



## Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo\*

**Esteban Abraham García Rodríguez**

Carrera: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se elaboró una propuesta de sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales. Para ello se realizó la determinación de las propiedades físicas y reológicas del lodo y de los parámetros de selección de un sedimentador que satisfaga los requisitos de la instalación. Los resultados obtenidos indicaron que existe la garantía de que no haya sedimentación del lodo en el tramo 1, puesto que la velocidad de transportación está en el orden de 0,339 m/s y la velocidad crítica estimada es de  $1,664 \cdot 10^{-4}$  m/s. Se seleccionó una bomba centrífuga serie 8020 de 1,88 kW; se estima que el costo de la inversión requerida para el establecimiento de un sedimentador 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.

**Palabras clave:** Aguas residuales; lavado de áridos; sedimentador.

---

\* Trabajo tutorado por el M. Sc. Benigno Leyva y el Dr. C. Héctor Luis Laurencio Alfonzo.  
Recibido: 18 febrero 2014 / Aceptado 15 septiembre 2014.

## **Sedimentation system for the recovery of residual waters resulting from washing aggregates in the UEB of Jobo**

**Abstract:** A proposal was prepared for the installation of a sedimentation system to recover the residual waters. It was required to identify the physical and rheological properties of the mud and the parameters for the selection of a thickener meeting the system requirements. The results indicated that there is a probability that the mud will not sediment in section one given that the transportation velocity is within the range of 0,339 m/s and the critical velocity is  $1,664 \cdot 10^{-4}$  m/s. A centrifugal pump 8020 series of 1,88 kW was selected. The capital cost of installation of a thickener is estimated to be 25 046,39 CUC, considering the purchase option of a YRQ-brand YONGLDA unit. It is thought that the implementation of the proposed sedimentation system will increase the availability of water required for the process and reduce the negative environmental effects.

**Key words:** Residual waters; aggregate washing; thickener.

## Introducción

Los Sistemas de Gestión de la Calidad se han convertido en el mundo globalizado de hoy en una necesidad insoslayable para permanecer en el mercado. 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 la pérdida de clientes que ha sufrido la Unidad Empresarial de Base (UEB) del Jobo de Sagua de Tánamo 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.

La UEB del Jobo requiere realizar una innovación tecnológica para aumentar su competitividad, puesto que en la misma se han evidenciado sedimentación del lodo residual en la evacuación, incrementando los costos por este concepto; interrupciones del proceso por déficit de agua; afectaciones ambientales por el proceso de lavado de áridos, pues el tubo de descarga del lodo no cumple plenamente las funciones asignadas por diseño e 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.

Leyva (2011) 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 todos 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) estableció el estado del arte relativo a los hidrociclones, estableció los elementos necesarios para la propuesta de un hidrociclón para la constructora del Jobo y consideró criterios económicos y ambientales, también determinó parámetros tecnológicos para la selección de una bomba Waerman 6/4.

De la revisión bibliográfica de los trabajos precedentes se determina que no se ha efectuado la propuesta de un sedimentador para la recuperación del agua que posee el lodo residual. Por ello este trabajo tiene como objetivo proponer un 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.

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 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 para el aseguramiento de la representatividad y objetividad en los resultados, el análisis de la granulometría, la densidad del sólido y del lodo, el cálculo del porcentaje de sólido, la obtención de la velocidad de sedimentación y del comportamiento reológico.

El método de correlación tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase en procesos físicos. Sin embargo, su precisión es adecuada si se utiliza dentro del intervalo de aplicación en el cual fue desarrollado.

### **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 criterios estadísticos.

### **Muestreo aleatorio simple**

Se utilizó el muestreo aleatorio simple aplicando las expresiones de cálculos recomendadas por Miller *et al.* (2005). Este muestreo se selecciona por el desconocimiento del tamaño total de la población y para asegurar la objetividad en los resultados que se obtengan. La cantidad de mediciones a realizar se determina tomando como referencia el siguiente modelo:

$$n = \left( Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ : Estadístico de la distribución normal, que se determina en tablas estadísticas

$\alpha$ : Nivel de significancia

$\sigma$ : Desviación típica poblacional, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro

E: Error máximo de estimación, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro

n: Tamaño mínimo de la muestra.

La expresión 1 permitió hallar el tamaño mínimo que debe tener la muestra para que los resultados sean representativos del proceso. Se debe lograr un balance adecuado entre representatividad, costo, y productividad para que el muestreo sea eficiente (Calero, 1976).

### **Análisis del muestreo**

Se realizaron tres repeticiones de las mediciones, desarrollando un muestreo aleatorio simple para la representatividad del mismo. Se definió una muestra lo más pequeña posible con la mayor representatividad. Para esto se fijó el tamaño de la muestra y se determinó 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 a 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 % con el propósito de evitar el encarecimiento de la investigación, ya que al utilizar un nivel de confianza superior al tamaño de la muestra implicaría el tener que realizar más ensayos.

### **Determinación de la granulometría**

Las muestras obtenidas no favorecen la aplicación de los procedimientos normalizados propuestos por Andreiev *et al.* (1980), puesto que poseen baja dureza y no se le conoce su composición química. Por tal motivo se efectuó la colada del lodo residual obtenido del proceso de lavado por el juego de tamiz seleccionado. Las muestras fueron tomadas en el proceso productivo continuo, a una misma hora, por lo que existe garantía de que formen parte de una misma carga.

Se realizaron 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 la Tabla 1.

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

En la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis granulométrico al realizar la colada del lodo residual por cada uno de los tamices. La colada se efectuó 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.

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

Abertura de los tamices, mm	Valores de la masa retenida, g	Rango de normalidad para m, al 95 % de confianza
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

La masa de la muestra que se utilizó en el análisis granulométrico se definió 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. En el lodo se pudieron detectar partículas con diámetros en el orden de los 0,3 mm. Se definió 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 (Martínez, 2009):

$$\%S = \frac{\rho_l - \rho_{H_2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \tag{2}$$

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.

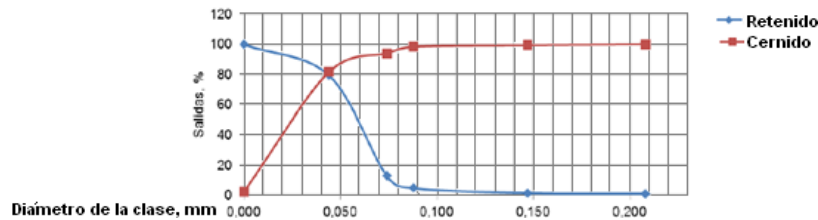


Figura 1. Curva de característica sumarias del lodo analizado.

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

### Determinación de la densidad del sólido, del lodo y del porcentaje de sólido

#### Densidad del sólido

En las Tablas 2 y 3 se relacionan los valores de la densidad del sólido obtenidos al aplicar el método del picnómetro. Los resultados indican que el proceso de medición se realizó bajo control estadístico, puesto que al replicar el experimento no se muestra diferencia significativa 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 g/cm<sup>3</sup> a 2,3739 g/cm<sup>3</sup>.

Tabla 2. Valores de densidad del sólido

		Muestra		
		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	$\rho_B = \frac{C-A}{B+C-A-D}$	2,0714	1,8893	1,9848
Densidad del sólido, g/cm <sup>3</sup>	$\rho_S = \rho_B \cdot \rho_{H_2O}$	2,0714	1,8893	1,9848

Tabla 3. Elaboración de los valores de la densidad del sólido

$\bar{\rho}_s$	Ecuación 4	1,9819	Nivel de confianza
S	Ecuación 7	0,0911	
t		4,303	95 %
LTmáx.	Ecuación 5	2,3739	
LTmín.	Ecuación 6	1,5899	

#### Densidad del lodo

Las Tablas 4 y 5 se relacionan los valores de la densidad del lodo obtenida al aplicar el método del picnómetro y la ecuación:  $\rho_l = \frac{m}{V}$  (3)

Los resultados indican que el proceso de medición estuvo bajo control estadístico, puesto que al repetir el experimento no se muestra diferencia significativa 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 g/cm<sup>3</sup> a 1 075,86 g/cm<sup>3</sup>.

Tabla 4. Valores de densidad del lodo

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

Tabla 5. Elaboración de los valores de densidad del lodo

$\bar{p}_i$	Ec. 4	1021,31	Nivel de confianza
S	Ec. 7	12,68	
t		4,303	95 %
LTmáx.	Ec. 5	1075,86	
LTmín.	Ec. 6	966,75	

### Determinación del porcentaje de sólido

La Tabla 6 muestra el valor obtenido del porcentaje de sólido que contiene el lodo residual. El cálculo se realizó aplicando la ecuación 2.

Tabla 6. Resultado del porcentaje de sólido

Densidad de la arcilla, kg/m <sup>3</sup>	1 981,9
Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup>	1 000
Densidad de la pulpa, kg/m <sup>3</sup>	1 021,31
%S	4

### Determinación de la velocidad de sedimentación del lodo

Se realizaron tres mediciones de la altura de la interface en cada tiempo considerado; Durante los primeros diez minutos se efectuaron las observaciones cada dos minutos para aumentar la precisión y luego se distancian las mediciones a diez minutos uniformemente. Se determinó el valor promedio de las alturas y se calculó el rango de normalidad para cada experimento, utilizando las ecuaciones de la 4 a la 7.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

$$LX, \text{máx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (5)$$

$$LX, \text{mín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7)$$



Los resultados indicaron que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, puesto que cuando se repite el experimento no se muestra diferencia significativa 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 (Figura 2) se elaboró a partir de los resultados de las pruebas de velocidad de sedimentación y muestra el comportamiento de la altura de la interface generada en el proceso de sedimentación del lodo.

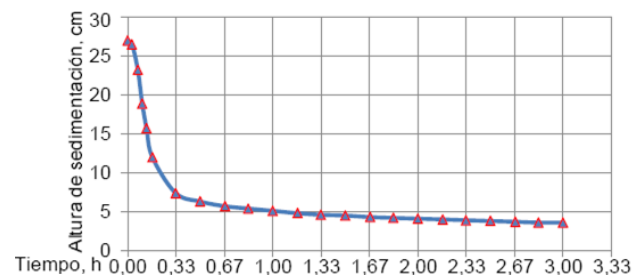


Figura 2. Curva de sedimentación del lodo.

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

La velocidad de sedimentación del lodo puede ser determinada a partir del ajuste a la curva de altura de la interface contra tiempo con un modelo lineal. 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 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.

$$Z = -5,63 \cdot t + 15,85 \quad (8)$$

Donde:

t: tiempo que se considera después de iniciado el proceso, h

Z: altura de la interface, cm.

Aplicando el criterio de la primera derivada a la ecuación 8 se obtiene la velocidad de sedimentación que caracteriza al lodo. 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; 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 indicó que la sección de la curva de la Figura 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:

$$Z = -94,57 \cdot t + 28,43 \quad (9)$$

El criterio de la primera derivada aplicado a la ecuación 9 permite obtener la velocidad de sedimentación que caracteriza al lodo 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 9, 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:

$$Z = -1,29 \cdot t + 6,71 \tag{10}$$

**Verificación de la sedimentación durante el transporte**

En la Tabla 7 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.

Tabla 7. Velocidades que caracterizan al lodo

Velocidad, m/s	Wsed., 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		

Los valores indicados se determinaron en correspondencia con las expresiones 11 y 12.

$$V_{crit} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w} \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[5]{S} \tag{11}$$

Donde:

g- aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

D- diámetro de la tubería, m

W – grosor hidráulico, m/s

ρ<sub>s</sub> – densidad del sólido, kg/m<sup>3</sup>

S – concentración de peso en sólido, adimensional

K<sub>d</sub>- coeficiente empírico corregido, que depende de la granulometría

V<sub>crit</sub> Velocidad critica de transportación, m/s.

$$v_m = \frac{Q}{A} \tag{12}$$

Donde

Q: es el gasto que fluye a través de la tubería, m<sup>3</sup>/s

A: es el área de la sección transversal del conducto, m<sup>2</sup>

v<sub>m</sub>: es la velocidad media de transportación, m/s.

La velocidad crítica calculada, según la ecuación 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 transportación se escogió un valor de Kd igual a 0,15, extrapolando a partir de los valores contenidos en la Tabla 8, ya que el alcance de lo referido en la tabla está limitado.

Tabla 8. Coeficiente empírico, que depende de la granulometría del material (dcp)

dcp(mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
Kd	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,83	0,77	0,73	0,74

### Determinación del comportamiento reológico del lodo

La Tabla 9 presenta los resultados obtenidos de las pruebas para determinar el comportamiento reológico del lodo. 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 determinaron tres veces el tiempo que demora el ensayo, y el volumen de lodo depositado en la probeta; se efectuaron 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.

Tabla 9. Comportamiento reológico del lodo

	$\Delta P$ (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)	$\frac{\Delta P}{4L}$ (Pa)	$\frac{8u}{D}$ (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

Se determinó el valor promedio del esfuerzo de corte y del gradiente de viscosidad correspondiente a cada experimento diferente y se calculó el rango de normalidad para cada uno, utilizando las ecuaciones 4 a la 7. El análisis de la normalidad se efectuó 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.

Los resultados mostrados indican que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, puesto que cuando se replica el experimento no se muestra diferencia significativa entre los resultados obtenidos al nivel de confianza del 95 %. 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, 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.

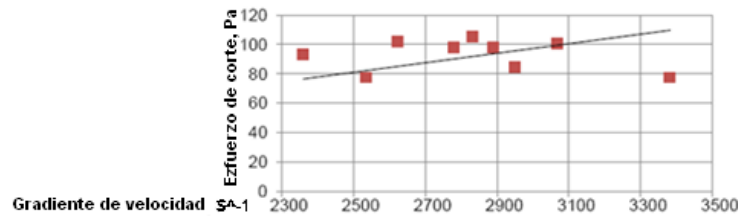


Figura 3. Curva de flujo del lodo.

En la Figura 3 se aprecia que el esfuerzo de corte del lodo 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, el de Ficher, y el de correlación. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la variable (1,17E-07), el de Ficher un valor de cálculo (305,46) mayor que el Ficher 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 (Tabla 10).

Tabla 10. Modelo reológico del lodo

Modelo general para fluido newtoniano	Modelo particular para el lodo
$\tau_{xy} = \mu \left( -\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$	$\tau_{xy} = 0,0324 \cdot \left( -\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$

Donde:

$\tau_{xy}$ : esfuerzo de corte, en Pa

$\frac{\partial v_x}{\partial y}$ : gradiente de velocidad, en s.

El lodo residual 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, es entonces de 0,0324 Pa.

### Selección del sedimentador

La Tabla 11 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. Los parámetros se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos iniciales

Gasto de lodo(Q0),m <sup>3</sup> /h	75
Concentración inicial del lodo(C0), g/l	41,00
Densidad del sólido, kg/m <sup>3</sup>	1 981,90
Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup>	1 000,00
Concentración final del lodo (Cf), g/l	298,00
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 13 y 14.

$$\frac{Q \cdot C}{A} = \frac{u}{\left[\frac{1}{C} + \frac{1}{C_f}\right] \frac{\rho_{psm}}{\rho}} \quad (13)$$

Donde:

$u = Q_r/A$ : Velocidad de ascenso del líquido que debe ser igual a la velocidad de sedimentación  
 $\rho_{psm} = (\rho_{so} + \rho_{sf})/2$ : 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.

$$A_{\min} = \frac{Q_0 \cdot C}{\left(\frac{Q \cdot C}{A}\right)_{\min}} \quad (14)$$

En la definición de la altura total del sedimentador se precisa la altura de inmersión del tubo de alimentación, la del cono de fondo y la 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.

A partir de las especificaciones técnicas se proponen los sedimentadores que poseen las características reflejadas en la Tabla 12.

Tabla 12. 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.

**Determinación de las alturas necesarias y disponibles**

La Figura 4 muestra el esquema de instalación que trasiega el lodo residual generado en la planta procesadora de árido, desde el sinfín lavador hasta el sedimentador propuesto.

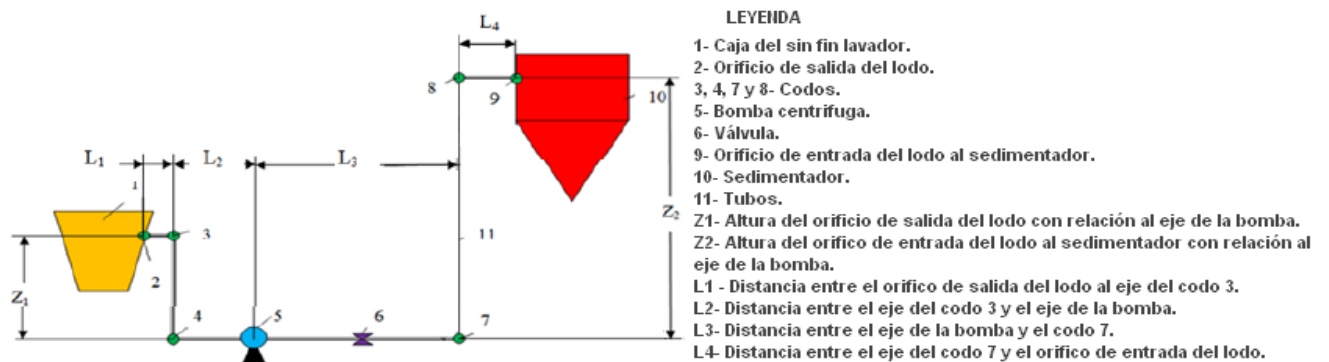


Figura 4. Esquema de la instalación del Tramo 1: Sinfín lavador-sedimentador.

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) y Martínez & Laurencio (2004).

**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 15, 16 y 17. 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 15, 16 y 17, se determinó 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 refirió los valores de 0,0169 m y 1,9331 m para la pérdida de altura y altura disponible, respectivamente.

$$H_{nec} = \frac{P_1}{\rho g} = \Delta z + \sum h = \Delta z + k \cdot Q^m \tag{15}$$

$$\sum h = \left( \sum \xi + \lambda t \cdot \frac{1}{d} \right) \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \tag{16}$$

$$k = \left( \sum \xi + \lambda t \cdot \frac{1}{d} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \text{ y } m = 2 \tag{17}$$

Los resultados 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 5; en la misma se observa la indicación de cada uno de los componentes que forma al tramo y las cotas de dimensiones fundamentales.

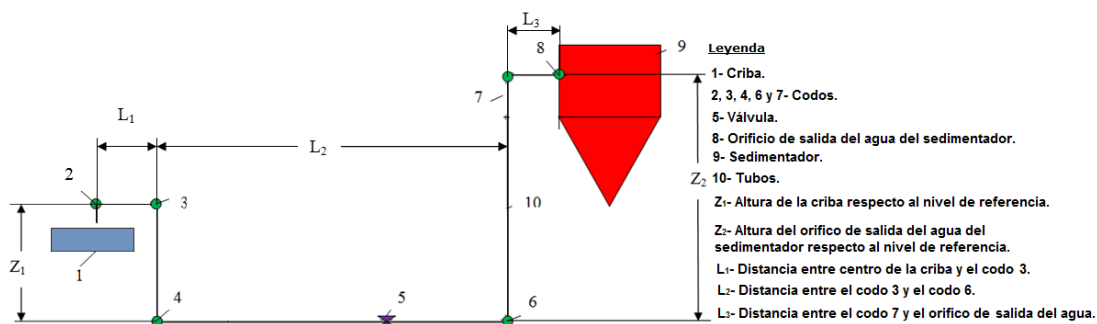


Figura 5. Esquema de la instalación.

En la Tabla 13 se muestran los datos vinculados al tramo, 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.

Tabla 13. Datos de la instalación, tramo 2

Parámetros	Nomenclatura	Valor
Gasto de lodo (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>0</sub>	64,68
Diámetro de la tubería (m)	D	0,28
Altura en criba (m)	Z <sub>1</sub>	5
Altura en el sedimentador (m)	Z <sub>2</sub>	9
Distancia (m)	L <sub>1</sub>	3
Distancia (m)	L <sub>2</sub>	11
Distancia (m)	L <sub>3</sub>	4
Coficiente de pérdida local en los codos 90°	$\zeta_{\text{Codo}}$	1
Coficiente de pérdida local en la válvula de bola	$\zeta_{\text{Válvula}}$	0,08
Coficiente de pérdida por local estrechamiento brusco	$\zeta_{\text{Estrechamiento}}$	0,5
Coficiente de pérdida local por ensanchamiento brusco	$\zeta_{\text{Ensanchamiento}}$	1

### Determinación del número de Reynolds

El número de Reynolds se calculó a partir de la ecuación 17, para el flujo de agua de 64,68 m<sup>3</sup>/h, y el diámetro de la tubería de 0,280 m 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 19.

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (18)$$

### 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 las ecuaciones 16, 17 y 18. Los resultados obtenidos refieren los valores de 0,0214 m y 5,0214 m para la pérdida de altura y altura necesaria, respectivamente. Mientras que para la altura disponible los valores de 0,0158 m y 8,9842 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 refieren que se dispone de la altura de carga suficiente para provocar el flujo de agua a gravedad.

### Selección de la bomba

El cálculo de la potencia necesaria para efectuar el flujo de lodo desde la caja del sinfín lavador hasta el sedimentador se efectúa considerando la ecuación 19. Para el gasto de 75 m<sup>3</sup>/h, la altura necesaria de 9,0275 m y un peso específico para el lodo de 10 021 kgf/m<sup>3</sup>, se obtiene que la potencia necesaria es de 1,88 kW. Este resultado conlleva a utilizar en el cálculo de la pérdida de carga la ecuación 16.

$$N_e = H_{nec} \cdot Q \cdot \rho_l \cdot g \quad (19)$$

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 %.

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, que puede ejecutarse 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 cumpliría bien variando el diámetro del rodete o el número de revoluciones.

### Variación de la característica de la bomba

Al aplicar la ecuación 20 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 1 290 rev/min.

$$H_{bc}(Q) = H_b(Q) \cdot \left(1 - k \cdot \frac{\rho_l - \rho_{agua}}{\rho_l}\right)^{0.88} \quad (20)$$

En la Figura 6 se muestra el nuevo régimen de operación.

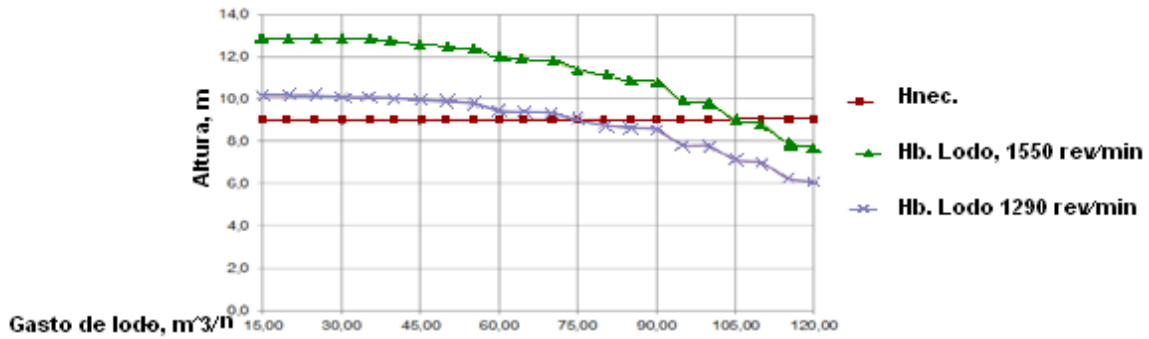


Figura 6. Curvas característica de la bomba y la red.

**Verificación de la cavitación**

La Tabla 7 muestra los resultados del cálculo realizado para verificar la condición referida al fenómeno de la cavitación.

Tabla 7. Parámetros relativos al cálculo referido a la cavitación

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

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.

**Conclusiones**

Se elabora 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, y la selección del sedimentador y la bomba.

Se analiza la sedimentación que caracteriza al lodo residual de la UEB del Jobo. Para un 4 % de sólido la velocidad de sedimentación, en la fase de caída libre, es de 94,57 cm/h (2,63\*10<sup>-4</sup> m/s), en la fase contrariada es de 1,29 cm/h (3,583\*10<sup>-6</sup>m/s) y la velocidad crítica de transportación estimada es de 1,664\*10<sup>-4</sup> 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 0,339 m/s.

El sistema de sedimentación para la recuperación del agua que contiene el lodo residual de la UEB se logra 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.

### Referencias bibliográficas

ANDREIEV, S. 1980: *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. Pueblo y Educación, La Habana.

CALERO, A. 1976: *Técnicas de muestreo*. Pueblo y Educación, La Habana, 506 p.

LEYVA, A. 2011: Estudio del diseño y mantenimiento de la criba horizontal balanceada CMD-107. Proyecto de curso. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

LAURENCIO, H. & MARTÍNEZ, R. 2004: *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. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

MARTÍNEZ, R. 2009: *Caracterización de las propiedades físico-mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tubería*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

MILLER, R.; JOHN, F. & RICHA, J. 2005: *Probabilidad y Estadística para Ingeniero*. Félix Varela, La Habana, p. 25-30.

NEKRASOV, B. 1986: *Hidráulica*. Pueblo y Educación, La Habana.

REGALADO, R. 2011: *Propuesta de hidrociclones para la constructora del Jobo de Sagua de Tánamo*. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

TURRO, A. 2002: *Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico.