

# ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE HIDRAULICO DEL AZUFRE

Ing. Manuel Pla Duporté

Facultad de Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico

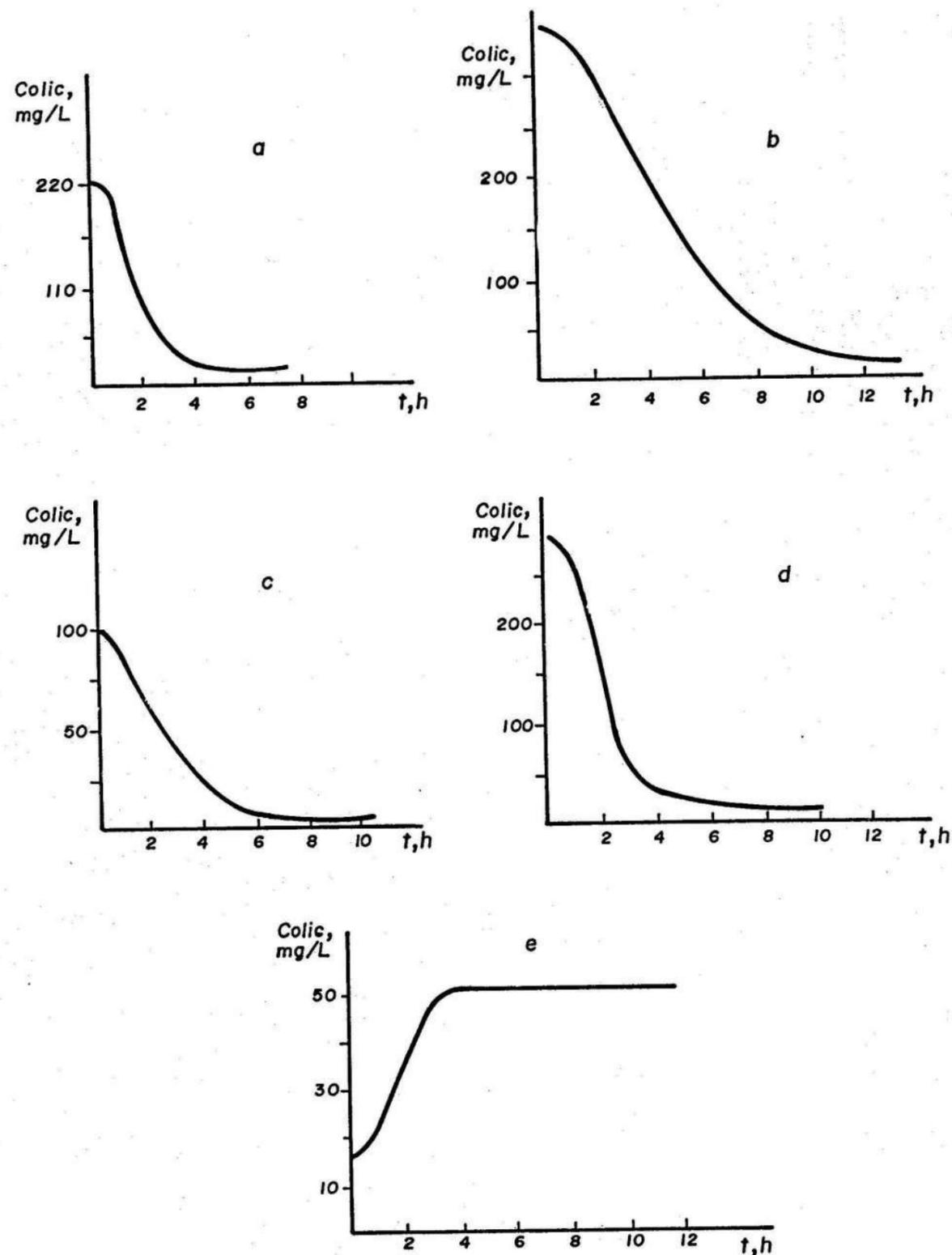


FIGURA 7. Características transitorias del proceso de separación de níquel y cobalto para los canales.

## RESUMEN:

Se presentan los resultados de las investigaciones experimentales del transporte hidráulico de azufre a escala semindustrial, que incluye el estudio de los parámetros principales del hidrot transporte y la determinación de algunas propiedades del sólido y la mezcla.

Los ensayos que pusieron de manifiesto el comportamiento característico de la hidromezcla durante su transporte, consistieron en determinar las pérdidas específicas de carga, las velocidades y pendientes críticas, y la capacidad de transporte en función de las diferentes concentraciones de la hidromezcla formada en un rango del 10 al 40 % en masa.

## ABSTRACT:

This work presents the results of experimental investigations about hydraulic transportation of sulphur at semindustrial scale. Studied are the principal parameters of hydraulic transportation determining some solid and mixture properties.

The experiments that put in practice the behaviour of hydromixture characteristics during its transportation consisted in determining specific losses of load, critical velocities and slope as well as the capacity of transportation depending of different concentrations of the hydromixture from 10 to 40 % in mass.

El transporte hidráulico como forma de trasiego de materiales sólidos es un método ampliamente usado en el mundo en diferentes esferas de la economía y la industria. En Cuba, aunque su uso no está muy extendido, se emplea, fundamentalmente, en la industria minera y la metalurgia extractiva.

El transporte hidráulico es una forma de transporte continuo de alta productividad, cuyas características lo hacen перспекivo para ser aplicado en la transportación del azufre como parte del proceso industrial de obtención de níquel en la empresa "Pedro Soto Alba" de Moa, donde se utiliza el transporte automotor y posteriormente el bombeo del azufre previamente derretido y mantenido en estado líquido a lo largo de una tubería de 4,5 km de longitud.

La esencia física de los procesos de flujo de líquidos heterogéneos es poco conocida, y los resultados obtenidos de la aplicación de las teorías del transporte de partículas en suspensión, sólo coinciden con los datos experimentales en condiciones muy limitadas, de ahí que para la determinación de los parámetros del movimiento de las hidromezclas se emplee fundamentalmente el método experimental.

Para fundamentar y proyectar una instalación de transporte hidráulico es necesario conocer la velocidad crítica, las pérdidas específicas de carga, la densidad o concentración de la mezcla, y el diámetro del conducto que permitan la determinación del régimen racional de trabajo y la selección de los equipos adecuados para el caso concreto. Estos parámetros tienen gran incidencia en la magnitud de las inversiones, en los gastos de explotación y en la fiabilidad del trabajo de la instalación.

Existen múltiples metodologías de cálculo de los parámetros de transporte de diferentes sustancias y materiales por canales y tuberías. Los análisis de los mismos son frecuentes en la literatura mundial. La ma-

yoría de las fórmulas de cálculo propuestas tienen carácter empírico y semiempírico, y se aplican sólo en condiciones iguales a aquellas en las que fueron obtenidas.

La generalización de los datos experimentales en base a la teoría de semejanza hidrodinámica presenta algunos problemas. Hasta el momento no existe un criterio universal de traslación de los modelos del laboratorio a las instalaciones industriales.

El campo en el cual se utilizan los criterios conocidos es aún impreciso. Sin embargo, se han establecido dependencias que permiten emplear, dentro de ciertos límites, los resultados experimentales.

Los resultados que se exponen en este trabajo, con el objetivo de determinar los parámetros principales del transporte hidráulico, se obtuvieron mediante experimentación en una instalación semindustrial (Figura 1).

Estructuralmente la instalación consta de dos tanques de alimentación, los cuales pueden alimentar la bomba, independiente o simultáneamente. Las válvulas situadas en la parte inferior de cada uno de ellos permiten que la hidromezcla llene la tubería de succión.

El tanque (1) tiene una capacidad de 1,29 m por lo que se utilizó para la calibración el metro Venturi, controlando el llenado de un volumen en un tiempo determinado. El tanque 2 tiene una capacidad de 2,899 m que es suficiente para el funcionamiento de la instalación a su capacidad máxima sin dificultades.

La bomba (4) impulsa la hidromezcla a la tubería de 100 mm (8), la cual consta de una válvula de cuña (10) para regular el flujo y la correcta operación de la bomba.

A una distancia de 4,075 m está montado un tubo de cristal (11), con el fin de determinar en qué momento ocurre la sedimentación de las partículas del material.

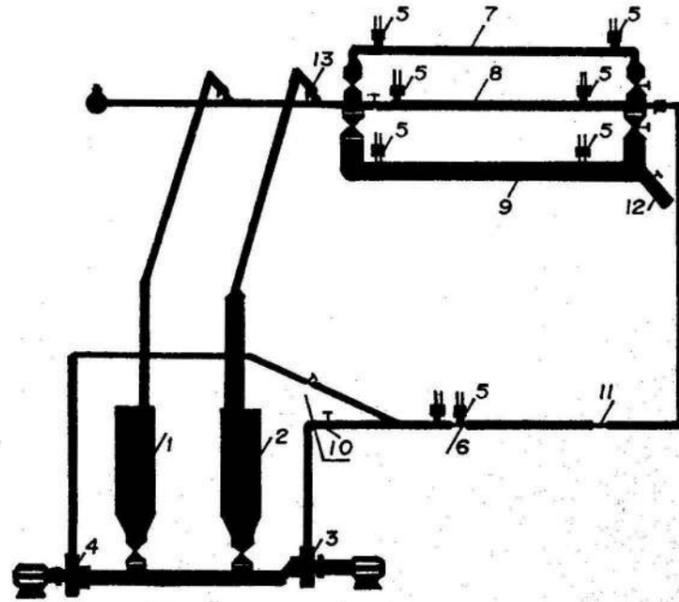


FIGURA 1. Esquema de la instalación de transporte hidráulico. 1 y 2, tanques para la recepción de la hidromezcla; 3 y 4, bombas centrífugas para bombeo de la hidromezcla; 5, puntos de toma de presión; 6, tubo Venturi; 7, 8 y 9, tramos de tubería de 50, 100 y 150 mm respectivamente para determinar pérdidas hidráulicas; 10, válvulas de regulación; 11, ventana de cristal; 12, válvula de drenaje; 13, tubería de retorno.

La tubería de 100 mm se comunica con una ramificación de tres tuberías en paralelo con diámetro interior a 50, 100 y 150 mm respectivamente. Al inicio y al final de cada una están situadas válvulas de cuña que permiten la circulación del flujo por la tubería del diámetro que se desea investigar.

Al final de la instalación se encuentra la tubería de retorno al tanque de alimentación (13), la que posee dos ramas por medio de las cuales se hace pasar el flujo, en dependencia del tanque que esté funcionando, y en caso de que la instalación trabaje en ciclo abierto, se abre la válvula de drenaje para expulsar el flujo hacia el exterior.

Para efectuar las mediciones de las diferencias de presión, tanto en la toma del medidor Venturi como en el tramo de la tubería a investigar, existen manómetros diferenciales en forma de U (5), los que permiten mediciones de gran exactitud. El líquido manométrico en este caso fue el mercurio, y el medio para transmitir la presión, el agua.

Para evitar que la pulpa se mezclara con el líquido manométrico se instalaron dispositivos separadores (recipientes), en el interior de los cuales se situó una cámara de goma, cerrada herméticamente, llena de líquido, que transmite la presión a través de mangueras plásticas hasta los manómetros en U (ver Figura 2).

El caudal se determina por medio de la fórmula:

$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

donde:

- $\Delta P$ : caída de presión en el tubo Venturi;
- K: 0,00327, constante del tubo Venturi;
- $\rho$ : densidad del fluido.

Todos los experimentos se realizaron en circuito cerrado comenzando por el agua, para la cual se determinaron las características de la tubería, es decir, las pérdidas de carga en función de la velocidad. Posteriormente se investigaron las diferentes hidromezclas agua-azufre con concentraciones de 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 % en peso (ver Figuras 3 y 4).

Un resultado interesante es el que demuestra que los valores de pérdida para hidromezclas con un 10 % de sólido son menores que para el agua, lo que contradice lo establecido por las teorías del movimiento de hidromezclas sólido-agua. Una explicación a esta anomalía podría estar dada por el llamado fenómeno Toms, el cual explica que cualquier modificación del sistema de flujo turbulento que resulte una reducción de las pérdidas de carga en el movimiento del líquido en régimen turbulento, puede ser posible si es causada por polímeros de adición. Las moléculas grandes de algunos polímeros disminuyen las pérdidas de carga del flujo turbulento de líquidos o mezclas de líquidos y sólidos, en tuberías y canales.

La reducción de las pérdidas hidráulicas en los flujos turbulentos de líquidos por las moléculas del polímero, representa un método importante para el aumento del caudal, en las tuberías con una capacidad limitada de transporte de líquido o de la suspensión (líquido con sólido), y para la disminución de la energía utilizada por la bomba.

De acuerdo con lo anterior podemos suponer que la presencia de pequeñas cantidades de azufre en el agua atenúa la turbulencia del flujo, provocando la disminución de las pérdidas de energía durante su movimiento.

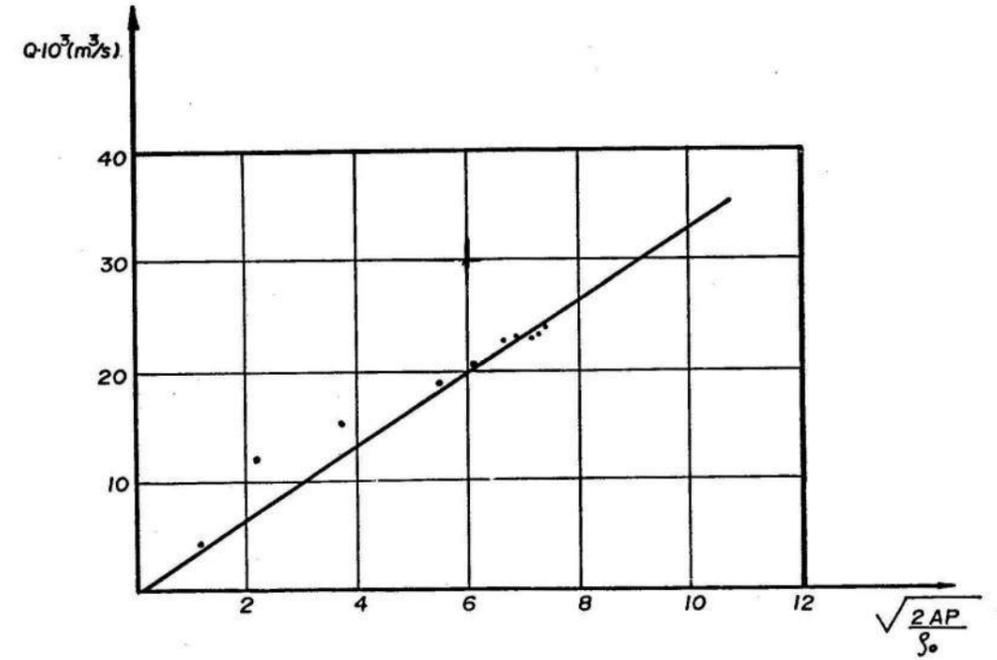


FIGURA 2. Curva de calibración del tubo Venturi.

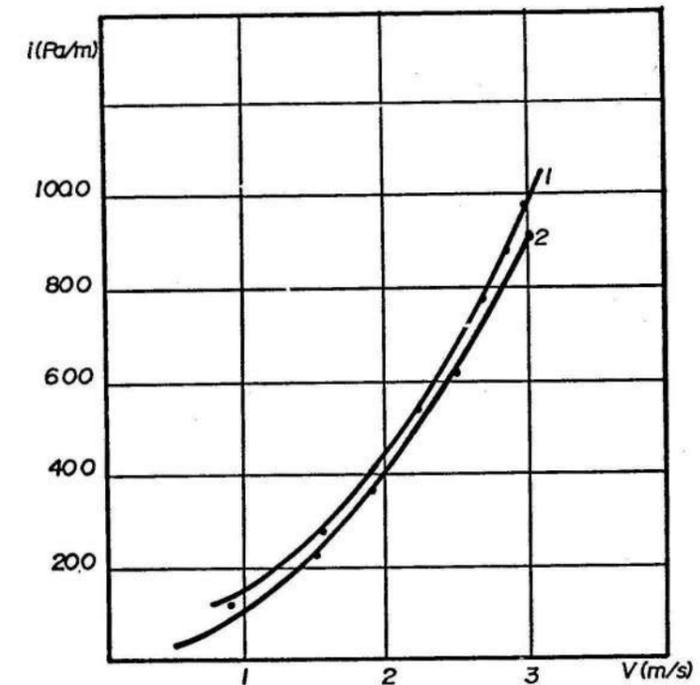


FIGURA 3. Curva de  $i=f(v)$  para el agua. 1. Experimental; 2. Teórica.

Una particularidad de los minerales a transportar es su composición granulométrica. Utilizando tamices de diferentes diámetros fue posible definir el

contenido de partículas de diferentes tamaños en el azufre. Este análisis se hizo antes y después del hidrot transporte del azufre en la instalación semindustrial.

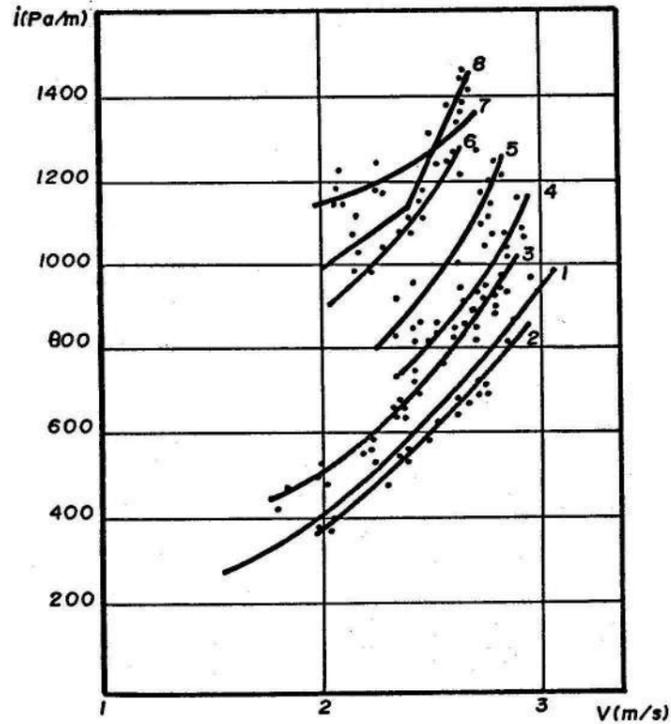


FIGURA 4. Pérdida específica de carga en función de la densidad. Curvas de  $i=f(v)$  para el agua y las hidromezclas en tuberías de diámetro  $D > 100$  mm. 1. Agua, 2. S=10 %, 3. S=15 %, 4. S=20 %, 5. S=25 %, 6. S=30 %, 7. S=35 %, 8. 40 %.

TABLA 1. Composición granulométrica de las muestras analizadas antes del hidrot transporte

Clase	Peso de la clase (kg)	% de Peso
+40	58,7	1,698
-40 +31,5	80,4	2,326
-31,5 +22,4	159,7	4,621
-22,4 +18	56,3	1,629
-18 +10	99,8	2,888
-10 +8	66,0	1,909
-8 +4,75	216,6	6,268
-4,75 +2	288,2	17,021
-2 +1,60	129,3	3,74
-1,6 +0,56	921,7	26,672
-0,56 +0	1 078,9	31,221

TABLA 2. Composición granulométrica de las muestras analizadas después del hidrot transporte

Clase	Peso de la clase (g)	% de Peso
+8	10	0,636
-8 +5	36,3	2,311
-5 +2	298,3	78,99
-2 +1,6	86,5	5,507
-1,6 +0,56	780,5	49,69
-0,56 +0	358,9	22,85

La densidad del sólido (azufre), por ser un parámetro importante del hidrot transporte, también fue determinada. Para ello se empleó el método picnométrico, el cual se emplea con éxito por su gran precisión, y además porque no necesita de la preparación de muestras (ver Tabla 3).

TABLA 3. Resultado del método picnométrico para determinar densidad del azufre

Ident. de la muestra	G1	G2	G3	G4	G3-G1	G4-(G3-G1)	G2-(G4-(G3-G1))	$\rho$ kg/dc <sup>3</sup>
1	40,4561	98,5600	57,9722	103,360	11,5161	91,8439	6,8061	1,69202
2	47,7091	97,0022	59,3500	102,083	11,6409	90,4429	6,5593	1,77471
3	44,6950	89,2000	56,1557	93,9500	11,4607	82,4893	6,7107	1,70782
4	45,1900	89,3304	56,7573	94,7200	11,5673	83,1527	6,1777	1,87242
5	44,8200	89,3200	56,5300	93,8752	11,7100	82,1652	7,1548	1,63666
$\Sigma \rho/n$								1,73674

G: peso de la muestra  
 $\rho$ : densidad

En el estudio del transporte de la hidromezcla es de especial importancia la influencia que ejerce su concentración sobre los valores de la velocidad crítica,

las pérdidas de presión, así como sobre la densidad de la hidromezcla.

La transportación del azufre se realiza a diferentes concentraciones, por lo que se determinó la den-

sidad de la hidromezcla para cada una de ellas. La densidad de la pulpa se halló para cada concentración por el método gravi-volumétrico, es decir, se toma una muestra con un peso equivalente a una concentración dada, se vierte en una probeta con un volumen de agua elegido y se toma el volumen total, calculándose la densidad por la fórmula siguiente:

$$\rho_m = G/V$$

donde:

- $\rho_m$ : densidad de la mezcla;
- G: peso de la mezcla para una concentración dada;
- V: volumen de la muestra (ver Tabla 4).

TABLA 4. Densidades de las hidromezclas

Concentración (%)	Volumen de la mezcla (m <sup>3</sup> )	Peso de la mezcla (g)	Densidad (t/m <sup>3</sup> )
10 %	315	315,33	1,04651
	315,5		
	315,5		
15 %	320	320	1,07812
	320		
	320		
20 %	330,2	330,13	1,09046
	330,2		
	330		
25 %	335,5	335,33	1,11829
	335		
	335,5		
30 %	345,3	345,23	1,12967
	345,3		
	345,1		
35 %	350,2	350,15	1,15664
	350,1		
	350,15		
40 %	360,2	360,16	1,16612
	360,2		
	360,1		

### Velocidad crítica

Uno de los principales parámetros del transporte hidráulico es la velocidad crítica, la cual se define como la velocidad del flujo que corresponde al comienzo de la sedimentación de las partículas suspendidas.

Los valores de la velocidad crítica para cada concentración fueron obtenidos visualizando el momento de la precipitación de partículas a través de la ventana de observación que posee la instalación experimental. El valor se obtiene a partir de la relación:

$$Q_{crit} = K \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_m}}$$

$$V_{crit} = \frac{Q_{crit}}{A}$$

donde:

- $V_{crit}$ : velocidad crítica;
- $Q_{crit}$ : caudal correspondiente a la velocidad crítica;
- A: área de la sección transversal de la tubería (ver Figura 5).

Por pendiente crítica se entiende, las pérdidas específicas de carga que corresponden a la velocidad crítica para diferentes densidades obtenidas. Los resultados de la determinación de la pendiente crítica aparecen graficados en la Figura 6.

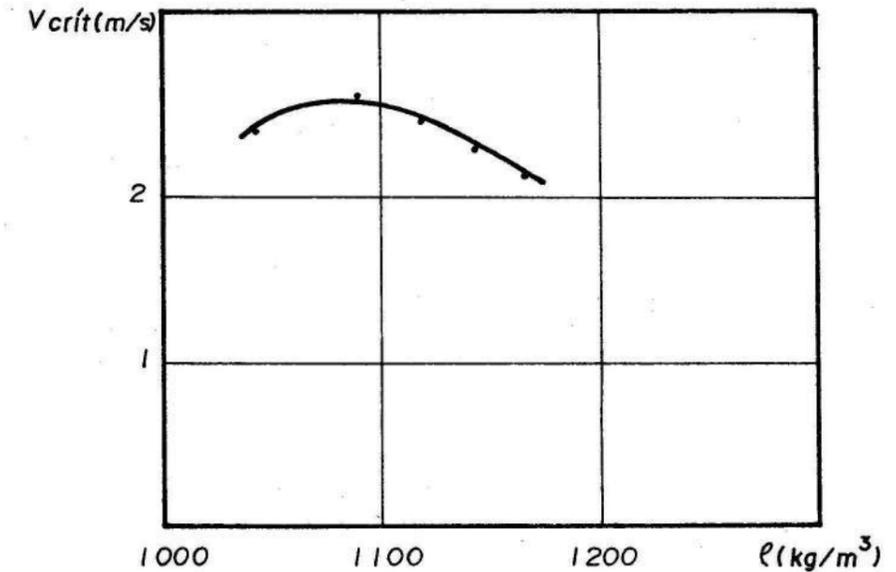


FIGURA 5. Velocidad crítica en función de la densidad.

# EMPLEO DE LAS ARCILLAS FERRO-CAOLINÍTICA-GIBBSÍTICAS DE LA REGIÓN DE MOA EN LOS TALLERES DE FUNDICIÓN

Ing. José Alberto Pons Herrera\*  
Ing. Carlos Alberto Leyva Rodríguez\*\*

\* Facultad de Metalurgia. \*\* Facultad de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico

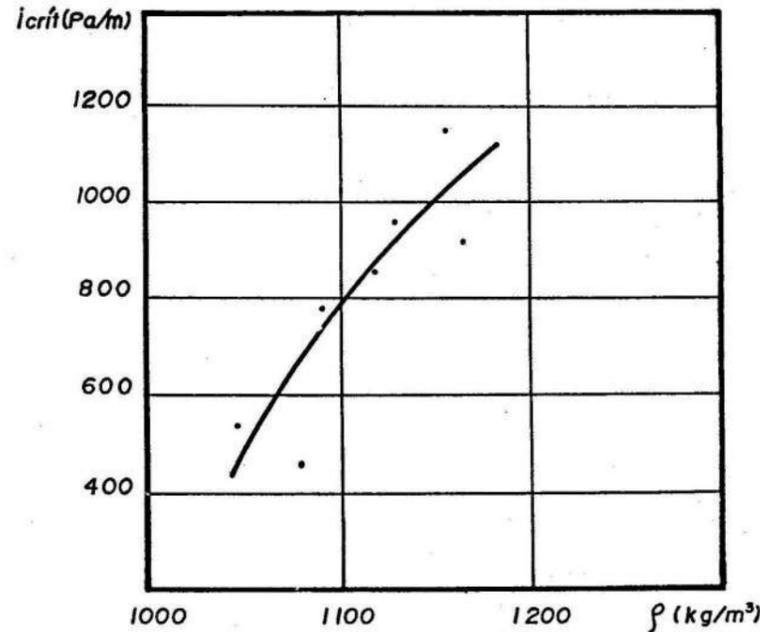


FIGURA 6. Pendiente crítica.

Para la determinación de las pérdidas de carga en el movimiento de hidromezclas, han sido propuestas múltiples formas de cálculo por diferentes autores. De manera general las pérdidas en el desplazamiento de las hidromezclas se pueden expresar como:

$$i_m = i_o \rho_m / \rho_o + \Delta_i$$

donde:

- $i_o$ : pérdidas específicas de carga para el agua;
- $\rho_m$ : densidad de la hidromezcla;
- $\rho_o$ : densidad del agua;
- $\Delta_i$ : pérdidas de carga complementaria relacionada con el transporte de las partículas sólidas;
- $i_m$ : pérdidas específicas de carga para la hidromezcla.

Los resultados obtenidos mediante esta expresión no se ajustan a los resultados experimentales, y por lo tanto no son confiables. Esto conllevó a la utilización de métodos estadísticos. Se empleó el análisis de regresión para determinar los coeficientes óptimos, obteniéndose de esta forma las siguientes ecuaciones:

Para el agua

$$i_o = 118,57 \cdot V^{1.806}$$

Para las diferentes hidromezclas

$i_m = 87,096 \cdot V^{2.098}$	para S = 10 %
$i_m = 158,12 \cdot V^{1.692}$	para S = 15 %
$i_m = 194,088 \cdot V^{1.559}$	para S = 20 %

$i_m = 214,28 \cdot V^{1.591}$	para S = 25 %
$i_m = 343,55 \cdot V^{1.332}$	para S = 30 %
$i_m = 435,51 \cdot V^{1.181}$	para S = 35 %
$i_m = 399,024 \cdot V^{1.227}$	para S = 40 %

donde:

S: porciento de concentración en peso de cada hidromezcla.

Las ecuaciones generales son:

$i_m = i_o + \Delta_i$	para S = 15-40 %
$i_m = i_o - \Delta_i$	para S = 10 %
$\Delta_i = 0,2349 \cdot V^{0.968}$	$\cdot S^{1.962}$

Para determinar estas ecuaciones se tuvo en cuenta el comportamiento físico de las curvas  $i_m$  vs V, ajustándolas a una función exponencial del tipo:

$$y = a \cdot x^b$$

## BIBLIOGRAFÍA

- BIRD, R.B.; W.E. STEWARD y E.N. LIGHTFOOT: *Fenómenos de transporte*, Reverté, Barcelona, 1973.
- KOLAR, V.: "Flujo turbulento en líquidos con polímeros", *Ingeniería Hidráulica*, VIII (3):165-172, 1987.
- PÉREZ BARRETO, R.: "Sobre algunos resultados de las investigaciones experimentales del transporte de sal común suspenda en flujos de salmueras saturadas", *Minería y Geología* (2):143-171, 1983.
- STREETER, V.L.: "Mecánica de los fluidos", *Ciencia y Técnica*, Instituto del Libro, La Habana, 1978.

## RESUMEN:

En los talleres de fundición se emplean con frecuencia las arcillas bentoníticas, las mismas son usadas principalmente como aglutinante, sin embargo existen otros tipos de arcillas (refractarias) que también pueden ser utilizadas. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos durante las pruebas industriales realizadas en la Empresa Mecánica del Níquel con una de las arcillas ferro-caolínica-gibbsíticas de la región de Moa.

## ABSTRACT:

Bentonitic clays are usually applied as cementing material on foundry. However some other refractory clays may be applied in casting shops. The analysis of one of gibbsite kaolinferrite clays, located in Moa, and its testing results on industry are given.

Las arcillas son rocas formadas por partículas muy finas (del orden de los micrones), cuyo componente fundamental es el silicato de aluminio hidratado, acompañado de algunas impurezas minerales como: calcita, feldespato, mica, óxido de hierro y cuarzo. Su coloración es muy variada y depende principalmente de la composición mineralógica.

Las arcillas en los talleres de fundición se emplean, fundamentalmente, para la elaboración de mezclas de moldeo aprovechando sus propiedades aglutinantes; este es el caso de las arcillas montmorilloníticas (bentonitas).

En Cuba, actualmente se explotan con fines de moldeo algunos yacimientos de arcillas, generalmente bentonitas cálcicas, las cuales son sometidas a un proceso de enriquecimiento con sodio con vistas a incrementar sus propiedades absorbentes. Sin embargo, las arcillas con propiedades refractarias no están completamente estudiadas, y su uso es aún insuficiente.

En la región de Moa se localizan importantes depósitos de minerales con excelentes propiedades, los cuales pueden ser empleados como material refractario, pigmentos y aislantes térmicos (Jerez y otros, 1995; Leyva y Pons, 1995; Pons y otros, 1995).

El desarrollo alcanzado en esta región en ramas tan importantes como la geología, la minería y la metalurgia, facilita los procesos de prospección, extracción, preparación, transportación y explotación de los variados recursos minerales con que cuenta el municipio y que, en su gran mayoría, no son aprovechados eficientemente.

## Características generales de la materia prima empleada

Las arcillas ferro-caolínica-gibbsíticas se caracterizan por poseer una estructura laminar, formada por una capa de iones de aluminio ( $Al^{3+}$ ) empaquetados entre capas similares de iones hidroxilos ( $OH^-$ ), y donde cada ion de aluminio está asociado a uno hidroxilo.

Los tetraedros de silice y oxígeno conforman unidades estratificadas donde el  $Si^{4+}$  como ion central está coordinado tetraédricamente por iones  $O^{2-}$  estableciéndose, en general, una estructura laminar próxima a la estructura deformada de la brucita (Betejtin, 1977; Dana, 1977 -19 edición-).

El proceso de formación de las arcillas caolínica se produce bajo la influencia de  $H_2O$  y  $CO_2$ , donde los álcalis con una parte de  $SiO_2$  y tierras alcalinas en forma de carbonatos se desprenden, mientras que el cuarzo y los demás minerales químicamente estables, se quedan como inclusiones en la masa arcillosa de caolín.

El fenómeno de caolinización también se produce en los procesos hidrotermales de bajas temperaturas bajo el efecto de aguas ácidas que contienen principalmente  $CO_2$  sobre los aluminosilicatos y silicatos de aluminio que no contienen álcalis.