la viscosidad.....	51
3.6. Ajuste de curvas por regresión	52
3.7. Determinación del error relativo	58
3.8. Valoración económica.....	60
3.9. Efectos ambientales	62
3.10. Conclusiones de capítulo 3.....	64
CONCLUSIONES GENERALES.....	65
RECOMENDACIONES	66



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
----------------------------------	----

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de gestión de la calidad en los momentos actuales se han convertido en el mundo globalizado de hoy, es 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.

El lodo proveniente del lavado de las arenas, 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).

Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido; para determinar si un equipo ya construido (con el fin de transportar o elaborar un material determinado) puede ser usado con otro material diferente; para clasificar los materiales 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).

En relación con lo anterior planteado se debe saber que en general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas partículas que poseen propiedades magnéticas con las que ocurre lo contrario, como es el caso de las pulpas de maghemita, según lo expresado por Garcell (1994).

En Cuba existen en todas las provincias, de una capacidad determinada, plantas

procesadoras de áridos, donde juegan un papel decisivo en la efectividad de dichas máquinas, las propiedades físico-mecánicas de los materiales extraídos de las canteras y yacimientos y, la correcta selección y diseño del equipamiento tecnológico. Hasta el momento, los equipos de extracción y carga, transporte, preparación mecánica y beneficio de áridos de la industria de materiales de construcción, se adquieren en el extranjero, sin embargo, se tiene la posibilidad de aprovechar los resultados de las investigaciones de instituciones (ISMMM, CEPRONI Y CTDMC), uso de herramientas y metodologías automatizadas.

La Unidad Básica Empresarial (UEB) del Jobo de Sagua de Tánamo requiere de realizar una innovación de su tecnología para poder aumentar su competitividad puesto que la misma ha presentado deficiencias relacionadas con:

- Sedimentación de lodo residual en la tubería de evacuación, incrementando los costos por este concepto-
- Interrupciones del proceso por déficit de agua y en lo adelante se prevé aumentar los volúmenes de producción, lo que se traduce en un incremento de la demanda de agua.
- Afectaciones ambientales por el proceso de lavado de áridos, pues el tubo de descarga del lodo no cumple plenamente con las funciones asignadas por diseño el mismo no presenta la longitud total que tenía inicialmente y se le ha practicado un orificio en la parte superior, en consecuencia el lodo se descarga en lugares no adecuados;
- Insuficientes conocimiento de las propiedades físico-mecánicas y reológica del lodo residual, en relación con el porcentaje de sólido que posee el lodo.

Dada la situación existente en relación con el insuficiente conocimiento de las propiedades físico-mecánicas y reológicas se requiere investigar sobre los métodos adecuados para la determinación de dichas propiedades. La determinación de la reología permite clasificar reológicamente el fluido, determinar la viscosidad, calcular el número de Reynolds y por consiguiente tratar el régimen de flujo ya sea turbulento o laminar. La prueba de granulometría permite caracterizar las partículas en suspensión como forma de asegurar la reproductividad en los resultados, y construir a la explicación del comportamiento reológico del fluido.

En cuanto a la deficiencia existente en la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo y la necesidad de determinar con adecuada precisión las propiedades del lodo, se declara el siguiente **problema a investigar**:

Insuficiente conocimiento del comportamiento reológico del lodo en relación con el porcentaje de sólido y la granulometría que posee el mismo.

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

Si se realiza la caracterización reológica del lodo para diferentes porcentajes de sólidos y de su granulométrica se podrá definir los modelos que describen las curvas de flujos, y demostrar la necesidad de realizar correcciones a los modelos propuestos por otros autores para el cálculo de la viscosidad aparente

Se establece como **objeto de la investigación**: el lodo generado en el lavado de árido y como **campo de acción** la caracterización del lodo a través de ensayos reológicos y granulométricos.

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

Caracterizar el comportamiento reológico del lodo que posee diferentes porcentajes de sólido, para la fundamentación de la necesidad de realizar correcciones a los modelos propuestos por otros autores en el cálculo de la viscosidad aparente y, posterior determinación de los parámetros de transportación.

Objetivos específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre las propiedades reológicas y granulométricas.
2. Caracterizar los instrumentos y procedimientos a emplear en la comparación de ensayos reológicos y granulométricos.
3. Efectuar un análisis y valoración de los resultados obtenidos en la pruebas sobre la base de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

De los objetivos propuestos se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

1. Revisión bibliográfica sobre la determinación de la reología y la granulometría.



2. Definición del procedimiento a emplear en la comparación de los resultados que se obtienen en los ensayos reológicos y granulométricos.
3. Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos reológicos y granulométricos.
4. Valoración económica y de los efectos ambientales obtenidos en las pruebas para la caracterización reológica y granulométrica del lodo.

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 creación de un fundamento teórico y las peculiaridades en cuanto a las características reológicas y granulométricas del lodo generado en la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo.

1.2. Trabajos precedentes realizados en la instalación

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

Leyva (2011), en un proyecto realizó un estudio bibliográfico para la verificación del diseño de la criba primaria horizontal balanceada CMD-107 ubicado en la Constructora del Jobo, se demostró que esta cumple con todo los requisitos necesarios para mantener la carga de trabajo a la que está sometido, por lo que se exponen criterios necesarios, que son de estricto cumplimiento en cuanto a su mantenimiento. Se considera el análisis de los resultados y a la vez el impacto ambiental en el área de trabajo.

Regalado (2011), en su tesis efectúa una búsqueda bibliográfica para establecer el estado del arte relativo a los hidrociclones, determina los elementos necesarios para la propuesta de un hidrociclón para la constructora del Jobo y considera criterios económicos y ambientales, así como calcula parámetros tecnológicos para la selección de una bomba Waerman 6/4.

García (2014), en su tesis efectúa la propuesta de un sedimentador para la recuperación del agua. Recomienda la determinación de las propiedades reológicas del lodo para un 26 % de sólido.

Trabajo de Diploma en opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Eglis Matos Pupo

Leyva (2014), en un artículo realiza una estimación de la velocidad crítica de transportación del lodo, determinando las condiciones para la cual no debe existir sedimentación en la tubería de descarga del lodo.

De la revisión bibliográfica efectuada de los trabajos precedentes realizados en la instalación se determina que en ninguno de ellos se hace una caracterización reológica y granulométrica para varios porcentos de sólido.

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

“La teoría de los fluidos deberá basarse necesariamente en la experimentación” D’Alambert en 1744, demostró que no existe resistencia al movimiento de un cuerpo cuando éste se mueve a través de un fluido ideal (no viscoso o invíscido), pero es obvio que esta conclusión no puede aplicarse a los cuerpos que se mueven a través de fluidos reales. Esta discrepancia entre la teoría y el experimento, que se denominó la paradoja de D’Alambert, ha sido ya resuelta. No obstante, demuestra con claridad las limitaciones de la teoría de esa época para la resolución de problema sobre fluidos.

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la hidráulica se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseville, interesado en la circulación de la sangre lo que lo llevó al campo de la hidráulica. Además de los científicos anteriores que desarrollaron sus trabajos en Francia, sobresalieron también en Alemania Julios Weisbach y Gottlieb Hagen. Durante esa época, y en el aspecto teórico se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Venturi Pitot entre otros.

En Cuba no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después del triunfo de la Revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico.

En el desarrollo de la investigación se han consultado diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica ha estado dirigida en dos líneas fundamentales:

- La información relacionada con el enfoque teórico – metodológico.

- Los trabajos sobre el tema de fluidos no newtonianos desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

El problema de los efectos viscosos de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, independientemente en 1839 por el médico francés Jean Poiseville, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthif Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e, independientemente, al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier- Stokes.

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 cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la 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. La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales en que se ensayó, 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.

Ivenski (1957), mediante el estudio de los regímenes de movimientos de las mezclas de materiales de la construcción por tuberías de diferentes diámetros estableció, que existe el régimen estructural en los límites de velocidades hasta 0,5 m/s, que se acompaña de la rotación de los granos, lo que conlleva a la destrucción de los enlaces estructurales.

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

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.

En su trabajo, Barreto (1979), sobre la base de las investigaciones teórico experimental y el análisis de otros autores determinó los parámetros y estableció los regímenes racionales de hidrotransporte de minerales de hierro y concentrados. Elaboró las recomendaciones sobre la modelación de las suspensiones, selección de los regímenes efectivos y la metodología para la determinación de los parámetros de materiales sólidos de alta densidad en flujos de alta densidad (hasta 40 % de sólido por volumen).

Se encuentra como dificultad de los tres trabajos anteriormente descritos, que los autores, no determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus investigaciones; lo cual dificultaría el ajuste de estas condiciones a otras condiciones de los fluidos estudiados.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya

sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Ibarz et al., 2001 y Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971; Foust et al., 1980; Macedo et al., 2001). La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe et al., 1986; Ibarz et al., 2001; Vélez, 2003; Perona, 2003; Sablani et al., 2003).

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

El análisis de los trabajos precedentes consultados que abordan el transporte de hidromezclas por tuberías permite apreciar que en todos ellos se efectúa la determinación de la reología y la granulometría. La determinación de la reología permite clasificar reológicamente el fluido, determinar la viscosidad, calcular el número de Reynol y por consiguiente tratar el régimen de flujo ya sea turbulento o laminar. La evaluación granulométrica permite caracterizar las partículas en suspensión como forma de asegurar la reproductividad en los resultados, y construir a la explicación del comportamiento reológico del fluido.

1.4. Propiedades de fluidos

Las propiedades de un fluido son las que definen el comportamiento y características del mismo tanto en reposo como en movimiento. Existen propiedades primarias y propiedades secundarias del fluido.

Propiedades primarias o termodinámicas:

- Presión
- Densidad
- Temperatura
- Energía interna
- Entalpía
- Entropía
- Calores específicos
- Viscosidad

Propiedades secundarias

Caracterizan el comportamiento específico de los fluidos.

- Viscosidad
- Conductividad térmica
- Tensión superficial
- Compresión

1.4.1. Propiedades reológica

Una definición moderna expresa que la reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales. Dichas ecuaciones son en general de carácter tensorial.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte).
- Coeficientes de esfuerzos normales.
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio).
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelásticos lineal).
- Funciones complejas de visco elasticidad no lineal.

Características:

- La posición relativa de sus moléculas puede cambiar de forma abrupta.
- La posición relativa de sus moléculas puede cambiar de forma abrupta.
- Todos los fluidos son compresibles en cierto grado. No obstante, los líquidos son fluidos igual que los gases.
- Tienen viscosidad, aunque la viscosidad en los gases es mucho menor que en los líquidos.

1.5. 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, sustancias asfálticas y materiales cristalinos.

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

1.5.1. 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).

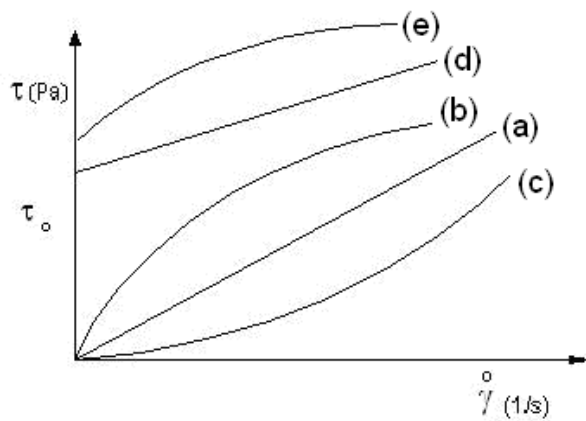


Figura 1.1. Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplástico; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell (2001).

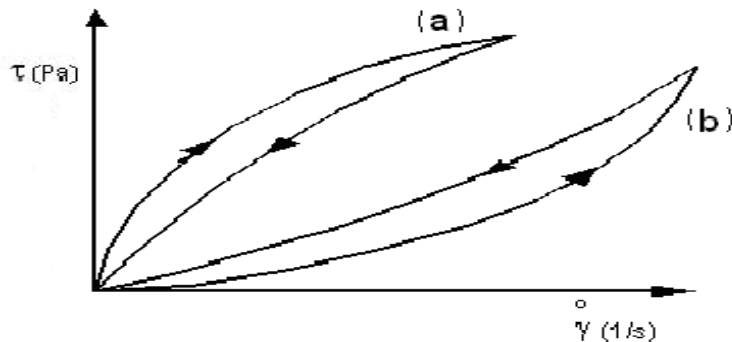


Figura 1.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo: (a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

Fuente: Garcell (2001).

1.5.2. 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).

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

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 1.6 se transforma en la ley de Newton, siendo $K = \mu$. El parámetro K es el índice de consistencia, el cual da una medida del grado de viscosidad del material.

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

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

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (1.6) se obtiene:

$$\mu_a = K \cdot \left(\frac{\tau}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (1.3)$$

- **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).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (1.4)$$

Donde:

Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

Viscosidad plástica.

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + \mu_p \quad (1.5)$$

- 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_0 . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley (Figura 1.1-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot (\gamma)^n \quad (1.6)$$

Los parámetros k , n y τ_0 , tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para $n = 1$, la ecuación 1.7 se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_0 = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_0 = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 1.11 y 1.7, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + K \cdot \left(\frac{\tau_0}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (1.7)$$

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 pseudoplásticos, plásticos ideales y reales (Figura 1.2 -a).

-Reopécicos: 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) y Ferro (2000).

1.5.3. Factores que influyen en el comportamiento reológico

Efecto de la granulometría

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

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

Efecto de la temperatura

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos, según

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

Efecto de la composición mineralógica

Se ha comprobado que las pulpas de mineral laterítico pueden presentar un amplio rango de los valores del punto iso eléctrico (i.e.p.) o de su punto de carga cero (p.z.c) en la dependencia de su composición mineralógica, según lo expresado por Garcell (1993).

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

Efecto de la concentración de sólidos

Por lo general, en las suspensiones diluidas (con valores de concentración volumétrica ϕ inferior a 10 %) el comportamiento de las suspensiones es newtoniano. A medida que aumenta la concentración de sólidos, se incrementan las interacciones de las partículas, con la tendencia a formar flóculos, agregados y estructuras. Como consecuencia de esto, a concentraciones moderadas, la suspensión puede alcanzar el comportamiento seudoplástico. A concentraciones más altas, los efectos hidrodinámicos son menos importantes, y, dado que las partículas se hayan más cerca una de otras, se forman estructuras tridimensionales que le comunican a la dispersión propiedades plásticas (Garcell 1993; Cerpa y Garcell 1998).

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

Efecto del pH

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

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

1.6. Instrumentos de medición

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).

1.7. Propiedades granulométricas

En general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas partículas que poseen propiedades magnéticas con las que ocurre lo contrario, como es el caso de las pulpas de maghemita, según lo expresado por Garcell (1994).

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica Lambe y Whitman (1997).

Método de determinación granulométrico

El método de determinación granulométrico más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de

coladores) que actúen como filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices. Pero para una medición más exacta se utiliza un granulómetro láser, cuyo rayo difracta en las partículas para poder determinar su tamaño. O también se pueden utilizar los rayos gamma Lambe y Whitman (1997).

Curva granulométrica

La curva granulométrica de un suelo es una representación gráfica de los resultados obtenidos en un laboratorio cuando se analiza la estructura del suelo desde el punto de vista del tamaño de las partículas que lo forman (Figura 1.4). Se representa gráficamente en un papel denominado "log-normal" por tener en la horizontal una escala logarítmica, y en la vertical una escala natural (Lambe y Whitman 1997).

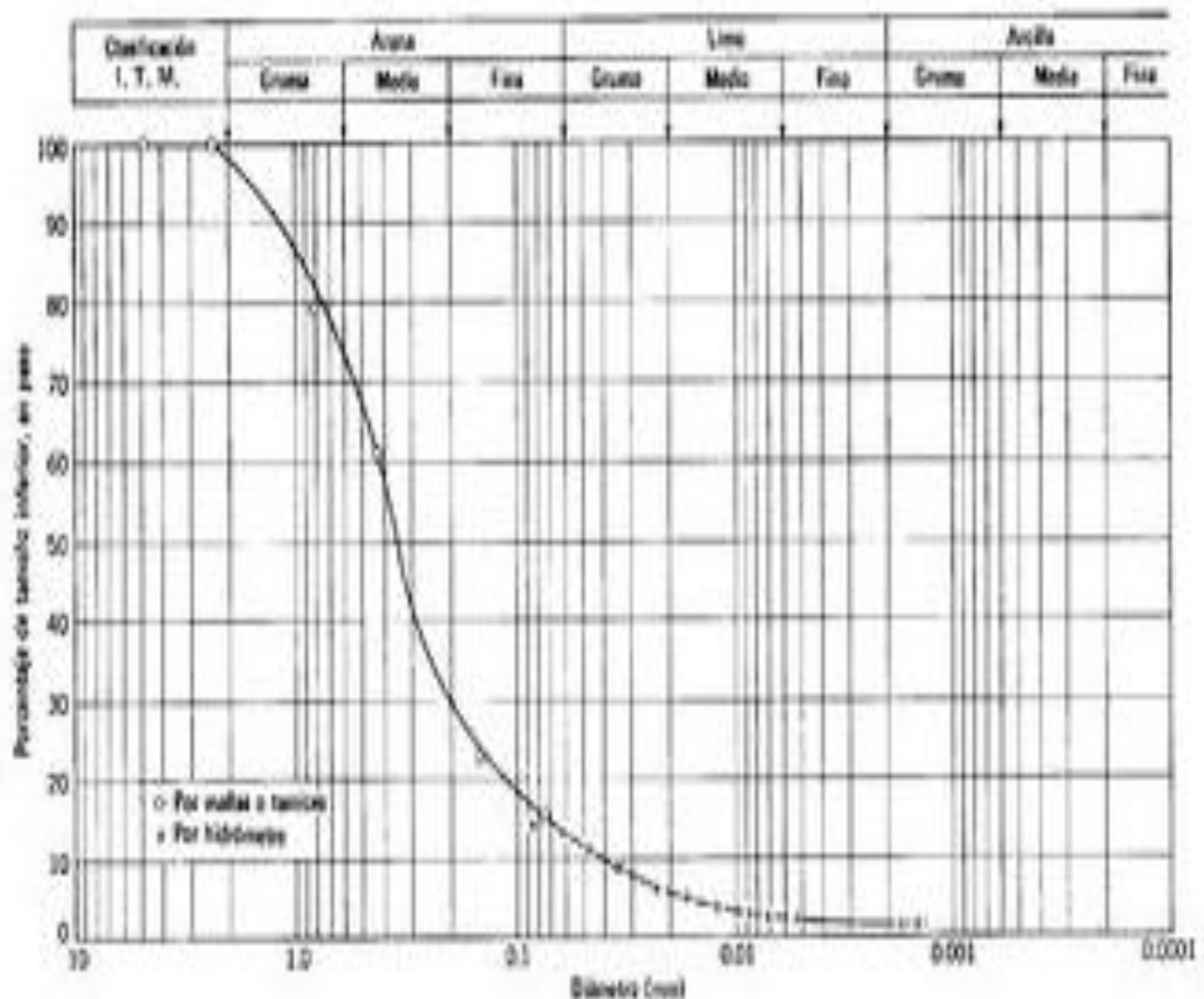


Figura 1.4. Curva granulométrica de un suelo areno-limoso, representado en un papel "log-normal".

Fuente: Lambe y Whitman (1997).

Trabajo de Diploma en opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Diplomante: Eglis Matos Pupo

Para este análisis se utilizan dos procedimientos en forma combinada, las partículas mayores se separan por medio de tamices con aberturas de malla estandarizadas, y luego se pesan las cantidades que han sido retenidas en cada tamiz. Las partículas menores se separan por el método hidrométrico.

Ensayo de tamizado

Para su realización se utiliza una serie de tamices con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos en una máquina especial. Luego de algunos minutos, se retiran los tamices y se desensamblan, tomando por separado los pesos de material retenido en cada uno de ellos y que, en su suma, deben corresponder al peso total del material que inicialmente se colocó en la columna de tamices (conservación de la masa).

Estructura del suelo

Ejemplo de estructuras de las partículas del suelo

La estructura del suelo es como el estado del mismo, que resulta de la granulometría de los elementos que lo componen y del modo como se hallan éstos dispuestos. La evolución natural del suelo produce una estructura vertical estratificada (no en el sentido que tiene estratificación en ecología) a la que se conoce como perfil. Las capas que se observan se llaman horizontes y su diferenciación se debe tanto a su dinámica interna como al transporte vertical.

El transporte vertical tiene dos dimensiones con distinta influencia según los suelos:

- La lixiviación o lavado la produce el agua que se infiltra y penetra verticalmente desde la superficie, arrastrando sustancias que se depositan sobre todo por adsorción.
- La otra dimensión es el ascenso vertical por capilaridad, importante sobre todo en los climas donde alternan estaciones húmedas con estaciones secas.

Se llama roca madre a la que proporciona su matriz mineral al suelo. Se distinguen suelos autóctonos, que se asientan sobre su roca madre y representan la situación más común. Debemos de tener en cuenta que el suelo es parte de nuestra vida



Según estudios recientes, estos aglomerados estarían consolidados por la lignina, producida por la descomposición de las sustancias orgánicas, la que daría una cierta estabilidad a los grumos y un cierto grado de resistencia frente a los agentes disgregantes (Bologna, 1970)

1.8. Conclusiones

1. Del análisis realizado en los trabajos precedentes en la instalación y sobre el transporte de hidromezcla se determinó que en ninguno de ellos se hace una caracterización reológica para varios porcentos de sólido y granulométrica con técnica moderna para el lodo objeto de estudio. La determinación de la reología permite clasificar reológicamente el fluido, determinar la viscosidad, calcular el número de Reynolds y por consiguiente tratar el régimen de flujo ya sea turbulento o laminar. El análisis de la granulométrica permite caracterizar las partículas en suspensión como forma de asegurar la reproductividad en los resultados, y construir a la explicación del comportamiento reológico del fluido.
2. Se exponen fundamentos teóricos relativos a la reología, tales como la clasificación reológica, los modelos reológicos y la clasificación de los instrumentos de medición para la determinación de la reología; lo que se tuvo en cuenta para la caracterización reológica del lodo objeto de estudio.
3. Se plantean elementos teóricos relativos a la granulometría, tales como método de determinación granulométrico, curva granulométrica, estructura del suelo, y polvos; lo que se tuvo en cuenta para la caracterización granulométrica del lodo objeto de estudio.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

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 máquinas en la industria cubana de la construcción. Para el desarrollo de toda investigación se necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados 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 reológicas y granulométricas del lodo.

2.2. 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 propone el siguiente modelo:

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (2.1)$$

Donde:

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 2.1.

Por tanto 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.

2.3. Toma y preparación de las muestras

En el análisis experimental se utilizaron muestras de lodo y arcilla tomadas en dos puntos del proceso tecnológico de la planta procesadora del árido del Jobo de Sagua de Tánamo, en la tubería de descarga y en el área de sedimentación del lodo respectivamente. A continuación en la tabla 2.1 se relacionan los puntos de toma de muestras utilizados para el análisis.

Tabla 2.1. Puntos de toma de muestras.

Muestras	Punto de toma de muestra
M - 1	Tubería de descarga del lodo.
M - 2	Área de sedimentación 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 cada 2 horas por un período de 2 días, este lodo se homogenizó y almacenó en una cantidad de 5 litros para la realización de los experimentos.

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

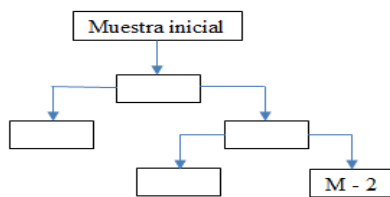


Figura 2.1. Esquema de preparación de la muestra 2.

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

2.4. Determinación de la granulometría

La determinación de la granulometría se efectuó aplicando dos procedimientos para aumentar la seguridad en los resultados. Se empleó el analizador de partículas compacto 22 y, el método de los tamices aplicado el procedimiento de la vía húmeda para aumentar la precisión en los resultados ya que la muestra contiene un alto contenido de partícula finas.

2.4.1. 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 (Figura 2.5). Dicho analizador posee un rango de medición de 0,3 a 300 μm el cual se describe a continuación.



Figura 2.5. Equipo láser para el análisis de partículas pequeñas.

Características de diseño del analizador de partículas

La unidad de la medición consiste en un banco óptico con una alta tecnología acoplada a un diodo láser. El cual mediante una ondulación de 635 nm, permite definir la longitud que está dentro del rango visible y el instrumento es una clase 1 producto del láser. El montaje rápido para medir las células permite el funcionamiento de importancia para el ajuste automático para la operación del instrumento sin dificultad. El equipo presenta un sensor del silicio monolítico en un material de apoyo cerámico que consta de elementos semicirculares para la buena aceptación del formulario de las partículas y también optimiza las garantías de la estabilidad mecánica y térmica.

Mediante la vía de una interfaz de RS232 es posible programar el analizador de partículas para cada aplicación. El operador marca con asterisco la medición del proceso apretando un botón. En donde un despliegue de LCD constantemente informa a los sistemas el estado del equipo. Una vez el programa se transfiere en los procesos de unidades de medición y la misma sucesión del programa y se ejecuta nuevamente. Por consiguiente, el instrumento incluso puede operar en el sitio conectándose a la computadora donde brinda la información necesaria de los resultados del proceso.

La integración de inteligencia reconoce automáticamente las partículas dispersando la unidad conectada en cada caso y controlando sus funciones. En el caso de la unidad dispersada en estado líquido, una bomba centrífuga previene las partículas pesadas del ambiente y las partículas con una densidad relativamente alta pueden medirse fácilmente. Los componentes normales del analizador compacto incluyen un baño ultrasónico para la deglomeración de la partícula.

La unidad limpia aproximadamente 300 ml de volumen de suspensión, automáticamente y totalmente sin dejar cualquier residuo. Todas las partes del sistema de acabado de flujo que lleva la suspensión en la lectura accesible y el operador no necesitan desmontarlos para limpiar. El apoyo celular dispersando del líquido resbala con un dispositivo de montura rápida y el sistema puede convertirse para secar la medida en segundos. La medida seca se realiza automáticamente haciendo un pequeño esfuerzo para limpiar lo que se requiere.

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.

2.4.2. Método de los tamices

Con el fin de determinar la composición granulométrica del material se realizó el análisis de cribado de las muestras estudiadas por vía húmeda, utilizando el juego de tamices que se muestra a continuación en la Figura 2.6, de acuerdo con Andreiev *et al.* (1980), el cual plantea que cuando la muestra a analizar contiene un alto porcentaje de partículas finas (polvo) se debe emplear en la determinación de la granulometría el tamizado por la vía húmeda para aumentar la precisión.



Figura 2.6. Juego de tamices.

Se tomó una muestra de 245 g de arcilla y se hizo pasar por el tamiz de menor dimensión diluida en agua, luego la masa retenida se secó y se pasó por el juego de tamiz para determinar la distribución de la masa por los tamices e inferir el diámetro medio de las partículas; la masa de la muestra que fue arrastrada por el flujo de agua se determinó por la diferencia de peso.

La siguiente tabla 2.1 muestra las dimensiones de los tamices utilizados en el análisis de la granulometría del lodo, la selección de ellos estuvo fundamentada en la utilización normalizada de los mismos.

Tabla 2.2. Tamices utilizados y aberturas de las mallas.

Abertura de las mallas, mm	Peso, g	% en peso	Retenido acumulado %	Cernido %
0,208				
0,147				
0,088				
0,074				
0,044				
0				
Total				

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

2.5.1. 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 $\pm 0,0001$ g y una estufa de temperatura hasta 100 °C

(Figura 2.2 a la 2.4)

**Figura 2.2.** Picnómetro.**Figura 2.3.** Balanza digital.**Figura 2.4.** Estufa.

El procedimiento consistió en el desarrollo de los siguientes pasos: Se tomó un picnómetro vacío y se pesó (peso A); se le añadió agua destilada y se volvió a pesar (peso B); se vació y secó el picnómetro minuciosamente y se le introdujo el mineral para ser pesado (peso C); el mineral con agua se puso en una estufa a

calentar para que escaparan las burbujas de aire, se enfrió 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:

$$\delta_e = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (2.2)$$

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

$$\rho_s = \delta_e \cdot \rho_{H_2O} \quad (2.3)$$

Los resultados obtenidos aplicando el procedimiento descrito anteriormente fueron contrastados con los obtenidos por Garcia *et al.* (2014), para determinar el margen de error. Garcia *et al.* (2014) determinan que la densidad promedio de la arcilla es de 1981,9 kg/m³.

2.5.2. 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/cm³ se obtiene por la siguiente expresión.

$$\rho_l = \frac{m}{V} \quad (2.4)$$

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/cm³.

La ecuación 2.4 se utilizó por Garcia *et al.* (2014) para la determinación de la densidad del lodo, obtiene el resultado promedio de 1 021,31 kg/m³. En este

trabajo se utilizó para la verificación de la densidad del lodo preparado para los correspondiente porciento de sólido.

2.5.3. 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.

$$S = \frac{\rho_l - \rho_{H_2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \quad (2.5)$$

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), Garcia *et al.* (2014), Mariño *et al.* (2009).

$$C_v = S \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (2.6)$$

$$C = \rho_l \cdot VT$$

$$C_p = \frac{m_s}{m_T} = \frac{C}{m_T} \cdot S \quad (2.7)$$

Dónde:

C_v – es la concentración volumétrica de la suspensión.

C_p – es la concentración en peso de la suspensión.

C – es la concentración de sólido, g/cm³

V_T – es el volumen total de la suspensión, cm³.

m_s – es la masa del sólido, g.

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

2.6. Características del instrumento de medición para la prueba reológica

Reología utilizando el viscosímetro brookfield DV-II + Pro

El análisis de la prueba reológica del fluido objeto de estudio se realizó en el laboratorio perteneciente a la empresa del CEDINIC con asistencia de sus técnicos

Trabajo de Diploma en opción al
Título de Ingeniero Mecánico

brindando un mayor garantía del ensayo realizado, utilizando el viscosímetro Brookfield DV-II + Pro (Figura 2.7) con un husillo LV1 61.



Figura 2.7. Viscosímetro programable Brookfield DV-II + Pro

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 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros del husillo.

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

Descripción técnica del viscosímetro brookfield DV-II + Pro

El viscosímetro Brookfield DV-II + Pro mide la viscosidad de los fluidos a velocidades de corte determinadas. La viscosidad es una medida de la resistencia al flujo de los fluidos. El equipo ofrece una versatilidad excepcional de modos de control que permite el funcionamiento autónomo tradicional, el funcionamiento automático mediante programas descargados desde un ordenador o con control total a través del ordenador utilizando el software Brookfield Rheocalc32.

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.

El software Brookfield DVLoader se puede utilizar para programar el equipo para que controle todos los aspectos de las pruebas y de la recogida de datos sin que el operario tenga que supervisar el instrumento; tan sólo necesita iniciar el programa y regresar a los datos de prueba impresos (la impresora es opcional).

El software Brookfield Rheocalc32 realizará todas las funciones de control y toma de datos del equipo desde el ordenador, a la vez que sirve de plataforma para la recogida y el análisis de datos avanzados para el control externo. En algunos de estos modos de control, el mismo proporcionará los mejores resultados de medición y control de la viscosidad.

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

$$cP = 100 * TK * SMC * \text{Par de torsión} \quad (2.8)$$

$$\text{Velocidad de corte (1/seg)} = \text{RPM} * \text{SRC} \quad (2.9)$$

$$\text{Tensión de corte (Dina/cm}^2\text{)} = TK * SMC * \text{SRC} * \text{Par de torsión} \quad (2.10)$$

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.

Presentación y tratamiento de los resultados

La calibración de los viscosímetros/reómetros Brookfield se determina utilizando vasos de precipitados Griffin de forma baja de 600 ml. En la calibración de los instrumentos de las series LV y RV hay que incluir el protector. La pared del vaso de precipitados (para los instrumentos HA/HB) o el protector (para los instrumentos LV/RV) definen lo que se denomina "límite exterior" de la medición. Estas condiciones de límites son las que se utilizaron para crear los factores de los husillos LV, RV y HA/HB. Los factores de husillo se utilizan para convertir el par de torsión del instrumento (expresado como lectura del cuadrante o como valor de par en %) en centipoise. En teoría, si se hacen mediciones con condiciones de límites diferentes, por ejemplo sin protector o en un vaso de precipitados que no sea de 600 ml, los factores de los husillos del Factor Finder no se podrán utilizar para hacer cálculos precisos de la viscosidad absoluta. El cambio de las condiciones de los

Trabajo de Diploma en opción al
Título de Ingeniero Mecánico

límites no cambia la viscosidad de los fluidos, pero sí cambia el modo en que el par del instrumento se convierte en centipoise. Sin cambiar el factor de viscosidad para adaptarse a las nuevas condiciones de límites, el cálculo del par del instrumento a viscosidad será incorrecto.

En la práctica, el protector es más eficaz cuando se utiliza con los husillos nº 1 y 2 de los juegos de husillos LV y RV (Nota: el husillo nº 1 RV/HA/HB no se incluye en el juego de husillos estándar). Cualquier otro husillo LV (3 y 4) o RV (3 - 7) se puede utilizar en vasos de precipitados de 600 ml con protector o sin él para obtener resultados correctos. Los viscosímetros/reómetros de las series HA y HB no incluyen protector para evitar los posibles problemas cuando se hagan mediciones de materiales de viscosidad elevada. Los husillos HA/HB nº 3 - 7 son idénticos a los mismos husillos de la serie RV. Los husillos HA/HB nº 1 y 2 tienen unas dimensiones ligeramente diferentes a las de los husillos RV correspondientes. Esta diferencia de dimensiones permite que los factores entre los husillos RV y HA/HB nº 1 y 2 sigan las mismas proporciones que el par del instrumento, aunque las condiciones de los límites sean diferentes.

2.7. Diseño del experimento

Para efectuar el diseño del experimento con vista a la caracterización reológica y granulométrica se tuvo en cuenta que es importante asegurar la simplicidad y la conducción de este tal que sea económico y eficiente. Se hizo todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental de acuerdo con Hernández (1997) y Chacín (2000).

La caracterización reológica del lodo objeto de estudio se efectuó sobre la base de un diseño de experimento de bloques aleatorios. La variable de entrada fue porcentaje de sólido (S). El porcentaje de sólido se estudió en cuatro niveles (4, 12 y 20 y 28 %).

Por otra parte la caracterización granulométrica se llevó a cabo también a través de un diseño de experimento de bloques aleatorios. En este caso la variable de entrada fue método de medición. Se utilizaron dos métodos de medición, el analizador de partícula 22 y el tamizado por vía húmeda.

2.7.1. Selección de las variables de entradas y sus niveles

El porcentaje de sólidos que contiene el lodo en la muestra 1 se definió por medio de la ecuación 2.5, la cual expresa la relación entre la densidad aparente del sólido en suspensión, la densidad del medio dispersante y la densidad del lodo. Luego operando de conjunto con la ecuación 2.5, 2.6 y 2.7 se prepararon muestras de lodo correspondientes a los niveles requeridos.

Consideraciones prácticas y teóricas

En la instalación actualmente el lodo que se evacúa por la tubería de descarga posee un 4 % de sólido Garcia *et al.* (2014) y Leyva *et al.* (2014), se evalúa la posibilidad de incrementar el porcentaje de sólido contenido en el lodo hasta un 28 %; y se incluyen dos niveles intermedios espaciados uniformemente para un mayor estudio de la tendencia. Los dos métodos de medición de la granulometría escogidos estuvieron dado por la posibilidad de realizar las mediciones con el Analizador de Partícula 22 que se encuentra en la Empresa Productora de Níquel Comandante Ernesto Che Guevara, la disponibilidad de juegos Estándares de tamices en el Instituto superior minero metalúrgico de Moa (ISMM).

2.7.2. Caracterización de las variables de salida

El comportamiento reológico del lodo objeto de estudio se caracterizó por medio de la relación entre el esfuerzo de corte, el gradiente de velocidad, la viscosidad y el índice de flujo. El análisis matemático del comportamiento reológico incluyó el ajuste de modelos matemáticos a la curvas de flujo. Se consideraron el modelo matemático de la ley de viscosidad de Newton y el de Oswald de Waele.

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.11)$$

$$\tau = K \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (2.12)$$

Se escogieron los modelos anteriores sobre la base del hecho que por lo general en las suspensiones diluidas (con valores de concentración volumétrica ϕ inferior a 10 %) el comportamiento de las suspensiones es newtoniano. A medida que aumenta la concentración de sólidos, se incrementan las interacciones de las partículas, con la tendencia a formar flóculos, agregados y estructuras. Como consecuencia de esto, a

concentraciones moderadas, la suspensión puede alcanzar el comportamiento pseudoplástico. A concentraciones más altas, los efectos hidrodinámicos son menos importantes, y, dado que las partículas se hayan más cerca una de otras, se forman estructuras tridimensionales que le comunican a la dispersión propiedades plásticas (Garcell 1993; Cerpa y Garcell 1998).

Para la construcción de la curva de flujo se utilizó las ecuaciones 2.8 y 2.10, pues se despejó en ambas el código SRC del husillo, se igualó ambas relaciones obtenidas, llegando a la siguiente ecuación, que permite el trazado de la curva de flujo y la clasificación reológica del lodo.

$$\tau = \frac{TK \cdot SMC \cdot Par}{n \cdot 10} \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.13)$$

Los resultados que se obtuvieron por medio de las ecuaciones 2.13 y 2.12 permitieron determinar la viscosidad aparente del lodo para los distintos porcentos de sólido. La ecuación que sirvió de base al cálculo es la que se muestra a continuación.

$$\mu_a = \mu_{mezcla} = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1}} \quad (2.14)$$

Los resultados obtenidos de la viscosidad para los distintos porcentos de sólido fueron contrastados con los que se predicen por medio de las ecuaciones y el gráfico que se muestra a continuación en la tabla 2.5 y la Figura 2.8, para determinar el margen error.

Tabla 2.5. Modelos para la estimación de la viscosidad dinámica.

Modelos	Parámetros	V %	Ec
$\mu_{mezcla} = \mu \cdot (1 + 2,5 \cdot Cv)$ Fuente: Kasatin(1985)	μ_{mezcla} -viscosidad de la mezcla, Pa*s. μ -viscosidad del medio dispersante, Pa*s. Cv -concentración en volumen, %	$Cv < 10$	(2.15)
$\mu_{mezcla} = \mu \cdot (1 + 4,5 \cdot Cv)$ Fuente: Kasatin(1985)		$Cv > 10$	(2.16)
$\mu_{mezcla} = \mu_{liquido} \cdot \left(1 + \frac{1,56 \cdot \Phi_s}{0,52 - \Phi_s} \right)$ Fuente: Aguiar (1975)	μ_{mezcla} - viscosidad de la mezcla, Pa*s μ - viscosidad del medio dispersante, Pa*s. Φ_s - Concentración en volumen. %	$Cv < 10$	(2.17)
$\mu_{mezcla} = \mu_{liquido} \cdot (1 + K1 \cdot Cv + K2 \cdot Cv)$ Fuente: Gaitan (2010)	Donde K 1 a K 4 son constantes. K 1 = 2.5 que es la constante de Einstein, K 2 ha sido encontrada que está entre el rango de 10,05 a 14,10.	$Cv < 20$	(2.18)

La Figura 2.8 muestra al comportamiento de la viscosidad dinámica de arcilla en función de la concentración volumétrica. La arcilla se caracterizó por un $d_{50} = 50 \mu m$, $d_{90} = 143 \mu m$ y un PH = 7.

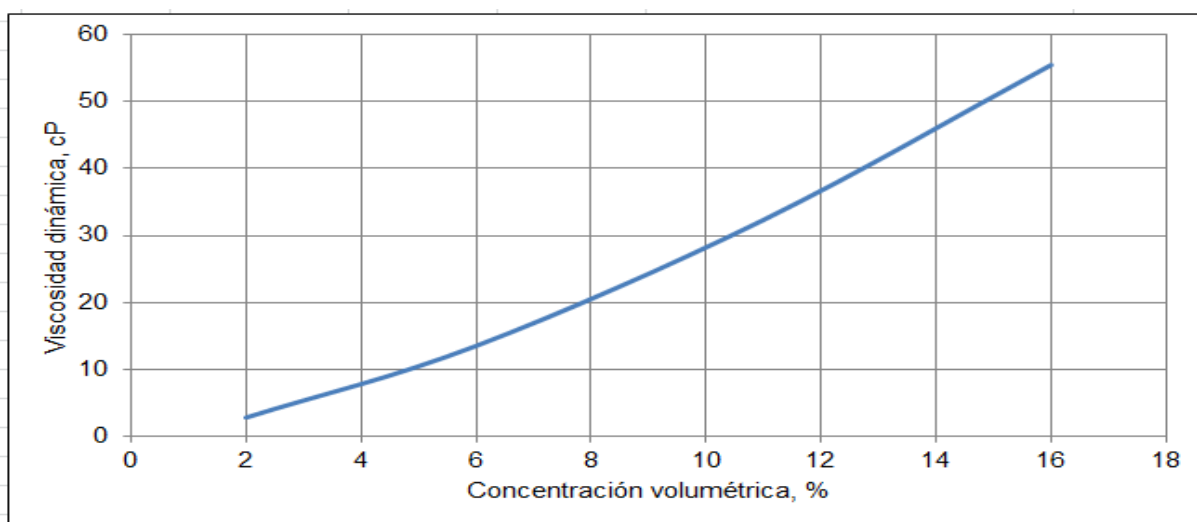


Figura 2.8. Comportamiento de la viscosidad dinámica de arcilla en función de la concentración volumétrica.

Fuente: Daido (1976).

Los modelos matemáticos y la gráfica se definieron con el propósito de sentar base para la determinación del Número de Reynolds, lo que permite clasificar el régimen de flujo, ya sea laminar o turbulento.

Granulometría

La caracterización de la granulometría se efectúa con el propósito de contribuir 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.

Los resultados obtenidos de la granulometría por los distintos métodos son comparados, para determinar el margen error o discrepancia.

2.7.3. Matriz de planificación del experimento

Reología

En total, para el desarrollo de los experimentos de la reología se efectuaron 12 pruebas, 4 experimentos diferentes y tres réplicas por cada uno. Los 12 experimentos se identificaron con números del 1 al 4 siguiendo el nivel del % de sólido, la letra a para la primera repetición, la letra b para la segunda repetición y la c para la tercera. La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Matriz de planificación del experimento de reología.

	Variable de entrada: porcentaje de sólido(S), %			
	S1= 4 %	S2= 12 %	S3= 20 %	S4= 28 %
Répica viscosidad(μ), Pa*s	R 1a	R 2a	R 3a	R 4a
	R 1b	R 2b	R 3b	R 4b
	R 1c	R 2c	R 3c	R 4c

Granulometría

En total, para el desarrollo de los experimentos de la granulometría se efectuaron 6 pruebas, 2 experimentos diferentes y tres réplicas por cada uno. Los 6 experimentos se identificaron con números del 1 al 2 siguiendo el orden de los métodos, la letra a para la primera repetición, la letra b para la segunda repetición y la c para la tercera. La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Matriz de planificación del experimento de granulometría.

	Variable de entrada: Métodos de medición	
	Analizador de partícula 22	Tamices
Réplica de la prueba(d), mm	R 1a	R 2a
	R 1b	R 2b
	R1c	R 2c

2.8. Elaboración de los resultados

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).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.19)$$

$$LX, \text{máx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.20)$$

$$LX, \text{mín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.21)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.22)$$

Donde:

$\bar{X}$ – es la media aritmética de las mediciones realizadas del correspondiente parámetro. $LX, \text{máx}$ – es el límite superior de tolerancia para el correspondiente parámetro.

$LX, mín$ – 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.

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 existan valores anormales, los mismos se pueden eliminar 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.

Análisis de variancia

Este análisis se efectuó con el objetivo de determinar si las variaciones mostradas entre los valores de la altura de la interface para distintos porcentaje de sólido son significativas y en consecuencia contribuir a la racionalización de la tarea de ajuste de curvas. El criterio empleado en la determinación es la prueba de Fisher, la cual se basa en la comparación entre el valor del estadístico de Fisher calculado ($F_{cál.}$) y el de Fisher crítico o tabulado ($F_{crít.}$).

El análisis de variancia implicó el considerar los supuestos de aleatoriedad, normalidad y homogeneidad de la variancia. La aleatoriedad está referida a la obtención de resultados representativos y objetivos del comportamiento de la variable; la normalidad se refiere al control de la variabilidad en cada tratamiento, esto es que exista simetría en la distribución de las observaciones con respecto a la

media; y la homogeneidad expresa la igualdad de la variancia entre cada tratamiento, las cuales van a estar determinadas por la influencia de las causas que introducen variación en los resultados.

En este trabajo se aseguró el cumplimiento del supuesto de aleatoriedad de las observaciones para la muestra uno, mediante la homogenización de las muestras de lodo tomadas en la tubería de descarga cada dos horas durante un período de dos días y para la muestra dos aplicando el método de cuarteo propuesto por Mitrofanov (1984). El supuestos de normalidad y homogeneidad de la variancia no se verificó basados en los siguientes argumentos: Miller *et al.* (2005) Plantean que la prueba de Fisher es poco sensible a la violación de la normalidad y homogeneidad de la variancia, esto es que se obtienen resultados bastantes confiables aun violándose dichas condiciones; además, Montgomery (2002) refiere que se hace más necesario la verificación del cumplimiento de los supuesto de normalidad y homogeneidad cuando el experimento es desbalanceado, esto es cuando la cantidad de observaciones por tratamiento no es la misma. Para aprovechar este último planteamiento se decidió seleccionar la misma cantidad de puntos por tratamiento.

Procedimiento de la prueba de Fisher para el análisis de variancia

El procedimiento que se llevó a cabo para la realización de la prueba de Fisher consiste en el desarrollo de los pasos que se definen a continuación, de acuerdo con Miller *et al.* (2005).

1. Definición de las hipótesis

Hipótesis nula (H_0): No existe diferencias significativas entre las medias.

Hipótesis alterna (H_1): Existe diferencias significativas entre las medias.

2. Nivel de significancia (α)

3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula: Se rechaza la hipótesis nula si Fisher calculado es mayor que Fisher critico ($F_{cál.} > F_{crit.}$).

4. Cálculo: El cálculo para el análisis de variancia se efectuó utilizando la herramienta de análisis de datos programa en el software Excel, que contiene la opción análisis de variancia.

5. Decisión: La decisión se toma sobre la base del criterio del rechazo de la hipótesis nula, definido en el paso 3.

Ajuste de curva por regresión

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

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

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

Determinación del error relativo

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

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

$$E_{rel} = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_2} \right| \cdot 100\% \quad (2.23)$$

Dónde:

- Valor obtenido.

- Valor correcto.
- Error relativo puntual, %.

2.9. Análisis económico

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.

2.9.1. Costo - beneficio

El objetivo de este análisis consistió en determinar el desembolso de efectivo que se debe hacer para lograr la realización de los experimento de las pruebas reológica y granulométrica e indicar el valor práctico directo de los resultado obtenidos. Esto constituye un punto de partida importante para evaluar la factibilidad económica de la investigación.

Costo de los experimentos

$$CT = CR + Cg1 + Cg2 \quad (2.24)$$

Donde:

CT – es el costo total.

CR . – es el costo del ensayo reológico.

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

$Cg2$ – es el costo de la prueba granulométrica con los tamices.

El benéfico de los resultados de la investigación resulto difícil de cuantificar en la actual etapa de la investigación, por lo que se hace una apreciación cualitativa de los posibles resultados a obtener. Además se formularon recomendación para generar lo utilidades esperadas.

2.10. Conclusiones del capítulo 2

1. Se exponen las expresiones matemáticas y procedimientos que permiten la caracterización reológicas y granulométrica delo lodo objeto de estudio y se plantean las características de los medios e instrumentos utilizados; es decir, se indica con qué y cómo efectuar la determinación de la granulometría, la densidad del sólido y del lodo, el % de sólido, y la reología del fluido.
2. Se plantean las expresiones matemáticas que permiten la evaluar los resultados obtenidos en la investigación realizada, posibilitando la determinación del margen de error en el que se incurre si se aplican los modelos de las teorías existentes así como los elementos referidos a la estimación del costo y beneficio del trabajo.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

El estudio de las propiedades físicas y reológicas del lodo residual generado en la planta procesadora de árido del Jobo de Sagua de Tánamo es de importancia en la caracterización del material objeto de estudio para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tubería y para la evaluación de la posibilidad de reutilizar el agua que posee, 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 por ciento 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 desarrolladas.

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 granulométricas y reológicas del lodo residual objeto de estudio.

3.2. Determinación de la granulometría

Analizador de Partícula 22

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. Los resultados promedios obtenidos se muestran en el Anexo 6. Al aplicar las ecuaciones 2.19 a la 2.22 se observa que el proceso de mediciones 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 que 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.

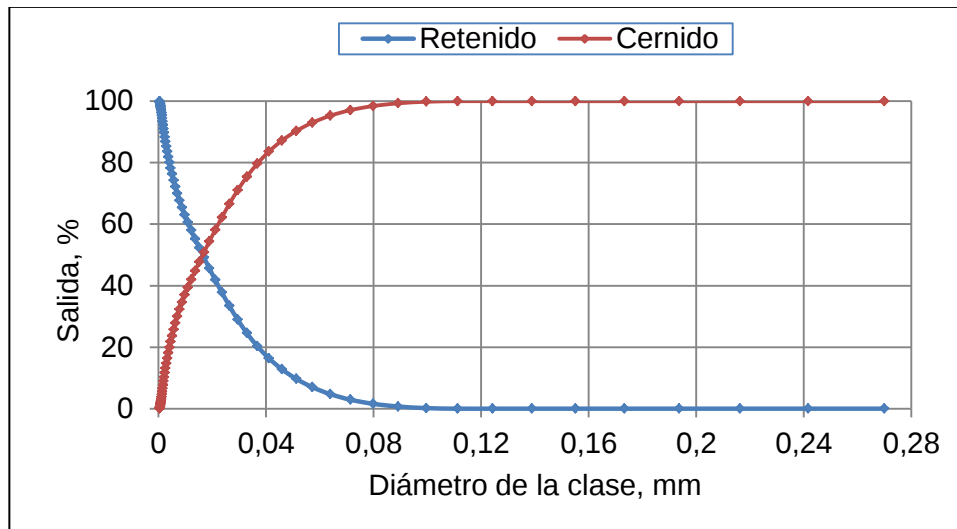


Figura 3.1. Curva de característica sumarias de la arcilla analizada, con el analizador de partícula.

Como puede apreciarse en la Figura 3.1 el d_{80} se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0,037 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor.

Método de lo tamices

La masa de la muestra que se utiliza en el análisis granulométrico se define sobre la base de la recomendación propuesta por Andreiev *et al.* (1980), el cual plantea como criterio el considerar el valor del diámetro de las partículas con mayores dimensiones presentes en el material a tamizar. Puesto que en el lodo se pudieron detectar partículas con diámetros en el orden de los 1mm, se define que el tamaño de la muestra debe ser superior a 200 g. Por lo tanto se escogió una masa de 245 g.

El comportamiento de la masa retenida en cada tamiz, no mostró anomalías puesto que en todos los casos la masa estuvo incluida en el rango de normalidad calculado. Los resultados promedios obtenidos se muestran en el Anexo 7. La verificación se realizó utilizando las ecuaciones 2.19 a 2.22. La Figura 3.2 muestra el comportamiento de la masa retenida y la cernida en función del diámetro de la clase.

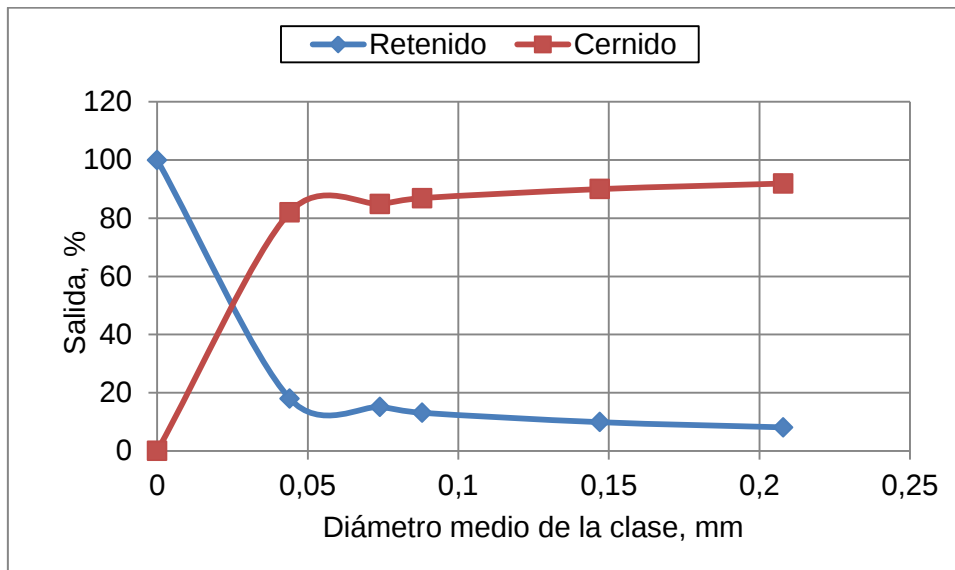


Figura 3.2. Curva de característica sumarias del lodo analizado.

La clasificación por clases de tamaño realizada a la muestra de lodo indica que este forma sistemas estructurales, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,044 mm, constituyendo el 82 % en relación al peso de la muestra. Como puede apreciarse en la Figura 3.1 existe de forma general un predominio de las fracciones finas y 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 clase medio.

Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos en la determinación de la granulometría con los dos procedimientos se aprecia que existe un alto grado de coincidencia. Se determina por medio de la ecuación 2.14 que el error relativo puntual es de un 16 % en el 80 % cernido.

El error obtenido es admisible, pues es menor que un 25 %, de acuerdo con Torres (2003), ya que se tiene certeza del valor correcto. Por lo que se plantea que los 80 % de la partícula presentes en el lodo poseen un diámetro medio inferior a 43 μm .

Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos por cada método utilizando la prueba de Fisher se determina que no existe diferencias significativas entre las medias de los diámetros, al nivel de confianza del 95 %, puesto que el valor de Fisher calculado es menor que el Fisher crítico (3,12 es menor que 4,96).

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

Densidad del sólido

En las tablas 3 y 4 del Anexo 8 se relacionan los valores de la densidad del sólido obtenidos al aplicar el método del picnómetro. Los resultados mostrados indican 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 bajo un nivel de confianza del 95 %. Se indica que existe una probabilidad de dicho 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 1,567 a 2,351 7 g/cm³.

La comparación entre los resultados obtenidos en la determinación de la densidad de la arcilla con el que obtuvo García *et al.* (2014) se aprecia que existe un alto grado de coincidencia. Al aplicar la ecuación 2.14 se determina que el error relativo puntual es de un 1,13 %.

Densidad del lodo

Las tablas 5 y 6 del Anexo 9 relacionan los valores de la densidad del lodo obtenidos al aplicar el método del picnómetro y la ecuación 2.4. Los resultados mostrados indican que el proceso de medición también se efectuó bajo de control estadístico, puesto que al repetir el experimento no se manifiestan diferencias entre los resultados obtenidos bajo un mismo nivel de confianza. Esto demuestra 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 hallaron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 947 a 1 097 g/cm³.

Determinación del % de sólido

La tabla 3.1 muestra el valor obtenido de la comparación de la densidad sólido y la del lodo. El cálculo del error relativo se realizó aplicando la ecuación 2.14.

Tabla 3.1 Resultado del porcentaje de sólido

Parámetro	Resultado	Garcia et al.(2014)	Error relativo, %
Densidad de la arcilla, kg/m ³	1 960	1 982	1,13
Densidad del lodo, kg/m ³ , para un S= 4 %	1 022,00	1 021,31	0,1

En la tabla anterior se observa que hay alta coincidencia entre los resultados obtenidos en la determinación de las densidades en este trabajo y los que obtuvo Garcia et al. (2014), pues el margen de error es inferior a 1,13 %. Lo que indica que la muestra 2 utilizada en este trabajo reproduce las características de la muestra 1 y que el procedimiento para la preparación de las muestras de lodo con distintos porcentaje de sólido es correcto.

La tabla 3.2 muestra los valores de la densidad del lodo, de la concentración volumétrica y en peso obtenidos para cada porcentaje de sólido, utilizando la ecuación 4, 5 y 6 expuesta anteriormente.

Tabla 3.2. Densidad del lodo para cada porcentaje de sólido.

Porcentaje de sólido(S), %	Densidad del lodo, kg/m ³	Concentración volumétrica, %	Concentración en peso, %
4	1022,00	2	4
12	1 063,21	6	12
20	1 109,98	11	20
28	1 161,06	16	28

3.4. Determinación del comportamiento reológico del lodo

La tabla 6 del Anexo 11 presenta los resultados obtenidos de las pruebas para Trabajo de Diploma en opción al
Título de Ingeniero Mecánico

determinar el comportamiento reológico del lodo objeto de estudio, considerando lo planteado en el capítulo anterior. Se escogieron para el estudio cuatros niveles del por ciento de sólido (4 - 12 - 20 y 28 %) y para cada por ciento de sólido se determinan tres veces la viscosidad promedio; se efectúan tres réplicas con el objetivo de analizar la tendencia en el comportamiento de las variables involucradas en el proceso y en consecuencia obtener un resultado más representativo. El esfuerzo de corte se calculó por medio de la ecuación 2.13.

Se efectúa un análisis de variancia de un factor para comparar los resultados de las réplicas de cada experimento, sobre la base del procedimiento descrito en el capítulo anterior y utilizando el Software Excel. El cálculo se lleva a cabo para cada por ciento de sólido, obteniendo los siguientes resultados:

1. Para un 4 % de sólido no se evidencia diferencias significativas entre los resultados de las réplicas de cada experimento, puesto que el valor de Fisher calculado es de 0,03 y el de Fisher crítico es de 3,40.
2. Para un 12 % de sólido no se evidencia diferencias significativas entre los resultados de las réplicas de cada experimento, puesto que el valor de Fisher calculado es de 0,06 y el de Fisher crítico es de 3,40.
3. Para un 20 % de sólido no se evidencia diferencias significativas entre los resultados de la réplica de cada experimento, puesto que el valor de Fisher calculado es de 0,07 y el de Fisher crítico es de 3,40.
4. Para un 28 % de sólido no se evidencia diferencias significativas entre los resultados de la réplica de cada experimento, puesto que el valor de Fisher calculado es de 0,02 y el de Fisher crítico es de 3,40.
5. Se determina que el experimento se realiza bajo control estadístico sobre la base del criterio de Fisher, puesto que para todas las réplicas realizadas no se mostró diferencias significativas, al nivel de confianza del 95 %.

3.5. Análisis de variancia de la viscosidad

Se efectúa un análisis de variancia de dos factor para comparar los resultados de las réplicas de cada experimento, y los que se obtiene cuando varia el por ciento de sólido, sobre la base del procedimiento descrito en el capítulo anterior y utilizando el Trabajo de Diploma en opción al
Título de Ingeniero Mecánico

Software Excel. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 6 de Anexo 10.

A partir de los resultados mostrados en la tabla 14 se determinan las decisiones que se formulan a continuación:

Para las réplicas

1. Puesto que el valor de Ficher calculado es menor que el de Ficher crítico (0,09 es menor que 5,14) la hipótesis nula no se rechaza, en otras palabras no existe diferencias significativas entre los resultados obtenidos al replicar los experimentos.

Para los porcentos de sólido

2. Puesto que el valor de Ficher calculado es mayor que el de Ficher crítica (1600,59 es mayor que 5,14) la hipótesis nula se rechaza, en otras palabras existe diferencias significativas entre los resultados obtenidos al variar el porcentaje de sólido.

3.6. Ajuste de curvas por regresión

Las curvas de flujo del lodo pronosticada y los modelos matemáticos ajustados para el 4 % de sólido se muestra a continuación en la Figura 3.3. Esto se elabora a partir del plot de los datos contenidos en la tabla 7 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.

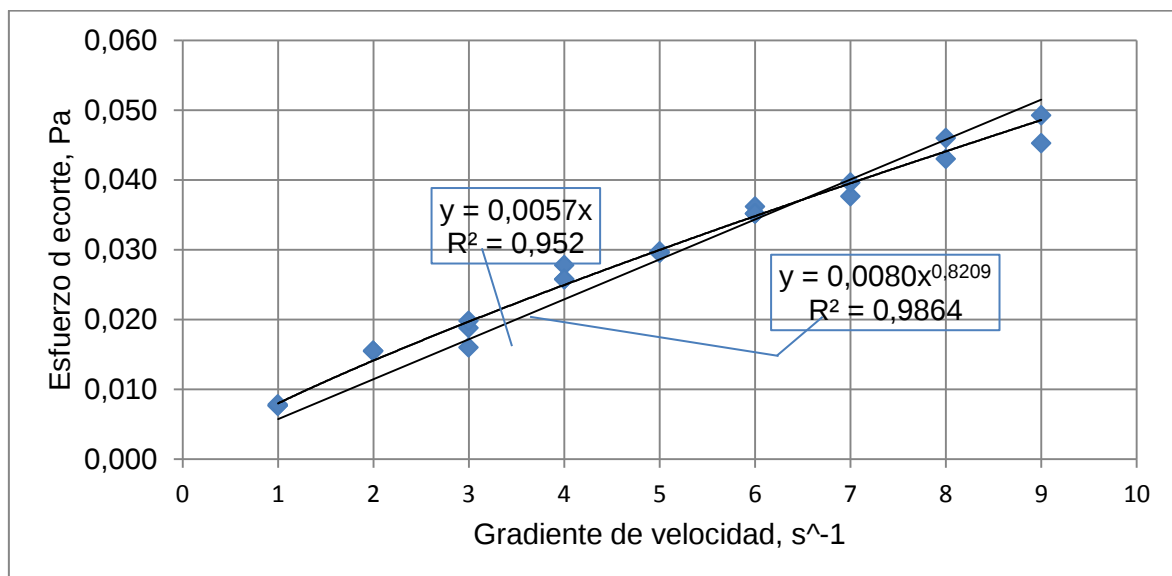


Figura 3.3. Curva de flujo del lodo para un 4 % de sólido.

En la Figura 3.3 se aprecia que el esfuerzo de corte del lodo objeto de estudio puede ser determinada a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal (una recta), puesto que el coeficiente de determinación está próximo a la unidad (0,952); pero el modelo de potencia es más adecuado pues posee un mayor coeficiente de determinación (0,9864).

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 potencial es significativa, puesto que el criterio de Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 (1,394 E-34), el de Fisher un valor de cálculo (931,68) superior que el Fisher crítico (1,63E-33) y el coeficiente de correlación de 0,99. A partir de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Modelo reológico del lodo.

Modelo general para fluido seudoplástico Ec. 2.12	Modelo particular para el lodo Ec. 3.1
$\tau_{x,y} = K \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n$	$\tau_{x,y} = 0,008 \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{0,821}$

Donde: $\tau_{x,y}$ – es el esfuerzo de corte, en Pa y $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ – es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Por lo tanto se indica que el lodo residual objeto de estudio muestra un comportamiento reológico Newtoniano, ya que puede ser representada la curva de flujo de este por un modelo lineal, significativamente. El coeficiente de viscosidad dinámico según lo planteado anteriormente es entonces de 0,008 $Pa \cdot s$ con un índice de flujo igual a 0,821.

Las curvas de flujo lodo pronosticada y los modelos matemáticos ajustados para el 12 % de sólido se muestra a continuación en la Figura 3.4. Esto se elabora a partir del ploteo de los datos contenidos en la tabla 9 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.

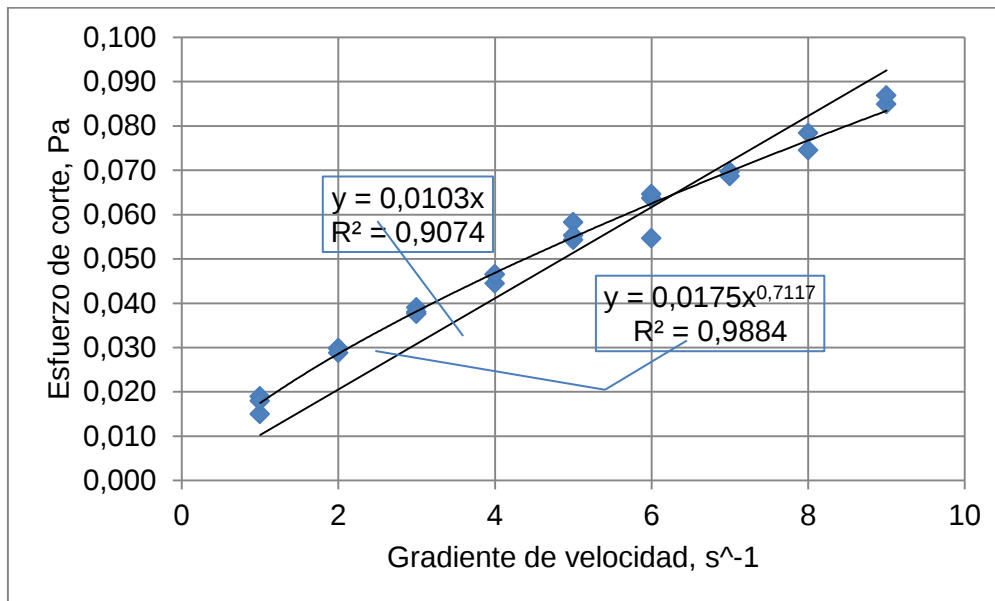


Figura 3.4. Curva de flujo del lodo para un 12 % de sólido.

En la Figura 3.4 se aprecia que el esfuerzo de corte del lodo objeto de estudio puede ser determinada a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal (una recta), puesto que el coeficiente de determinación está próximo a la unidad (0,91); pero el modelo de potencia es más adecuado pues posee un mayor coeficiente de determinación (0,99).

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 potencial es significativa, puesto que el criterio de Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 ($1,06 \times 10^{-36}$), el de Fisher un valor de cálculo (13158,43) superior que el Fisher crítico ($1,489 \times 10^{-35}$) y el coeficiente de correlación de 0,99. A partir de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.4. Modelo reológico del lodo.

Modelo general para fluido pseudoplástico Ec. 2.12	Modelo particular para el lodo Ec. 3.2
$\tau_{x,y} = K \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n$	$\tau_{x,y} = 0,0175 \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{0,7117}$

Donde: $\tau_{x,y}$ – es el esfuerzo de corte, en Pa y $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ – es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Por lo tanto se indica que el lodo residual objeto de estudio muestra un comportamiento reológico pseudoplástico, ya que puede ser representada la curva de flujo de este por un modelo de potencia, significativamente. El coeficiente de viscosidad dinámico según lo planteado anteriormente es entonces de $0,0175 Pa \cdot s$ con un índice de flujo igual a $0,7117$.

La curva de flujo del lodo pronosticada para el 20 % de sólido se muestra a continuación en la Figura 3.5, la cual se elabora a partir del ploteo de los datos contenidos en la tabla 11, utilizando el software Excel. La gráfica permite visualizar el comportamiento del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

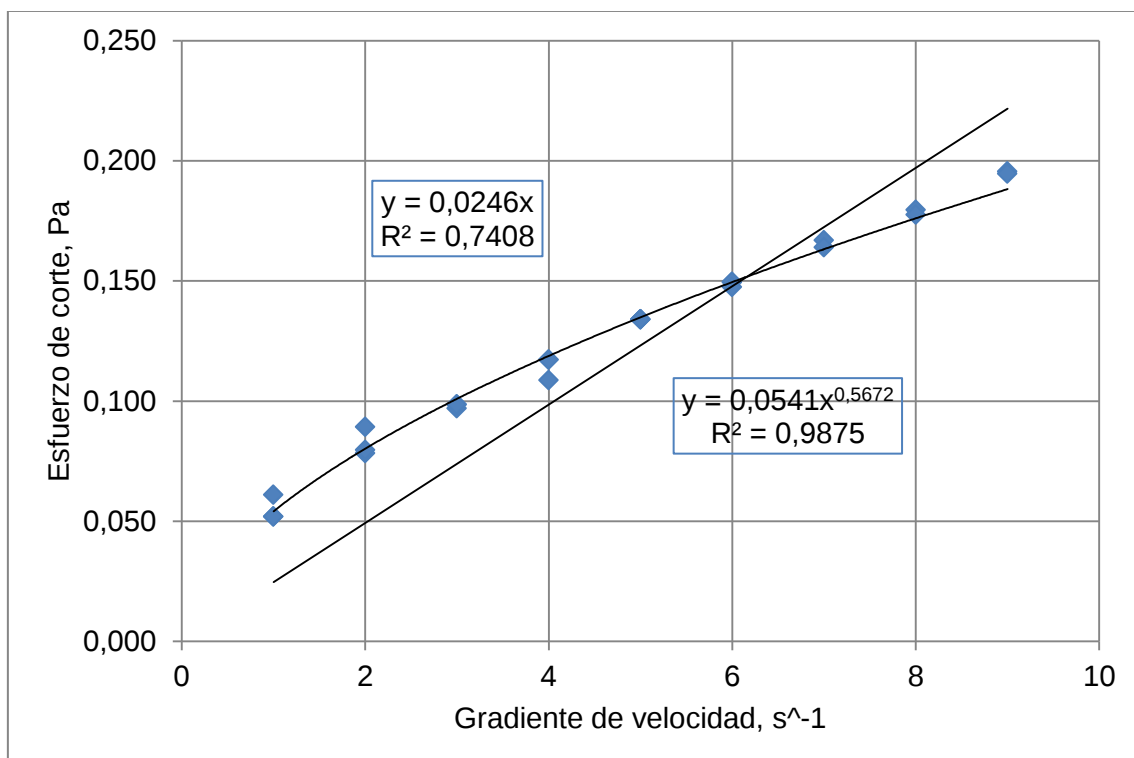


Figura 3.5. Curva de flujo del lodo para un 20 % de sólido.

En la Figura 3.5 se aprecia que el esfuerzo de corte del lodo objeto de estudio no puede ser determinada a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal, puesto que el coeficiente de determinación difiere considerablemente de la unidad ($0,74$);

por lo que el modelo de potencia es más adecuado pues posee un coeficiente de determinación muy próximo a uno (0,99).

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 potencial es significativa, puesto que el criterio de Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 (1,42 E-41), el de Fisher un valor de cálculo (31227,76) superior que el Fisher crítico (3,07E-40) y el coeficiente de correlación de 0,99. A partir de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Modelo reológico del lodo.

Modelo general para fluido newtoniano Ec. 2.12	Modelo particular para el lodo Ec. 3.3
$\tau_{x,y} = K \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n$	$\tau_{x,y} = 0,0541 \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{0,5672}$

Donde: $\tau_{x,y}$ – es el esfuerzo de corte, en Pa y $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ – es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Por lo tanto se indica que el lodo residual objeto de estudio muestra un comportamiento reológico pseudoplástico, ya que puede ser representada la curva de flujo de este por un modelo de potencia, significativamente. El coeficiente de viscosidad dinámico según lo planteado anteriormente es entonces de 0,0541 Pa · s con un índice de flujo igual a 0,567.

La curva de flujo del lodo pronosticada para el 28 % de sólido se muestra a continuación en la Figura 3.6, la cual se elabora a partir del ploteo de los datos contenidos en la tabla 13, utilizando el software Excel. La gráfica permite visualizar el comportamiento del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

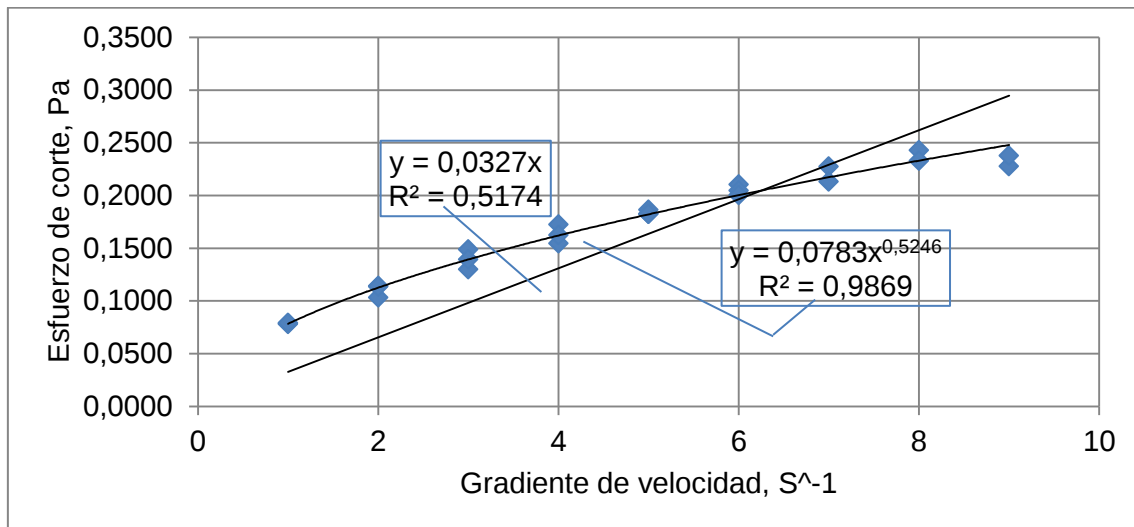


Figura 3.6. Curva de flujo del lodo para un 28 % de sólido.

En la Figura 3.6 se aprecia que el esfuerzo de corte del lodo objeto de estudio no puede ser determinado a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal, puesto que el coeficiente de determinación difiere considerablemente de la unidad (0,52); por lo que el modelo de potencia es más adecuado pues posee un coeficiente de determinación muy próximo a uno (0,99).

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 potencial es significativa, puesto que el criterio de Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 ($1,92 \text{ E}-38$), el de Fisher un valor de cálculo ($17924,68$) superior que el Fisher crítico ($3,15 \text{ E}-37$) y el coeficiente de correlación de 0,99. A partir de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.6. Modelo reológico del lodo.

Modelo general para fluido seudoplástico Ec. 2.12	Modelo particular para el lodo Ec. 3.4
$\tau_{x,y} = K \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n$	$\tau_{x,y} = 0,0783 \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{0,5246}$

Donde: $\tau_{x,y}$ – es el esfuerzo de corte, en Pa y $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ – es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Por lo tanto se indica que el lodo residual objeto de estudio muestra un comportamiento reológico pseudoplástico, ya que puede ser representada la curva de flujo de este por un modelo de potencia, significativamente. El coeficiente de viscosidad dinámico según lo planteado anteriormente es entonces de $0,0783 \text{ Pa} \cdot s$ con un índice de flujo igual a 0,5246.

A partir de los resultado obtenido de viscosidad aparentes sobre la base de los modelos ajustado dado por las ecuaciones 3.1 a la 3.4, utilizando los valores de concentración volumétrica expuestos en la tabal 3.2 y el modelo de viscosidad propuesto por Einstein en 1911(Kasatin 1985), se obtiene el siguiente modelo resumen.

Modelo general para el lodo

$$\mu_{lodo} = \mu_{H_2O} \cdot (1 + K \cdot Cv) \quad (3.5)$$

Donde:

K – es un coeficiente que adquiere para este caso el valor de 4,6.

Los resultados obtenidos en el cálculo del realizado para la determinación del coeficiente K, indican que el modelo es significativo, puesto que el criterio de Student muestra una probabilidad inferior a 0,05 (0,0008), el de Ficher un valor de cálculo (182,27) superior que el Ficher crítico (0,005) y el coeficiente de determinación de 0,98.

3.7. Determinación del error relativo

En la tabla 15 del Anexo 15 se muestra los resultados del análisis realizado del error relativo en el que se incurre cuando se efectúa la determinación de la viscosidad aparente utilizando la correspondiente ecuación, en relación con los valores obtenidos por medición. El cálculo del error relativo se efectúa sobre la base de la ecuación 2.23.

En la tabla anterior se observa que cuando se aplica la ecuación 2.15 propuesta en Kasatin (1985), el error relativo es superior al 8 a 47 %. Al utilizar la ecuación 2.16 propuesta en Kasatin (1985), el error relativo varía de 1 a 62 %. Cuando se emplea la ecuación 2.17 de Aguiar (1975) el error relativo varía en el rango de un 9 a un 42 %. Y, En el caso que se efectúa el cálculo de la viscosidad aparente con la ecuación propuesta por Gaitán (2010) el error relativo varía en el rango de 70 a 97 %.

Del análisis realizado se infiere que la ecuación que ofrece menor relativo es la propuesta por Kasatin (1985), pero dicho error se incrementa hasta un 62 % si se hace extensiva a todo el rango de variación de la concentración de sólido considerada. Esto era de esperarse puesto que dicha ecuación se sugiere para concentraciones superior a un 10 % en volumen.

La Figura 3.7 muestra el comportamiento de la viscosidad del lodo tratado en el trabajo desarrollado por Daido (1976) y el considerado en este trabajo. La viscosidad dinámica del lodo objeto de estudio, se determinó por medio de la ecuación 3.1 a la 3.4 expuesta anteriormente.

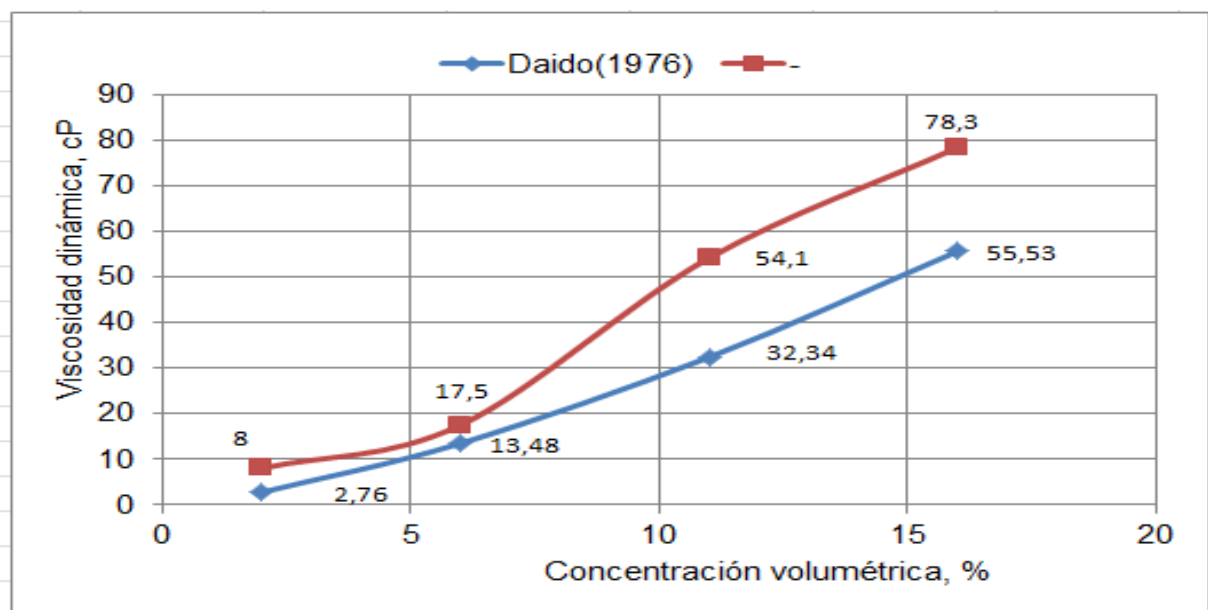


Figura 3.7. Comportamiento de la viscosidad aparente de arcillas.

Se observa en la Figura 3.7 que en general el lodo considerado en este trabajo mostro una viscosidad superior a la del lodo del trabajo de (Daido 1976). El análisis matemático para la comparación se efectúa utilizando la ecuación del error relativo

(ecuación 2.23). En la tabla 3.7 se muestran los resultados del cálculo efectuado para la determinación del error relativo.

Tabla 3.7. Comparación de la viscosidad de lodos de arcilla.

Viscosidad obtenida, cP	Viscosidad, cP(Daido 1976)	Error relativo; %
8	2,76	66
17,5	13,5	23
54,1	32,3	40
78,3	55,5	29

Los valores de viscosidad mostrados se pueden atribuir a la diferencia de diámetro de las partículas presentes en el lodo; el lodo de Daido (1976) refiere un diámetro de partícula superior al lodo objeto de estudio en este trabajo. La arcilla de Daido (1976) se caracterizó por un $d_{50} = 50 \mu\text{m}$, $d_{90} = 143 \mu\text{m}$ y la del lodo objeto de estudio $d_{50} = 16 \mu\text{m}$, $d_{90} = 51 \mu\text{m}$. Este resultado era de esperarse puesto que en general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas partículas que poseen propiedades magnéticas con las que ocurre lo contrario, como es el caso de las pulpas de maghemita, según lo expresado por Garcell (1984).

3.8. Valoración económica

En este trabajo se expone la caracterización reológica y granulométrica del lodo generado en la Unidad Empresarial de Base del Jobo de Sagua de Tánamo. La metodología desarrollada permite realizar la valoración del estado del arte relativo a la 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 se propondrá la

utilización de la metodología para otras instalaciones similares.

Las curvas de flujo elaborada es importante para el diseño y selección de los equipos a emplear para la evacuación y/o tratamiento 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).

Sobre la base de la ecuación 2.24 se efectúa el análisis económico del costo en el que se incurre por concepto de la caracterización realizada. En la tabla 3.7 se muestra el resultado de la evaluación del modelo para estimación del costo de la investigación.

Tabla 3.8. Costo de la investigación.

Parámetros	Valor, CUC	Valor, CUP	Proveedor
Valor de la investigación($I_{inv.}$)			
Pruebas realizadas:			
Ensayos granulométricos con <i>Analizador de partícula</i> 22	22,5		ECCG
Ensayos granulométricos con tamices	574,91		ISMM
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
Costo total de la investigación	1 844,99	379,75	

En la tabla anterior 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 para determinar las densidades y la granulometría se efectuó sobre la base de los precios otorgados por el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINIQ) que realizan dichos trabajos.

Se debe señalar que lo expuesto anteriormente se hace a manera de mostrar una referencia sobre la implicación económica ocasionada por el establecimiento del sistema de sedimentación propuesto. 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.

3.9. Efectos ambientales

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

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

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.

❖ UEB del Jobo de Sagua de Tánamo

La UEB del jobo 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 y se le ha practicado un orificio en un costado, en consecuencia el lodo se descarga en lugares no adecuados, provocando alteraciones en el ecosistema y causando molestia a la comunidad.
2. La necesidad de disponer de mayores volúmenes de agua para poder satisfacer la demanda actuales y futura del proceso y la comunidad. En la actualidad se producen interrupciones del proceso por déficit de agua y en lo adelante se prevé aumentar los volúmenes de producción de árido, lo que incrementará la demanda de agua. Además se han hecho intentos por palear la situación mediante la construcción de un nuevo pozo pero no se han obtenido resultados alentadores.
3. Sedimentación del lodo residual en la tubería de evacuación, lo cual se ha evidenciado por reiteradas interrupciones en el proceso, debido a la necesidad de realizar operaciones de mantenimiento para restituir la capacidad de trabajo de la instalación, incrementando los costos por este concepto.

Las afectaciones que se presentan en el tubo de descarga del lodo se expresan en generación de polvo que trae consigo la contaminación de la UEB, sus alrededores y al ser humano.

3.10. Conclusiones de capítulo 3

1. Se efectúa la determinación de la granulometrías del lodo generado en el proceso de lavado de la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo, utilizando el analizador de partícula 22 y el método de los tamices por la vía húmeda, obteniéndose como resultado que el diámetro medio correspondiente al 80 % cernido es de 0,037mm y 0,043 mm para los respectivos métodos, lo que indica un error relativo del 16 % y la no existencia de diferencia significativa al nivel de confianza del 95 %.
2. Se realiza la caracterización reológica del lodo objeto de estudio, para los 4 por ciento de sólido considerado, obteniéndose como resultado que su curva de flujo se ajusta significativamente a un comportamiento pseudoplásticos, los modelos que describen la curvas, y se demuestra la necesidad de realizar correcciones a los modelos propuestos por otros autores para el cálculo de la viscosidad aparente.
3. Efectúa un análisis de las implicaciones económicas y ambientales asociada a los resultados del temas de investigación, determinándose que por concepto de los ensayos realizados se incurre en un costo de 1 844,99 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 que trae consigo la contaminación de la UEB, sus alrededores y al ser humano.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se determinó que en ninguno de los trabajos precedentes realizado en la instalación y sobre el transporte de hidromezcla se hace una caracterización reológica para varios porcentos de sólido y granulométrica con técnica moderna, para clasificar reológicamente el fluido, determinar la viscosidad, calcular el número de Reynolds y por consiguiente tratar el régimen de flujo ya sea turbulento o laminar; además de una evaluación granulométrica con vista a caracterizar las partículas en suspensión como forma de asegurar la reproductividad en los resultados, y construir a la explicación del comportamiento reológico del fluido.
2. Se efectuó la determinación de la granulometrías del lodo generado en el proceso de lavado de la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo, utilizando el analizador de partícula 22 y el método de los tamices por vía húmeda, en tal sentido se indicó que el diámetro medio de las partículas correspondiente al 80 % cernido es de 0,037mm y 0,043 mm para los respectivos métodos, precisando un error relativo del 16 % y la no existencia de diferencias significativas al nivel de confianza del 95 %.
3. Se realizó un análisis de la reología del lodo objeto de estudio, para los 4 por ciento de sólido, obteniéndose como resultado que su curva de flujo se ajusta significativamente a un comportamiento pseudoplásticos, los modelos que describen la curvas, y se demuestra la necesidad de realizar correcciones a los modelos propuestos por otros autores para el cálculo de la viscosidad aparente.
4. Se efectuó una valoración de las implicaciones económicas y ambientales relacionadas con los resultados del temas de investigación, obteniéndose que por concepto de los ensayos realizados se genera un costo de 1 844,99 CUC más 379,75 CUP y que las principales afectaciones ambientales presentadas en el tubo de descarga del lodo, están dada por generación de polvo que trae consigo la contaminación de la UEB, sus alrededores y al ser humano.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar la caracterización reológica y granulométrica de otros lodos generados en el proceso de lavado de materiales con vista sentar base para la generalización de los resultados y establecer regularidades entre propiedades.
2. Realizar experimento para la determinación del pH, el punto isoelectrico, de la mineralogía y de microcopia para contribuir a la explicación del comportamiento reológico del fluido.
3. Realizar ensayos de composición química para evaluar la posibilidad de utilizar el material que sedimenta como materia prima en la construcción.
4. Determinar los modelos de la pérdida de presión y la velocidad crítica de transportación para el lodo objeto de estudio, considerando la clasificación reológica realizada al fluido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A.S.Dukhin and P.J.Goetz "Ultrasound for characterizing colloids", Elsevier, (2002)
2. Andreiev, S.E. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Editorial pueblo y educación, 1980.
3. Aguiar, S.P Comportamiento reológico de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Facultad de Tecnología. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba 1975.
4. 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.
5. Bandala M. Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
6. 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
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. Cerpa, A.; Garcell. L .R Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. La Habana: Informe al evento Metalurgia 98, 1998.
9. Chacín, F. 2000. Diseño y análisis de experimentos I. Ed. FEPUVA – UCV. Caracas, Venezuela. p 388.
10. Chen, Francis F. (1984) (en inglés). Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion: Plasma physic.
11. DAIDO, A. (1976): "Viscosity and Yield Value of Fluid Containing Clay", Proceedings of the 26th Japan National Congress for Applied Mechanics.
12. 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
13. Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1989.

14. GAITÁN, I. *estimación de parámetros reológicos de pulpas minerales a diferentes concentraciones de sólidos* (2010).
15. 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.
16. Garcell, L. *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía*, 2001.
17. 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.
18. 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.
19. 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.*
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, R.E. *Propuesta de un sedimentador para la recuperación del agua del lodo residual.*(2014).
22. Hatschek, Emil (1928). *The Viscosity of Liquids*. New York: Van Nostrand.
23. Heny, K.; Fred, H.; Stephen, L. 1959. *Mineralogía. Edición revolucionaria. La Habana.*
24. Hernández, S. 1997 *“Metodología de la Investigación.”* Editorial McGraw-Hil. México.
25. Hernández, S. 1986. *Metrología dimensional. Editorial ISPJAE.*
26. 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.*

27. Izquierdo, P.R. *Investigación de los parámetros y elaboración de los regímenes racionales del transporte hidráulico de lateritas utilizadas en las condiciones de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1989.*
28. *Información Comercial Española*. Nro: 714. pp: 87-98.
29. K. Walters (1975) *Rheometry (Chapman & Hall)* ISBN 0-412-12090-9
30. Kasatin, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.*
31. Lakovlev, S.V y Dalkov Y.M., *Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p*
32. Laurencio Alfonso, H.L.; Martínez Rojas, R: “Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad (cola) en el proceso carbonato amoniacal”. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, 2004.
33. Leyva, A. *Estudio del diseño y mantenimiento de la criba horizontal balanceada CMD-107. Proyecto de curso. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2011.*
34. Leyva, B., Guillen, Y., Torres, E., y Laurencio, H. 2014. *Pronóstico de la velocidad crítica de transportación de lodo residual. Enermoa. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.*
35. Liu S. y Masliyah J.H., On Non-Newtonian Fluid Flow in Ducts and Porous Media, *Chemical Engineering Science*: 53 (6), 1175-1201, 1998.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. Mariño, A. Mora, L. Chang, A. 2009. *Equipos de la metalurgia no ferrosa. Editorial Felix Varela. La Habana. Cuba. 238 p.*

40. *Mechanics of Fluids* (Ninth edición). London; New York: Spon Press. 2011.
41. Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. 2005. *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba pp 25 – 30.
42. Mitrofanov, L. 1984. *Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales*, Editorial MIR, Moscú 1984.
43. Montgomery, D. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Félix Varela. La Habana. 585 p.
44. Nekrasov B. "Hidráulica". Editorial Pueblo y Educación, 1986.
45. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada., Pipe Transportation of Minced Fish Paste. *Journal of Food Science*: 45 (4), 844-847 (1980).
46. Pakrovskaya, V.I., *El transporte hidráulico en la industria minera*. Moscú: Niedra, 1985, 192 p.
47. Perona P., an Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. *Journal of Food Engineering*: 60, 137-145, 2003.
48. Perry J.H., *Chemical engineers handbook*. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1984.
49. Regalado, R. *Propuesta de hidrociclones para la constructora del Jobo de Sagua de Tánamo. Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2011.
50. Rosabal, J. y Garcell L., *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. Tomo I.
51. Skelland A.H. *Non Newtonian flow and heat transfer*. Ediciones revolucionarias, La Habana, 1970.
52. Suárez F.M. *Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito. Tesis de doctorado*. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
53. Steffe J.M. y R.G. Morgan., *Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods*. *Food Technology*. Dic.: 78-85, 1986.

54. *Tejeda, H.D. Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.*
55. *Toose, E.M. A boundary integral method for two dimensional (non) – Newtonian drops is slow viscous flow. Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics, 1995.*
56. *Turiño, I. M. Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga. Centro azúcar, No.1, 1994.*
57. *Turro, B.A. Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002.*
58. *T. William Lambe. Robert V. Whitman. Mecánica de suelos. Editora Limusa. México. 1997. ISBN 968-18-1894-6 Massachusetts. Editora Limusa. México 1997.*
59. *VISCOSÍMETRO PROGRAMABLE BROOKFIELD DV-II+ Pro Manual M/03-165 Edición Noviembre' (2006).*
60. *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.*



Anexos

ANEXO1



Figura 1. Probeta utilizada en el cálculo de la densidad de sólido

ANEXO 2

Tabla 1. Análisis de la granulometría, (analizador de partículas 22)

% Cernido	% Retenido	Clase, mm	% Cernido	% Retenido	Clase, mm
0,07	99,93	0,000 31	3,81	96,19	0,001 056
0,16	99,84	0,000 348	4,65	95,35	0,001 18
0,26	99,74	0,000 389	5,58	94,42	0,001 318
0,39	99,61	0,000 435	6,61	93,39	0,001 473
0,56	99,44	0,000 486	7,74	92,26	0,001 646
0,79	99,21	0,000 543	8,96	91,04	0,001 839
1,08	98,92	0,000 607	10,27	89,73	0,002 054
1,45	98,55	0,000 678	11,67	88,33	0,002 295
1,9	98,1	0,000 757	13,16	86,84	0,002 564
2,44	97,56	0,000 846	14,73	85,27	0,002 865
3,08	96,92	0,000 945	16,37	83,63	0,003 201



Tabla 1. Análisis de la granulometría (Continuación))

% Cernido	% Retenido	Clase, mm	% Cernido	% Retenido	Clase, mm
18,09	81,91	0,003 576	75,41	24,59	0,032 845
19,89	80,11	0,003 995	79,64	20,36	0,036 696
21,76	78,24	0,004 464	83,58	16,42	0,040 999
23,71	76,29	0,004 987	87,14	12,86	0,045 807
25,73	74,27	0,005 572	90,29	9,71	0,051 178
27,83	72,17	0,006 226	93,01	6,99	0,057 179
30	70	0,006 956	95,28	4,72	0,063 883
32,25	67,75	0,007 771	97,09	2,91	0,071 374
34,56	65,44	0,008 682	98,41	1,59	0,079 743
36,95	63,05	0,009 7	99,3	0,7	0,089 093
39,43	60,57	0,010 838	99,82	0,18	0,099 54
42,02	57,98	0,012 109	100	0	0,111 212
44,75	55,25	0,013 528	100	0	0,124 252
47,68	52,32	0,015 115	100	0	0,138 822
50,86	49,14	0,016 887	100	0	0,155 099
54,33	45,67	0,018 867	100	0	0,173 286
58,12	41,88	0,021 079	100	0	0,193 605
62,21	37,79	0,023 551	100	0	0,216 306
66,54	33,46	0,026 313	100	0	0,241 669
70,99	29,01	0,029 398	100	0	0,270 007

ANEXO 3

Tabla 2. Análisis de la granulometría (tamices)

Abertura de las mallas, mm	Peso, g	% en peso	Retenido acumulado %	Cernido
0,208	19,82	8,09	8	92
0,147	4,38	1,79	10	90
0,088	7,89	3,22	13	87
0,074	4,93	2,01	15	85
0,044	7,06	2,88	18	82
0	200,92	82,01	100	0
Total	245	100		



ANEXO 4

Tabla 3. Densidad de la arcilla.

		muestras		
		M1	M2	M3
B	Picnómetro vacío	17,005 4	18,097 8	18,875 4
C	Picnómetro con arcilla	24,012 8	25,065 4	24,608 6
D	Picnómetro con arcilla + agua	45,396 7	47,005 4	45,938 1
A	Picnómetro con agua destilada	42,019 8	43,807 8	42,895 8
agua	Densidad del agua	1,0	1,0	1,0
	Densidad el solido	1,931 3	1,900 7	2,047 1
	Densidad de la arcilla		1,959 7	

Tabla 4. Límites de control.

Xmed	1,959 7	
S	0,091 1	
t	4,303	95%
LTmax	2,351 7	
LTmin	1,567 7	

ANEXO 5

Tabla 5. Densidad del lodo para un 4 %.

	Picnómetro vacío,g	Picnómetro lleno, g	Masa del lodo, g	Volu. ml	Densidad. de la arcilla	Densidad del lodo, kg/m ³
Picnómetro 1	19,762 9	45,813 4	26,050 5	25	1,042 0	1 042,02
Picnómetro 2	19,942 5	45,200 7	25,258 2	25	1,010 3	1 010,33
Picnómetro 3	19,960 2	45,301 7	25,341 5	25	1,013 7	1 013,66
	Dens. del lodo					
	1 022					



ANEXO 6

Tabla 6. Resumen del análisis de variancia.

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Fila 1 (Réplicas 1)	4	91,45	22,86	273,14		
Fila 2 (Réplica 2)	4	90,93	22,73	284,84		
Fila 3 (Réplica 3)	4	90,60	22,65	273,90		
Columna 1 (4 %)	3	18,75	6,25	0,003		
Columna 2 (12 %)	3	35,58	11,86	0,05		
Columna 3 (20 %)	3	92,19	30,73	1,02		
Columna 4 (28 %)	3	126,45	42,15	0,53		
ANOVA						
O. variaciones	S cuadrados	G. de libertad	P. de los cuad.	F	P	Vcrítico para F
Filas	0,09	2	0,05	0,09	0,9 2	5,14
Columnas	2 492,54	3	830,85	1 600,59	0,0 0	4,76
Error	3,11	6	0,52			
Total	2 495,74	11				



ANEXO 7

Tabla 7. Resultado de la prueba de reología para un 4 % de sólido.

Exp.	n, rev/min	cP	Par, %	Esfuerzo de corte, (Dina/cm ²)	Esfuerzo de corte, (Pa)
1	75	7,630	9,5	0,076	0,007 63
2	100	7,735	12,9	0,155	0,015 47
3	105	5,328	9,3	0,160	0,015 98
4	135	6,945	15,6	0,278	0,027 78
5	140	5,951	13,9	0,298	0,029 75
6	150	6,027	15,1	0,362	0,036 6
7	160	5,375	14,3	0,376	0,037 63
8	180	5,748	17,2	0,460	0,045 98
9	200	5,026	16,8	0,452	0,045 24
1	75	7,630	9,5	0,076	0,007 63
2	100	7,735	12,9	0,155	0,015 47
3	105	6,261	11,0	0,188	0,018 78
4	135	6,445	14,5	0,258	0,025 78
5	140	5,911	13,8	0,296	0,029 55
6	150	5,860	14,7	0,352	0,035 16
7	160	5,661	15,1	0,396	0,039 63
8	180	5,373	16,1	0,430	0,042 98
9	200	5,471	18,2	0,492	0,049 24
1	75	7,830	9,8	0,078	0,007 83
2	100	7,735	12,9	0,155	0,015 47
3	105	6,594	11,5	0,198	0,019 78
4	135	6,445	14,5	0,258	0,025 78
5	140	5,911	13,8	0,296	0,029 55
6	150	5,860	14,7	0,352	0,035 16
7	160	5,518	14,7	0,386	0,038 63
8	180	5,873	17,6	0,470	0,046 98
9	200	4,915	16,4	0,442	0,044 24

Tabla 8. Réplicas de la viscosidad para un 4 %.

n, rev/min	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica,cP
75	7,630	7,630	7,830
100	7,735	7,735	7,735
105	5,328	6,261	6,594
135	6,945	6,445	6,445
140	5,951	5,911	5,911
150	6,027	5,860	5,860
160	5,375	5,661	5,518
180	5,748	5,373	5,873
200	5,026	5,471	4,915



ANEXO 8

Tabla 9. Resultado de la prueba de reología para un 12 % de sólido.

Exp.	n, rev/min	cP	Par, %	Esfuerzo de corte, (Dina/cm ²)	Esfuerzo de corte, (Pa)
1	75	19,00	23,8	0,190	0,019 0
2	100	14,90	24,8	0,298	0,029 8
3	105	13,03	22,8	0,391	0,039 1
4	135	11,12	25,0	0,445	0,044 5
5	140	11,66	27,2	0,583	0,058 3
6	150	9,11	22,8	0,547	0,054 7
7	160	9,95	26,6	0,697	0,069 7
8	180	9,80	29,4	0,784	0,078 4
9	200	9,43	31,5	0,849	0,084 9
1	75	15,00	18,8	0,150	0,015 0
2	100	14,90	24,8	0,298	0,029 8
3	105	12,70	22,2	0,381	0,038 1
4	135	11,62	26,2	0,465	0,046 5
5	140	10,86	25,3	0,543	0,054 3
6	150	10,61	26,5	0,637	0,063 7
7	160	9,81	26,2	0,687	0,068 7
8	180	9,31	27,9	0,745	0,074 5
9	200	9,66	32,2	0,869	0,086 9
1	75	18,00	22,5	0,180	0,018 0
2	100	14,40	24,0	0,288	0,028 8
3	105	12,53	21,9	0,376	0,037 6
4	135	11,62	26,2	0,465	0,046 5
5	140	11,06	25,8	0,553	0,055 3
6	150	10,78	26,9	0,647	0,064 7
7	160	9,81	26,2	0,687	0,068 7
8	180	9,43	28,3	0,754	0,075 4
9	200	10,10	33,7	0,909	0,090 9

Tabla 10. Réplicas de la viscosidad para un 12 %.

n, rev/min	Viscosidad dinámica cP	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica, cP
75	19,00	15,00	18,00
100	14,90	14,90	14,40
105	13,03	12,70	12,53
135	11,12	11,62	11,62
140	11,66	10,86	11,06
150	9,11	10,61	10,78
160	9,95	9,81	9,81
180	9,80	9,31	9,43
200	9,43	9,66	10,10



ANEXO 9

Tabla 11. Resultado de la prueba de reología para un 20 % de sólido.

Exp.	n, rev/min	cP	Par, %	Esfuerzo de corte, (Dina/cm ²)	Esfuerzo de corte, (Pa)
1	75	61,00	76,3	0,610	0,061 0
2	100	44,65	74,4	0,893	0,089 3
3	105	32,33	56,6	0,970	0,097 0
4	135	29,29	65,9	1,172	0,117 2
5	140	26,79	62,5	1,340	0,134 0
6	150	24,91	62,3	1,494	0,149 4
7	160	23,85	63,6	1,669	0,166 9
8	180	22,45	67,4	1,796	0,179 6
9	200	21,73	72,5	1,956	0,195 6
1	75	52,00	65,0	0,520	0,052 0
2	100	39,15	65,3	0,783	0,078 3
3	105	32,86	57,5	0,986	0,098 6
4	135	29,29	65,9	1,172	0,117 2
5	140	26,79	62,5	1,340	0,134 0
6	150	24,92	62,3	1,495	0,149 5
7	160	23,42	62,5	1,639	0,163 9
8	180	22,20	66,6	1,776	0,177 6
9	200	21,62	72,1	1,946	0,194 6
1	75	52,00	65,0	0,520	0,052 0
2	100	39,85	66,4	0,797	0,079 7
3	105	32,86	57,5	0,986	0,098 6
4	135	27,18	61,2	1,087	0,108 7
5	140	26,79	62,5	1,340	0,134 0
6	150	24,57	61,4	1,474	0,147 4
7	160	23,36	62,3	1,635	0,163 5
8	180	22,32	67,0	1,786	0,178 6
9	200	21,51	71,7	1,936	0,193 6

Tabla 12. Réplica de la viscosidad para un 20 %.

n, rev/min	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica,cP
75	61,00	52,00	52,00
100	44,65	39,15	39,85
105	32,33	32,86	32,86
135	29,29	29,29	27,18
140	26,79	26,79	26,79
150	24,91	24,92	24,57
160	23,85	23,42	23,36
180	22,45	22,20	22,32
200	21,73	21,62	21,51



ANEXO 10.

Tabla 13. Resultado de la prueba de reología para un 28 % de sólido.

Exp.	n, rev/min	cP	Par, %	Esfuerzo de corte, (Dina/cm ²)	Esfuerzo de corte, (Pa)
1	75	79,00	98,8	0,790	0,079 0
2	100	51,64	86,1	1,033	0,103 3
3	105	43,29	75,8	1,299	0,129 9
4	135	38,61	86,9	1,544	0,154 4
5	140	36,49	85,2	1,824	0,182 4
6	150	35,09	87,8	2,106	0,210 6
7	160	32,47	86,6	2,273	0,227 3
8	180	30,37	91,1	2,429	0,242 9
9	200	25,29	84,3	2,276	0,227 6
1	75	78,00	97,5	0,780	0,078 0
2	100	57,14	95,3	1,143	0,114 3
3	105	49,62	86,9	1,489	0,148 9
4	135	43,11	97,0	1,724	0,172 4
5	140	37,29	87,0	1,864	0,186 4
6	150	34,09	85,3	2,046	0,204 6
7	160	30,47	81,3	2,133	0,213 3
8	180	29,12	87,4	2,329	0,232 9
9	200	26,41	88,0	2,376	0,237 6
1	75	79,00	98,8	0,790	0,079 0
2	100	56,74	94,6	1,135	0,113 5
3	105	46,49	81,4	1,395	0,139 5
4	135	40,61	91,4	1,624	0,162 4
5	140	36,49	85,2	1,824	0,182 4
6	150	33,43	83,6	2,006	0,200 6
7	160	31,04	82,8	2,173	0,217 3
8	180	29,24	87,7	2,339	0,233 9
9	200	27,52	91,7	2,476	0,247 6

Tabla 14. Réplica de la viscosidad para un 28 %.

n, rev/min	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica, cP	Viscosidad dinámica, cP
75	79,00	78,00	79,00
100	51,64	57,14	56,74
105	43,29	49,62	46,49
135	38,61	43,11	40,61
140	36,49	37,29	36,49
150	35,09	34,09	33,43
160	32,47	30,47	31,04
180	30,37	29,12	29,24
200	25,29	26,41	27,52



ANEXO 11

Tabla 15. Análisis de los errores.

Por ciento de sólido y concentración volumétrica	Viscosidad obtenidos, cP	Viscosidad calculada, cP	Ec.	Error relativo, %
S= 4 % o Cv = 2 %	8		(2.15)	24
			(2.16)	26
			(2.17)	9
			(2.18)	70 - 77
S= 12 % o Cv = 6 %	17,5		(2.15)	8
			(2.16)	62
			(2.17)	14
			(2.18)	90 - 92
S= 20 % o Cv = 11 %	51,4		(2.15)	44
			(2.16)	1
			(2.17)	37
			(2.18)	94 - 96
S= 28 % o Cv= 16 %	78,3		(2.15)	47
			(2.16)	6
			(2.17)	42
			(2.18)	96 - 97