

Para obtener un criterio sobre la efectividad económica del proceso, se realizó un análisis económico, tomando como base la metodología seguida por la JUCEPLAN y el costo actualizado del equipamiento.

El valor del hemihidrato fue calculado según las demandas del país en 1991 y tomando los tipos de yeso a los cuales este sólido puede sustituir y el precio en el mercado mundial de los mismos en ese año, siendo necesario señalar que el costo obtenido está sujeto a modificaciones, pues no tiene en cuenta la transportación de gases de recuperación hasta la planta de producción de hemihidrato, el sistema de ciclones y el de transportación del sólido.

En todos los casos el flujo de la recuperación de la inversión es pequeño, por lo que las alternativas estudiadas se consideran efectivas.

CONCLUSIONES

Se llegó a las siguientes conclusiones a partir de los resultados obtenidos:

1. La fase predominante en el sólido es yeso, con un 75,48 % de pureza y un tamaño de partícula promedio de 110 mm, lo que lo hace tener características similares a la de los yacimientos existentes en el país.
2. La humedad predominante en el sólido es la ligada, no siendo recomendable el empleo de secadores solares por la gran área que ocuparían éstos.
3. La temperatura y el tiempo de calcinación óptimos son de 145 y 240 min respectivamente.
4. El yeso obtenido por vía química puede sustituir al yeso natural como yeso de construcción, de modelar y para la producción de tizas, entre otros, aumentando la resistencia a la flexión y a la compresión con el tiempo de envejecimiento.
5. La solución de azúcar al 1 % puede utilizarse como retardador de fraguado, no afectando las restantes propiedades físicas.
6. En el diseño del calcinador se obtuvieron las siguientes dimensiones: longitud 8,03 m y diámetro 2 m.
7. En el diseño del secador se obtuvo que la variante más económica, es aquella que utiliza los gases de

recuperación de la planta reformadora de hidrógeno con dimensiones de 8,72 m de largo y 2,5 m de diámetro.

8. Los resultados obtenidos a escala de laboratorio deben ser complementados a escala ampliada para definir los parámetros de diseño de la planta, así como, la diversificación del uso del yeso en diferentes industrias.

BIBLIOGRAFIA

- APLEYARD, F.: "Gypsum and anhidrite", *Construction materials*, diciembre, 1992.
- ARREDONDO, F.: *El yeso*, 7ma edición, Madrid, 1972.
- BALIDO, Z.: "Obtención de hemihidrato a partir del sólido, producto de la neutralización del licor WL", Trabajo de diploma, 1991.
- BERNIZ, L.: *Secador solar multipropósito CNE*, 1990.
- COLLEJA, J.: "El yeso como constituyente de los conglomerantes hidráulicos", I Coloquio Internacional sobre Obras Públicas en los terrenos yesíferos Voliv, 1ra edición, España, 1984.
- CHANG, A.: *Hornos metalúrgicos*, ISMM, Moa, 1986.
- FIGUEROA, D.: "Diseños de secadores rotatorios en contracorriente vía computacional", Trabajo de diploma, 1982.
- GUERRA, J.: *Introducción al análisis estadístico de procesos*, 2da edición, Ed. Pueblo y Educación, 1987.
- HERO, A.: *Trabajo del yeso manual del fermentador*, Ed. 0550, Barcelona, 1954.
- PERRY, R.: *Chemical Engineers Handbook*, Ed. Revolucionaria, 1972.
- KERIV, D.: *Proceso de transferencia de calor*, Ed. Revolucionaria, La Habana, 1988.
- MORERA, V.: "Determinación de los parámetros óptimos de trabajo de la planta procesadora de yeso marino", Trabajo de diploma, 1989.
- NC-54-330/85: *Características de los yesos*.
- NC-054-017/85: *Determinación de la resistencia a la flexión y compresión en yeso*.
- NOVOL, L.: *El yeso en la construcción*, 4ta edición, Ed. CEAC, Barcelona, 1970.
- ORIZAMOVISKI, S.: *Aplicación y desarrollo del yeso*, La Habana, 1966.
- PAVLOV, K.: *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en la industria química*, Ed. Mir, 1976.
- TREYBOL, R.: *Operaciones con transferencia de masa*, Ed. Revolucionaria, 1985.



INVESTIGACION DE LOS PARAMETROS Y REGIMENES RACIONALES DE HIDROTRANSPORTE DE LAS PULPAS LATERITICAS APLICABLES A LAS CONDICIONES DE EXPLOTACION DE LA EMPRESA COMANDANTE PEDRO SOTO ALBA (2da PARTE)

Dr. Raúl Izquierdo Pupo
Dr. Rafael Pérez Barreto

Departamento de Eléctromecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas, 83320, Moa, Holguín

RESUMEN

Se exponen los resultados de investigaciones realizadas sobre hidrot transporte de la pulpa laterítica, con el objetivo de obtener los parámetros de diseño y explotación adecuados en la empresa Comandante Pedro Soto Alba. Se obtienen las expresiones de cálculo para las pérdidas hidráulicas en los regímenes estructural y turbulento en tuberías de dimensiones industriales y se plantea el algoritmo de cálculo de los parámetros de la instalación.

ABSTRACT:

The results of the investigation carried out about lateritic pulp hydrotransporting is exposed in order to obtain the adequated parameters of desing and exploitation in Pedro Soto Alba nickel plant. The mathematical expressions of hydraulic losses in the structural and turbulent regimes in industrial pipelines are obtained as well as the algorithm of calculus of the instalation parameters.

Las reservas de mineral laterítico del yacimiento Moa Occidental se agotará alrededor del

año 2000; el nuevo yacimiento que se planifica para explotación se encuentra a 65 m de la planta de espesadores donde se suministra la pulpa preparada.

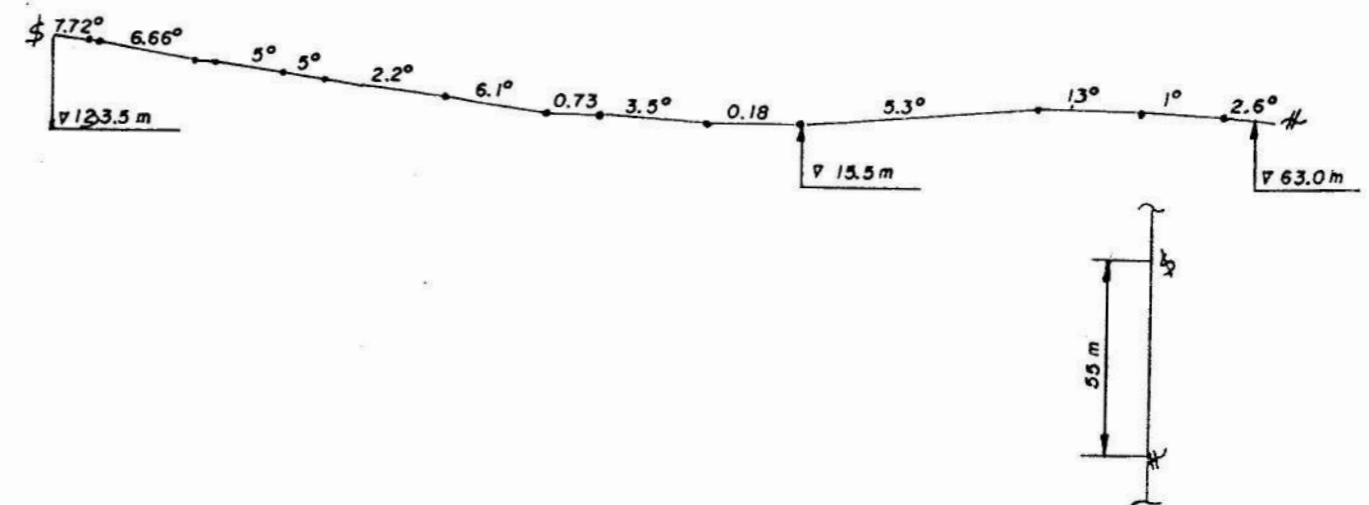


FIGURA 1. Esquema para el proyecto de hidrot transporte, Moa Oriental

En la Figura se muestra el esquema de la línea conductora para hidrot transportar el mineral procedente del nuevo yacimiento, donde se aprecia que después de un descenso hasta el nivel 15,5 m, la tubería

tiene que ascender hasta el nivel 63 m. De tal forma, el hidrot transporte por gravedad sólo es posible a presión, aprovechando la diferencia de nivel entre los puntos final e inicial.

Con el objetivo de determinar los parámetros de transporte de la hidromezcla y la elaboración de recomendaciones prácticas para la explotación y diseño de instalaciones con pulpas lateríticas, se diseñó y construyó la instalación semi-industrial (ver la Figura 2).

De acuerdo con los parámetros de las instalaciones para pulpas lateríticas, son de interés en la industria los regímenes de flujo estructural y turbulento. En el régimen estructural la viscosidad tiene un papel fundamental y para la generalización de los datos experimentales son aplicables los criterios de semejanza:

Criterio de semejanza de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho_m}{\eta} \quad (1)$$

Criterio de Iluchina:

$$I = \frac{\tau_o \cdot D}{\eta v} \quad (2)$$

donde:

- v: velocidad del flujo;
- D: diámetro de la tubería;
- ρ_m : densidad de la hidromezcla;
- η : viscosidad de la pulpa estructural;
- τ_o : esfuerzo cortante inicial.

Las fuerzas de viscosidad en el régimen turbulento tiene un significado secundario y en calidad de criterio de semejanza se utiliza el complejo adimensional:

$$\pi = \frac{i}{\rho g l} \quad (3)$$

donde:

- i: pérdidas específicas de energía hidráulica;
- l: longitud de la tubería;
- g: aceleración gravitacional.

La mayoría de los investigadores (B.B. Filatov et al.) aplican, para el cálculo de los parámetros del flujo de la hidromezcla en tubos con régimen estructural, la expresión simplificada de Bukingan:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 l \eta} \left[1 - 4/3 \frac{2 l \tau_o}{R \Delta p} \right] \quad (4)$$

donde:

- R: radio de la tubería;
- ΔP : diferencia de presión.

Después de algunas transformaciones de la ecuación (4), Z. Lantinov y B.V. Filatov obtuvieron la siguiente expresión para la determinación del coeficiente de resistencia hidráulica:

$$\lambda = \frac{64 (1 + \frac{l}{N})}{Re} \quad (5)$$

donde:

- N: es una magnitud que depende del material hidrotransportado y se determina de forma experimental.

Las pérdidas de energía hidráulica del flujo con partículas suspensas en régimen turbulento, se determinan por la expresión:

$$i = i_o (1 + ack) \quad (6)$$

donde:

- i: pérdidas específicas de energía hidráulica;
- a = $\frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o}$: densidad relativa del sólido;
- c = $\frac{\rho_m - \rho_o}{\rho_s - \rho_o}$: concentración volumétrica;
- ρ_o : densidad del agua;
- ρ_s : densidad del sólido;
- ρ_m : densidad de la pulpa.
- k: constante que depende del tipo de material hidrotransportado.

Durante el flujo de la hidromezcla por una tubería inclinada el ángulo de inclinación de la tubería interviene en las pérdidas hidráulicas:

$$i_t = i \pm (i - i_o) \cos \alpha \quad (7)$$

donde:

- α : ángulo de inclinación de la tubería.

Si el flujo es en ascenso, se produce un incremento de la pérdida de energía, $(i - i_o) \cos \alpha$. Esta magnitud se resta si el flujo es en descenso.

Las investigaciones se llevaron a cabo en una instalación semi-industrial construida en el Instituto Superior Metalúrgico (ver Figura 2).

La instalación consta de los tanques 1 y 2 para la calibración del tubo venturi y para la recepción de la pulpa hidrotransportada respectivamente; la bomba centrífuga 3 y 4; los puntos de toma de presión 5; el tubo venturi 6; los tramos de tubería 7, 8 y 9 para determinar las pérdidas hidráulicas; la tubería 10 y 11 en descenso y ascenso respectivamente; el drenaje del sistema por la válvula 12; las válvulas de regulación 13 y 14, piezas para variar el ángulo de inclinación 15; y la ventana de cristal 16.

Las tuberías 7, 8 y 9 poseen diámetros de 50, 100 y 150 mm y longitud de 20, 14,5 y 10 m respectivamente. Los puntos para medir la presión 5, se encuentran alejados de los extremos de la tubería a distancia igual o mayor a 40 D, para evitar la influencia de las perturbaciones más cercanas (codos, ventanas de cristal, etc.). El punto de observación del flujo de la pulpa (ventana de cristal) se encuentra situado a 5,5 m del tubo venturi.

El tanque 1 posee un volumen de 1,9 m³ y el tanque 2 de 2,9 m³, la bomba 3 tiene una productividad de 160 m³/h y la bomba 4 de 60 m³/h. Para los experimentos la instalación trabaja en circuito semicerrado (succión, impulsión, tanque); la limpieza se logra con el trabajo de la instalación en circuito abierto (succión, impulsión, drenaje).

Para eliminar el aire en cada medición se tomaron diferentes medidas, una de ellas fue la ubicación de trampas mediante las cuales se expulsaba el aire de la tubería a la atmósfera y otras de carácter práctico.

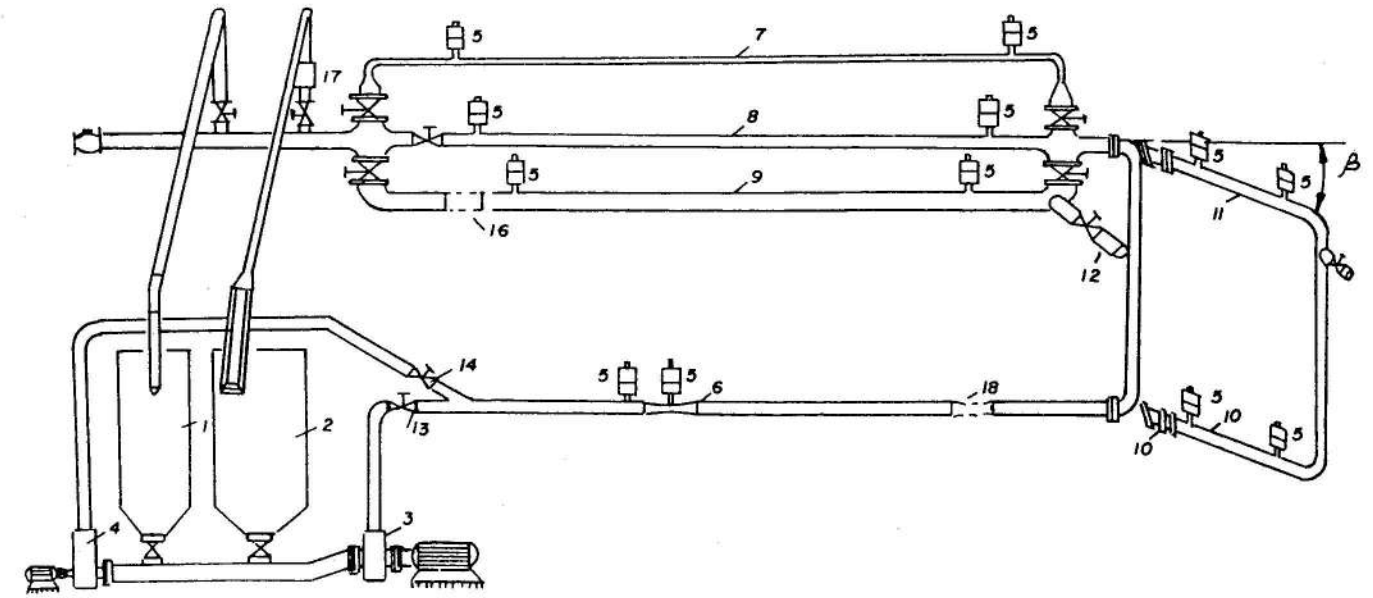


FIGURA 2. Esquema de la instalación de hidrotransporte semi-industrial

La caída de presión que se produce durante el flujo de la mezcla por el tubo venturi y por los tramos de medición de las pérdidas hidráulicas por rozamiento (tramos 7, 8 y 9) se realizó con la ayuda de manómetros diferenciales en forma de U, cuyo líquido manométrico es agua o mercurio en dependencia de la magnitud de la caída de presión:

$$\Delta P = (L_1 - L_2) ; \text{ para el agua}$$

$$\Delta P = (L_1 - L_2) 12,6 ; \text{ para el mercurio}$$

donde:

- L₁; L₂: unidades que desciende o asciende el líquido en la escala del manómetro.

La pendiente hidráulica se determina por:

$$i = \frac{\Delta P_{roz}}{l}$$

donde:

- ΔP_{roz} : caída de presión por las pérdidas hidráulicas por rozamiento;
- l: longitud de la tubería.

El gasto de la hidromezcla se determina por medio del tubo venturi, mediante la fórmula:

$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

donde:

- ΔP : caída de presión en el tubo de venturi;
- k: 0,0065, constante del tubo venturi.

La constante del tubo venturi k, se obtuvo mediante su calibración. En la Figura 3 se muestran los resultados de esta calibración en el mismo (ver Figura 3).

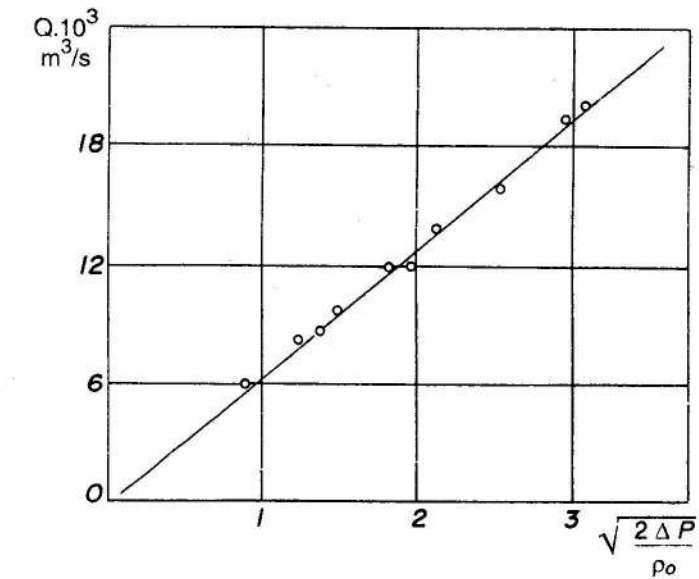


FIGURA 3. Curva de calibración del tubo venturi

Se determina la concentración volumétrica de la hidromezcla C y la concentración en masa S, según las fórmulas siguientes:

$$C = \frac{V_t}{V_t - V_o} ; S = \frac{M_t}{M_t + M_o}$$

donde:

- V_t, M_t: volumen y masa del sólido;
- V_o, M_o: volumen y masa del agua.

La cantidad de datos a tomar para la medición se determinó según la metodología estadística siguiente:

Valor medio del parámetro:

$$\bar{V}_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

Desviación media cuadrática:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1}$$

Número de datos:

$$N = \frac{t^2 \alpha(n) \sigma^2}{mf^2}$$

donde:

t_{α} : coeficiente de student, $\alpha = 0,05$;
 $t = 2$, error permisible, $m = 0,05$.

La elaboración de los datos experimentales permitió establecer que para un 95 % de confiabilidad es necesario tomar 3 datos para cada medición.

El análisis granulométrico del mineral investigado mostró que el 86,8 % de las partículas son menores de 0,045 mm y la densidad media de 3 400 kg/m³ (ver Figura 4).

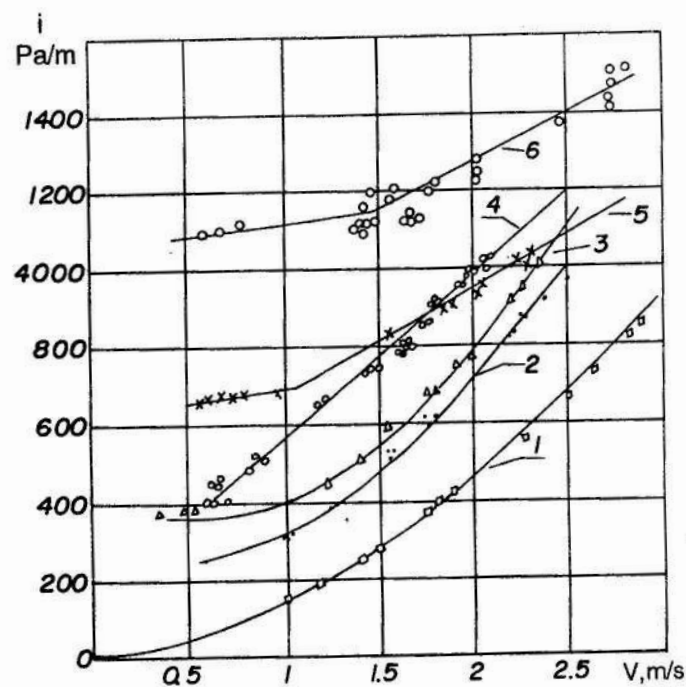


FIGURA 4. Curvas de sedimentación de la pulpa laterítica a diferentes concentraciones, $t = 25$: 1- 20 %; 2- 25 %; 3- 30 %; 4- 35 %; 5- 40 %; 6- 45 %; 7- 50 %

En la Figura 4 se muestran los resultados de la velocidad de sedimentación realizado en una probeta de 2 000 cm y un diámetro de 91 mm, las concentraciones de la pulpa fueron 20, 25, 30, 40, 45 y 50 % de sólido en masa. Las curvas que representan la relación entre la altura de descenso del sólido en el agua H y el tiempo en que se efectúa este proceso t , indican que a partir de la concentración 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, 2 y 3; el fenómeno observado se explica por la aparición de propiedades estructurales en la pulpa, a partir de una concentración superior a 30 %.

La investigación de los parámetros del hidrot transporte de la pulpa laterítica se realizaron para concentraciones en masa de 25, 30, 35, 40 y 45 % de sólido. Los resultados fueron elaborados según la dependencia $i = f(v)$ para el flujo de pulpa en los tubos de 100 y 150 mm de diámetro (ver Figura 5 y 6).

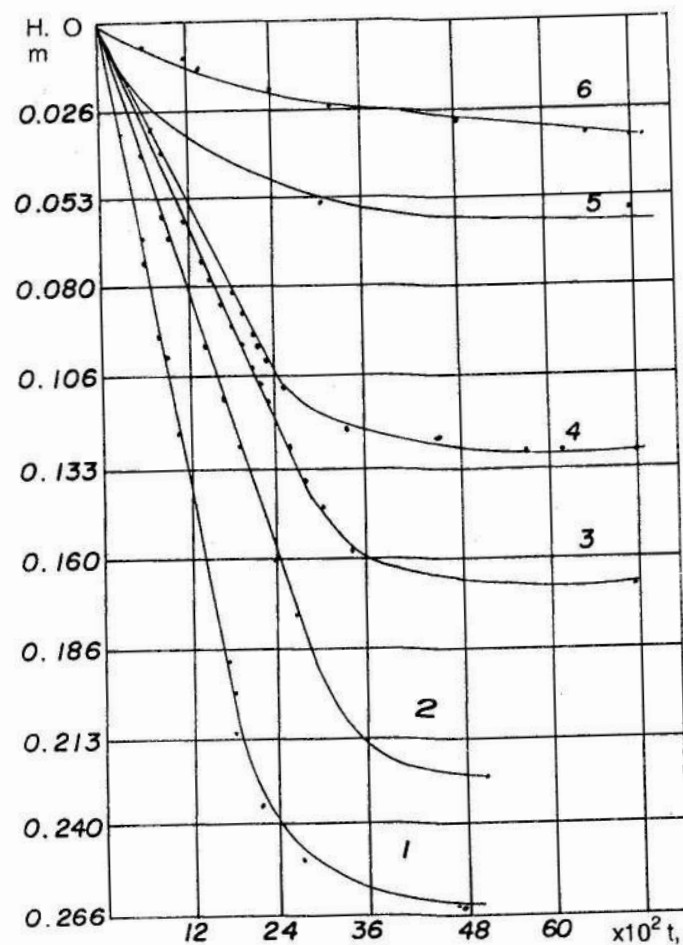


FIGURA 5. Dependencia $i = f(v)$ para el movimiento de la pulpa laterítica en una tubería; $D = 100$ mm y concentraciones 1- agua; 2- 25 %; 3- 30 %; 4- 35 %; 5- 40 % y 6- 45 %

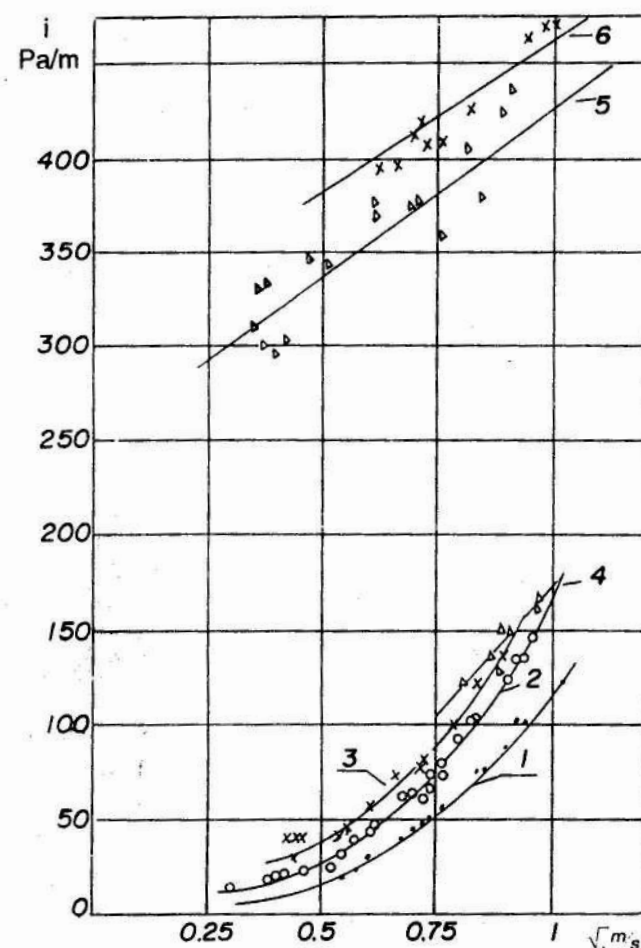


FIGURA 6. Dependencia $i = f(v)$ para el flujo de la pulpa laterítica en una tubería; $D = 150$ mm y concentraciones: 1- agua; 2- 25 %; 3- 30 %; 4- 35 %; 5- 40 %; 6- 45 %

Durante el hidrot transporte de la pulpa laterítica se presentan los regimenes de movimiento estructural, transitorio y turbulento, de esta forma se confirman los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas y del modelo físico matemático (primera parte).

Las hidromezclas con una concentración superior a 35 %, pertenecen a los líquidos no newtonianos, la distribución lineal de las rectas 4, 5 y 6 en las Figuras 4 y 5 y su desplazamiento del centro de coordenadas, manifiestan la presencia de una pulpa viscoso-plástica.

Cuando la velocidad de la pulpa es menor de 1 m/s se observa el régimen estructural, (rectas 4 y 5; Figura 5). El régimen transitorio se manifiesta en los datos correspondientes a la segunda pendiente de las rectas 4, 5 y 6 (Figura 5). Los regimenes estructural y transitorio se caracterizan por diferentes grados de destrucción o rompimiento de la estructura. Las características estructurales de la hidromezcla pueden mantenerse aun para altos valores del gradiente de velocidad.

Durante el régimen turbulento, como se observa de la comparación entre los datos experimentales del flujo de las hidromezclas (curvas 2 y 3; Figuras 4 y 5) y el comportamiento de los resultados para el flujo de agua (curva 1); las dependencias $i = f(v)$ tienen las mismas características y se diferencian por un incremento de las pérdidas hidráulicas debido a la presencia del mineral.

TABLA 1.

Diámetro del tubo, m	Velocidad m/s	Régimen
0,150	0 - 1,0	Estructural $S > 35$ % Turbulento $S < 35$ %
0,100	0 - 2,12	Estructural $S > 35$ % $V < 1,0$ m/s Transitorio $S > 35$ % $V > 1,0$ m/s Turbulento $S < 35$ %

La elaboración estadística de los resultados experimentales permitió establecer el valor de las constantes, N y K , de las expresiones 5 y 6; $N = 2,3$ y $K = 3,312$.

En los ensayos se observó que las partículas del mineral se mantienen en suspensión para las velocidades y concentraciones de las mezclas estudiadas. Además las variaciones en la pendiente hidráulica de la tubería inclinada y la horizontal ($i_t - i$) en inclinaciones pequeñas ($< 10^\circ$) son despreciables.

Para la determinación de los parámetros de hidrot transporte de la pulpa laterítica en los regimenes estructural y turbulento, puede aplicarse el algoritmo siguiente (ver Figura 7).

La elaboración de los datos para la determinación de los parámetros de la línea Moea oriental utilizando la metodología propuesta en el algoritmo, arrojó como resultado que el flujo de la hidromezcla puede efectuarse por la diferencia de nivel existente entre los puntos de alimentación y descarga sin consumo de energía.

CONCLUSIONES

- La investigación teórico-experimental del flujo de la hidromezcla con mineral laterítico permitió establecer:
 - que dependiendo de la velocidad del flujo y la concentración del mineral sólido en la hidromezcla se presentan los regimenes estructural, transitorio y turbulento;
 - la dependencia para determinar el coeficiente de resistencia hidráulica para el flujo en régimen estructural;
 - las fórmulas para calcular las pérdidas hidráulicas durante el movimiento de la hidromezcla en el régimen turbulento;
 - la metodología de cálculo de los parámetros de hidrot transporte de la pulpa laterítica en los regimenes estructural y turbulento.
- La aplicación de la metodología elaborada para el cálculo de los parámetros de la línea Moea oriental, reveló que la instalación puede trabajar sin consumir energía, o sea, en flujo por gravedad.

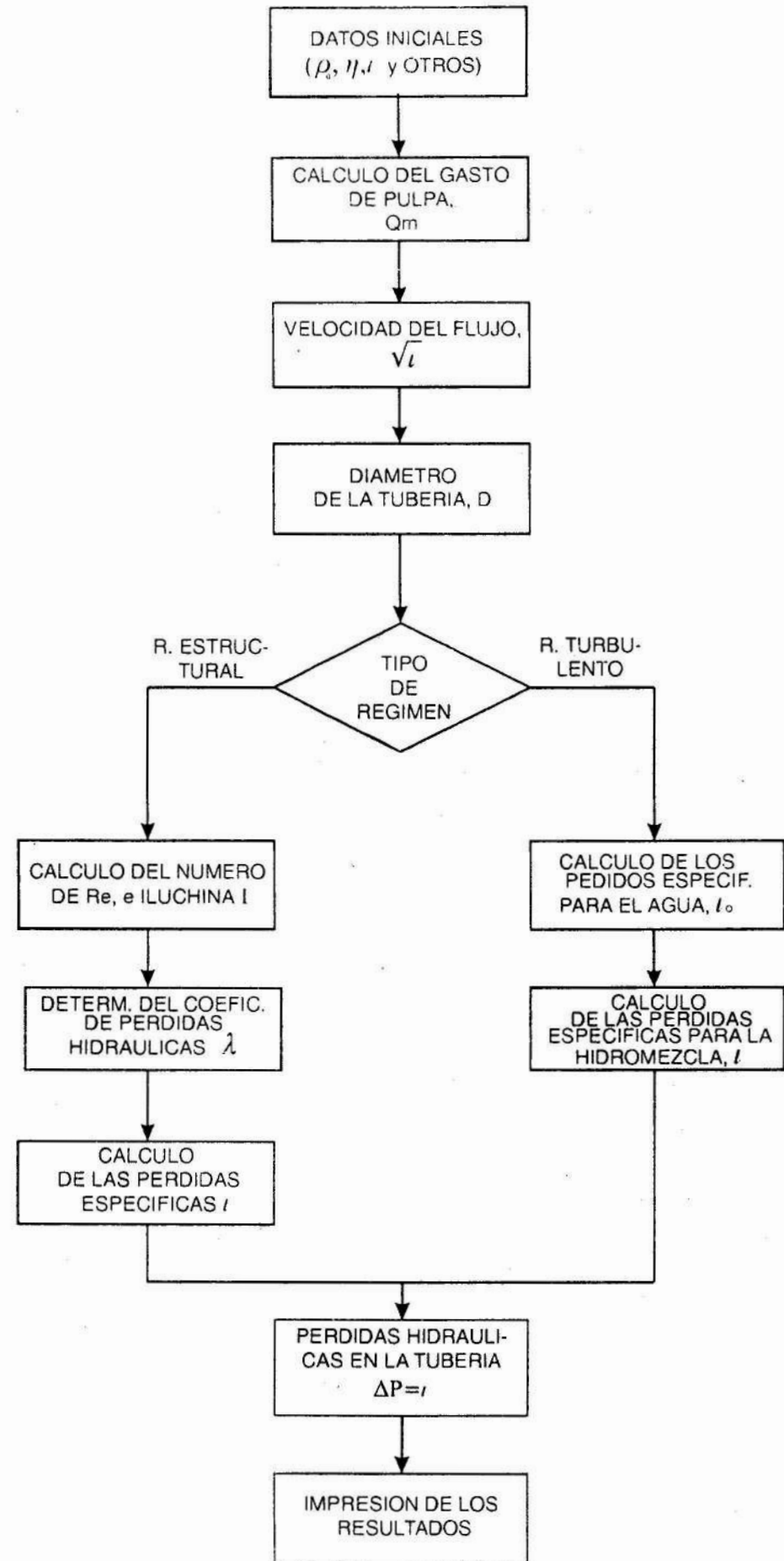


FIGURA 7. Algoritmo de cálculo de los parámetros de hidrot transporte de la pulpa laterítica

BIBLIOGRAFIA

- BULINA, I.: *Transporte de suspensiones estructurales de alta densidad por tubos*, Dis. C. Dr. Ciencias Técnicas, 1960.
- FILATOV, B.V.: "Determinación de las propiedades reológicas de suspensiones de arcillas en condiciones de un flujo estable", en *rev. Coloide*, t. 16, no. 2, 1964.
- LAUTINOV, Z. y B.V. FILATOV: "Aproximación de la ecuación de Buckingham al flujo de sistemas dispersos viscoso-plástico", en *rev. Coloide*, t. XXV, 1963.
- SKELLAND, A.U.: *Non - Newtonian Flow and Heat Transfer*, Edición Revolucionaria, La Habana, 1970.

- SMOLDRIEV, A.E. y Y.K. SAFONOV: *Transporte por tubería de hidromezclas concentradas*, Construcción de Máquina, Moscú, 1989.
- PEREZ, R.: "Investigaciones experimentales de los parámetros del transporte hidráulico de minerales de hierro triturado", en *rev. Tecnología*, no.1, 1971.
- PEREZ, R. y S. MALIUK: "Algunos resultados de las investigaciones de los parámetros del transporte de sal común suspensa en flujos de salmueras saturadas", en *rev. Minería y Geología*, no.2, 1983.

Visite
MOA

