



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
" DR. ANTONIO NUÑEZ JIMÉNEZ "  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

# Trabajo de diploma

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

**Título:** Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo.

**Autor:** Esteban Abraham García Rodríguez

**Tutor(es):** MsC. Benigno Leyva de la Cruz  
Dr.C Héctor Luis Laurencio Alfonzo

**"Año 56 de la Revolución"  
Moa-2014**



---

### **Declaración de autoría**

Yo: Esteban Abraham García Rodríguez

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**

-----  
**Esteban Abraham García Rodríguez**



---

### **Pensamiento**

“No habrá dificultad que no seamos capaces de vencer, ni error que no pueda evitarse si puede preverse, ni deje de rectificarse rápidamente, si llega a cometerse”.

“Y siempre mediremos, por encima de todo un Técnico y un Científico no por sus conocimientos, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus conocimientos”.

“Fidel Castro Ruz”



---

## Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a todos mis familiares.

En especial a mi madre y a mi padre por toda su dedicación en mí.

A nuestra revolución, por las posibilidades que me ofrece.

A Dios el padre todo poderoso.



Quiero dedicar este trabajo

En especial a mi madre y

A nuestra revolución, por

A Dios el padre todo poderoso



### **Agradecimiento**

A mi familia que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional.

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el aprendizaje como estudiante de la carrera que me ocupa.

A mis tutores el Msc. Benigno Leyva de la Cruz por confiar en mí durante la realización de este trabajo, al Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso ya que sin su supervisión y dedicación no se habría podido desarrollar dicho trabajo.



## SÍNTESIS

Este trabajo tiene como objetivo elaborar una propuesta de sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales. Para cumplir el objetivo propuesto se realiza la determinación de las propiedades físicas y reológicas del lodo; los parámetros de selección de un sedimentador; también se lleva a cabo la selección de sedimentadores y de la bomba que satisfacen los requisitos de la instalación; por último se efectúa una valoración técnico-económica y socio-ambiental del proceso propuesto. Los resultados obtenidos indicaron que existe la garantía de que no haya sedimentación del lodo en el tramo uno, puesto que la velocidad de transportación está en el orden de 0,339 m/s y la velocidad crítica estimado es de  $1,664 \cdot 10^{-4}$  m/s; existen 20 combinaciones posibles de diámetro, altura y torque requerido para asegurar el incremento del porcentaje de sólido del lodo de 4% a 26%; se selecciona una bomba centrífuga serie 8020 de 1,88 kW; se estima que el costo de la inversión requerida para el establecimiento de un sedimentador fabricado en Empresa Mecánica del Níquel es de 25 046,39 CUC y se considera la variante de compra de un Modelo YRQ – Marca YONGLDA, además se determina que la implementación del sistema de la sedimentación propuesto permite aumentar la disponibilidad de agua para el proceso y disminuir las afectaciones ambientales.



## SYNTHESIS

This work had as objective to elaborate a proposal of sedimentation system for the recovery of residual waters. To fulfill the proposed objective you makes the determination of the physical properties and rheological of the mud; the parameters of selection of the sedimentador; it is also carried out the sedimentadores selection and of the bomb that satisfy the requirements of the installation; lastly is carried out a technician-economic and partner-environmental valuation of the proposed process. The obtained results indicated that it exists guarantee that there is not sedimentation of the mud in the tract one, since the transportation speed is in the order of 0,339 m/s and the speed criticizes dear it is of  $1,664 \cdot 10^{-4}$  m/s; 20 combinations exist possible of diameter, height and torque required to assure the increment of the percent of solid of the mud from 4% to 26%; intends a bomb centrifugal series 8020 of power 1,88 kW; is considered that the cost of the investment required for the establishment of a sedimentador manufactured in the EMNI is of 25 046,39 CUC and it is considered the purchase variant of one Model YRQ - YONGLDA Marks and it was determined that the implementation of the proposed sedimentation system allows to increase the readiness of water for the process and to diminish the environmental affectations.



<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
Introducción.	1
<b>1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN.</b>	<b>5</b>
1.1. Introducción.	5
1.2. Trabajos precedentes realizados en la instalación.	5
1.3. Introducción teórica sobre sedimentación y filtración.	6
1.4. Factores que afectan la velocidad de sedimentación.	9
1.5. Trabajos precedentes sobre los parámetros de hidrotransporte en el flujo de hidromezclas por tuberías.	10
1.6. Clasificación reológica de los fluidos.	15
1.6.1. Modelos reológicos.	15
1.6.2. Curvas de flujo.	18
1.7. Generalidades de las máquinas de flujo.	19
1.7.1. Curvas características de las bombas centrífugas.	20
1.8. Flujo tecnológico y balance de material de la planta procesadora de árido del Jobo de Sagua de Tánamo.	20
1.8.1. Descripción del flujo tecnológico del molino Sagua.	23
1.9. Conclusiones del capítulo 1.	24
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>25</b>
2.1. Introducción.	25
2.2. Muestreo y elaboración de los resultados.	25
2.3. Determinación de la granulometría.	27
2.4. Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido.	29
2.5. Determinación de la velocidad de sedimentación del lodo.	30
2.5.1. Determinación de la velocidad crítica.	31
2.6. Determinación del comportamiento reológico del lodo.	32
2.6.1. Pruebas de reología utilizando un reómetro convencional.	32
2.7. Selección del sedimentador.	34
2.8. Determinación de las alturas necesarias y disponibles.	37



---

2.9.	Selección de la bomba.	41
	2.9.1. Verificación de la cavitación.	42
2.10.	Análisis económico.	43
2.11.	Conclusiones del capítulo 2.	45
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>46</b>
3.1.	Introducción.	46
3.2.	Análisis del muestreo.	46
3.3.	Determinación de la granulometría.	47
3.4.	Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido.	48
3.5.	Determinación de la velocidad de sedimentación del lodo.	49
3.6.	Determinación del comportamiento reológico del lodo.	53
3.7.	Selección del sedimentador.	55
3.8.	Determinación de las alturas necesarias y disponibles.	56
3.9.	Selección de la bomba.	58
3.10.	Valoración económica.	60
3.11.	Efectos ambientales.	62
3.12.	Conclusiones de capítulo 3.	65
	<b>CONCLUSIONES GENERALES.</b>	<b>66</b>
	<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>68</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXOS</b>	



## INTRODUCCIÓN

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

Los Sistemas de Gestión de la Calidad en los momentos actuales se han convertido en el mundo globalizado de hoy, en una necesidad insoslayable para permanecer en el mercado a partir del hecho de que un producto o servicio que no satisfaga los requerimientos de calidad del mercado no se logra comercializar, y si no son estables a largo plazo, las empresas llegan a perder su competitividad y prestigio por lo que no sobreviven en el mercado.

La razón de esta investigación se fundamenta en que la Unidad Empresarial de Base (UEB) del Jobo de Sagua de Tánamo ha perdido clientes por haber presentado productos de baja calidad; la arena que se oferta ha mostrado niveles de lodo que superan los establecidos por normas, lo cual se atribuye al déficit de agua para el lavado y a la existencia de otros proveedores más competentes en el territorio como es el caso de la UEB de Miguel de Sagua. Para poder elevar los niveles de calidad la entidad requiere de contar con un Sistema de Gestión de la Calidad efectivo.

El fenómeno de la cooperación empresarial ha sido estudiado por varios autores (Mowery y Rosenberg, 1989; Arora y Gamberdella, 1990; García, 1993; Casanni, 1995; Das y Teng, 1997; Torres y Méndez, 2000; Escribá, 2002; Larrea, 2006). Los acuerdos de cooperación posibilitan compartir riesgos, pero se hace complejo hasta cierto punto el establecimiento de ellos.

En los lineamientos del VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, se plantea las aspiraciones en materia de política para la ciencia, tecnología, innovación y medio



ambiente; el lineamiento 129 refiere el diseño de una política integral y el 133 el sostener y desarrollar investigaciones integrales. En tal sentido, se debe plantear que la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesaria y para ello se requiere intensificar el desarrollo de la industria de la construcción y como objetivo estratégico incrementar la producción de materiales de construcción con la mayor eficiencia en las inversiones. Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos existentes en los yacimientos en Cuba y se perfeccione el sistema de transportación lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

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 y experiencia de la rama Industria de Materiales de Construcción para realizar la proyección de instalaciones procesadoras de grava y arena, con el consiguiente diseño de muchos de sus equipos componentes, para su posterior construcción en talleres y empresas cubanas, como es la empresa mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche".

La UEB del Jobo de Sagua de Tánamo requiere de realizar una innovación de su tecnología para poder aumentar su competitividad, puesto que en la misma se han evidenciado las siguientes insuficiencias: 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; interrupciones del proceso por déficit de agua y en lo adelante se prevé aumentar los volúmenes de producción de árido, lo que se traduce en un incremento de la demanda de agua, esto ha generado intentos por palear la situación mediante la construcción de un nuevo pozo pero no se han obtenido resultados alentadores; afectaciones ambientales 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; insuficiente conocimiento de las propiedades físico-mecánicas y reológicas del lodo residual en relación con el porcentaje de sólido que posee el lodo, lo que dificulta la evaluación y proyección racional del sistema de drenaje.

Dada la situación planteada, se resume que, es necesario que se realice una investigación que permita aumentar la calidad del producto que se oferta por la UEB, lo cual pasa por considerar el aumento de la disponibilidad de agua para el proceso de lavado de árido. Tal investigación debe basarse en un enfoque integral que permita una fundamentación racional de la propuesta de solución tecnológica a la luz de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

A partir de las deficiencias expuestas se declara como **problema científico a investigar**: insuficiente conocimiento de las relaciones que se establecen entre las propiedades físicas y reológicas del lodo (densidad del sólido y del lodo, diámetro medio de las partículas en suspensión, velocidad de sedimentación, viscosidad, etc.), el gasto de lodo, la pérdida de presión que se produce durante el transporte de este por tubería, y los parámetros de un sedimentador: lo que dificulta la elaboración de una propuesta de sistema de sedimentación que permita el incremento de la disponibilidad de agua en la instalación.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis científica**: si se caracterizan las propiedades del lodo residual y se elabora una propuesta de sistema de sedimentación con la incorporación de un sedimentador en el proceso de lavado, se

puede recuperar el agua residual, para ser reutilizada en el mismo y en consecuencia incrementar la calidad del producto que se oferta.

Se establece como **objeto de la investigación**: sistema para sedimentación de lodo residual, y como **campo de acción**: recuperación de aguas residuales en proceso de lavado.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo general del trabajo**: elaborar una propuesta de sistema de sedimentación para la recuperación del agua residual del proceso de lavado en la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo, para aumentar la calidad del producto que se oferta.

### **Objetivos específicos:**

1. Realizar una revisión bibliográfica y sistematización de los fundamentos teóricos sobre la propuesta de sistema de sedimentación.
2. Efectuar experimentos de granulometría, densidad del lodo y la arcilla, velocidad de sedimentación y reología, así como la elaboración de la propuesta de sistema de sedimentación.
3. Analizar los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados y la propuesta de sistema de sedimentación formulada sobre la base de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

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

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el tema.
2. Determinación de la granulometría, la densidad de la arcilla y del lodo, la velocidad de sedimentación y la reología del lodo.
3. Determinación del diámetro, la altura y el torque requerido del sedimentador que se ajustan a la característica de la instalación.
4. Selección de la bomba que satisface la altura de carga necesaria en la instalación para lograr el flujo de lodo requerido.



- 
5. Valoración técnico-económica y socio-ambiental del proceso propuesto para la recuperación del agua residual del proceso de lavado.

## **1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Introducción**

Cuando se hace un estudio es de vital importancia conocer hasta dónde ha llegado la humanidad en la temática analizada, ello permitirá aprovechar de manera eficiente los conocimientos heredados generación tras generación, evitando así arribar a conclusiones erróneas según nuestros puntos de vista 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 de funcionamiento de un sistema de sedimentación y su adaptación a un flujo tecnológico para el proceso de lavado de áridos en el municipio Sagua de Tánamo. 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.

### **1.2. Trabajos precedentes realizados en la instalación**

Sierra (1987), realizó el análisis de la explotación de un esquema tecnológico en funcionamiento en esa época, donde se investigaron los flujos de cada fracción de material procesado, el balance energético y nivel de utilización de los equipos. En el mismo se demostró que todos los equipos estaban sobredimensionados y que conllevaban al sobre consumo energético. Este trabajo es muy importante tenerlo en cuenta para estos análisis o investigaciones.

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 determina parámetros tecnológicos para la selección de una bomba Waerman 6/4.

De la revisión bibliográfica efectuada de los trabajos precedentes se determina que en ninguno de ellos se efectúa la propuesta de un sedimentador para la recuperación del agua que posee el lodo residual.

### 1.3. Introducción teórica sobre sedimentación y filtración

Para examinar la sedimentación y la filtración gravitatorias, se considera el modelo físico hipotético representado en la fig. 1.1, tomado de Smiles (1975).

Cuando las superficies del líquido en el recipiente y de la suspensión en el cilindro se encuentran a la misma altura ( $h=0$ ), ocurre solamente la caída de las partículas (sedimentación), que en este caso se produce únicamente gracias a la acción de la fuerza de gravedad. Si,  $h>0$  también ocurre el movimiento del líquido a través del fondo poroso (filtración).

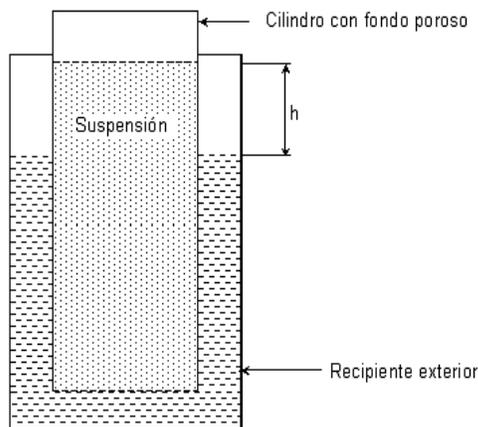


Fig. 1.1 Representación gráfica de la sedimentación y la filtración gravitatorias.

Büerger, Concha y Karlsen (2001) han propuesto un modelo físico hipotético de la filtración a presión con sedimentación simultánea y la ulterior compresión mecánica. En su propuesta, los referidos autores suponen que la presión se ejerce directamente sobre la suspensión que se encuentra en la probeta, mediante un pistón que una vez terminada la filtración propicia la compresión mecánica del sedimento. Sobre esta base,

ilustran la distribución de las concentraciones volumétricas del sólido  $\phi$  en el sistema, en el instante inicial, en un instante donde ocurre la filtración y en un instante donde ocurre la compresión mecánica.

Si de la situación explicada por Büerger, Concha y Karlsen (2001), se toma la suspensión en la probeta y la distribución de concentraciones del sólido, y seguidamente se combina con la situación representada en la fig. 1.1, donde se supone que  $h=0$ , se obtiene la situación representada en la fig. 1.2.

A partir de esta situación, se explica simplificadaamente el mecanismo de sedimentación-consolidación periódica.

En la fig. 1.2 c) puede verse que al final de la sedimentación-consolidación, quedan dos zonas: la zona de líquido clarificado y la zona del sedimento consolidado o comprimido por la acción de la fuerza de gravedad.

Entre las fuerzas que se oponen tanto a la sedimentación como a la compactación, se encuentra la fuerza de Arquímedes y la fuerza de arrastre,  $F_a$  provocada por la fricción del líquido con el sólido. Esta última depende de la velocidad relativa del líquido respecto al sólido  $v_r$  conforme la siguiente ecuación:

$$F_a = C_a \frac{\rho_l v_r^2}{2} \quad (1.1)$$

Donde:  $C_a$  - coeficiente de arrastre o de fricción;  $\rho_l$  - densidad del líquido.

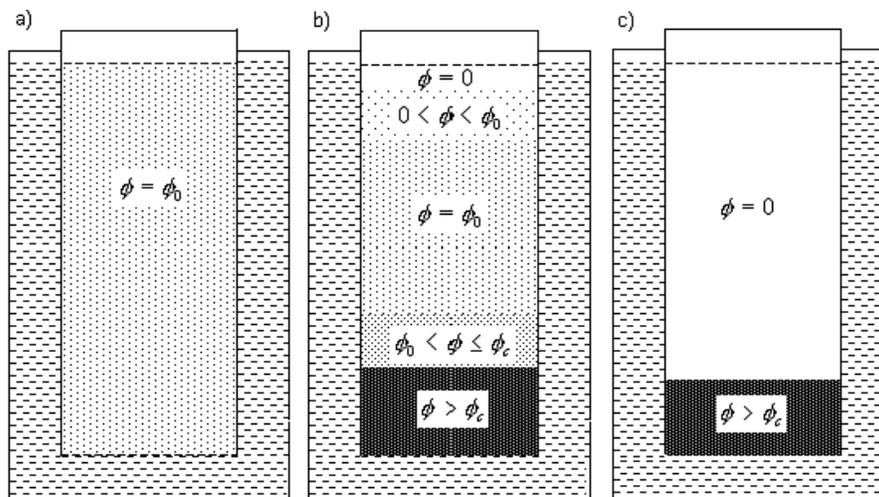


Fig. 1.2 Para explicar el transcurso de la sedimentación y la filtración gravitatorias.  
a) Estado inicial; b) Formación del sedimento; c) Sedimento comprimido.

En la zona donde la concentración de sólidos es igual a la inicial, se supone que ocurre la sedimentación contrariada. En estas condiciones, de acuerdo con Lu et al. (1998), en el caso de suspensiones polidispersas, la velocidad de sedimentación gravitatoria puede ser estimada por la fórmula

$$U = U_0 f(\phi) \quad (1.2)$$

Donde:  $U_0$  - velocidad de sedimentación de Stokes;  $f(\phi)$  - factor de velocidad contrariada, que es una función creciente de la fracción volumétrica de las partículas,  $\phi$ .

En esta ecuación, el factor  $f$  de sedimentación obstaculizada depende solo de la fracción volumétrica total de las partículas,  $\phi$  lo que constituye una simplificación de la realidad. En la actualidad, Berres et al., (2002) han considerado la influencia de las concentraciones de cada especie. No obstante, esta ecuación resulta útil para un análisis cualitativo.

Si se supone que en la fig. 1.2, el desnivel entre la superficie libre del líquido en el recipiente exterior y la superficie libre de la suspensión,  $h$  es mayor que cero, la fuerza de gravedad además de provocar la caída de las partículas, provoca una corriente de líquido a través del fondo poroso del cilindro.

En este caso, el flujo específico referido a la unidad de área de la sección transversal del cilindro  $q$  ( $m^3/(m^2 \cdot s)$ ) es equivalente a la velocidad lineal con que desciende el líquido respecto a las paredes del cilindro. Este flujo descendente provoca el incremento de la velocidad de sedimentación. En estas condiciones la velocidad de sedimentación resultante,  $u$  es la suma de la velocidad de sedimentación contrariada  $U$  y la velocidad del líquido  $q$  (Lu et al., 1998)). Lo anterior se expresa mediante la ecuación:

$$u = U + q \quad (1.3)$$

La relación entre el flujo específico  $q$  a través del sedimento y las características del sólido y de la fase líquida, se expresa a través de la ecuación de Kozeny (Carman, 1997), dada para el flujo específico de líquido a través de un lecho poroso arbitrario. La referida ecuación es:

$$q = \frac{\varepsilon^3}{k\mu S^2} \frac{\Delta P \cdot g}{L} \quad (1.4)$$

Donde:  $\varepsilon$  - volumen de los poros referido a la unidad de volumen del lecho (porosidad);  $k$  - constante;  $\mu$  - viscosidad dinámica del fluido;  $S$  - área de superficie de las partículas, referida a la unidad de volumen del lecho;  $\Delta P$  - diferencia entre la presión en la parte posterior y anterior del lecho (fuerza motriz de la filtración),  $g$  - aceleración de la gravedad;  $L$  – altura o espesor del lecho.

Durante la sedimentación-compresión, en la capa de sedimento la fuerza motriz de la compresión es tan solo la fuerza de gravedad, mientras la fuerza de arrastre provocada por la fricción entre las partículas y el líquido que se mueve hacia arriba, se opone a la compresión. Sin embargo, en el caso de la filtración, la fuerza de arrastre actúa de arriba hacia abajo y constituye una componente más de la fuerza motriz de la compresión. Esto trae como resultado que la capa de sedimento tienda a compactarse hasta concentraciones mayores, con respecto a las concentraciones alcanzadas sin la participación de la filtración.

#### 1.4. Factores que afectan la velocidad de sedimentación

Diferentes investigaciones han sido desarrolladas para determinar las causas que afectan la sedimentación de las pulpas. Se explica que el comportamiento de la sedimentación de la pulpa varía en función de su composición granulométrica, observándose que al aumentar el contenido de la clase gruesa disminuye la zona de caída libre de la pulpa y se obtienen sólidos más concentrados, sin embargo, con el aumento de partículas finas ocurre todo lo contrario, se retarda la sedimentación y la concentración de sólido durante el espesamiento es menor (Beyris y Ferrer, 1996; Beyris y Falcón, 2000).

La composición iónica de la pulpa es otro parámetro a tener en cuenta al estudiar la sedimentación. La presencia de determinados iones en pequeñas concentraciones influye en los fenómenos de dispersión y coagulación de las partículas pequeñas durante la sedimentación, lo cual se puede lograr con el uso de sustancias químicas electrolíticas (Beyris, 1996; Falcón, 1997).

Valdés (1983) estudia la influencia del pH en la sedimentación, determinando un rango óptimo de  $\text{pH} = 6,6 - 7,6$  cercano al punto isoeléctrico lo que más tarde fue corroborado en otras investigaciones (Beyris, 1985; Falcón y Beyris, 1997; Beyris y Falcón, 1984).

Nebot (1969) estudia el efecto del magnetismo en la sedimentación aplicando un campo magnético con intensidad desde 0 hasta 4 000 Gauss, pero los resultados no fueron favorables.

Ponce (1983) analiza muestras de pulpa del proceso industrial cuando la concentración de sólido es de 45 %, logrando explicar la relación entre la composición mineralógica y química y la posibilidad de que sus variaciones influyan en la sedimentación de la pulpa laterítica, sin embargo no establece comparaciones con otros valores de concentración que permitieran detectar y explicar las diferencias.

Se ha llegado a establecer que sobre los procesos de sedimentación de estas pulpas influyen varios factores, entre los que se encuentran: la composición granulométrica, composición iónica, pH y la composición mineralógica. Sin embargo, la mayoría de los trabajos referidos a la influencia de la composición mineralógica, analiza la pulpa alimentada al proceso sin tener en cuenta el origen y las características del mineral que la compone. En tal sentido Beyris y Falcón (2007) realizan un trabajo que tuvo como objetivo explicar la influencia que tiene la composición mineralógica de la mena en el proceso de sedimentación de las pulpas de mineral laterítico.

### **1.5. 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 Poiseuille, 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 Poiseuille, 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, 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; trabajos como De la Paz et al., (2002), en el que se realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la 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 ensayo, se encuentra como deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

A partir de los trabajos descritos por Caldiño et al. (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como pH y diámetro medio de las partículas de arena.

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 Lakovlev 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 hidrot transporte 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 hidrot transporte 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; 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 laminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme cuando se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la

tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas o láminas imaginarias en movimiento (Welty et al., 1976; Bandala, 2001).

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

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

## 1.6. Clasificación reológica de los fluidos

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

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

Se clasifican en dos grupos:

- Newtonianos.
- No Newtonianos

### 1.6.1. Modelos reológicos

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

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

del gradiente de velocidad  $\left( -\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \gamma$  (Figura 1.3-a).

$$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left( -\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (1.5)$$

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

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

### 1. De viscosidad independiente del tiempo

- Seudoplásticos: sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ( $\tau > 0$ ). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para  $n < 1$ ), (Figura 1.3-b).

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left( -\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n \quad (1.6)$$

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  $\mu_a$ . La viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.7)$$

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

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

- Dilatantes: sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ( $\tau > 0$ ). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para  $n > 1$ ), (Figura 1.3-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 ( $\tau_0$ ), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe (Figura 1.3-d).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (1.9)$$

Donde:

$\tau_0$  - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

$\mu_p$  - Viscosidad plástica.

Para  $\tau_0 = 0$  la ecuación 1.9, se transforma en la ley de Newton, siendo  $\mu_p = \mu$ . La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene, combinando la ecuación 1.9 en la ecuación 1.7.

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + \mu_p \quad (1.10)$$

• 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  $\tau_0$ . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley (Figura 1.3-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot (\gamma)^n \quad (1.11)$$

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

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

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + K \cdot \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (1.12)$$

## 2. De viscosidad dependiente del tiempo

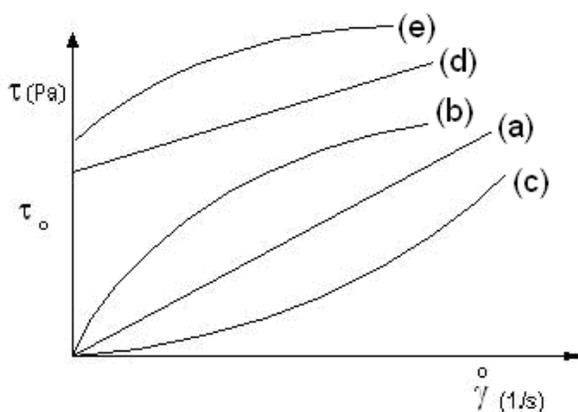
- Tixotrópicos: la viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidos a un gradiente de velocidad determinado. Se comportan reológicamente como pseudoplásticos, plásticos ideales y reales (Figura 1.4 -a).
- Reopécticos: la viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes (Figura 1.4-b).

## 3. Viscoelásticos ó de Maxwell

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

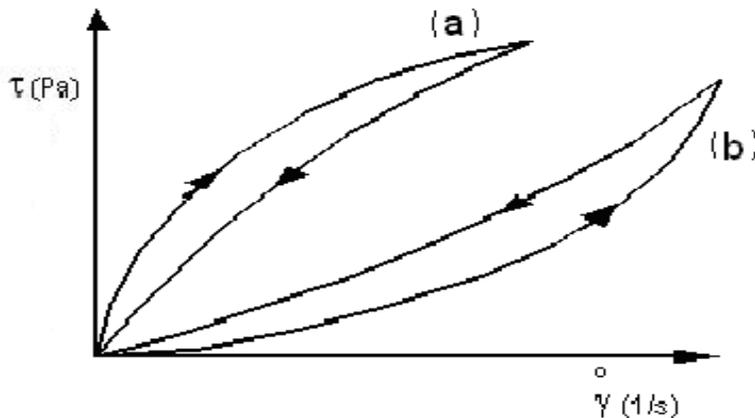
### 1.6.2. Curvas de flujo

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



**Figura 1.3.** Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.



**Figura 1.4.** Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

Fuente: Garcell, 2001.

### 1.7. Generalidades de las máquinas de flujo

Una bomba es una máquina empleada para elevar o transferir líquidos. En definitiva son máquinas que realizan un trabajo para mantener un líquido en movimiento, consiguiendo así aumentar la presión cinética del fluido.

Se tiene constancia de la existencia de algún tipo de bomba sobre el 300 A.C., Arquímedes (matemático y físico griego) construyó una de diseño sencillo, aunque poco eficiente, con un tornillo que gira en una carcasa e impulsa el líquido.

Existen infinidad de formas de clasificación de bombas pero fundamentalmente se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Bombas dinámicas o de energía cinética: fundamentalmente consisten en un rodete que gira acoplado a un motor. Entre ellas se sitúan las regenerativas, las especiales, las periféricas o de turbinas y una de las más importante, las centrífugas.

Las bombas centrífugas constituyen las máquinas más frecuentes en los procesos de lixiviación ácido y amoniaco para la producción de níquel.

La complejidad del flujo en una bomba está condicionado por las características de Intercambio energético en dichos equipos y los principales factores que afectan son (Brenen, 1994; Blanco *et al.*, 2000):

- Complejidad geométrica, que aconseja la utilización de mallados estructurados para evitar la excesiva deformación de las celdas en zonas críticas para los cálculos (estela de alabes o zona del corta aguas).
- La energía cinética debida al giro del rodete, que impone la necesidad de considerar términos fuente en las ecuaciones de gobierno.
- La interacción dinámica entre el flujo que sale del rodete y la voluta, lo que impone la necesidad de realizar un cálculo no estacionario que considere la variación de posición relativa de alabes y corta aguas.
- La presencia de cavitación definida a partir del conocimiento de los factores hidráulicos que influyen sobre la carga neta de succión de la instalación (Reyes, 2007).

#### **1.7.1. Curvas características de las bombas centrífugas**

Las interrelaciones de capacidad, carga, fuerza y eficiencia se denominan características de la bomba. Generalmente todas éstas curva están basadas en agua, por lo que cuando se va a trasegar otro fluido es necesario corregir éstas curvas.

Según González *et al.*, (2005) y Turiño (1994) el primer paso en la caracterización fluido - dinámica de una bomba centrífuga es la obtención de sus propiedades estáticas, es decir, definir su rango de aplicabilidad a través de su curva característica.

Las curvas características de las bombas centrífugas generalmente están basadas en el bombeo de agua por lo que deben ajustar cuando se va a trasegar pulpas u otro líquido con propiedades diferentes usando factores de corrección determinados experimentalmente o sugeridos por el fabricante. En el caso específico de transporte de pulpa la curva característica se afecta fundamentalmente por el diámetro de la partícula sólida, la gravedad específica y la concentración (Wilcox, 1993; Warman y Eral, 1998).

#### **1.8. Flujo tecnológico y balance material de la planta procesadora de árido del Jobo de Sagua de Tánamo**

La preparación mecánica de los minerales se puede definir como el conjunto de operaciones, tecnológicamente relacionadas entre sí, cuyo objetivo principal es preparar el mineral para su ulterior tratamiento mediante la transformación física de la materia prima en mineral.

La descripción del flujo tecnológico y balance de carga por secciones para la planta objeto de estudio se muestran a continuación, lo cual es de importancia para el correcto entendimiento del contenido tratado.

### Primera sección

Como puede verse en figura 1.5 el todo uno entre 0 y 200 mm es descargado en camiones a la tolva (Pos 1), un alimentador recíprocante (Pos 2) extrae el material de la tolva y lo envía al molino de quijada (Pos 3) con fracción de salida entre 0 y 90 mm y todo ese material es descargado mediante el transportador (Pos 4) hasta la zaranda (Pos 5) concluyendo así la primera sección del proceso.

#### PRIMERA SECCION

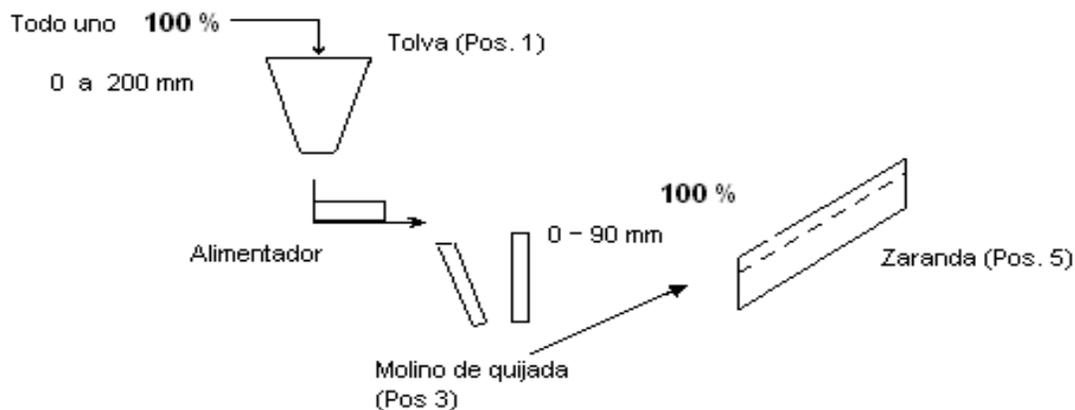


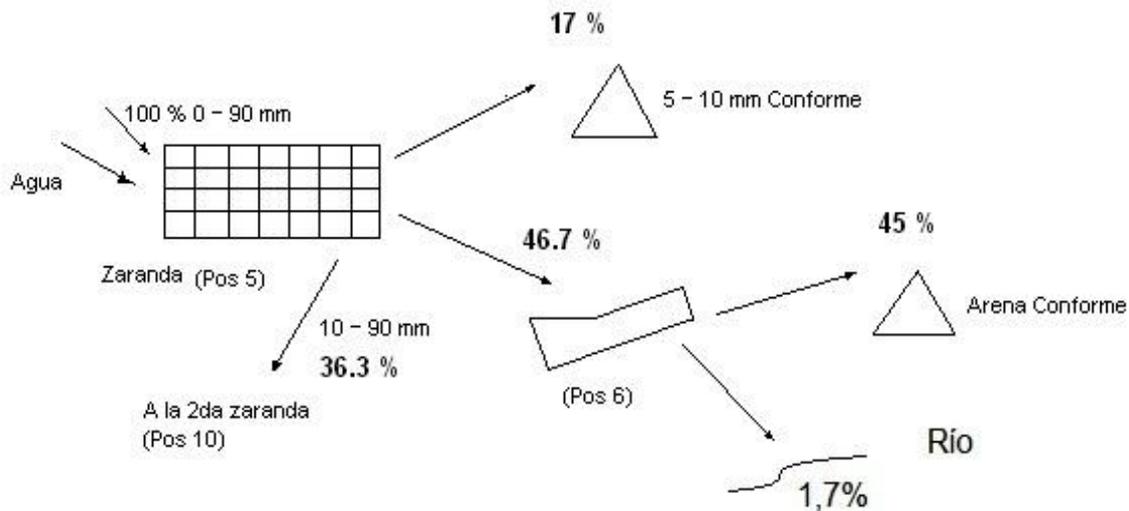
Figura 1.5. Esquema de la primera sección.

### Segunda sección

La segunda sección se inicia con la alimentación del material triturado en el molino de quijada en la zaranda (Pos 5), ver figura 1.6. El material proveniente del transportador (Pos 4) cae a la zaranda (Pos5). Esta zaranda posee dos paños de 5 y 10 mm. La fracción menor de 5 mm es descargada al sin fin lavador (Pos 6) donde la arena es lavada y se separa la arcilla (2 %). La arena lavada (45%) es descargada mediante el transportador (Pos 7) a un piso tecnológico de hormigón donde está lista para ser comercializada. La fracción entre 5 y 10 mm (17%) es trasladada mediante el transportador (Pos 8) al piso tecnologico para ser comercializado como granito 3/8. Las fracciones entre 10 y 90 mm pasan mediante el transportador (Pos 9) a la zaranda (Pos10) y aquí termina la segunda sección. Los materiales producidos en esta sección

(arena y granito 3/8) clasifican como conformes según ensayos de calidad realizados en el centro.

### SEGUNDA SECCION



**Figura 1.6.** Esquema de la segunda sección.

### Tercera sección

En la tercera sección "Clasificación y trituración secundaria" la zaranda (Pos 10), ver figura 1.7, recibe las fracciones mayores de 10 mm y hasta 90 mm (36,3 %). Esta zaranda tiene paños de 22 y 38 mm: La fracción entre 10 y 22 mm (36 %) es descargada al piso tecnológico mediante el transportador Pos13). Las fracciones mayores de 38 mm (0,3%) caen mediante una canal al molino de cono (Pos 11) y la remolida es descargada mediante el transportador (Pos12) al transportador (Pos 9) y este a su vez lo descarga de nuevo a la zaranda (Pos 10), aquí termina la tercera sección. El material producido en esta sección (Gravilla  $\frac{3}{4}$  o fracción 10 – 22 mm) clasifica como conforme según ensayos realizados a cada producto. La arcilla (1,7%) que se separa de la arena en el sin fin lavador es conducida mediante tubería a una laguna de sedimentación la cual se limpia periódicamente. Para el lavado de los ametrallales se emplea un bomba de pozo profundo que extrae el agua de un pozo que existe dentro del área del molino.

### TERCERA SECCION

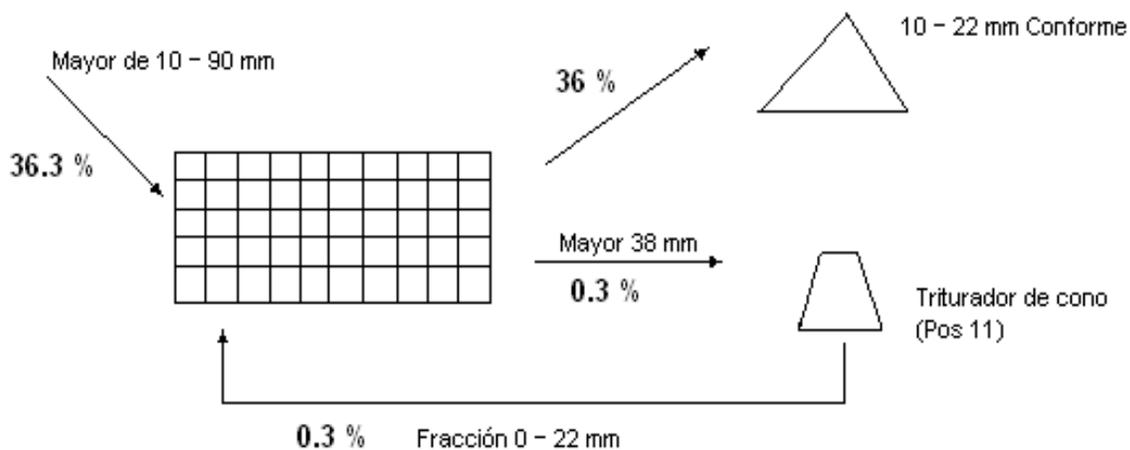
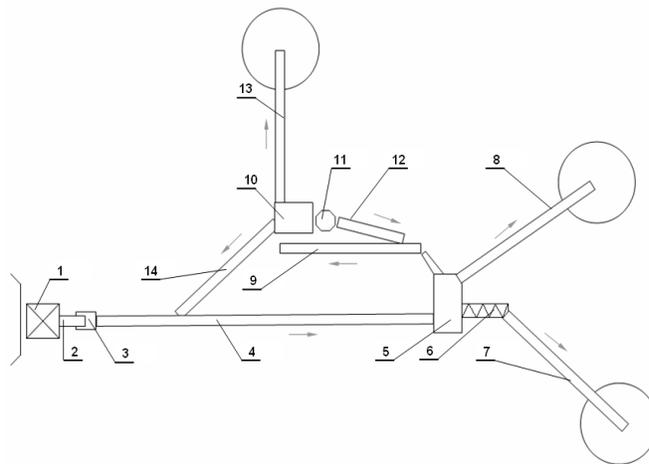


Figura 1.7. Esquema de la tercera sección.

#### 1.8.1. Descripción del flujo tecnológico del molino Sagua

El material todo uno es descargado por los camiones en la tolva de alimentación (Pos. 1), ver figura 1.8. Un alimentador recíprocante (Pos. 2) extrae el material de la tolva y lo envía al molino de quijada (Pos. 3). El material triturado es descargado al transportador (Pos. 4) el cual se encarga de transportar dicho material a la zaranda (Pos. 5). Esta zaranda consta de un paño de 10 mm y otro de 5 mm. La fracción menor de 5 mm es descargada al sin fin lavador (Pos. 6), donde a la arena se le separa la arcilla. La arena lavada es descargada mediante el transportador (Pos. 7) a un piso tecnológico de hormigón donde está lista para ser comercializada. La fracción entre 5 y 10 mm es trasladada mediante el transportador (Pos. 8) al piso tecnológico para ser comercializada. Las fracciones mayores de 10 mm pasan mediante el transportador (Pos. 9) a la zaranda (Pos. 10). Esta zaranda tiene paños o mallas con aberturas de 22 y 38 mm. La fracción entre 10 y 22 mm es descargada al piso tecnológico mediante el transportador (Pos. 13). Las fracciones mayores de 38 mm caen mediante una canal al molino de cono (Pos. 11) y la remolida es descargada mediante el transportador (Pos. 12) al transportador (Pos. 9) y este a su vez lo descarga de nuevo a la zaranda (Pos. 10). La fracción entre 20 y 38 mm que se clasifica en esta zaranda es descargada mediante el transportador (Pos. 14) al transportador (Pos. 4) para ser reciclada.



**Figura 1.8.** Esquema de la instalación.

La arcilla que se separa de la arena en el sin fin lavador es conducida mediante tubería al río de donde fue extraída anteriormente conjuntamente con la arena.

Para el lavado de los materiales se emplea una bomba que extrae el agua de un pozo que existe en la instalación.

### 1.9. Conclusiones del capítulo 1

- Se efectuó una revisión de trabajos precedentes realizados en la Unidad Empresarial de Base del Jobo de Sagua de Tánamo, determinándose que en ninguno de ellos se efectúa la propuesta de un sistema de sedimentación para la recuperación del agua que posee el lodo residual.
- Se exponen fundamentos teóricos referidos al proceso de sedimentación y al fenómeno de transporte de fluidos que sirven de base al análisis, explicación y proyección de un sistema de sedimentación para la instalación objeto de estudio.
- Se efectuó una descripción del flujo tecnológico de la UEB objeto de estudio, en el cual se muestra las relaciones entre las tres secciones de la que consta el proceso, lo que permite adquirir una visión de conjunto o panorámica de la instalación y facilita la contextualización del conocimiento.

## 2: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

Los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de transporte de lodos, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación y diseño de los sistemas de transporte por tuberías de este fluido 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 principales propiedades y modelos matemáticos que permitan el transporte eficiente por tubería del lodo residual objeto de estudio, y la propuesta del sistema de sedimentación adecuado.

### 2.2. Muestreo y elaboración de los resultados

Para aumentar la representatividad de los resultados en la determinación de los parámetros del lodo se deben efectuar repeticiones de las mediciones. Los resultados que se obtienen se inspeccionan para asegurar su condición de normalidad, basado en criterio estadístico. Las expresiones matemáticas que se utilizan en el análisis son las que se refieren a continuación:

- **Muestreo aleatorio simple**

Se utilizó el muestreo aleatorio simple aplicado las expresiones de cálculos recomendadas por Miller *et al.*, (2005). Este muestreo se selecciona sobre la base del hecho de que no se conoce el tamaño total de la población y con el objetivo de asegurar la objetividad en los resultados que se obtengan. La cantidad de mediciones a realizar se determina tomando como referencia el siguiente modelo:

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

Dónde:

$Z_{\alpha/2}$  – Es el estadístico de la distribución normal, que se determina en tablas estadísticas.

$\alpha$  – Es el nivel de significancia.

$\sigma$  – Es la desviación típica poblacional, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$E$  – Es el error máximo de estimación, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$n$  – Es el tamaño mínimo de la muestra.

La expresión anterior permite hallar el tamaño mínimo que debe tener la muestra para que los resultados sean representativos del proceso objeto de estudio. Ahora bien, debe tratarse de lograr un balance adecuado entre representatividad, costo, y productividad para que el muestreo sea eficiente (Calero, 1976).

- **Elaboración de los resultados**

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).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.2)$$

$$LX, \text{máx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.3)$$

$$LX, \text{mín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.5)$$

Dónde:

$\bar{X}$  – es la media aritmética de las mediciones realizadas del correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$LX, máx$  – es el límite superior de tolerancia para el correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$LX, mín$  – es el límite inferior de tolerancia para el correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$t$  - es el estadístico de la distribución probabilística de student.

$S$  - es la desviación típica, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$n$  - 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.

### 2.3. Determinación de la granulometría

Según Andreiev *et al.* (1980) 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. El tamizado por vía húmeda consiste en hacer pasar por el tamiz de menor dimensión la masa de material a tamizar diluida en agua, luego la masa retenida se seca y se hace pasar 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 es determinada por la diferencia de peso. El método es adecuado cuando las partículas que contiene la masa posee una dureza suficiente como para conservar la

representatividad de sus dimensiones al ponerse en contacto con el agua y además, si se conoce la composición química de la muestra pudiendo someterla a altas temperatura de secado para eliminar su humedad sin pérdida de componentes químicos.

En el caso que nos ocupa la masa de la muestra contiene un alto porcentaje de partículas finas, es de una baja dureza y no se conoce la composición química, lo que no favorece la aplicación de los procedimientos normalizados propuesto por Andreiev *et al.* (1980). Por tal motivo se razona sobre la lógica y los objetivos de los procedimientos propuestos y se decide efectuar la colada del lodo residual obtenido del proceso de lavado, por el juego de tamiz seleccionado.

Con el fin de determinar la composición granulométrica del material se realiza el análisis de cribado de las muestras estudiadas, para ello se toma una muestra de lodo y se tamiza a través de un juego estándar de cribas (Ver anexo 1), posteriormente se determina el porcentaje de residuo en cada una de estas, respecto a la masa de la muestra inicial.

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 2.1.** Tamices utilizados y aberturas de las mallas.

Abertura de las mallas, mm	Peso, g	% en peso	Retenido acumulado %	Cernido %
0,208				100,00
0,147				
0,088				
0,074				
0,044				
0			100	
<b>Total</b>		100		

Para aumentar la precisión de la prueba se debe determinar la masa del sólido que contiene el lodo. La determinación de la masa del sólido que contiene el lodo se efectúa

a partir de la densidad del sólido y del lodo y, considerando el cálculo del porcentaje de sólido.

#### 2.4. Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido

##### • Densidad del sólido

Para la determinación de la densidad del sólido se utiliza el método del picnómetro, dicha prueba se realizó en el laboratorio de química de la facultad de Metalurgia Electromecánica, siguiendo el procedimiento descrito a continuación (Heny, K.E; Fred, H.W; Stephen, R.L, 1959). Se utiliza un juego de picnómetros de 25 ml (Ver anexo 2), una balanza digital con precisión  $\pm 0,01$  g (Ver anexo 3) y una estufa de temperatura hasta 100 °C (Ver anexo 4).

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

Luego se determina la densidad del sólido ( $\rho_s$ ) como el producto del peso específico del sólido ( $\delta_e$ ) por la densidad del agua ( $\rho_{H_2O}$ ). Las siguientes expresiones para el cálculo de la densidad del sólido se muestran a continuación.

El peso específico se determina por la expresión siguiente:

$$\delta_e = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (2.6)$$

Entonces la densidad del sólido se calcula utilizando la fórmula que se muestra a continuación:

$$\rho_s = \delta_e \cdot \rho_{H_2O} \quad (2.7)$$

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

- **Densidad del lodo**

Para determinar la densidad del lodo se utiliza el método volumétrico, a través del procedimiento siguiente.

Se toman picnómetros de capacidad 25 ml (volumen) y se pesan.

- Luego se toma la muestra del lodo y se homogeniza mediante agitación
- Se vierte el lodo en los picnómetros hasta el volumen de 25 ml, y se pesa obteniéndose los resultados en (g).

La densidad del lodo en  $\text{g/cm}^3$  se obtiene por la siguiente expresión.

$$\rho_l = \frac{m}{V} \quad (2.8)$$

Donde:

$m$  – Es la masa total del lodo, g

$V$  – Es el volumen total del lodo, g

Para este análisis se utiliza una pipeta de 25 ml, y balanza digital con precisión  $\pm 0,01$  g

- **Determinación del % de sólido**

Con los datos obtenidos de densidad del lodo y del sólido se calcula el % de sólido por la siguiente fórmula (Martínez, 2009):

$$\% S = \frac{\rho_l - \rho_{H_2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \quad (2.9)$$

$\rho_l$  – Densidad del lodo,  $\text{g/cm}^3$ .

$\rho_{H_2O}$  – Densidad del agua,  $\text{g/cm}^3$ .

$\rho_s$  – Densidad del sólido,  $\text{g/cm}^3$ .

## 2.5. Determinación de la velocidad de sedimentación del lodo

El análisis de sedimentación se realiza con el objetivo de valorar el comportamiento del lodo durante el proceso de sedimentación.

La curva de sedimentación se realiza de forma experimental para ello se toma una probeta de 500 ml (Ver anexo 5), y una muestra del material escogido de la tubería de descarga de la planta procesadora de árido objeto de estudio.

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

El comportamiento de la sedimentación del lodo objeto de estudio se caracteriza por medio de la velocidad de sedimentación, la cual puede ser definida desde el punto de vista matemático como la rapidez con que varía la altura de la interface en la unidad de tiempo. El análisis matemático de la velocidad de sedimentación incluye el ajuste de modelos matemáticos a las curvas de altura de la interface contra tiempo, en tal sentido se recomienda considerar los modelos propuestos por Pavlov (1981).

### 2.5.1. Determinación de la velocidad crítica

Se puede considerar la velocidad crítica como la velocidad media del flujo para la cual es inminente la sedimentación de las partículas sólidas del mineral que se transporta en el líquido.

La velocidad adecuada para el funcionamiento normal se escoge entre los límites:

$$V_m = (1,1 - 1,2)V_{\text{Crit.}} \quad (2.10)$$

La determinación de la velocidad crítica por las indicaciones metodológicas para el cálculo técnico económico de los sistemas de transporte por tuberías se efectúa por medio de la siguiente expresión.

$$V_{\text{Crit}} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[6]{S}} \quad (2.11)$$

Donde:

$g$ - aceleración de la gravedad,  $m/s^2$ .

$D$ - diámetro de la tubería, m.

$W$  – grosor hidráulico, m/s.

$\rho_s$  – densidad del sólido,  $kg/m^3$

$S$  – concentración de peso en sólido, adimensional.

$K_d$  coeficiente empírico corregido, que depende de la granulometría.

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

El coeficiente empírico que tiene en cuenta la influencia de la granulometría del material se determina utilizando la tabla 2.2, que se muestra a continuación.

**Tabla 2.2.** Coeficiente empírico, que depende de la granulometría del material ( $d_{cp}$ ).

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

La velocidad media del flujo se determina a través de la siguiente expresión, la cual se deduce a partir del análisis de continuidad de un fluido en una vena líquida.

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (2.12)$$

Donde:

$Q$  – es el gasto que fluye a través de la tubería,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$A$  – es el área de la sección transversal del conducto,  $\text{m}^2$ .

$v_m$  – es la velocidad media de transportación, m/s.

## 2.6. Determinación del comportamiento reológico del lodo

La finalidad de esta práctica es definir y trazar la curva reológica o reograma del lodo, mediante una serie de parámetros que se determinarán experimentalmente en el Laboratorio.

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 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 batchy que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro.

### 2.6.1. Pruebas de reología utilizando un reómetro convencional

La fundamentación matemática del reómetro utilizado, así como la descripción del funcionamiento puede observarse en Torres (2008). Los modelos se basan en los estudios de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed, los cuales llegaron a unas expresiones válidas para todo fluido no newtoniano independiente del tiempo, expresiones en las cuales todos los parámetros se pueden hallar experimentalmente, excepto dos que se determinan mediante la representación en papel logarítmico de la función (Laurencio, 2007). El reómetro utilizado en la prueba puede verse en el anexo 6.

- **Metodología de toma de datos**

Al mismo tiempo se tomarán las lecturas de presión del manómetro M1.

Conociendo el diámetro del tubo ( $D$ ), su longitud ( $L$ ) y como el caudal ( $Q$ ) será igual a:

$$Q = u \cdot S \quad (2.13)$$

Donde:

$u$ : Velocidad media, m/s

$S$ : Sección del tubo,  $\text{mm}^2$ :

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.14)$$

Se podrá calcular la velocidad por la expresión:

$$u = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2.15)$$

Conocida la velocidad se calculan las siguientes relaciones:

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} = Y_i [\text{Pa}] \quad (2.16)$$

$$\frac{8 \cdot u}{D} = X_i [\text{s}^{-1}] \quad (2.17)$$

El término  $\Delta P$  es la diferencia de presión entre la entrada y la salida del dispositivo (medida en Pascales).

A continuación se representa  $\log(X_i)$  en función de  $\log(Y_i)$ , ajustando una recta del tipo  $y = mx + b$  en el que la pendiente  $m$  es  $n$  y la ordenada en el origen  $b$  es  $k'$ , pudiéndose obtener por tanto:

$$k = k' \cdot \left( \frac{4n}{3n + 1} \right)^n \quad (2.18)$$

Con todo ello se obtendrá la curva reológica que será de la forma  $\tau = k(\dot{\gamma})^n$

### **Presentación y tratamiento de los resultados**

Se deberán presentar los datos experimentales tal como fueron obtenidos en el Laboratorio. Además se realizará una tabla de resultados parecida a la siguiente tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Presentación y tratamiento de los resultados.

$\Delta P$ (bar)	$\Delta P$ (Pa)	V (m <sup>3</sup> )	t (s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\frac{D \cdot \Delta P}{4L}$ (Pa)	$\frac{8 \cdot u}{D}$ (s <sup>-1</sup> )

Al mismo tiempo, se realizarán las gráficas pertinentes, y en el caso de ajuste de rectas de regresión se presentarán los valores obtenidos y el coeficiente de correlación.

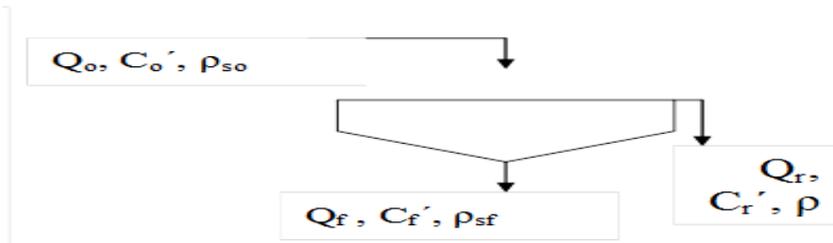
### **2.7. Selección del sedimentador**

Para la selección del sedimentador de acción continua se debe determinar a partir de los requisitos operacionales, el valor de la sección transversal, la altura y el torque requerido en el accionamiento. Las expresiones que se utilizan en el cálculo de los parámetros referidos anteriormente se muestran a continuación, las cuales fueron tomadas de Falcón (2002).

- **Cálculo de la sección transversal de sedimentador continuos**

En la figura 2.4 se muestran las variables fundamentales que caracterizan al fluido que entra y sale del sedimentador. Para el caso específico de un sedimentador de separación del agua que contiene el lodo residual que se genera en el lavado de áridos las variables del proceso son: el gasto del lodo que entra ( $Q_o$ ), la concentración de sólido inicial del lodo ( $C'_0$ ), la densidad inicial del sólido ( $\rho_s$ ), gasto del lodo que sale

espesado ( $Q_f$ ), la concentración de sólido final del lodo ( $C_f'$ ), la densidad del sólido a la salida ( $\rho_{sf}$ ), gasto del agua de reboso ( $Q_r$ ), la concentración de sólido del agua de reboso ( $C_r'$ ) y la densidad del agua de reboso ( $\rho$ ),



**Figura 2.4.** Esquema de los flujos relativos al sedimentador.

A partir de un balance de sólido y de líquido en el sedimentador se obtienen las siguientes ecuaciones que muestran la relación entre varios parámetros, las cuales puede servir para determinar el gasto de lodo espesado y el gasto del líquido (agua) de reboso.

$$Q_f = \frac{Q_0 \cdot C_0'}{C_f'} \quad (2.19)$$

$$Q_r = Q_0 - Q_f \quad (2.20)$$

La concentración de sólido que contiene el lodo se determina a partir de la siguiente expresión, la cual se deduce a partir de la ecuación 2.9.

$$C = \frac{\rho_s \cdot (\rho_l - \rho_{H2O})}{(\rho_s - \rho_{H2O})} \quad (2.21)$$

Y la densidad del lodo para distintos porcentaje de sólido se calcula por medio de la ecuación siguiente:

$$\rho_l = \frac{-\rho_{H2O}}{\left[ \frac{\%S}{\left( \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H2O}} \right) - 1} \right]} \quad (2.22)$$

Para una concentración  $C'$  cualquiera, donde el gasto volumétrico del líquido en ascenso sea  $Q$ , se tiene:

$$\frac{Q \cdot C'}{A} = \frac{u}{\left[ \frac{1}{C'} + \frac{1}{C_f} \right] \cdot \frac{\rho_{sm}}{\rho}} \quad (2.23)$$

Dónde:

$u = Q_r/A$  - es la velocidad de ascenso del líquido que debe ser igual a la velocidad de sedimentación.

$\rho_{sm} = (\rho_{so} + \rho_{sf})/2$  - es la densidad promedio de la suspensión en el sedimentador.

La capa límite  $C'$  debe encontrarse en los límites en  $C_0$  y  $C_f$  y resultará la que limita la capacidad máxima de trabajo del sedimentador en cuanto a clarificación; para la clarificación debe trabajarse sobre esta condición.

Entonces si se determina  $\left( \frac{Q \cdot C'}{A} \right)_{mín.}$  se puede despejar  $A$ .

El área mínimo se obtiene considerando que por un balance de sólido entre el alimentado y la capa de concentración  $C'$ , tal como se indica a continuación:

$$Q_0 \cdot C'_o = Q_0 \cdot C'$$

Por lo que

$$A_{mín.} = \frac{Q_0 \cdot C'}{\left( \frac{Q \cdot C'}{A} \right)_{mín.}} \quad (2.24)$$

- **Determinación de la altura del sedimentador**

El valor del volumen de la zona de compresión para garantizar el tiempo de retención requerido es

$$V_D = \frac{Q_o \cdot C_o}{\rho_s} \cdot (t_f - t_p) + \frac{Q_o \cdot C'_o}{\rho_{H2O}} \cdot \int_{t_c}^{t_f} \frac{dt}{X}$$

Sólido

Líquido

$$V_D = \frac{Q_o \cdot C_o}{\rho_s} \cdot (t_f - t_p) + \frac{Q_o \cdot C'_o \cdot (t_f - t_c)}{\rho_{H2O} \cdot X} \quad (2.25)$$

En la anterior ecuación X es la relación sólido: líquido y puede obtenerse por:

$$X = x/(1-x); \quad x = C' / \rho_s \quad \gamma \quad \rho_s = \rho \cdot \left[ 1 + C' \cdot \left( \frac{1}{\rho_{H_2O}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right]$$

Por lo que

$$X = \frac{C'}{\rho_s = \rho \cdot \left[ 1 + C' \cdot \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right]} \quad (2.26)$$

La altura mínima de la zona de compresión se determina según

$$H_D = \frac{V_D}{A} \quad (2.27)$$

Donde:

A- es la sección transversal determinada para el sedimentador y la altura total se determina como:

$$H = H_{Alim.} + H_{Cono} + H_{Almacen} + H_D \quad (2.28)$$

Donde:

$H_{Alimentación}$ - inmersión del tubo de alimentación (30 – 60 cm).

$H_{Cono}$ - altura del cono de fondo (30 – 60 cm).

$H_{Almacén}$ - altura de la capacidad de almacenaje para hacer frente a interrupciones, irregularidades o utilizar el sedimentador como almacén de suspensión (30 – 60 cm).

#### • Elección de los mecanismos

Los requisitos de carga usualmente relacionan la demanda de torque con el par del motor que acciona el mecanismo de rastrillo.

La demanda de torque puede ser determinada por la expresión:

$$M_T = K \cdot D^2 ; N*m \quad (2.29)$$

Donde: K es un coeficiente que se expresa en N/m.

D- Diámetro de los rastrillo, m.

Los valores de K se obtienen del libro "Plant Design of Mineral Dressing" AIME, 1983.

### 2.8. Determinación de las alturas necesarias y disponible

Los experimentos demuestran que son posibles dos régimen o dos tipos de corrientes en los tubos: Laminar y turbulento.

El cambio de régimen de corriente de un fluido en una tubería se realiza a determinada velocidad de la corriente que se denomina velocidad crítica  $v_{crit.}$ . Experimentalmente se ha demostrado, que la magnitud de esta velocidad es directamente proporcional al coeficiente cinemático de viscosidad ( $\nu$ ) e inversamente proporcional al diámetro del tubo ( $d$ ), o sea:

$$v = k \cdot \frac{\nu}{d} \quad (2.30)$$

El coeficiente adimensional de proporcionalidad  $k$  tiene significado universal, es decir es el mismo para todos los líquidos y gases y para cualquier diámetro del tubo. Este número adimensional se denomina número de crítico de Reynolds (en honor al sabio inglés que estableció este criterio) y se designa:

$$Re_{crit.} = \frac{v_{crit.} \cdot d}{\nu} \quad (2.31)$$

Como demuestran los experimentos, el número crítico de Reynolds es de aproximadamente 2 300. Sin embargo, se puede hablar de no solamente del número crítico de Reynolds que corresponde al cambio de régimen, sino también del número real de Reynolds para diferentes flujos y expresarlo por la velocidad real, es decir,

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.32)$$

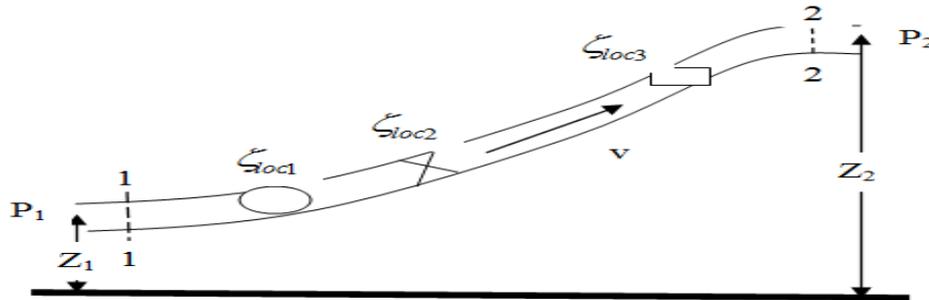
Conociendo la velocidad de la corriente del fluido, el diámetro del tubo y la viscosidad del líquido, se puede calcular el régimen de la corriente del líquido, lo que es muy importante para los cálculos hidráulicos.

- **Cálculo hidráulico de las tuberías**

Todas las tuberías pueden ser divididas en simples y complejas. Se denomina tubería simple una tubería sin ramificaciones y complejas, con una y varias ramificaciones.

Para la presentación de la fórmula que se utilizan en el cálculo se supone que una tubería simple de sección constante, situada a voluntad en el espacio (Figura 2.5), tiene una longitud total  $L$  y el diámetro  $d$ , y posee varias resistencias locales. En la sección inicial (1 – 1) se tiene la altura de nivel  $Z_1$  y la presión excesiva  $P_1$  y en la final (2 – 2),  $Z_2$

y  $P_2$  respectivamente. La velocidad en estas secciones es constante gracias a que el diámetro del tubo es invariable, e igual a  $v$ . Aplicando la ecuación de Bernoulli a las secciones 1 – 1 y 2 – 2; considerando que  $\alpha_1 = \alpha_2$  y eliminado las alturas dinámicas, se tiene:



**Figura 2.5.** Esquema de una tubería simple.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\delta} = Z_2 + \frac{P_2}{\delta} + \sum h \quad (2.33)$$

O bien,

$$\frac{P_1}{\delta} = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2}{\delta} + \sum h = \Delta Z + \frac{P_2}{\delta} + \sum h \quad (2.34)$$

La altura piezométrica que se encuentra en el miembro izquierdo de la ecuación la denominaremos altura necesaria ( $H_{nec}$ ). Si esta magnitud se da, se denomina altura disponible ( $H_{dip}$ ). Como se ve de la ecuación, esta altura se forma de la altura geométrica  $\Delta Z$  a la cual asciende el líquido en el proceso de su flujo por la tubería, de la altura piezométrica al final de la tubería, y de la suma de todas las pérdidas hidráulicas en la misma.

La suma de los dos primeros sumando  $\Delta Z + \frac{P_2}{\delta}$  es la altura estática y se la puede representar como cierta altura geométrica equivalente de elevación del líquido  $\Delta Z'$ , y el último sumando  $\sum h$ , como función de potencia del gasto, entonces

$$H_{nec.} = \frac{P_1}{\delta} = \Delta Z' + \sum h = \Delta Z' + k \cdot Q^m \quad (2.35)$$

Donde el coeficiente  $k$  y el índice  $m$  tienen diferentes valores en dependencia del régimen de la corriente.

Para el régimen laminar, al sustituir las resistencias locales por las longitudes equivalentes, se obtiene:

$$\sum h = \frac{128 \cdot (l + l_{eq.}) \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot d^4} \quad (2.36)$$

Por consiguiente

$$k = \frac{128 \cdot (l + l_{eq.})}{\pi \cdot g \cdot d^4} \text{ y } m = 1 \quad (2.37)$$

Para el régimen turbulento, se tiene:

$$\sum h = \left( \sum \zeta + \lambda t \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (2.38)$$

Por consiguiente,

$$k = \left( \sum \zeta + \lambda t \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \text{ y } m = 2 \quad (2.39)$$

Las formulas anteriores es la base para el cálculo de las tuberías simples. Al mismo tiempo esta fórmula permite trazar la curva de las alturas necesarias.

Cuando se examina el caso en el cual las velocidades son distintas en el comienzo y en el final de la tubería, la expresión de la altura necesaria para toda la tubería, a diferencia de la fórmula 2.35 debe contener la diferencia de las alturas dinámicas en el comienzo y el final de la tubería, o sea

$$H_{nec.} = \frac{P_1}{\delta} = \Delta Z' + \sum h = \Delta Z' + C \cdot Q^2 + k \cdot Q^m \quad (2.40)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left( \frac{\alpha_2}{S_2^2} - \frac{\alpha_1}{S_1^2} \right) \quad (2.41)$$

$$\Delta Z' = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2}{\delta} \quad (2.42)$$

En las expresiones anteriores  $S_1$  y  $S_2$  son las áreas de la sección transversal de la tubería al comienzo y al final de la tubería respectivamente,  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los coeficientes que tienen en cuenta las irregularidades en la distribución de los perfiles de velocidad que se presentan en la tubería al inicio y al final, respectivamente. El coeficiente de

irregularidad de las velocidades adquiere el valor de 2 para régimen laminar y en el rango de 1,13 a 1,025 (ver figura 60 de Nekrasof, 1986) para régimen turbulento; para régimen turbulento se puede adoptar  $\alpha = 1$ .

- **Determinación del coeficiente de rozamiento**

Existen varias fórmulas empíricas y semiempíricas que expresan la relación entre el coeficiente de rozamiento y el número de Reynolds para la corriente turbulenta en tubos lisos; una de las fórmulas más cómoda y aplicable es la del científico ruso P. Konakov. Esta ecuación tiene la forma siguiente:

$$\lambda_t = \frac{1}{(1,81 \cdot \log(\text{Re}) - 1,5)^2} \quad (2.43)$$

Y se usa desde  $\text{Re} = \text{Re}_{\text{crit.}}$  hasta  $\text{Re}$  igual a varios millones.

Con los números de Reynolds de 2 300 a 100 000 se puede emplear también la antigua fórmula de Blasius.

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad (2.44)$$

- **Determinación de los coeficiente de pérdidas locales**

La cuestión consiste en saber determinar los coeficientes  $\zeta_{\text{loc.}}$  para diferentes resistencias locales.

Las resistencias locales más sencillas se pueden dividir en los siguientes grupos y subgrupos:

1. Ensanchamiento del cauce: brusco y gradual.
2. Estrechamiento del cauce: brusco y gradual.
3. Cambio de dirección del cauce: brusco y gradual.

En el capítulo 8 del libro Nekrasof pueden determinarse los valores recomendados para los coeficientes de perdidas locales de usos corrientes.

Para las resistencias locales y número de Reynolds con los cuales la ley de resistencia es próxima a la lineal se emplea a menudo la expresión de las pérdidas hidráulicas locales por longitudes equivalentes de tubería, es decir, a la longitud real de la tubería se le suma la longitud equivalente por su resistencia a las resistencias locales.

## 2.9. Selección de la bomba

La potencia necesaria, para transportar el lodo estaría dada por la deducción de la ecuación Darcy - Weisbach asumiendo el transporte de un fluido Newtoniano.

Para cualquier fluido, la potencia necesaria en  $W$ , para su transporte por una tubería será.

$$Ne = H_{nec.} \cdot Q \cdot \rho l \cdot g \quad (2.45)$$

Esta ecuación permitirá obtener la potencia necesaria de los sistemas de bombeo para los fluidos que tienen un comportamiento reológico newtoniano o no, para cualquier régimen de corriente.

- **Corrección de la curva característica de la bomba**

Para calcular la característica de la bomba cuando el fluido que se transporta es distinto al utilizado por el que elabora la curva característica, se puede utilizar la expresión que se plantea a continuación:

$$H_{bc.}(Q) = H_b(Q) \cdot \left( 1 - k \cdot \frac{\rho_l - \rho_{agua}}{\rho_l} \right)^{0.86} \quad (2.46)$$

Donde:

$K$  – es el coeficiente que depende del tipo de bomba, se escoge entre 0,4 y 0,6.

- **Semejanza de flujo**

Para la corrección de la altura de la bomba cuando se decide realizar la variación del punto de operación por medio de modificación del número de revoluciones, se debe emplear la siguiente relación.

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (2.47)$$

Donde:

$H_1$  y  $H_2$  son las alturas disponibles de la bomba para el régimen de operación  $n_1$  y  $n_2$  respectivamente.

$n_1$  y  $n_2$  son los números de revoluciones de la bomba, en regímenes semejante de flujos.

### 2.9.1. Verificación de la cavitación

Cuando la columna del líquido está por encima del eje de la bomba solo se analiza este fenómeno en el caso que la altura del líquido sea igual o inferior a 0,5 m sobre el nivel del eje de la bomba, ya que otro nivel del tanque es favorable para las bombas (Hernández, 2009).

Para que la bomba no cavite debe de cumplirse con la siguiente condición:  $NSPH_{dis} > NSPH_{req}$ . Aquí,  $NSPH_{dis}$  es la altura de carga disponible en la succión de la bomba y  $NSPH_{req}$  es la altura requerida en la entrada de la bomba; la altura disponibles se determina por cálculo en función del régimen de operación del bomba, la altura en la succión, la presión en recipiente de donde se produce la succión, la tensión del vapor del líquido a la temperatura dada y la pérdida de carga por rozamiento y locales. Por otra parte la altura requerida se define por la característica de la bomba, la cual es ofrecida en catálogos de los fabricantes de bombas.

Para calcular la altura disponible en la succión de la bomba se emplea la siguiente expresión:

$$NPSH_{dis}(Qr) = Patm + Hsucc - H_{eq.} - ht - \sum hsucc(Qr) \quad (2.48)$$

Donde:

$Patm$  – es la presión atmosférica en el tanque de donde se produce la succión.

$Hsucc.$  – es la altura geométrica en la succión de la bomba, la cual se toma con signo negativo si el depósito está por debajo del eje de la bomba.

$ht$  – es la tensión del vapor saturado del líquido a la temperatura dada.

$\sum h$  – es la pérdida de altura en la succión, la cual se determina en función del régimen de flujo.

$H_{eq.}$  – es la pérdida de altura producto a la influencia de la rapidez de la bomba, se caracteriza por la velocidad específica de la bomba y se determina de la forma que se indica a continuación.

$$H_{eq.} = \left[ 10 \cdot \left( \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{c} \right) \right]^{\frac{4}{3}} \quad (2.49)$$

Donde:

$n$  – es el número de revoluciones por minuto del rotor, rev/min.

$Q$  – es el gasto que ofrece la bomba,  $m^3/s$

$c$  – es un valor tabulado y se da en función del coeficiente de rapidez.

$n_s$  – es el coeficiente de rapidez, el cual se determina como sigue.

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \left[ \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \right] \quad (2.50)$$

El valor de  $c$  se determina en la siguiente tabla 2.4, en función del resultado que se obtiene en el cálculo del coeficiente de rapidez.

**Tabla 2.4.** Valor de  $c$  y en función del coeficiente de rapidez.

$n_s$	Menor que 70	70 - 80	80 – 150	Mayor que 150
$c$	600	700	800	1200

## 2.10. Análisis económico

Todo proyecto de inversión 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.

El objetivo de este análisis es determinar el desembolso de efectivo (costo de la inversión) que se debe hacer para lograr el establecimiento del sistema de sedimentación propuesto. Esto constituye un punto de partida importante para evaluar la factibilidad económica de una inversión. Luego de tener dicho resultado, se debe

realizar una estimación de los flujos de efectivos generados a partir de la explotación del sistema para poder aplicar las técnicas de evaluación financiera de inversiones, tales como: período de recuperación (PR), periodo de recuperación descontado (PRD), valor actual neto (VAN), tasa interna de rentabilidad (TIR) y tasa interna de rentabilidad modificada (TIRM).

- **Costo de la inversión**

$$I = I_{inv} + I_{const} + I_{Tran} + I_{Mont.} \quad (2.51)$$

Dónde:

$I_{inv}$  - es el valor de la investigación.

$I_{const}$  - es el gasto de la adquisición.

$I_{Tran}$  - es el gasto de transportación.

$I_{Mont.}$  - es el gasto por concepto de montaje.

## 2.11. Conclusiones de capítulo 2

- Se exponen las expresiones matemáticas y procedimientos que permiten la caracterización de las propiedades físicas y reológicas del lodo residual 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, la velocidad de sedimentación y la reología del fluido.
- Se plantean las expresiones matemáticas que permiten la determinación de la altura necesaria para el transporte por tubería de un fluido Newtoniano, la selección de una bomba y un sedimentador continuo, así como los elementos referidos a la estimación del costo de la inversión necesario para lograr la materialización de lo proyectado.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Introducción**

El estudio de las propiedades físicas y reológicas del lodo residual generado en la planta procesadora de árido 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 del porcentaje de sólido, la obtención de la velocidad de sedimentación 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 este planteamiento, 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 físicas y reológicas del lodo residual objeto de estudio y la propuesta para un sistema de sedimentación.

#### **3.2. Análisis del muestreo**

La representatividad de los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades del lodo residual se considera aplicando la expresión 2.1 expuesta en el capítulo anterior. Se decide efectuar tres repeticiones de las mediciones, desarrollando un muestreo aleatorio simple. La tarea principal de este apartado consistió en definir una muestra lo más pequeña posible con la mayor representatividad. Para esto se fija el tamaño de la muestra y se determina la posición espacio-temporal procurando maximizar la representatividad.

La cantidad de mediciones a realizar se determinó considerando las siguientes aproximaciones, para el cálculo: estadístico de la distribución normal ( $Z_{\alpha/2}$ ) igual 1,645, nivel de significancia ( $\alpha$ ) igual a 0,01, desviación típica poblacional ( $\sigma$ ) igual a error máximo de estimación ( $E$ ); es decir un error máximo de estimación igual a la desviación típica ( $\sigma$ ) y un nivel de confianza del 90%.

Se escoge un nivel de confianza del 90 % con el propósito de evitar el encarecimiento de la investigación, puesto que al utilizar un nivel de confianza superior el tamaño de la muestra requerido aumentaría y esto implicaría el tener que realizar más ensayos.

### 3.3. Determinación de la granulometría

Como se planteó en el capítulo anterior las muestras de este trabajo no favorecen la aplicación de los procedimientos normalizados propuesto por Andreiev *et al.* (1980), puesto que posee baja dureza, y no se le conoce su composición química. Por tal motivo se decide efectuar la colada del lodo residual obtenido del proceso de lavado por el juego de tamiz seleccionado. Además se debe tener en cuenta que las muestras consideradas fueron tomadas en pleno proceso productivo continuo a una misma hora, por lo que existe garantía de que las muestras formen parte de una misma carga.

Se realizan tres repeticiones del experimento para determinar la tendencia en el comportamiento de la variable diámetro de las partículas en la muestra analizada. Los resultados obtenidos se muestran en Anexo 7.

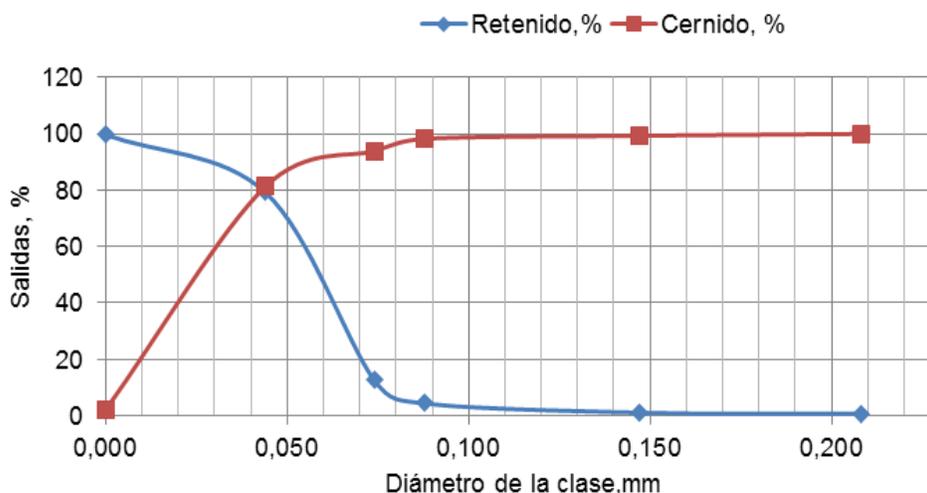
El comportamiento de la variable masa retenida en cada tamiz, no mostró anomalía puesto que en todos los casos la masa estuvo incluido en el rango de normalidad calculado.

En el Anexo 7 se muestran los resultados del análisis granulométrico al realizar la colada del lodo residual por cada uno de los tamices. La colada se efectuó independientemente en cada tamiz, en orden descendente del diámetro, posibilitando de esta forma la agitación de la masa de lodo para disminuir el efecto de la sedimentación.

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 0,3 mm se define que el tamaño de la muestra debe ser superior a 50 g. La masa del sólido que contiene el lodo sometido a análisis se determina utilizando la ecuación 2.9.

La clasificación por clases de tamaño realizada a la muestra de lodo demuestra que este forma sistemas polidispersos, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,074 mm, constituyendo el 66,663 % en peso de la muestra. Como puede apreciarse en la figura 3.1 existe un predominio de las fracciones finas de forma general y el  $d_{80}$  se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0,043 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor.



**Figura 7.** Curva de característica sumarias del lodo analizado.

Es importante destacar que aproximadamente el 80 % de la muestra contiene un diámetro de inferior a 0,043 mm. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas estructurares (Turro, 2002). Del análisis se deriva que las muestras de lodo constituyen sistemas altamente polidispersos.

### 3.4. 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 muestra diferencia significativos entre los resultados obtenidos al

nivel de confianza del 95 %. Se indica que existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la densidad del sólido bajo condiciones similares a la que existieron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,5899 a 2,3739 g/cm<sup>3</sup>.

- **Densidad del lodo**

Las tablas 5 y 6 del Anexo 9 relacionan los valores de la densidad del lodo obtenida al aplicar el método del picnómetro y la ecuación 2.8. Los resultados mostrados indican que el proceso de medición estuvo bajo control estadístico, puesto que al repetir el experimento no se muestra diferencia significativos entre los resultados obtenidos al nivel de confianza del 95 %. Se indica que existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la densidad del lodo bajo condiciones similares a la que existieron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,00 a 1075,86g/cm<sup>3</sup>.

- **Determinación del % de sólido**

La tabla 3.1 muestra el valor obtenido del por ciento de sólido que contiene el lodo residual. El cálculo se realizó aplicando la ecuación 2.9 que se expuso en el capítulo anterior.

**Tabla 3.1.** Resultado del por ciento de sólido.

Densidad de la arcilla, kg/m <sup>3</sup>	1981,9
Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup>	1000
Densidad de la pulpa, kg/m <sup>3</sup>	1021,31
%S	4

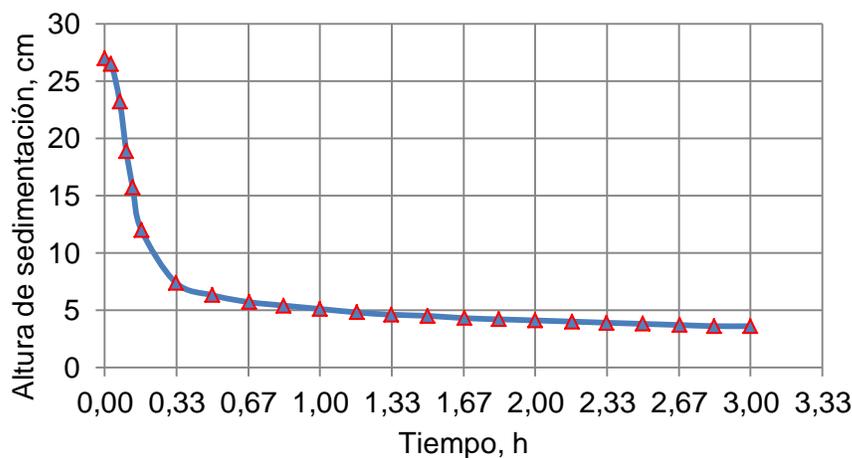
### **3.5. Determinación de la velocidad de sedimentación del lodo**

La tabla 7 del Anexo 10 muestra los resultados obtenidos de las pruebas para determinar la velocidad de sedimentación del lodo objeto de estudio, considerando lo planteado en el capítulo anterior. Se efectúan tres mediciones de la altura de la interface en cada tiempo considerado; se decide en el intervalo de 0 a 10 minutos efectuar las observaciones cada 2 minutos para aumentar la precisión y luego se espacian las mediciones en un tiempo de 10 minutos uniformemente. Se determinan el valor promedio de las alturas y se calcula rango de normalidad para cada experimento desarrollado, utilizando las ecuaciones 2.2 a la 2.5.

Los resultados mostrados anteriormente indican que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, puesto que cuando se repite el experimento no se muestra

diferencia significativos entre los resultados obtenidos al nivel de confianza del 95 %. Se refiere que existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la altura de la interface del proceso de sedimentación bajo condiciones similares a la que existieron en este experimento el resultado se obtenga en los rangos de normalidad establecidos, puesto que para todos los ensayos el valor estuvo incluido en los intervalos calculados.

La curva de sedimentación del lodo se muestra a continuación en la figura 3.2, la cual se elabora a partir de los datos contenidos en la tabla 7, utilizando el software Excel. La ilustración permite visualizar el comportamiento de la altura de la interface generada en el proceso de sedimentación del lodo.



**Figura 3.2.** Curva de sedimentación del lodo.

El comportamiento de la altura de la interface refleja las tres fase por la que transita el proceso de sedimentación, la fase de sedimentación libre que se manifiesta durante los 10 primeros minutos (0,17 h) de iniciado el proceso, la fase de sedimentación contrariada que se extiende desde 0,17 horas hasta 2,67 horas de incida el proceso y la fase compresiva que se estudia en el tiempo que media desde las 2,83 horas hasta las 3 horas de efectuado el proceso.

La velocidad de sedimentación del lodo objeto de estudio puede ser determinada a partir del ajuste a la curva de altura de la interface contra tiempo con un modelo lineal (una recta). La primera derivada del modelo lineal obtenido será la velocidad de sedimentación.

Los resultados del cálculo realizado para el ajuste indican que la representación de la curva de la figura 3.2 por un modelo lineal es significativa si se considera el criterio de Student y el de Fisher, pero la correlación puede ser mejorada ya que difiere considerablemente de la unidad. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la intersección ( $1,97E-08$ ) y para la variable ( $6,74E-05$ ), el de Fisher un valor de cálculo (24,50) mayor que el Fisher crítico ( $6,74E-05$ ) y el coeficiente de correlación de 0,73. Sobre la base de los cálculos realizados se obtiene el siguiente modelo matemático.

$$Z = -5,63 \cdot t + 15,85 \quad (3.1)$$

Donde:

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

$Z$  – Es la altura de la interface, cm.

Aplicando el criterio de la primera derivada a la ecuación 3.1 se obtiene la velocidad de sedimentación que caracteriza al lodo objeto de estudio. La velocidad de sedimentación según lo planteado anteriormente es de 5,63 cm/h.

El coeficiente de correlación es el criterio que expresa el grado de coincidencia de la curva observada y la definida por el modelo matemático propuesto, prefiriéndose los valores más próximos a la unidad; en el caso que ocupa el coeficiente de correlación es de 0,73, el cual puede ser incrementado si se realiza un análisis por parte.

- **Determinación de la velocidad de sedimentación de caída libre**

El cálculo realizado para el ajuste indica que la sección de la curva de la figura 3.2 correspondiente a la etapa de sedimentación libre puede ser representada por un modelo lineal significativamente, considerando el criterio de Student, el de Fisher y el del coeficiente. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la intersección ( $3,97E-06$ ) y para la variable ( $2,95E-04$ ), el de Fisher un valor de cálculo (139,27) mayor que el Fisher crítico ( $2,95E-04$ ) y el coeficiente de correlación de 0,99. Los cálculos efectuados permiten obtener el siguiente modelo matemático.

$$Z = -94,57 \cdot t + 28,43 \quad (3.2)$$

Donde:

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

$Z$  – Es la altura de la interface, cm.

El criterio de la primera derivada aplicado a la ecuación 3.2 permite obtener la velocidad de sedimentación que caracteriza al lodo objeto de estudio en la fase libre. La velocidad de sedimentación según lo planteado anteriormente es de 94,57 cm/h.

- **Determinación de la velocidad de sedimentación contrariada**

El criterio de Student, el de Fisher y el del coeficiente de correlación indican que el ajuste a la sección de la curva de la figura 3.2 que corresponde a la etapa de sedimentación contrariada puede ser representada por un modelo lineal significativamente. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la interacción ( $9,16E-13$ ) y para la variable ( $1,09E-06$ ), el de Fisher un valor de cálculo ( $72,93$ ) mayor que el Fisher crítico ( $1,09E-06$ ) y el coeficiente de correlación de 0,92. A partir de los cálculos realizados se obtiene el siguiente modelo matemático.

$$Z = -1,29 \cdot t + 6,71 \quad (3.5)$$

Donde:

$t$  – Es la altura de la interface, h.

$Z$  – Es la altura de la interface, cm.

Aplicando el criterio de la primera derivada a la ecuación 3.5 se obtiene la velocidad de sedimentación que caracteriza al lodo objeto de estudio en la fase contrariada. La velocidad de sedimentación según lo referido anteriormente es de 1,29 cm/h.

- **Verificación de la sedimentación durante el transporte**

En la tabla 8 del anexo 11 se muestran los resultados de la determinación de la velocidad de transporte de lodos, la velocidad de sedimentación en fase de caída libre y en la fase de caída contrariada. Los valores indicados se determinaron en correspondencia con las expresiones 2.11 y 2.12.

La velocidad crítica calculada según la ecuación 2.11 es de  $1,664 \cdot 10^{-4}$  m/s. Dicha velocidad es muy inferior a la que se transportará el lodo por lo que existe garantía de que no haya sedimentación en la tubería. Se considera válido indicar que para el cálculo de la velocidad crítica de trasportación se escogió un valor de  $K_d$  igual a 0,15 extrapolando a partir de los valores contenidos en la tabla 2.2, ya que el alcance de lo referido en la tabla está limitado.

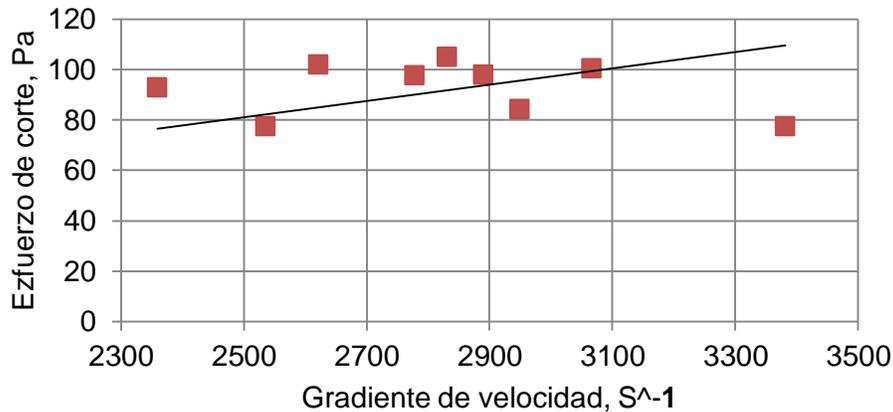
### 3.6. Determinación del comportamiento reológico del lodo

La tabla 9 del Anexo 12 presenta los resultados obtenidos de las pruebas para determinar el comportamiento reológico del lodo objeto de estudio, considerando lo planteado en el capítulo anterior. Se escogieron para el estudio tres niveles de variación de la presión (1,1 - 1,3 - 1,4) y para cada variación de la presión se determinan tres veces el tiempo que demora el ensayo, y el volumen de lodo depositado en la probeta; se efectúan tres réplicas de cada experimento 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.

Se determinan el valor promedio del esfuerzo de corte y del gradiente de viscosidad correspondiente a cada experimento diferente y luego se calcula rango de normalidad para cada uno, utilizando las ecuaciones 2.2 a la 2.5. El análisis de la normalidad se efectúa basado en el hecho de que se aprecian fluctuaciones en los valores del esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad en experimentos que poseen igualdad de condiciones. En la tabla 10 del Anexo 12 se aprecia el tratamiento dado a las variables esfuerzo de corte y gradiente de velocidad para verificar la normalidad.

Los resultados mostrados indican que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, puesto que cuando se réplica el experimento no se muestra diferencia significativos entre los resultados obtenidos al nivel de confianza del 95 %. Se indica que existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones del esfuerzo de corte y gradiente de velocidad bajo condiciones similares a la que existieron en este experimento el resultado se obtenga en los rangos de normalidad establecidos, puesto que para todos los ensayos el valor estuvo incluido en los intervalos determinado.

La curva de flujo del lodo pronosticada se muestra a continuación en la figura 3.3, la cual se elabora a partir del ploteo de los datos contenidos en la tabla 9, utilizando 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.

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). Los resultados del cálculo realizado para el ajuste indican que la representación de la curva de flujo por un modelo lineal es significativa si se considera el criterio de Student y el de Fisher, y el de correlación. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la variable (1,17E-07), el de Fisher un valor de cálculo (305,46) mayor que el Fisher crítico (4,94E-07) y el coeficiente de correlación de 0,99. Sobre la base de los cálculos realizados se obtiene el modelo matemático ajustado que se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Modelo reológico del lodo.

Modelo general para fluido newtoniano <sub>Ec. 1.5</sub>	Modelo particular para el lodo <sub>Ec. 3.6</sub>
$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left( - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$	$\tau_{x,y} = 0,0324 \cdot \left( - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$

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<sup>-1</sup>.

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 0,0324 Pa · s .

### 3.7. Selección del sedimentador

La tabla 3.3 muestra las especificaciones técnicas que se determinaron para la selección del sedimentador de acción continua, atendiendo a los requisitos operacionales del flujo tecnológico de la planta procesadora de árido del Jobo de Sagua de Tánamo. Los parámetros mostrados en la tabla siguiente se determinaron utilizando las expresiones 2.19 a 2.22.

**Tabla 3.3.** Datos iniciales.

Datos		
Gasto de lodo(Q <sub>0</sub> ), m <sup>3</sup> /h	75	
Concentración inicial del lodo(C <sub>o</sub> ), g/l	41,00	4 %S
Densidad del sólido, kg/m <sup>3</sup>	1981,90	
Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup>	1000,00	
Concentración final del lodo (C <sub>i</sub> ), g/l	298,00	26 %S
Gasto de agua de reboso, m <sup>3</sup> /h	64,68	
Gasto de lodo espesado, m <sup>3</sup> /h	10,32	

La determinación del diámetro de la sección transversal del sedimentador se efectúa aplicando las ecuaciones 2.23 y 2.24. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 11, 12 y 13 del anexo 13.

Por otra parte, la altura y el torque requerido del sedimentador se calculan mediante las ecuaciones 2.25 a la 2.29. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 14 del Anexo 14.

La tabla 15 del Anexo 13 refiere los valores que se determinaron del diámetro de la sección transversal, de la altura y del torque requerido en el accionamiento, para el sedimentador que se propone.

En la definición de la altura total del sedimentador se precisa para la altura de inmersión del tubo de alimentación; la altura del cono de fondo y la altura de la capacidad de almacenaje para hacer frente a interrupciones, a irregularidades o utilizar el sedimentador como almacén de suspensión 60 cm en cada una. Y al coeficiente *K* se le asigna el valor de 75 N/m puesto que se considera un régimen de carga estándar; el cual se obtiene del libro "Plant Design of Mineral Dressing" AIME (1983).

Las especificaciones mostradas en la tabla 15 indican las combinaciones posibles de diámetro de la sección transversal, altura y torque que aseguran cumplir con las

especificaciones técnicas planteadas para el sedimentador a seleccionar, atendiendo a la característica del flujo tecnológico de la planta objeto de estudio. Esto constituye un criterio técnico para la selección.

A partir de las especificaciones técnicas planteadas en la tabla 15, se proponen los sedimentadores que poseen las características que se referencian en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Especificaciones técnicas del sedimentador propuesto.

Parámetros	Sedimentador 1	Sedimentador 2
Diámetro de la sección transversal	7 m	7 m
Altura total	6 m	4 m
Torque	501 N*m	500 N*m

El sedimentador 1 se fabricaría en el combinado mecánico del níquel, mientras que el 2 es uno Modelo YRQ – Marca YONGLDA, que se compraría en China. La ilustración de un ejemplar del sedimentador 2 propuesto se muestra en el Anexo 14.

### 3.8. Determinación de las alturas necesarias y disponibles

La figura 8 del Anexo 15 muestra el esquema de instalación que trasiega el lodo residual generado en la planta procesadora de árido objeto de estudio, desde el sin fin lavador hasta el sedimentador propuesto. Como se puede observar en la figura se indica con un número cada uno de los componentes que constituyen a la instalación y las cotas de dimensiones fundamentales.

La tabla 16 del Anexo 15 refiere los datos de la instalación que sirven de base al cálculo de los parámetros de transporte. La cantidad de cada uno de los elementos se puede apreciar al realizar una inspección visual del esquema de la instalación mostrado en la figura 8. Las dimensiones de los parámetros fueron definidas sobre la base de consideraciones objetivas del contexto ambiental de la planta. Los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los accesorios se escogieron a partir de la información referenciada en Nekrasof (1986), Martínez y Laurencio (2004).

- **Determinación del número de Reynold**

El cálculo del número de Reynolds se efectúa a partir de la ecuación 2.32. Para el flujo del lodo de 75 m<sup>3</sup>/h, el diámetro de la tubería de 0,280 m se obtuvo el resultado de 31199, lo que indica que el régimen de flujo es turbulento, ya que es superior a 2300.

Este resultado conlleva a utilizar en el cálculo de la pérdida de carga la ecuación 2.38, expuesta en el capítulo anterior.

- **Determinación del coeficiente de pérdida por rozamiento.**

El coeficiente de pérdida por rozamiento se determina utilizando la fórmula del científico ruso P. Konakov (ecuación 2.43). Esto se sustenta en el hecho que la tubería posee un acabado superficial tal que puede ser despreciada su influencia en la transportación. El resultado obtenido refiere un valor de 0,0227.

- **Cálculo de la altura necesaria.**

La altura necesaria para provocar el flujo de lodo desde el punto definido por el eje de la bomba hasta el orificio de entrada del lodo al sedimentador se lleva a cabo por medio de las ecuaciones 2.35, 2.38 y 2.39. Los resultados obtenidos refieren los valores de 0,0275 m y 9,0275 m para la pérdida de altura y altura necesaria respectivamente.

- **Cálculo de la altura disponible.**

De forma análoga mediante las ecuaciones 2.35, 2.38 y 2.39 se determina la altura disponible para provocar el flujo de lodo desde el punto definido por el eje de la bomba hasta el orificio de entrada del lodo al sedimentador. El cálculo efectuado refiere los valores de 0,0169 m y 1,9331 m para la pérdida de altura y altura disponible respectivamente.

Los resultados mostrados relativos a la determinación de la altura necesaria y disponible en la instalación para el tramo que media desde el sinfín lavador hasta el sedimentador indican que no se dispone de la altura de carga suficiente para provocar el flujo de lodo por gravedad, por lo que se debe considerar la posibilidad de utilizar una bomba.

### **Tramo 2: Sedimentador – criba**

El esquema de instalación que trasiega el agua de rebose generada en el sedimentador propuesto se muestra en la figura 9 del Anexo 16. En la misma se observa la indicación de cada uno de los componentes que forma al tramo y las cotas de dimensiones fundamentales.

En la tabla 17 del Anexo 16 se muestran los datos vinculados al tramo objeto de análisis, que sirven de base al cálculo de los parámetros de transporte. La cuantía de

cada uno de los elementos se puede apreciar al realizar una observación del esquema de la instalación presentado en la figura 9. Las dimensiones de los parámetros y los valores de los coeficientes de pérdidas locales fueron definidas de forma análoga a como se procedió para el tramo 1.

- **Determinación del número de Reynolds**

El número de Reynolds calculado a partir de la ecuación 2.38 para el flujo de agua de  $64,68 \text{ m}^3/\text{h}$ , el diámetro de la tubería de  $0,280 \text{ m}$  mostró el resultado de  $639570$ , lo que refiere un régimen en la región de turbulencia, por lo que se puede utilizar en el cálculo de la pérdida de carga la ecuación 2.32.

- **Determinación del coeficiente de pérdida por rozamiento**

De forma análoga a como se procedió para el tramo 1 el coeficiente de pérdida por rozamiento se determina utilizando la ecuación 2.43. El resultado obtenido refiere un valor de  $0,0123$ . Se considera que la tubería es liza, lo cual es razonable producto a que hoy en día se dispone de tuberías con un gran acabado superficial.

- **Cálculo de la altura necesaria y disponible**

La altura necesaria y disponible para provocar el flujo de agua desde el punto definido por el orificio de salida del agua en el sedimentador hasta la parte superior de la criba se lleva a cabo por medio de la ecuación 2.35, 2.38 y 2.39. Los resultados obtenidos refieren los valores de  $0,0214 \text{ m}$  y  $5,0214 \text{ m}$  para la pérdida de altura y altura necesaria respectivamente. Mientras que para la altura disponible los valores de  $0,0158 \text{ m}$  y  $8,9842 \text{ m}$ .

Los resultados mostrados relativos al cálculo de la altura necesaria y disponible en la instalación para el tramo que abarca desde el sedimentador hasta la criba refiere que se dispone de la altura de carga suficiente para provocar el flujo de agua a gravedad.

### **3.9. Selección de la bomba**

El cálculo de la potencia necesaria para efectuar el flujo de lodo desde la caja del sinfin lavador hasta el sedimentador se efectúa considerando la ecuación 2.45. Para el gasto de  $75 \text{ m}^3/\text{h}$ , la altura necesaria de  $9,0275 \text{ m}$  y un peso específico para el lodo de  $10021 \text{ kgf/m}^3$ , se obtiene que la potencia necesaria es de  $1,88 \text{ kW}$ .

Sobre la base de la potencia, el gasto y la altura de carga definida para la instalación se procede a la selección de una bomba que sea capaz de suplir la demanda del flujo en el proceso. Se escoge la bomba centrífuga serie 8020 que posee un rendimiento máximo de 78 %. En el Anexo 17 se muestra la curva característica de la bomba seleccionada.

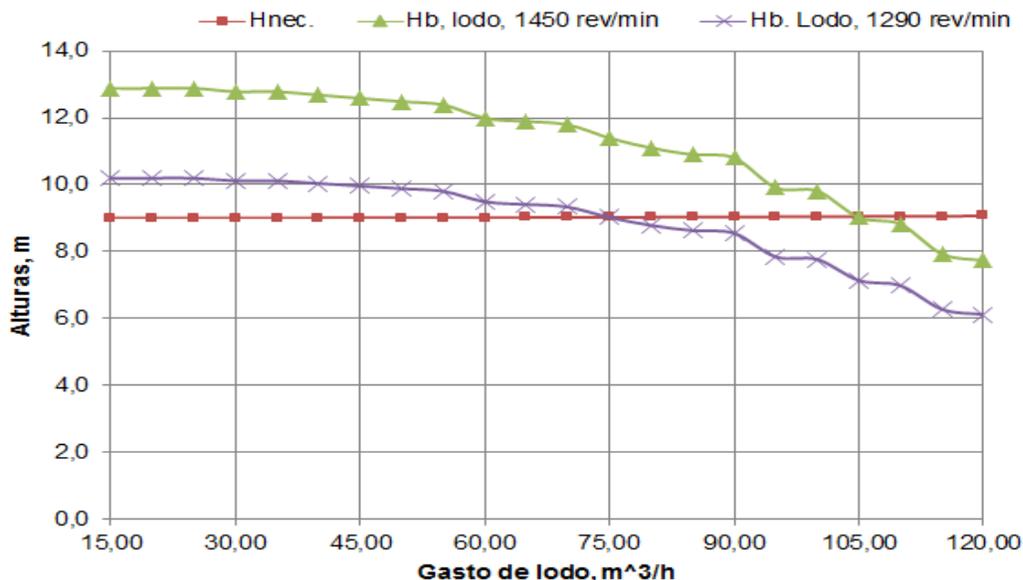
Se determina que el punto de operación de la instalación se encuentra en la coordenada correspondiente a un gasto de 108 m<sup>3</sup>/h (0,030 m<sup>3</sup>/s) y altura de 9 m.

El punto de operación de la instalación no asegura el gasto de lodo igual a 75 m<sup>3</sup>/h, el cual fue definido por diseño, por lo que se deben efectuar regulaciones para cumplir con tal especificación. Lo cual puede efectuarse por medio de la variación de la característica de la red o variando la característica de la bomba.

La regulación de la característica de la red se efectuaría por ejemplo variando el grado de abertura de la válvula, mientras que la regulación de la característica de la bomba se efectuaría bien variando el diámetro del rodete o el número de revoluciones.

- **Variación de la característica de la bomba**

Al aplicar la ecuación 2.46 se obtiene que para asegurar un gasto de 75 m<sup>3</sup>/h y tener una altura disponible de 9,0275 m el rodete de la bomba seleccionada debe girar a razón de 1290 rev/min. En la figura 3.4 se muestra el nuevo régimen de operación.



**Figura 3.4.** Curvas característica de la bomba y la red.

- **Verificación de la cavitación**

La tabla 18 del Anexo 18 muestra los resultados del cálculo realizado para verificar la condición referida al fenómeno de la cavitación. El cálculo se efectúa considerando las ecuaciones 2.48 a la 2.50.

Se puede inferir a partir del resultado mostrado en la tabla anterior que en la instalación no se debe presentar el fenómeno de la cavitación, puesto que el valor de la altura requerida es mucho menor que el de la altura admisible.

### 3.10. Valoración económica

En este trabajo se expone una metodología para elaborar la propuesta de un sistema de sedimentación para la Unidad Empresarial de base del Jobo de Sagua de Tánamo. La metodología desarrollada permite realizar la valoración del estado del arte relativo a al tema en cuestión, considerando los trabajos precedentes y tratando de poner de relieve los aspectos más distintivos de cada uno para aplicar la sugerencia oportuna. Se hace una caracterización de los materiales y métodos a emplear para la producción del conocimiento científico, teniendo como punto de referencia las normas y los principios científicos de la interrelación dialéctica teoría-práctica. Se plantea una valoración de los resultados obtenidos, poniendo de manifiesto la importancia de estos tanto en el plano conceptual como práctico y se propondrá la utilización de la metodología en la elaboración de propuestas para otras instalaciones similares.

Sobre la base de la ecuación 2.51 se efectúa el análisis económico del costo en el que se incurre por concepto de la instalación propuesta. En la tabla 3.5 se muestra el resultado de la evaluación del modelo para estimación del costo de la inversión.

**Tabla 3.5.** Costo de la inversión.

Parámetros	Valor, CUC	Proveedor
1. Valor de la investigación ( $I_{inv}$ )		
Pruebas realizadas:		
• Ensayos granulométricos	574,91	ISMM
• Ensayos de densidad de la arcilla	582,49	ISMM
• Ensayos de densidad del lodo	552,44	ISMM
• Ensayos de velocidad de sedimentación	554,05	ISMM

**Tabla 3.5.** Costo de la inversión (Continuación)

Parámetros	Valor, CUC	Proveedor
• Ensayo reológico	616,70	ISMM
2. Gasto de la adquisición( $I_{const.}$ )	12369,89	EMNI
3. Gasto de transportación( $I_{Tran.}$ )	1257	SERVICAR
4. Gasto por concepto de montaje( $I_{Mont.}$ )	8538,91	SOMED
Costo total de la inversión( $I$ )	25046,39	

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 gasto de adquisición se refiere al costo por la compra de equipamiento y accesorio para la instalación propuesta. El gasto de transportación está referido al desembolso de efectivo que se debe hacer para lograr el traslado de todos los equipos, accesorios y materiales necesarios para el establecimiento de la instalación. Y por último el gasto por concepto de montaje incluye lo referente al monto de la inversión para crear las condiciones y establecer el proceso.

El establecimiento de las cifras referidas a los ensayos realizados para determinar las propiedades del lodo se efectuó sobre la base de los precios otorgados por el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINIQ) que realizan dichos trabajos. La estimación de los costos de fabricación del tanque de sedimentación parte de la metodología del cálculo de costo de fabricación conocida como "Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles" que se utiliza como Norma empresarial, para calcular las fichas de costo, amparado por la resolución conjunta No. 1/2005. El gasto de transportación y el de montaje está dado por el precio acordado con SERVICAR y SOMED, respectivamente.

Se debe señalar que lo anteriormente expresado 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 se obtienen.

El análisis económico referido anteriormente se basa en la variante de adquisición de un sedimentador fabricado en la Empresa mecánica de Níquel. Como puede observarse el monto de la inversión se encuentra alrededor de los 25046,39 CUC. Si se considera la solución referida a la compra de un sedimentador Modelo YRQ – Marca YONGLDA, sobre el cual se refiere un costo de 90 000 USD, el monto de la inversión aumentaría considerablemente, de lo que se infiere que es más factible económicamente fabricar el sedimentador en la EMNI que comprarlo en el extranjero.

### **3.11. 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 la 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 producto a la sedimentación que se presentan en el tubo de descarga del lodo se expresan también en generación de polvo que trae consigo la contaminación de la UEB, sus alrededores y al ser humano.

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

- Disminuir los volúmenes de lodo a evacuar desde la instalación, ya que con el sistema de sedimentación propuesto gran parte del agua contenida en el lodo se reincorpora al proceso.
- Aumentar la disponibilidad de agua para la instalación y la comunidad, ya que una vez estabilizado el proceso no se requiere del suministro de agua desde el pozo existente.

- La instalación proyectada debe garantizar que no exista la sedimentación del lodo en la tubería.
- La instalación no requerirá del empleo de otra variante de suministro de agua, que pueden ser poco económica y de mayor contaminación ambiental.

Sobre esto último debe indicarse que en la actualidad se ha pensado en la variante del suministro de agua limpia desde el río Sagua, que se encuentra a uno 500 m de la instalación, pero para esto se requiere el considerar las grandes y frecuentes crecidas que se producen de las aguas de dicho río. Además, se piensa en la posibilidad del suministro de agua sucia desde una presa de cola, pero las condiciones ambientales no permiten el desarrollo de tal solución.

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

- **Efectos ambientales del procesos de fabricación**

En el proceso de fabricación de los componentes del sistema de sedimentación se pueden ejecutar los procesos de fundición, maquinado, conformación, corte y soldadura. Estos procesos afectan al medio ambiente, por lo que se requiere del conocimiento y control de las principales variables que lo caracterizan.

Las implicaciones económicas y sociales que todo esto representa son universalmente conocidas, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen, por lo que todo trabajo que se haga debe considerarse el tratamiento de este tema puesto que el mismo reviste gran importancia.

Debido a su proximidad con el lugar de origen y emisión, el personal es el que más está expuesto a los riesgos de la producción. En la UEB de Construcciones Metálicas de la Empresa Mecánica del Níquel, esto se traduce en amplias normativas para la protección de los que allí laboran. Tomando como ejemplo los procedimientos de fabricación más importantes y de mayor relevancia ambiental. Esta empresa dispone de hojas de datos que informan sobre la peligrosidad de los riesgos a que están expuestos

los trabajadores así como de instrucciones redactadas. Es importante que el personal de la empresa sea consciente del peligro que esto representa a largo plazo.

### 3.12. Conclusiones de capítulo 3

- Se calculó el tamaño de la muestra mínimo requerido para asegurar la representatividad en los resultados, lo cual indica que el tamaño requerido es de 3 unidades, según las especificaciones de precisión y exactitud definida.
- Se efectuó la determinación de las propiedades físicas y reológicas del lodo residual objeto de estudio, obteniéndose como resultado: un 4 % de la arcilla de 0,043 mm; la densidad de la arcilla de 1981 kg/m<sup>3</sup> y la del lodo de 1021 kg/m<sup>3</sup>; la velocidad de sedimentación en caída libre es de 94,57cm/h(2,63\*10<sup>-4</sup> m/s), en fase contrariada de 1,29 cm/h(3,583\*10<sup>-6</sup>m/s), la velocidad crítica estimada es de 1,664\*10<sup>-4</sup> m/s; y la viscosidad dinámica del lodo es de 0,032 4 Pa\*s.
- Se determinó que en el tramo de la instalación que abarca desde el sinfín lavador hasta el sedimentador no debe existir sedimentación porque la velocidad crítica determinada es inferior a la velocidad de transportación (1,664\*10<sup>-4</sup> es menor que 0,339) y que el lodo considerado en el análisis posee un comportamiento Newtoniano, con un coeficiente de correlación de 0,99.
- Se efectuó la determinación de 20 combinaciones posibles de diámetro, altura del sedimentador y torque requerido para asegurar el aumento del porcentaje de sólido en el lodo de un 4 % a un 26 %, para un gasto de lodo alimentado de 75 m<sup>3</sup>/h.
- Se efectuó el cálculo de la altura necesaria y disponible en los dos tramos considerados en la instalación, lo que derivó una propuesta de bomba centrífuga de serie 8020 para lograr el flujo de lodo desde el sinfín lavador al tanque de sedimentación.
- Se plantean las implicaciones económicas y ambientales de la propuesta del sistema de sedimentación. El costo estimado de la inversión inicial es de 25 046,39 CUC y se prevé la disminución de las afectaciones ambientales del proceso de lavado de árido.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. Se expone el marco teórico de la investigación, mediante la presentación de los trabajos precedentes, fundamentos teóricos y descripción del flujo tecnológico del proceso. Se plantea que aunque existe la necesidad de disponer de más agua en el proceso objeto de estudio y los fundamentos teóricos para la implementación de un sistema de sedimentación, ningún trabajo realizado hasta el momento ha considerado la propuesta de un sedimentador, para la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo.
2. Se exponen las características de los materiales y procedimientos a utilizar en la determinación de las propiedades físicas y reológicas del lodo objeto de estudio y la elaboración de una propuesta de sistema de sedimentación para la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo. Se define con qué y cómo determinar la granulometría, la densidad de la arcilla y del lodo, la velocidad de sedimentación, la reología; así como la selección del sedimentador y la bomba.
3. Se analiza la sedimentación que caracteriza al lodo objeto de estudio. Para un 4 % de sólido la velocidad de sedimentación en la fase de caída libre es de 94,57cm/h ( $2,63 \cdot 10^{-4}$  m/s), en la fase contrariada es de 1,29 cm/h ( $3,583 \cdot 10^{-6}$  m/s) y la velocidad crítica de transportación estimada es de  $1,664 \cdot 10^{-4}$  m/s; lo que indica que existe garantía de que no exista sedimentación del lodo en el tramo que mediaría entre el sinfín lavador y el sedimentador, puesto que la velocidad de transportación calculada está en el orden de 0,339m/s.
4. Se elabora una propuesta de sistema de sedimentación para la recuperación del agua que contiene el lodo residual de la UEB objeto de estudio, a partir de la determinación de 20 combinaciones posibles de diámetro, altura y torque requerido para asegurar el incremento del porcentaje de sólido del lodo de un 4 % a un 26 %, con un gasto de lodo alimentado de 75 m<sup>3</sup>/h.



5. Se efectúa la determinación de la altura necesaria y disponible en los tramos que mediarían entre el sinfín lavador y el sedimentador y entre el sedimentador y la criba. El cálculo realizado permitió proponer una bomba centrífuga serie 8020 de potencia 1,88 kW y rendimiento máximo de 78 % para el primer tramo, mientras que para el segundo tramo se indica que el flujo de agua se realizaría a gravedad; todo esto partiendo de considerar una elevación para el sedimentador de 9 m, situado a una distancia de 14 m del sin fin lavador y un diámetro para la tubería de entrada y salida del sedimentador de 0,28 m.
6. Se realiza una valoración de los resultados obtenidos. Se estima que el costo de la inversión requerida para el establecimiento de un sedimentador fabricado en la EMNI es de 25 046,39 CUC y se resalta el incremento que puede tener este si se considera la variante de compra de uno Modelo YRQ – Marca YONGLDA, en el mercado internacional. Se plantea que es posible con la implementación del sistema de sedimentación propuesto: aumentar la disponibilidad de agua para el proceso y disminuir las afectaciones ambientales que se producen hoy en día en la UEB objeto de estudio.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar muestreo del lodo generado en el proceso de lavado de árido de la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo en diferentes momentos, para tener en cuenta la variabilidad que se pudiera presentar y consecuencia realizar el trabajo en base a la tendencia.
2. Validar el procedimiento aplicado para la determinación de la granulometría del lodo objeto de estudio y realizar el análisis de la composición química de la muestra con el propósito de conocer lo constituyente de la arcilla, lo que debe considerarse en la determinación de la granulometría y en los estudios de posible utilización como materia prima en otros procesos.
3. Determinar el coeficiente de ajuste para la expresión que posibilita el cálculo de la velocidad crítica de transportación del lodo, ya que en el presente trabajo se realizó una extrapolación, lo cual genera imprecisiones en la determinación.
4. Determinar las velocidades de sedimentación y la reología del lodo que se genera en el proceso de sedimentación, para un 26 % de sólido, con el propósito de evaluar el fenómeno de transporte en el tramo 3, tramo que media entre el sedimentador y el depósito para la descarga del lodo.
5. Considerar la variante propuesta de sistema de sedimentación para la UEB del Jobo de Sagua de Tánamo, ya que se prevé que esta es técnicamente posible y la más económica, social y ambiental razonable para aumentar la disponibilidad de agua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andreiev, S.E. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Editorial pueblo y educación, 1980.
2. Arora, A. y Gambardella, A. (1990). "Complementary and external linkages: the strategies of the large firms in biotechnology". The Journal Industrial Economics. Vol: XXXVIII. Nro: 4. pp: 361-379.
3. Bandala M. Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
4. 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
5. BERRES, S.; BÜRGER, R.; KARLSEN, K. H. & TORY, E. M. 2002: Strongly degenerate parabolic-hyperbolic systems modeling polydisperse sedimentation with compression. J. Appl. Math64 (1): 41-80.
6. Beyris M. P.E. y J. Falcón H. 2000: Consideraciones del efecto de la composición granulométrica en el proceso de sedimentación. Evento CINAREM 2000.
7. BEYRIS P.E. Y FE RRE R, E. 1996. Comportamiento de distintos tipos de iones durante el proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas Minería y Geología XXIII (2) :75-77.
8. BÜRGER, R.; CONCHA, F. & KARLSEN, K. N. 2001: Phenomenological model of filtration processes: 1. Cake formation and expression. Chemical Engineering Science 56: 4537-4553.
9. 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).
10. Calero A. Técnicas de muestreo. Editorial pueblo y educación. Ciudad Habana. 1976. 506 p.
11. CARMAN, P. C. 1997: Fluid flow trough granular beds. JUBILEE SUPPLEMENT- Trans IChemE, Vol 75 (December):S32-S48.
12. Casani, F. (1995). "Una aproximación empírica a la cooperación interempresarial en España. La actividad empresarial en España". Boletín Económico de ICE. Nro: 746 del mes de octubre. En Rodríguez Carraso, J.M. y Garrido Buj, S. (1998).



13. Fundamentos de la dirección estratégica. Lecturas. Editorial: Pirámide. Madrid. España. pp: 421-449.
14. Das, T. K. y Teng, B-S. (1997). "Sustaining strategic alliances: options and guidelines". Journal of General Management. Vol: 22. Nro: 4. pp: 49-64.
15. 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
16. Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1989.
17. Escriba, A; Sánchez, L. Y Sánchez, E. (2002). "Características y evolución del uso de las alianzas estratégicas en España (1994-1999)". Actas del XVI Congreso Nacional AEDEM del mes de junio. Alicante. España.
18. Falcón J. Hernández A. 1997. Influencia de la composición iónica de la pulpa limonítica sobre la velocidad de sedimentación Minería y Geología V(3):67-80.
19. Falcón J., Beyris P., Ferrer E. y Montero M. 1997. Sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos de la planta Moa Nickel S.A. Minería y Geología XIV (1): 31 - 36.
20. Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.
21. 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.
22. García Canal, E. (1993). "La cooperación empresarial. Una revisión de la literatura".
23. 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.
24. Heny, K.E; Fred, H.W; Stephen, R.L. Mineralogía. Edición revolucionaria. La Habana. 1959.
25. Hernández, S. Metrología dimensional. Editorial ISPJAE.1986.
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. Información Comercial Española. Nro: 714. pp: 87-98.
28. Karne García F, (2012) Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible.
29. Lakovlev, S.V y Dalkov Y.M., Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p
30. Larrea, José Luis.(2006).” El desafío de la innovación y la cooperación” disponible en ([www.i3b.ibermatica.com](http://www.i3b.ibermatica.com)) [consulta: marzo 2007].
31. 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.
32. Leyva, A. Estudio del diseño y mantenimiento de la criba horizontal balanceada CMD-107. Proyecto de curso. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2011.
33. LU. W. M.; TUNG, K. L.; PAN, C. H. & HWANG, K. J. 1998: The effect of particle sedimentation on gravity filtration. Separation Science and Technology33 (12): 1723-1746.
34. 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.
35. 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.
36. Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. Probabilidad y Estadística Para Ingeniero. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005. pp 25 – 30.
37. Mowery, D. Y Rosenberg, N. (1989). “Technology and the pursuit of economic growth”.Cambrige University Press. Cambrige. Inglaterra.
38. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada, Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980).
39. Nebot, Miguel. 1969. Prueba de sedimentación con pulpas sometidas a un campo magnético. Trabajo de investigación. E.C.P.S.A. Moa.
40. Nekrasov B. “Hidráulica”. Editorial Pueblo y Educación, 1986.
41. Pakrovskaya, V.I., El transporte hidráulico en la industria minera. Moscú: Niedra, 1985, 192 p.

42. Pavlov, K.F. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Editorial MIR, Moscú, 1981.
43. Perona P., An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. *Journal of Food Engineering*: 60, 137-145, 2003.
44. Perry J.H., *Chemical engineers handbook*. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1988.
45. 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.
46. Sablani S.S. y Shayya W.H., Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids: 57, 327-335, 2003.
47. Skelland A.H. *Non Newtonian flow and heat transfer*. Ediciones revolucionarias, La Habana, 1970.
48. SMILES, D. E. 1975: Sedimentation and self-weight filtration in industrial slurries. *Process Chem. Eng.* 28: 13-16.
49. Steffe J.M. y R.G. Morgan., Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian luid Foods. *Food Technology*. Dic: 78-85, 1986.
50. Suárez F.M. Determinación de los parámetros del hidrot transporte de las pulpas del mineral serpentinito. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
51. Tejeda, H.D. Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
52. Toose, E.M. A boundery integral method for two dimentional) (non) – Newtonian drops is slow visions flow. *Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics*, 1995.
53. Turiño, I. M. Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrifuga. *Centro azúcar*, No.1, 1994.
54. Turro, B.A. Estudio del hidrot transporte de las colas en el proceso carbonato amoniacaal. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002.
55. 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.

## ANEXO 1



Figura 1. Juego de tamices.

## ANEXO 2



Figura 2. Picnómetro.

### ANEXO 3



Figura 3. Balanza digital.

### ANEXO 4



Figura 4. Estufa.

## ANEXO 5



Figura 5. Probetas para la prueba de velocidad de sedimentación.

## ANEXO 6



Figura 6. Reómetro.

## ANEXO 7

**Tabla 1.** Pruebas para el análisis granulométrico de la masa retenida.

<b>Abertura de los tamices, mm</b>	<b>Valores de la masa retenida, g</b>	<b>Rango de normalidad para m, al 95 % de confianza</b>
0,208	0,423 – 0,411 – 0,402	0,457 - 0,367
0,147	0,247 – 0,221 – 0,215	0,301 - 0,154
0,088	1,987 – 1,961 – 1,952	2,045 - 1,888
0,074	4,965 – 4,943 – 4,929	5,024 - 4,868
0,044	39,998 – 39,970 – 39,925	40,123 - 39,806
0,000	12,380 – 12,243 – 12,185	12,700 -11,838

**Tabla 2.** Resultado del análisis granulométrico.

<b>Diámetro, mm</b>	<b>Peso, g</b>	<b>% en peso</b>	<b>Retenido %</b>	<b>Cernido %</b>
0,208	0,412	0,705	0,705	100,000
0,147	0,228	0,412	1,117	99,295
0,088	1,967	3,312	4,428	98,178
0,074	4,946	8,275	12,703	93,750
0,044	39,964	66,663	79,367	81,047
0,000	12,269	20,633	100,000	1,680
<b>Total</b>	60	100		-98

## ANEXO 8

**Tabla 3.** Valores de densidad de el sólido.

		muestras		
		M1,g	M2,g	M3,g
B	Picnómetro vacío	17,2054	18,6978	17,8754
C	Picnómetro con arcilla	24,7128	25,6654	23,6086
D	Picnómetro con arcilla + agua	45,9967	47,1054	45,7381
A	Picnómetro con agua destilada	42,0980	43,8478	42,8958
agua	Densidad del agua	1,0	1,0	1,0
Peso específico	Ec. 2.6	2,0714	1,8893	1,9848
Densidad del sólido, g/cm <sup>3</sup>	Ec. 2.7	2,0714	1,8893	1,9848

**Tabla 4.** Elaboración de los valores de la densidad del sólido.

$\rho_s$	Ec. 2.2	1,9819	Nivel de confianza
<b>S</b>	Ec. 2.5	0,0911	
<b>t</b>		4,303	95%
<b>LTmáx.</b>	Ec. 2.3	2,3739	
<b>LTmín.</b>	Ec. 2.4	1,5899	

## ANEXO 9

**Tabla 5.** Valores de densidad del lodo.

	Picnómetro vacío	Picnómetro lleno, g	Masa del lodo, g	Densidad del lodo, g/cm <sup>3</sup>
<b>Picnómetro 1</b>	19,9774	45,8234	25,8460	1,0338
<b>Picnómetro 2</b>	19,8885	45,1007	25,2122	1,0085
<b>Picnómetro 3</b>	19,9772	45,5170	25,5398	1,0216

**Tabla 6.** Elaboración de los valores de densidad del lodo.

$\bar{\rho}_l$	Ec. 2.2	1021,31	<b>Nivel de confianza</b>
<b>S</b>	Ec. 2.5	12,68	
<b>t</b>		4,303	95%
<b>LTmáx.</b>	Ec. 2.3	1075,86	
<b>LTmín.</b>	Ec. 2.4	966,75	

**ANEXO 10**

**Tabla 7.** Resultados de las pruebas de velocidad de sedimentación.

T, min	T, h	Prueba 1, Z1	Prueba 2, Z2	Prueba 3, Z3	Promedio de Z	Rango de normalidad de Z al 95% de confianza	
0	0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
2	0,03	25,9	27,0	26,6	26,5	24,1	28,9
4	0,07	23,2	23,1	23,2	23,2	23,0	23,4
6	0,10	18,8	18,9	19	18,9	18,5	19,3
8	0,13	15,6	15,8	15,6	15,7	15,2	16,2
10	0,17	12,4	12,2	11,5	12,0	10,0	14,0
20	0,33	7,0	7,8	7,5	7,4	5,7	9,1
30	0,50	5,9	6,5	6,5	6,3	4,8	7,8
40	0,67	5,4	5,9	5,7	5,7	4,6	6,8
50	0,83	5,1	5,6	5,4	5,4	4,3	6,5
60	1,00	4,8	5,3	5,1	5,1	4,0	6,2
70	1,17	4,5	5,1	4,9	4,8	3,5	6,1
80	1,33	4,3	4,9	4,8	4,6	3,2	6,0
90	1,50	4,2	4,6	4,5	4,5	3,6	5,4
100	1,67	4,0	4,5	4,4	4,3	3,2	5,4
110	1,83	3,9	4,4	4,3	4,2	3,1	5,3
120	2,00	3,8	4,3	4,1	4,1	3,0	5,2
130	2,17	3,7	4,1	4,1	4,0	3,0	5,0
140	2,33	3,7	4,1	4,0	3,9	3,0	4,8
150	2,50	3,5	4,0	3,9	3,8	2,7	4,9
160	2,67	3,5	3,9	3,8	3,7	2,8	4,6
170	2,83	3,4	3,8	3,7	3,6	2,7	4,5
180	3,00	3,4	3,8	3,7	3,6	2,7	4,5

## ANEXO 11

**Tabla 8.** Velocidades que caracterizan al lodo.

Velocidad, m/s	$w_{sed.}$ , m/s	$w'$ , m/s
0,000	2,63*10 <sup>-4</sup>	3,583*10 <sup>-6</sup>
0,045		
0,090		
0,135		
0,181		
0,226		
0,271		
0,316		
0,339		
0,361		
0,406		
0,451		

## ANEXO 12

**Tabla 9.** Presentación de los resultados.

	$\Delta P$ ( kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ ( Pa )	V ( cm <sup>3</sup> )	V ( m <sup>3</sup> )	t ( s )	Q ( m <sup>3</sup> / s )	u ( m/s )	$\frac{D \cdot \Delta P}{4L}$ ( Pa )	$\frac{8 \cdot u}{D}$ ( s <sup>-1</sup> )
1.	1,05	1,03E+05	430	4,30E-04	6	7,17E-05	2,536	77,23	3380
2.	1,05	1,03E+05	430	4,30E-04	8	5,38E-05	1,902	77,23	2540
3.	1,15	1,12E+05	500	5,00E-04	8	6,25E-05	2,212	84,21	2950
4.	1,26	1,24E+05	500	5,00E-04	10	5,00E-05	1,769	92,67	2360
5.	1,33	1,30E+05	530	5,30E-04	9	5,89E-05	2,084	97,45	2780
6.	1,33	1,30E+05	490	4,90E-04	8	6,13E-05	2,167	97,82	2890
7.	1,37	1,34E+05	520	5,20E-04	8	6,50E-05	2,300	100,40	3070
8.	1,39	1,36E+05	500	5,00E-04	9	5,56E-05	1,966	101,87	2620
9.	1,43	1,40E+05	480	4,80E-04	8	6,00E-05	2,123	104,81	2830

**Tabla 10.** Presentación y tratamiento de los resultados.

$\frac{D \cdot \Delta P}{4L}$ ( Pa )	Rango de normalidad para $\tau$ , al 95 % de confianza	$\frac{8 \cdot u}{D}$ ( s <sup>-1</sup> )	Rango de normalidad para $\delta^o$ , al 95 % de confianza
77,23	62,22 - 96,90	3381,30	1149,24 - 4764,10
77,23		2536,0	
84,21		2948,80	
92,67	83,62 - 108,34	2359,0	1473,11 - 3880,23
97,45		2778,40	
97,82		2889,80	
100,40	92,70 - 112,02	3066,80	1871,11 - 3808,89
101,87		2621,20	
104,81		2830,90	

**ANEXO 13****Tabla 11.** Resultados del comportamiento de la concentración.

<b>Z, cm</b>	<b>t,h</b>	<b>(Z-Zinf)/(Z0-Zinf)</b>	<b>Zi, cm</b>	<b>U, cm/h</b>	<b>C', g/cm<sup>3</sup></b>
27	0	1,000	27,00	-	0,0410
26,5	0,03	0,981	27,00	16,667	0,0410
23,2	0,07	0,859	24,37	16,667	0,0454
18,9	0,1	0,700	20,57	16,667	0,0538
15,7	0,13	0,252	18,78	23,66	0,0590
12	0,17	0,444	16,02	23,66	0,0691
7,4	0,33	0,274	15,21	23,66	0,0728
6,3	0,5	0,233	7,48	2,35	0,1481
5,7	0,67	0,211	6,90	1,796	0,1604
5,4	0,83	0,200	6,89	1,796	0,1607
5,1	1	0,189	5,88	0,784	0,1881
4,8	1,17	0,178	5,72	0,784	0,1936
4,6	1,33	0,170	5,64	0,784	0,1962
4,5	1,5	0,167	5,54	0,69	0,2000
4,3	1,67	0,159	5,45	0,69	0,2030
4,2	1,83	0,156	5,21	0,55	0,2126
4,1	2	0,152	5,20	0,55	0,2129
4	2,17	0,148	5,19	0,55	0,2132
3,9	2,33	0,144	5,18	0,55	0,2136
3,8	2,5	0,141	5,18	0,55	0,2139
3,7	2,67	0,137	5,17	0,55	0,2142
3,6	2,83	0,133	3,60	0	0,3075
3,6	3	0,133	3,60	0	0,3075

**Tabla 12.** Determinación de los valores de  $QC/A$ .

$1/C \cdot \text{cm}^3/\text{g}$	$(1/C) - (1/C_f)$	$\rho_{H_2O} \cdot \text{Kg}/\text{m}^3$	$\rho_s \cdot \text{Kg}/\text{m}^3$	$\rho_s / \rho_{H_2O}$	$(Q \cdot C/A),$ $\text{g}/\text{h} \cdot \text{cm}^2$	$(Q \cdot C/A),$ $\text{kg}/\text{h} \cdot \text{m}^2$
24,3902	21,0345	1,0000	1,9819	1,9819	-	
24,3903	21,0345	1,0000	1,9819	1,9819	4,00	39,98
22,0115	18,6558	1,0000	1,9819	1,9819	4,51	45,08
18,5788	15,2231	1,0000	1,9819	1,9819	5,52	55,24
16,9610	13,6053	1,0000	1,9819	1,9819	8,77	87,75
14,4735	11,1178	1,0000	1,9819	1,9819	10,74	107,38
13,7379	10,3821	1,0000	1,9819	1,9819	11,50	114,99
6,7525	3,3968	1,0000	1,9819	1,9819	3,49	34,91
6,2361	2,8804	1,0000	1,9819	1,9819	3,15	31,46
6,2246	2,8689	1,0000	1,9819	1,9819	3,16	31,59
5,3153	1,9596	1,0000	1,9819	1,9819	2,02	20,19
5,1647	1,8090	1,0000	1,9819	1,9819	2,19	21,87
5,0973	1,7416	1,0000	1,9819	1,9819	2,27	22,71
5,0000	1,6443	1,0000	1,9819	1,9819	2,12	21,17
4,9253	1,5696	1,0000	1,9819	1,9819	2,22	22,18
4,7033	1,3475	1,0000	1,9819	1,9819	2,06	20,59
4,6974	1,3417	1,0000	1,9819	1,9819	2,07	20,68
4,6915	1,3358	1,0000	1,9819	1,9819	2,08	20,77
4,6807	1,3250	1,0000	1,9819	1,9819	2,09	20,94
4,6748	1,3191	1,0000	1,9819	1,9819	2,10	21,04
4,6689	1,3132	1,0000	1,9819	1,9819	2,11	21,13
3,2520	-					
3,2520						

**Tabla 13.** Característica de la sección transversal y del accionamiento.

<b>Qo*Co, kg/h</b>	<b>As,m<sup>2</sup></b>	<b>D, m</b>	<b>K, N*M</b>	<b>Torque, N*M</b>
3075,00			75	-
3075,00	76,91	10	75	742
3075,00	68,22	9	75	699
3075,00	55,66	8	75	632
3075,00	35,04	7	75	501
3075,00	28,64	6	75	453
3075,00	26,74	6	75	438
3075,00	88,09	11	75	794
3075,00	97,74	11	75	837
3075,00	97,35	11	75	835
3075,00	152,32	14	75	1045
3075,00	140,62	13	75	1004
3075,00	135,38	13	75	985
3075,00	145,23	14	75	1020
3075,00	138,63	13	75	997
3075,00	149,32	14	75	1034
3075,00	148,67	14	75	1032
3075,00	148,02	14	75	1030
3075,00	146,81	14	75	1026
3075,00	146,16	14	75	1023
3075,00	145,51	14	75	1021

**Tabla 14.** Alturas del sedimentador.

X	tf, h	tc, h	VD, m <sup>3</sup>	Hd, m	HT, m
0,04	2,83	0,17	212,390	2,76	5
0,04	2,83	0,17	192,933	2,83	5
0,05	2,83	0,17	164,855	2,96	5
0,05	2,83	0,17	151,622	4,33	6
0,06	2,83	0,17	131,276	4,58	6
0,07	2,83	0,17	125,259	4,68	6
0,12	2,83	0,17	68,122	0,77	3
0,13	2,83	0,17	63,898	0,65	2
0,13	2,83	0,17	63,804	0,66	2
0,15	2,83	0,17	56,366	0,37	2
0,15	2,83	0,17	55,134	0,39	2
0,15	2,83	0,17	54,583	0,40	2
0,15	2,83	0,17	53,787	0,37	2
0,16	2,83	0,17	53,176	0,38	2
0,16	2,83	0,17	51,360	0,34	2
0,16	2,83	0,17	51,312	0,35	2
0,16	2,83	0,17	51,264	0,35	2
0,16	2,83	0,17	51,175	0,35	2
0,16	2,83	0,17	51,127	0,35	2
0,16	2,83	0,17	51,079	0,35	2

**Tabla 15.** Especificaciones de la sección transversal, la altura y torque requerido.

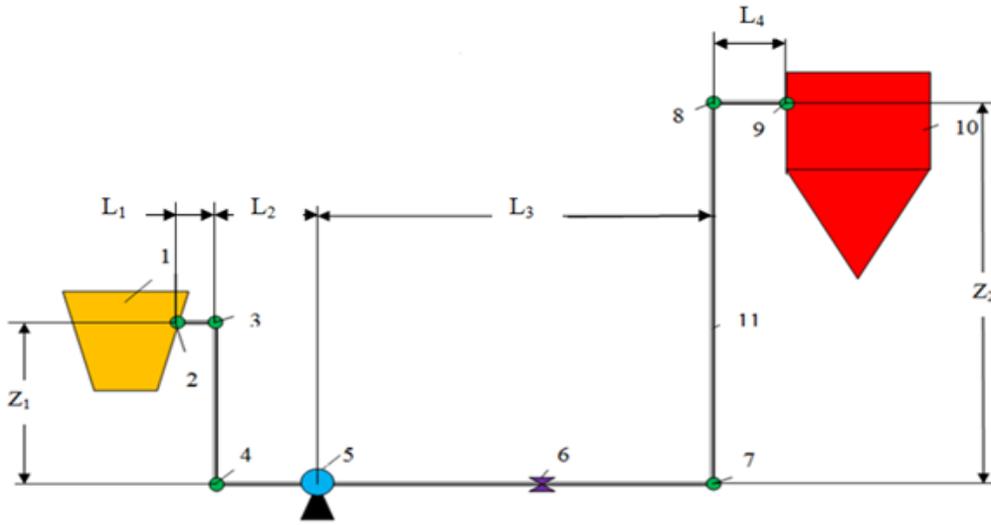
<b>As,m<sup>2</sup></b>	<b>D, m</b>	<b>HT, m</b>	<b>Torque, N*M</b>
76,91	10	5	742
68,22	9	5	699
55,66	8	5	632
<b>35,04</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>501</b>
28,64	6	6	453
26,74	6	6	438
88,09	11	3	794
97,74	11	2	837
97,35	11	2	835
152,32	14	2	1045
140,62	13	2	1004
135,38	13	2	985
145,23	14	2	1020
138,63	13	2	997
149,32	14	2	1034
148,67	14	2	1032
148,02	14	2	1030
146,81	14	2	1026
146,16	14	2	1023
145,51	14	2	1021



Figura 7. Sedimentador propuesto.

## ANEXO 15

### Tramo 1: Sin fin lavador – sedimentador.



**Figura 8.** Esquema de la instalación.

Donde:

1- Caja del sin fin lavador.

2- Orificio de salida del lodo.

3, 4, 7 y 8- Codos.

5- Bomba centrífuga.

6- Válvula.

9- Orificio de entrada del lodo al sedimentador.

10- Sedimentador.

11- Tubos.

$Z_1$ - Altura del orificio de salida del lodo con relación al eje de la bomba.

$Z_2$ - Altura del orificio de entrada del lodo al sedimentador con relación al eje de la bomba.

$L_1$  - Distancia entre el orificio de salida del lodo al eje del codo 3.

$L_2$ - Distancia entre el eje del codo 3 y el eje de la bomba.

$L_3$ - Distancia entre el eje de la bomba y el codo 7.

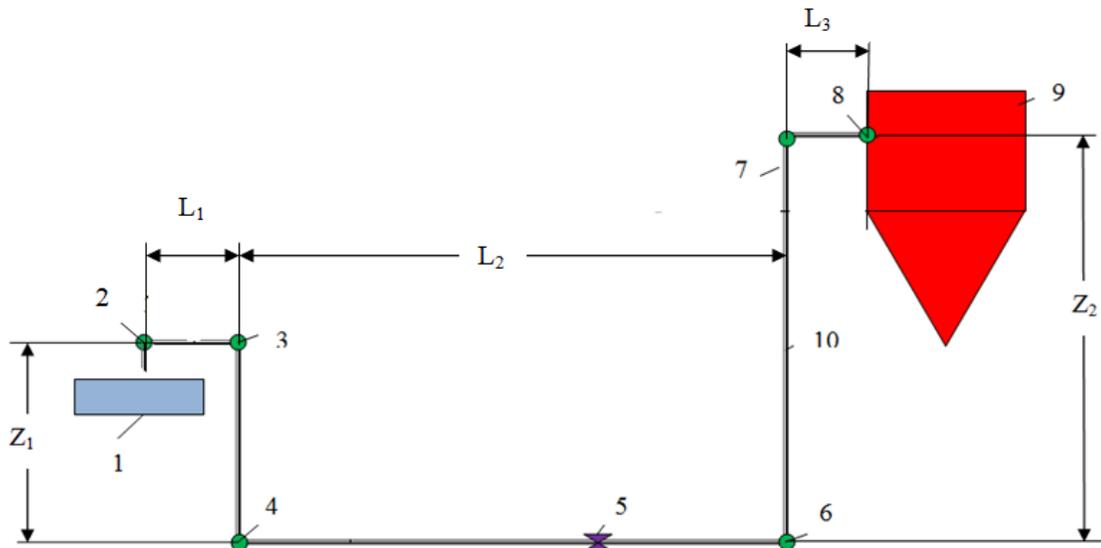
$L_4$ - Distancia entre el eje del codo 7 y el orificio de entrada del lodo.

**Tabla 16.** Datos de la instalación, tramo 1.

Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad de medida
Gasto de lodo.	$Q_0$	75	$m^3/h$
Diámetro de la tubería.	D	0,28	m
Altura de succión.	$Z_1$	1,95	m
Altura de la descarga.	$Z_2$	9	m
Longitud	$L_1$	1	m
Longitud	$L_2$	2	m
Longitud	$L_3$	9	m
Longitud	$L_4$	2	m
Coeficiente de pérdida local en los codos $90^\circ$ .	$\zeta_{Codo}$	1	---
Coeficiente de pérdida local en la válvula de bola.	$\zeta_{Válvula}$	0,08	---
Coeficiente de pérdida por local estrechamiento brusco.	$\zeta_{Estrechamiento}$	0,5	---
Coeficiente de pérdida local por ensanchamiento brusco.	$\zeta_{Ensanchamiento}$	1	---

## ANEXO 16.

### Tramo 2: Sedimentador – criba.



**Figura 9.** Esquema de la instalación.

Donde:

Donde:

1- Criba.

2, 3, 4, 6 y 7- Codos.

5- Válvula.

8- Orificio de salida del agua del sedimentador.

9- Sedimentador.

10- Tubos.

$Z_1$ - Altura de la criba respecto al nivel de referencia.

$Z_2$ - Altura del orificio de salida del agua del sedimentador respecto al nivel de referencia.

$L_1$ - Distancia entre centro de la criba y el codo 3.

$L_2$ - Distancia entre el codo 3 y el codo 6.

$L_3$ - Distancia entre el codo 7 y el orificio de salida del agua.

**Tabla 17.** Datos de la instalación, tramo 2.

Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad de medida
Gasto de lodo.	$Q_0$	64,68	$m^3/h$
Diámetro de la tubería.	D	0,28	m
Altura en criba	$Z_1$	5	m
Altura en el sedimentador	$Z_2$	9	m
Distancia	$L_1$	3	m
Distancia	$L_2$	11	m
Distancia	$L_3$	4	m
Coeficiente de pérdida local en los codos $90^\circ$ .	$\zeta_{Codo}$	1	---
Coeficiente de pérdida local en la válvula de bola.	$\zeta_{Válvula}$	0,08	---
Coeficiente de pérdida por local estrechamiento brusco.	$\zeta_{Estrechamiento}$	0,5	---
Coeficiente de pérdida local por ensanchamiento brusco.	$\zeta_{Ensanchamiento}$	1	---

ANEXO 17

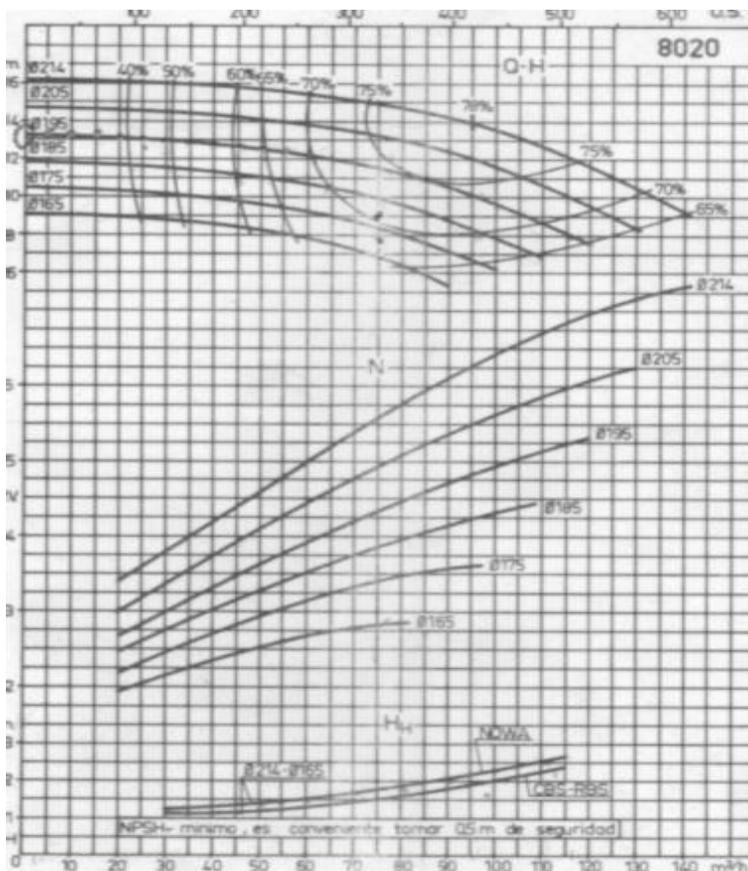


Figura 10. Curva característica de la bomba.

## ANEXO 18

**Tabla 18.** Parámetros relativos al cálculo referido a la cavitación.

Parámetros	Valor	Unidad de medida
Presión atmosférica en m cH <sub>2</sub> O	10,33	m
Altura geométrica de la succión	1,95	m
Altura equivalente	0,050	m
Número de revoluciones específicas	11,39	---
Coefficiente de rapidez(c )	600	--
Gasto de lodo	75	m <sup>3</sup> /h
Altura requerida en la succión(NPSHR)	1,9	m
Altura admisible(NPSHA)	11,45	m
Tensión de vapor del agua a 30 °C	0,432 46	m