

HIDROTRANSPORTE DEL MINERAL LATERÍTICO EN RÉGIMEN ESTRUCTURAL

HYDRAULIC TRANSPORT OF THE LATERITIC ORE FLOW IN STRUCTURAL REGIME

RAÚL IZQUIERDO PUPO

ALBERTO TURRO BREFF

ALEJANDRO NIKOLAEV

E-mail: rizquierdo@ismm.edu.cu

Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez

Instituto de Minas de San Petersburgo, Rusia

RESUMEN: El hidrotransporte de mezclas lateríticas en la empresa niquelera Moa Nickel - Pedro Sotto Alba, en Moa, se realiza mediante tuberías en flujos por gravedad y a presión. El objetivo de esta investigación es la determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido. Se modeló el hidrotransporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y de la hidromezcla, así como las características granulométricas del mineral, la velocidad de caída contrariada y las propiedades reológicas de la hidromezcla. Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (λ) y el número generalizado de Reynolds (Re^*).

Palabras clave: Viscoso-plásticos, hidrotransport, hidromezcla.

ABSTRACT: Hydrotransport of lateritic mixtures in Moa Nickel - Pedro Sotto Alba company of Moa is carried out, using graveness and pressure, by means of pipes. The objective of this research is to determine the type of movement that takes place when the hydromixture circulates at low speeds with high solid concentrations. The hydrotransport process was modelled in a semi-industrial installation, built for this purpose. Physical-mechanical properties of the mineral and the hydromixture were determined, as well as the granulometric characteristic of the mineral, the speed of settling no free and the reological properties of the hydromixture. The existence of the structural regime of movement for the hydromixture was demonstrated, what frames it inside the viscous-plastics fluids. It was also obtained, graphical and analytically, the relationship among the coefficient of hydraulic loss for friction (λ) and the generalized number of Reynolds (Re^*).

Key words: Viscous-plastic. Hydraulic transport. Slurries.

INTRODUCCIÓN

De las empresas cubanas que obtienen concentrados de níquel y cobalto a partir del mineral laterítico, la Empresa Moa Nickel- Pedro Sotto Alba es la única que aplica el hidrotransporte del mineral sin tratamiento previo. Con la ayuda del transporte hidráulico la hidromezcla, con una concentración de 25-30 % de sólido, se transporta por gravedad a una distancia mayor de 5 km. El tiempo en que la hidromezcla viaja por la tubería es de 40 - 45 minutos aproximadamente. La tubería está dividida en 53 tramos con pozos intermedios los cuales tienen la función de disminuir la velocidad del flujo y con ello la turbulencia, ¿pero realmente con esto se logra disminuir la turbulencia en la hidromezcla?

Como es conocido, el movimiento del agua y de otros líquidos más viscosos, como los aceites lubricantes, a

bajas velocidades transcurren en régimen laminar, lo cual se subordina a la ley de Newton, ecuación 1.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dr} \right) \quad (1)$$

donde:

τ : esfuerzo de resistencia al movimiento.

μ : coeficiente dinámico de viscosidad.

$\frac{dv}{dr} = \gamma$: gradiente de velocidad.

La corriente laminar es estrictamente ordenada, el líquido fluye por capas sin mezclarse, se describe por la ley de rozamiento de Newton y se determina completamente por ésta.

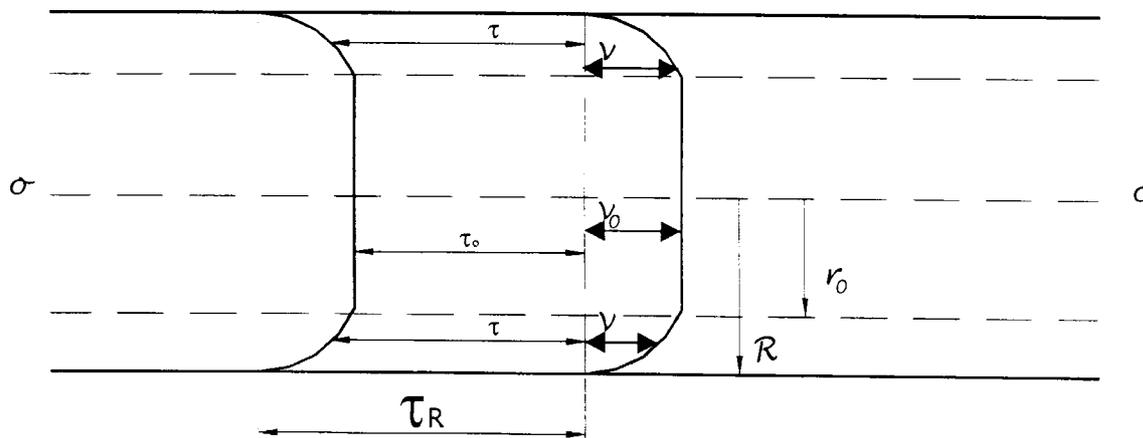


Figura 1. Esquema de distribución de la velocidad y la tensión en la sección transversal del flujo.

La distribución de la velocidad en la sección del conducto se describe mediante una parábola, ecuación 2.

$$V = V_{m\acute{a}x} \cdot [1 - (r/R)^2] \tag{2}$$

donde:

R : radio del tubo.

r : distancia medida a partir del eje de la tubería.

$V_{m\acute{a}x}$: velocidad máxima ($r = 0$).

Smoldriev (1980) e Izquierdo (1987) revelan que la presencia de grandes cantidades de partículas puede cambiar el régimen de flujo del líquido cuando ellas se mueven con velocidades prácticamente iguales a la velocidad del líquido, lo que disminuye la resistencia al movimiento. Durante el desplazamiento de la hidromezcla por la tubería, las partículas sólidas se trituran y se multiplican, aumentando la cantidad de pequeñas partículas suspensas en el medio.

La presencia de partículas sólidas en el flujo líquido, varía el cuadro de la distribución de las velocidades en la sección transversal de la tubería. Se conoce que la distribución de la velocidad en la sección del flujo, cuando se mueve un líquido homogéneo en un tubo circular horizontal, con una rugosidad uniforme, es simétrica para cualquier diámetro.

La distribución de la concentración de partículas sólidas por la sección transversal del flujo en la tubería se encuentra en relación directa con la distribución de la velocidad. Por esto, la distribución de la concentración del sólido en la sección del flujo de la hidromezcla tiene sus particularidades en función del tamaño hidráulico de las partículas, concentración de la hidromezcla y velocidad media del flujo.

Cuando en el flujo se desplazan sólo pequeñas partículas y la concentración es pequeña, las partículas se distribuyen por la sección del conducto, por lo que se presenta una estructura similar a la de un flujo de líquido homogéneo, y el eje geométrico prácticamente coincide

con el eje dinámico de la corriente.

Las hidromezclas con una concentración en masa superior a 25 - 30 %, formadas por partículas de pequeñas dimensiones, adquieren propiedades particulares. En la mezcla comienzan a revelarse propiedades viscoso-plásticas, y se forma una estructura sólida con el líquido.

Se ha demostrado de forma teórica y experimental la existencia en el flujo de agua de los regímenes: laminar, transitorio, turbulento. En el caso del flujo de hidromezclas se conocen los siguientes regímenes: estructural, transitorio, turbulento.

El estudio de la literatura sobre el hidrotransporte evidencia la ausencia de una teoría y un modelo único que explique la estructura del flujo de una pulpa viscoso-plástica. Esta investigación se realiza con el objetivo de obtener los parámetros que permitan diseñar y explotar, con un fundamento técnico y económico, las instalaciones de hidrotransporte del mineral laterítico.

TEORÍA DEL HIDROTRANSPORTE DE SUSPENSIONES ESTRUCTURALES

Para poner en movimiento la pulpa estructural es necesario vencer un esfuerzo inicial τ_0 , por esta razón no se cumple la ley de rozamiento de Newton. El modelo de Shvedov-Bingham, es el que más se aplica para describir las hidromezclas viscoso-plásticas, ecuación 3 (Pakroskaia, 1985).

$$\tau = \tau_0 + \eta (dv / dy) \tag{3}$$

Durante el movimiento uniforme de un líquido por un tubo, se cumple:

$$\tau = \frac{\Delta P}{2L} r \tag{4}$$

donde:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \text{ - caída de presión en la longitud } L.$$

Sustituyendo la ecuación 4 en 3, se obtiene:

$$\frac{\Delta P}{2L} r = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr} \tag{5}$$

donde:

$$d v = \frac{\Delta P}{2L\eta} r dr - \frac{\tau_0}{\eta} dr \tag{6}$$

Integrando en los límites desde r hasta R, obtendremos:

$$v = \frac{\Delta P}{4L\eta} (R^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\eta} (R - r) \tag{7}$$

Cuando r = r₀; v = v₀ obtenemos:

$$v_0 = \frac{\Delta P}{4L\eta} [R^2 - (r_0)^2] - \frac{\tau_0}{\eta} (R - r_0) \tag{8}$$

El flujo está compuesto de un núcleo con radio r₀, con igual velocidad por toda su sección v₀ y una capa adyacente a la pared con una velocidad v (ecuaciones 7 y 8, respectivamente) (Fig. 1).

El gasto está formado por la suma de los gastos del núcleo Q₀(v₀), más Q₁(v) para r > r₀.

$$Q = Q_0 + Q_1$$

$$Q = \pi (r_0)^2 v_0 + \int_{r_0}^R 2\pi r v dr \tag{9}$$

Sustituyendo las ecuaciones 7 y 8 en 9, e integrando, obtenemos la ecuación de Buckingham.

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta L} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_0}{\Delta P R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\Delta P R} \right)^3 \right] \tag{10}$$

La ecuación de Buckingham es difícil de resolver con relación a ΔP; por eso, de esta forma, se utiliza muy poco para los cálculos ingenieriles. Si se desprecia el tercer sumando no se provoca un error sustancial.

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta L} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_0}{\Delta P R} \right) \right] \tag{11}$$

La elaboración de los datos experimentales sobre el hidrot transporte con mezclas de carbón, arcilla, turba y otros materiales en tuberías con diámetros industriales demostró que para la determinación de las pérdidas hidráulicas se cumple la fórmula de Darcy-Weisbach, ecuación 12.

$$i = \frac{\Delta P}{L} = \lambda [(v^2) / (2D)] \rho \tag{12}$$

donde:

λ - coeficiente de resistencia hidráulica.

De la ecuación 11, después de algunas transformaciones, se obtiene la ecuación para la determinación del coeficiente de resistencia hidráulica:

$$\lambda = 64 / Re^* \tag{13}$$

donde:

Re* = Re' / [1+(I / N)] Criterio de Reynolds generalizado.

$$Re' = \frac{v D \rho}{\eta} \text{ Criterio de Reynolds} \tag{14}$$

$$I = [(\tau_0 / D) / (v \eta)] \text{ Criterio de Iliuchin} \tag{15}$$

El criterio de semejanza de Iliuchin tiene en cuenta la relación entre las fuerzas plásticas y viscosas.

La magnitud N es una constante que depende de la hidromezcla, la cual varía en el rango de 2 a 8 según reportan diferentes investigadores. Trainis (1970) obtuvo N = 8 para una hidromezcla de carbón.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

La investigación experimental se realizó en una instalación semindustrial diseñada y construida en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa conservando la semejanza con la instalación industrial. Se empleó mineral procedente del yacimiento Atlantic, zona sur (bloque L-2) y del frente de arranque D-34. Se realizaron 4 experimentos: las curvas de sedimentación de la pulpa, la velocidad de caída contrariada, el comportamiento reológico de la pulpa y el coeficiente de pérdida por rozamiento. Se determinó, además, la composición granulométrica del mineral laterítico. Para la determinación de la densidad del sólido se aplicó la metodología del picnómetro. Las pulpas se prepararon usando agua destilada y partículas minerales de granulometría menor a 0,833 mm. La investigación de la velocidad de caída contrariada se realizó en una probeta de 91 cm de 2 000 cm³ de capacidad. Se ensayaron pulpas con contenido de sólido en peso de 20, 25, 30, 40, 45 y 50 % respectivamente. Los parámetros reológicos de las pulpas lateríticas se determinaron en un viscosímetro rotatorio.

Los experimentos de hidrot transporte se realizaron con el mineral laterítico de granulometría -0,833 mm. Las hidromezclas se prepararon con el agua que se emplea en el propio proceso, respetando los valores de concentración de sólidos utilizados en la industria.

Aquí se aplican conocidos criterios de semejanzas. En el régimen estructural la presencia de una pulpa viscoso-plástica determinó el empleo de los criterios de Reynolds e Iliuchin.

La instalación utilizada en los ensayos experimentales es reportada en la literatura (Izquierdo, 1995 a y b). El esquema de la instalación se muestra en la figura 2, y consta de dos tanques: 1, para la calibración del tubo Venturi y 2, de recepción de la pulpa hidrot transportada; las bombas centrífugas 3 y 4, los puntos de toma de presión 5, el tubo Venturi 6, los tramos de tuberías 7, 8 y 9, para determinar las pérdidas hidráulicas; las tuberías 10 y 11, en ascenso y descenso respectivamente; el drenaje del sistema por la válvula 12, las válvulas de regulación 13, 14 y 15, y las ventanas del cristal 16 y 18 .

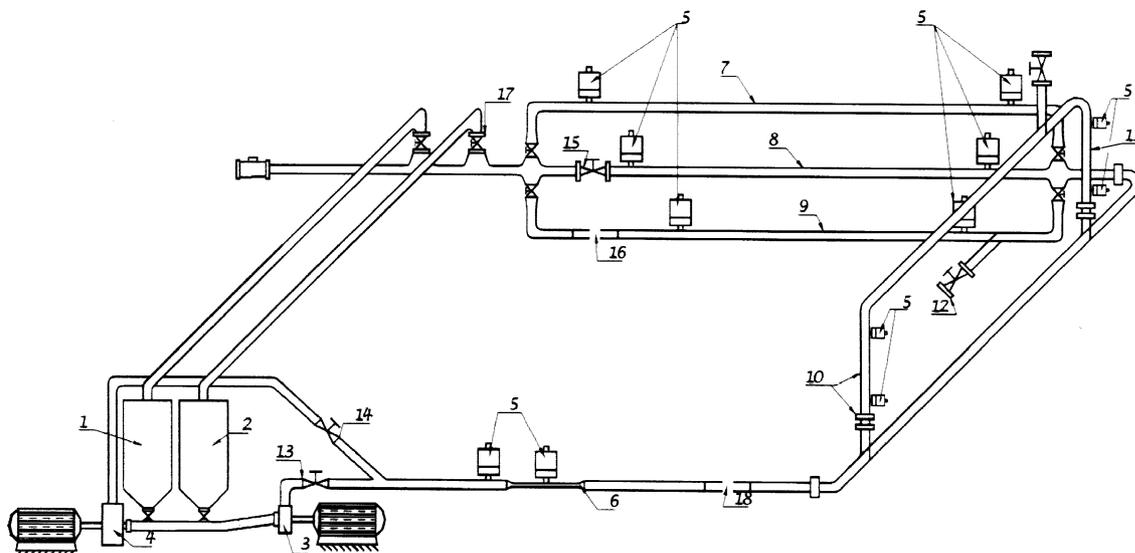


Figura 2. Esquema de la instalación de hidrotransporte para la modelación de flujos y ensayos de bombas.

Las tuberías 7, 8, 9, poseen los diámetros 50, 100, 150 mm y longitud 20, 14,5 y 10 m, respectivamente.

CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL LATERÍTICO

En los yacimientos lateríticos se distinguen cuatro zonas: la primera zona de 3-8 m de potencia media, constituye las rocas de destape; en la segunda se encuentra la laterita con una potencia media que oscila entre 5-15 m, la tercera y cuarta zonas las constituyen serpentinas y rocas del basamento.

El mineral es una mezcla de laterita de carácter terroso y serpentina parcialmente descompuesta y dura. El

mineral laterítico se presenta como una tierra suelta y en terrones, y el mineral serpentínico se presenta en toda la gama desde el material terroso hasta fracciones de rocas duras de diversos tamaños.

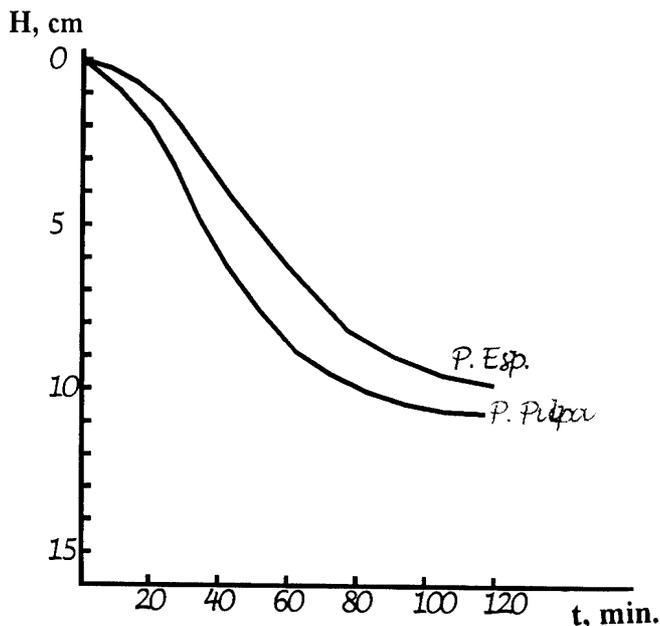
Rojas (1995) fundamenta que las fases portadoras de níquel son goethita y espinelas, y las no portadoras, hematita y gibbsita. El níquel se concentra en la goethita en un contenido promedio de 1,4 %, se concentra en la fracción (0,045 mm) y representa el 53 % del contenido en peso del material laterítico de color amarillo pardusco. Las espinelas poseen un contenido promedio de 1,29 % de Ni, se concentran en la fracción (-0,83 + 0,074 mm) y representan el 5,6 % del material laterítico de color pardo oscuro. La gibbsita y la hematita, fases no portadoras del Ni, se concentran en las fracciones (-0,833 + 0,074 mm) y (-0,074 + 0,045 mm), respectivamente.

La composición química del mineral sometido a ensayo es la siguiente: 1,2 % de Ni; 0,06 % de Co; 44,18 % de Fe y 0,5 % de Mg.

INFLUENCIA DEL HIDROTRANSPORTE EN LA SEDIMENTACIÓN DE PULPAS LATERÍTICAS

Es conocido que la agitación influye negativamente en la velocidad de sedimentación de la hidromezcla. En la figura 3 se muestra el resultado de la determinación de la velocidad de sedimentación de una muestra tomada a la salida de la planta de pulpa, antes de la hidrotransportación (P.Pulpa), y la otra a la entrada de la planta de espesadores, después del recorrido (P.Esp.). Es evidente que el proceso de hidrotransportación provoca una disminución de la velocidad de sedimentación y afecta el correcto funcionamiento de la planta de espesadores, cuyo objetivo es sedimentar la hidromezcla hasta obtener una pulpa con 45 - 48 % de sólido. Los datos estadísticos de la planta muestran una concentración máxima de 46 % promedio en el año 1990 y el más bajo de 43,22 %

Figura 3. Curva de sedimentación de la pulpa laterítica a la salida de la planta de preparación del mineral y a la entrada de la planta de espesadores.



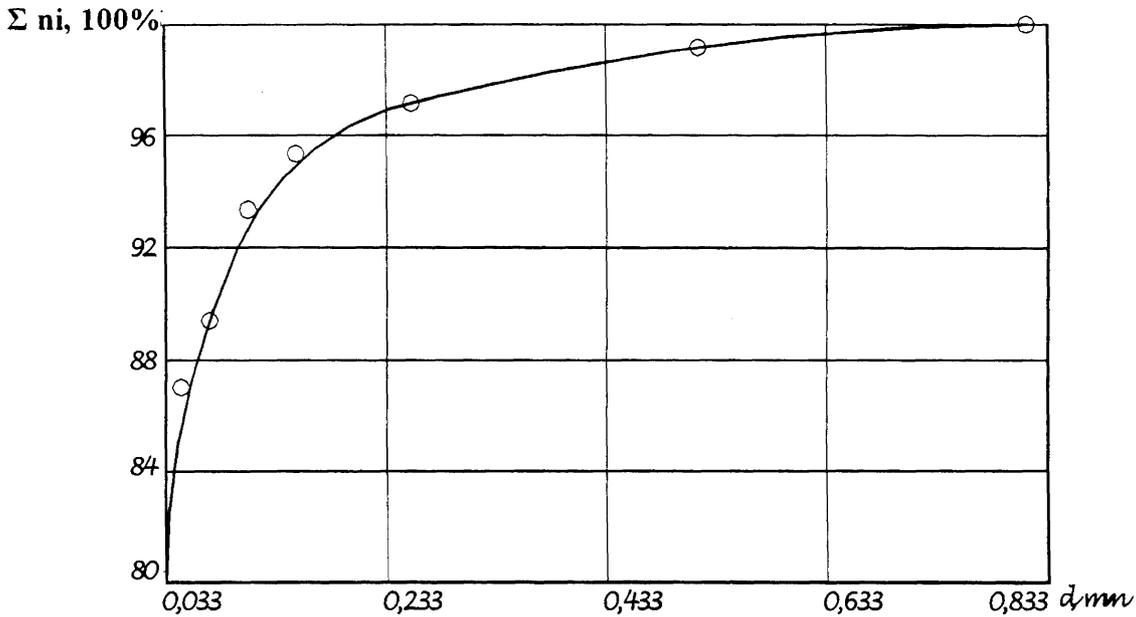


Figura 4. Composición granulométrica del material laterítico.

en 1968 (Beyris, 1997). Falcón (1983) plantea que la formación de pequeñas partículas durante el hidrot transporte provoca una disminución de la velocidad de sedimentación.

Las hidromezclas con una concentración en peso superior a 35 % de sólido pertenecen a los líquidos plásticos, o sea, no newtonianos; si la velocidad de la pulpa es menor de 1 m/s se observa el régimen estructural y a velocidades superiores se manifiesta el régimen turbulento. En los ensayos se observó que las partículas del mineral laterítico se mantienen en suspensión para las velocidades y concentraciones de las mezclas estudiadas. Además, las variaciones en las pendientes hidráulicas de las tuberías inclinadas y la horizontal son despreciables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físico-mecánicas del mineral y de la pulpa

Densidad y granulometría del mineral

La densidad media del sólido es de 3 334 kg/m³. El análisis granulométrico muestra que el 85 % del mineral tiene un tamaño menor de 0,044 mm y el 15 % restante está representado por impurezas, fundamentalmente de granallas de hierro con un tamaño de 3-6,5 mm y pequeñas cantidades de serpentinas (Fig. 4).

Velocidad de caída contrariada

Durante los ensayos para determinar la velocidad de caída libre (tamaño hidráulico) de las partículas, se observó que la sedimentación de éstas en un medio en reposo es suave y sin la presencia de torbellinos, lo que permite asegurar que su sedimentación en condiciones de reposo se efectúa en un régimen laminar. El número de Reynolds, calculado a partir del diámetro de las partículas, fue menor que 2.

En la figura 5, se muestran las curvas que representan la relación entre la altura (H) de descenso del sólido en el agua y el tiempo (t) en que se efectúa este proceso. A partir de la concentración de 30 % (curva 3), aparece una zona casi paralela al eje del tiempo, donde la sedimentación es casi nula en comparación con la etapa inicial de las curvas 1 y 2; el fenómeno observado se explica por la aparición de propiedades estructurales en la pulpa a partir de una concentración superior a 30 %.

Reología

La reología de las pulpas lateríticas es un tema muy discutido. Investigaciones realizadas en la Universidad de Santiago de Cuba, dirigidas por el Dr. Leonel Garcell (Garcell, 1991), en un viscosímetro capilar, muestran que la curva reológica de la pulpa laterítica se ajusta al modelo Bulkley-Herschel, o sea, se corresponde con un líquido plástico real, ecuación 16.

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \tag{16}$$

Donde:

- τ_0 - esfuerzo cortante inicial.
- k - índice de consistencia.
- n - índice de flujo.

El modelo de Bulkley-Herschel tiene la ventaja de describir la curva reológica completamente.

Los resultados del análisis reológico se muestran en la figura 6. El gradiente que se registró en el viscosímetro es pequeño: menor de 100 s⁻¹. La recta para un 30 % de sólido en peso se ajusta al modelo de Newton, mientras las restantes poseen una dependencia que se describe mediante el modelo de Shvedov-Bingham, ecuación 17.

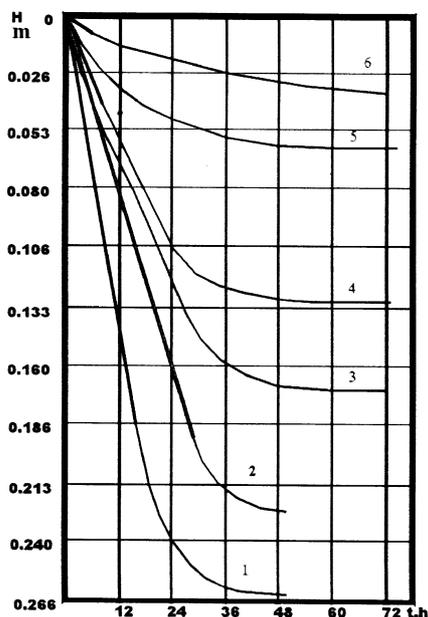


Figura 5. Velocidad de caída contrariada. Concentraciones: 1-20 %; 2-25 %; 3-30 %; 4-35 %; 5-40 %; 6-45 %. Temperatura 25°C

$$\begin{aligned}
 \tau &= 0,134\dot{\gamma} && \text{para } 30 \%. \\
 \tau &= 0,58 + 0,152\dot{\gamma} && \text{para } 35 \%. \\
 \tau &= 2 + 0,170\dot{\gamma} && \text{para } 40 \%. \\
 \tau &= 5,57 + 0,194\dot{\gamma} && \text{para } 45 \%.
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

En el estudio del movimiento de hidromezclas visco-plásticas en tubos, muchos investigadores han planteado la existencia de diferentes grados de rompimiento de la estructura. Smoldriev (1980) plantea que durante el

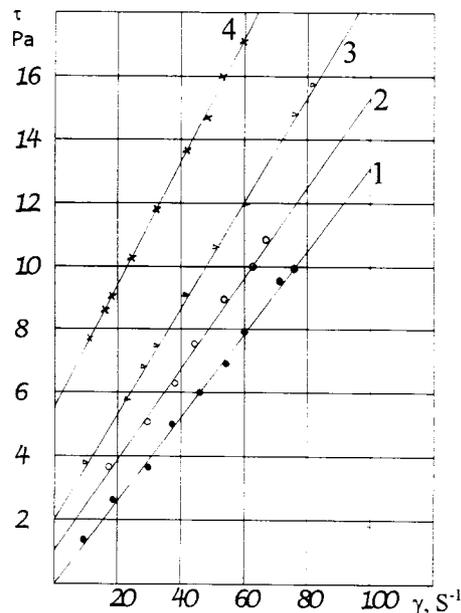
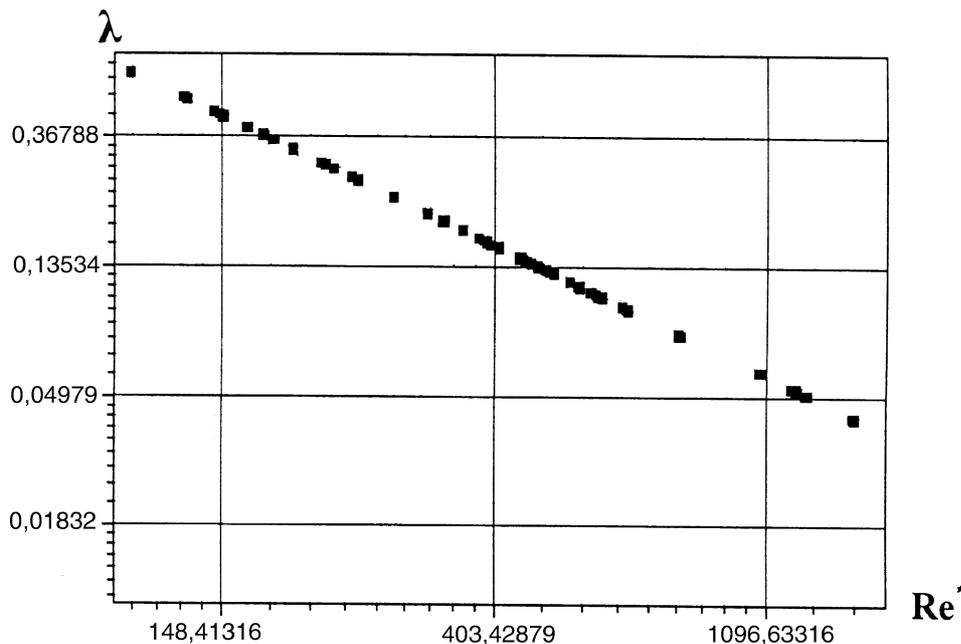


Figura 6. Comportamiento reológico de la pulpa laterítica a pequeños gradientes de velocidad: 1-30 %; 2-35 %; 3-40 %; 4-45 %.

movimiento de la mezcla agua-carbón se presentan tres regímenes de movimientos: régimen estructural a velocidades pequeñas; con el aumento de la velocidad aparece el régimen transitorio, y la aparición del régimen turbulento está condicionada por varios factores, y el más importante es el rompimiento de la estructura.

Diferentes autores (Chichenko, 1951; Smoldriev, 1980), durante el estudio experimental del flujo de materiales arcillosos y de construcción en tuberías de diferentes diámetros apreciaron los regímenes estructural y turbulento, todos coinciden en que el régimen estructural se describe

Figura 7. Dependencia del coeficiente de pérdidas por rozamiento contra número de Reynolds para el régimen estructural obtenido por vía experimental en pulpas lateríticas.



por el modelo de Shvedov-Bingham y se presenta a velocidades en el rango de 0 - 0,6 m/s.

Smoldriev (1980) y Smoldriev y Safonov (1989) muestra en qué medida la utilización del criterio generalizador de Reynolds (Re^*) es correcta para la determinación del coeficiente de pérdidas hidráulicas para diferentes regímenes de movimiento.

Los puntos experimentales para los regímenes estructural y transitorio para el mineral laterítico se ajustan perfectamente a la línea $\lambda = (64 / Re^*)$, lo que confirma la racionalidad de utilizar el criterio de Reynolds para la generalización de los datos experimentales (Fig. 7).

Experimentalmente, para el mineral laterítico se determinó un valor de $N = 2,3$. La investigación realizada aporta una metodología ingenieril para el cálculo de los parámetros de hidrotransporte de las hidromezclas con mineral laterítico en régimen estructural.

CONCLUSIONES

1. El régimen de movimiento de la hidromezcla laterítica es estructural, y atiende a las propiedades físico-mecánicas del mineral y de la hidromezcla.
2. La práctica demuestra la influencia desfavorable que ejerce en el proceso de sedimentación la agitación a que es sometida la hidromezcla.
3. Cuando la concentración de sólido en la hidromezcla es de 30 % en peso, la curva responde al modelo de Newton; para concentraciones superiores se manifiestan propiedades plásticas; estos comportamientos están expresados por el modelo de Shvedov-Bingham.

4. Las instalaciones de transporte en régimen estructural pueden ser calculadas y diseñadas a partir de la ecuación $\lambda = 64 / Re^*$

BIBLIOGRAFÍA

- BEYRIS, P. E.: "Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba", Tesis doctoral, Departamento de Metalurgia, ISMM, Moa, 1997.
- CHICHENKO, R.: *Hidráulica de las suspensiones de arcilla*, Nauka, Baku, 1951.
- FALCÓN, H. J.: "Consideraciones sobre la sedimentación de la pulpa limonítica en la planta Pedro Sotto Alba", *Minería y Geología* (2) :172-188, 1983.
- GARCELL, L.: "Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas", *Minería y Geología*, Edición Especial, 19-22, 1991.
- IZQUIERDO, R.: "Blianie parametrov hidrotransporta lateritov na proces azazdienia". *Pabishenia nadiestnosti raboty transporty sistem gornijk prietpriatii*, t. 110, pp. 98-100, Rusia, 1987.
- IZQUIERDO, R. Y A. NIKOLAEV: "Investigación de los parámetros y regímenes racionales de hidrotransporte de las pulpas lateríticas aplicables a las condiciones de explotación de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba", I parte, *Minería y Geología*. 12 (1):57-59, 1995 a.
- IZQUIERDO, R. Y R. PÉREZ: "Investigación de los parámetros y regímenes racionales de hidrotransporte de las pulpas lateríticas aplicables a las condiciones de explotación de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba", II parte, *Minería y Geología*, 12 (2):31-36, 1995 b.
- PAKROSKAIA, N.: *Transporte hidráulico en la industria minera*, Niedra, Moscú, 1985.
- ROJAS, A.: "Principales fases minerales portadoras del níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa", Tesis doctoral, Departamento de Geología, ISMM, Moa, 1995.
- SMOLDRIEV, E.: *Transporte hidráulico*, Niedra, Moscú, 1980.
- SMOLDRIEV, A. E. y Y. K. SAFONOV: "Transporte por tubería de hidromezclas concentradas", *Construcción de Maquinaria*, Moscú, 1989.
- TRAINIS, B.: *Parámetros y regímenes del transporte hidráulico de carbón por tubos*, Nauka, Moscú, 1970.