

Tabla 1 Resultados de las pruebas de separación para las condiciones de Nicaro

Operación	Relación Vo/Va	Fases				Fase acuosa g/L				Acido libre				Fase orgánica g/L			
		Ni	Co	Cu	Zn	Ni	Co	Cu	Zn	NH <sub>3</sub>	pH	Ni	Co	Cu	Zn	NH <sub>3</sub>	
		F.O. descargada															
		0,000	11,50	0,000	0,023	88,0				0,02	0,10	0,02	0,002	0,06			
Extracción		0,03	11,56	0,0008	0,091	70,0				0,025	0,11	0,02	0,012	-			
	5,38	0,85	11,80	0,001	0,280	77,0				0,17	0,118	0,02	0,080	-			
		17,45	11,80	0,01	0,080	97,0				3,39	0,118	0,022	0,020	-			
		34,80	11,80	0,97	0,031	145,0				6,50	0,118	0,21	0,0036	1,48			
Lavado	1,0	0,015	0,075	0,03	0,080	-				9,80	-	-	-	-			
		99,30	0,025	0,00	0,025	4,45				6,50	0,103	0,21	0,002	0,32			
		30,30	0,000	0,70	0,000	-				2,00	0,10	0,28	0,002	-			
Reextracción	14,0	1,00	0,000	0,10	0,000	-				0,85	0,10	0,87	0,002	-			
		0,001	0,000	0,000	0,000	224,0				0,02	0,10	0,02	0,002	-			

Tabla 2 Resultados de las pruebas de separación para las condiciones de Moa

Operación	Relación Vo/Va	Fases				Fase Acuosa g/L				Acido libre				Fase Orgánica g/L			
		Ni	Co	Cu	Zn	Ni	Co	Cu	Zn	NH <sub>3</sub>	pH	Ni	Co	Cu	Zn	NH <sub>3</sub>	
		O. Inicial															
		0,0000	5,200	0,000	0,840	86,10				0,070	0,020	0,007	0,001	-			
Extracción	5,0	0,0002	5,220	0,000	2,200	70,00				0,075	0,022	0,007	0,300	-			
		9,9500	5,220	0,000	1,740	65,00				2,000	0,022	0,007	0,200	-			
		29,0000	5,220	0,030	1,060	61,69				5,880	0,022	0,013	0,050	-			
		47,0900	5,220	0,080	0,860	101,30				9,330	0,022	0,024	0,003	1,300			
Lavado	1,0	0,0100	0,060	0,030	0,055	-				9,50	-	-	-	-			
		0,0000	0,050	0,000	0,050	118,00				8,50	0,022	0,025	0,002	0,280			
		110,3000	0,038	0,000	0,030	3,52				3,00	-	-	-	-			
Reextracción	12,0	55,2900	0,000	0,280	0,040	0,52				2,90	4,610	0,020	0,025	0,002			
		55,2900	0,000	0,280	0,040	0,52				1,70	1,760	0,020	0,086	0,002			
		19,8500	0,000	1,040	0,006	0,05				1,70	1,760	0,020	0,086	0,002			
		0,0010	0,000	0,000	0,000	225,5				0,070	0,020	0,007	0,001	0,080			

## DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE HIDROTRANSPORTACION DEL MINERAL SERPENTINITICO

Ing. Alejandro Nicolaev;  
Ing. Manuel Suárez F.;  
Ing. Victor Labrador A.;  
Ing. Rodolfo Montes de Oca S.;

Instituto Superior Minero Metalúrgico

**RESUMEN** En el presente trabajo se exponen algunos de los resultados de las investigaciones experimentales del transporte hidráulico de las pulpas serpentiniticas. En particular se aportan datos sobre las propiedades físico-mecánicas de las serpentinitas y de su hidrottransportación, fórmula para la determinación de la caída libre, valores experimentales de la velocidad crítica y las pendientes hidráulicas del mineral serpentinitico a distintas concentraciones. Estos resultados han sido obtenidos en una instalación semi-industrial construida en el Instituto Superior Minero Metalúrgico.

**ABSTRACT** In the present work, it shows some of the results of the experimental investigations of the hydraulic transport of the serpentinitic pulps of the nickel deposit of Moa. In particular it gives data on the mechanical physical properties of the serpentines and of its hydrotransportation, formula for the determination of free fall, experimental values of the critical velocity and the hydraulic gradient of the serpentinitic mineral at distinct concentration. These results were obtained in the installation semi-industry constructed in the Higher Institute of Mining and Metallurgy (I.S.M.M.)

### DESARROLLO

La utilización de las reservas de mineral serpentinitico, siempre ha sido una preocupación de todos los investigadores de la rama, hoy en día, la disminución de las menas limoniticas ha intensificado dicha preocupación, así pues, se plantea la necesidad inmediata de construir una planta para procesar las menas serpentiniticas en nuestro país.

Alrededor de toda esta problemática han surgido propuestas concretas para realizar el transporte de los

yacimientos, nosotros basándonos en la experiencia nacional e internacional que se tiene sobre el trasiego de las hidromezclas, proponemos este medio como una vía más a elegir.

La industria minero metalúrgica ha utilizado a través de los años variados tipos de transporte mineral, el ferroviario, el automotor, el neumático, etc, cada uno de ellos, con sus características tecnológicas y económicas, que en sí son las que condicionan su campo de aplicación.

Actualmente la crisis engendrada por la escasez de recursos energéticos, ha hecho centrar la atención sobre el transporte por tuberías, fundamentalmente el hidráulico. En la práctica se ha comprobado la utilización de este medio en la metalurgia de concentrados no ferrosos, tales como el carbón mineral y los concentrados del cobre.

Las principales ventajas de este medio son:

1. Alta eficiencia económica
2. Permiten la automatización completa del transporte
3. Las pérdidas de los concentrados durante su transportación son insignificantes
4. Disminuye considerablemente la utilización de los suelos cultivables para la construcción del sistema en comparación con otros medios de transporte.

Estas y otras ventajas más han permitido el surgimiento de sistemas de transporte tales como el Markonaflo de la firma Marenga (USA)

Este tipo de transporte relaciona conjuntamente, las empresas de extracción y elaboración de las materias primas, situadas a una distancia de 1 000 km una de otra, utilizando transporte por tuberías, desde la empresa de extracción de minerales hasta el puerto, luego se transporta por vía marítima (en barcos) hacia el puerto de destino, y de este a la empresa elaboradora por medio de tuberías.

La carga y descarga se realiza automáticamente necesitando para ello de poco tiempo.

A pesar de la experiencia que se tiene mundialmente sobre este eficaz medio de transporte no ha sido posible elaborar una metodología única para el cálculo de los parámetros del hidrot transporte.

Con frecuencia encontramos abundantes expresiones empíricas del cálculo de la velocidad crítica tales como: que su validez está restringida a la magnitud de determinados parámetros, como el diámetro del grano, la densidad y concentración de la pulpa etc, es decir que, por ejemplo, tenemos una pulpa que se ajusta a los requerimientos de una de estas expresiones empíricas, pero que no cumple satisfactoriamente uno de estos parámetros, los resultados podrían variar, al punto de no tener utilidad la expresión elegida. Es por ello que se realizan los cálculos preferiblemente en una instalación pequeña, de modo que todos los parámetros sean obtenidos directamente. Después ajustamos el modelo matemático a la realidad de los resultados experimentales, y de esta manera surge una expresión aplicable a la pulpa con la que se experimentó.

En el caso de las serpentinitas no existe bibliografía que trate el problema de su hidrot transporte; por eso es necesario elaborar las recomendaciones de las serpentinas para calcular y proyectar el sistema de hidrot transporte de las serpentinas.

Para lograr este objetivo fue necesario la construcción de una estación de bombeo a escala semi-industrial en el área del ISMM, la cual fuera capaz de facilitar todas las variantes posibles durante la experimentación.

Las rocas serpentínicas se dividen en blandas o intemperizadas y en duras o sin intemperizar. Las rocas de interés para nuestro trabajo, están en la capa correspondiente a la serpentina dura. Estas rocas de dureza media siempre tienen como impurezas el FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, en el caso de nuestras menas aparecen además otras como CoO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, etc.

Experimentalmente se determinó que su densidad es de 2 200 kg/m<sup>3</sup> y que su humedad natural lo superaba el 13,25 %.

En el análisis granulométrico se tomó una muestra mineral de 118,152 kg, seleccionamos una torre de tamices con módulo igual a la 2, obteniéndose un total de 6 clases.

- 12,5 + 6,3      - 2,5 + 1,25
- 6,3 + 3,15      - 1,25 + 0,63
- 3,15 + 2,5      - 0,63

Los resultados del análisis mediante el tamiz aparecen reflejados en la Figura 1.

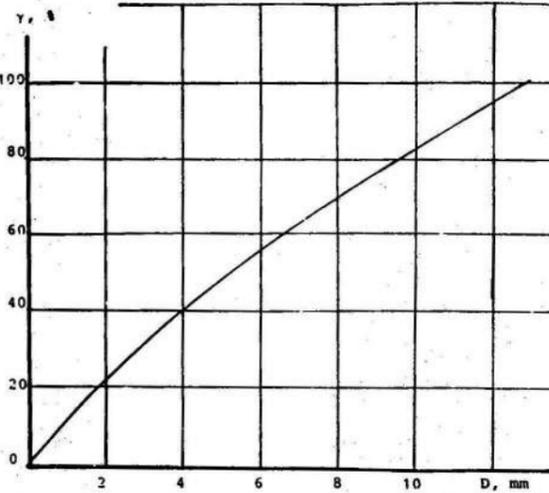


Figura 1 Característica sumaria de grosor para el mineral serpentínico

Para determinar la velocidad de caída libre de una partícula en un medio (agua destilada) en reposo se clasificaron 10 clases de tamaños.

- 12,5 + 10,0      - 4,76 + 3,15
- 10,0 + 8,0      - 3,15 + 2,5
- 8,0 + 6,35      - 2,5 + 2,0
- 6,35 + 5,0      - 1,25 + 1,0
- 5,0 + 4,76      - 0,63 + 0,5

Se seleccionaron 15 granos, de diferentes grosores, lo más representativo posible de su clase. El experimento se realizó colocando verticalmente un tubo de vidrio con diámetro 0,050 m, con agua destilada, y una a una se midió la velocidad con que se movía cada grano a través del medio, una vez concluida la experimentación se procedió a dar una justificación teórica de los resultados obtenidos.

Durante el cálculo se siguieron dos vías diferentes en la sustitución de los diámetros.

1. Considerar el diámetro del grano como el diámetro medio (diámetro según tamaño).

$$d_{med} = \frac{(d_1 + d_2)}{2}; \quad d_{eq} = (0,05 - 1,1) d_{med}$$

2. Considerar el diámetro de la partícula como el de una esfera convencional, cuyo volumen (v) es igual

al volumen del cuerpo de forma irregular (diámetro según peso)

$$d_{eq} = 1,24 \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}}, \quad (m)$$

M-Masa de partículas, kg

Al observar los criterios o fórmulas expuestas más arriba se llegó a la conclusión que los parámetros que rigen el proceso de sedimentación son la densidad del medio; densidad del sólido; viscosidad del medio; diámetro del grano y número de Reynolds.

Sin embargo la velocidad de sedimentación de cuerpos sólidos depende considerablemente de la forma de los granos.

Las investigaciones han permitido decir, que los granos de igual masa de una misma sustancia se sedimentan en las mismas condiciones, a diferentes velocidades por la variedad de su forma.

Significa esto que se hace necesario introducir en las expresiones teóricas un coeficiente que contemple este parámetro. El coeficiente denominado de forma, se determinó por:

$$\psi = \frac{V_e}{V_t}$$

V<sub>e</sub>-Velocidad experimental

V<sub>t</sub>-Velocidad teórica

ψ-Coeficiente de forma

Para seleccionar el criterio que más se aproximó a la experimentación se construyó la gráfica de la Figura 2 en ella se reflejan las curvas teóricas y experimental para la velocidad, en función del diámetro según el tamaño.

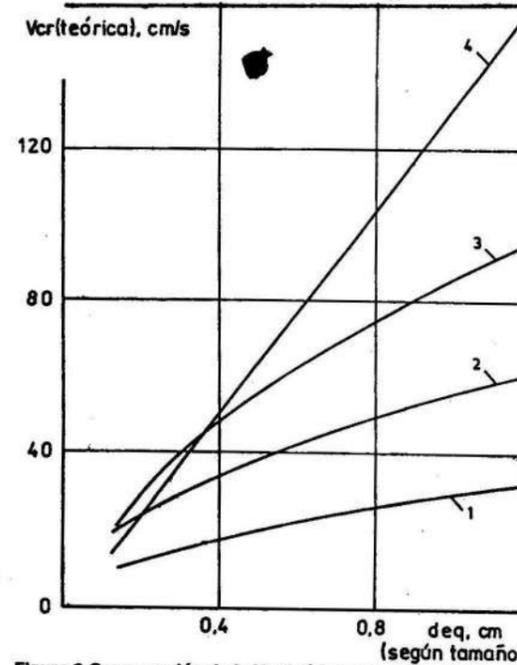


Figura 2 Comparación de la Vcr teórica y experimental

1. Experimental
2. Rittinger
3. Antonov
4. Allen

En la Figura 3 se representa el esquema de la instalación, una bomba centrífuga destinada para el trasego de materiales áridos es la encargada de hacer circular la pulpa a través de la instalación.

El sistema incluye dos tanques, el T<sub>1</sub> destinado para calibrar el medidor de Venturi y el T<sub>2</sub> para la alimentación directa de la bomba.

El material bombeado entra por un tubo con diámetro 100 mm, que en su parte más cercana a la bomba presenta una válvula para regular la velocidad del flujo. En el mismo conducto se instaló un medidor de Venturi y varios metros, después una ventana de cristal.

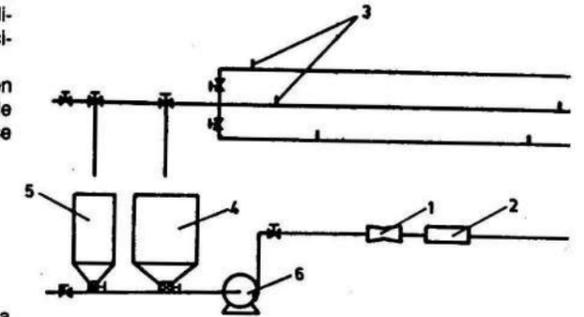


Figura 3 Instalación experimental

1. Metro venturi
2. Ventana de cristal
3. Toma de presión
4. Tanque alimentador
5. Tanque de medición
6. Bomba centrífuga de arena

La impulsión puede ser concentrada a través de válvulas a dos tuberías de distinto diámetro es decir 50 mm y 150 mm, en dependencia de las exigencias del investigador.

Cada tramo recto de tubería presenta dos formas de presión colocadas cada una a 50 veces el diámetro del tubo de la perturbación más cercana.

La determinación de las pérdidas hidráulicas se cumplieron en los tramos rectos de las tuberías con la ayuda de los manómetros diferenciales.

El valor de las pérdidas de presión para el tramo de la tubería cuya longitud es 1 m se determinó por:

$$i = \frac{\Delta H \cdot 12,6}{L}$$

ΔH-Diferencia de alturas medidas en el manómetro

L-Longitud del tramo de tuberías comprendido entre las tomas de presión (m)

Para la graduación del venturímetro se midió el tiempo de flujo de un volumen determinado de agua en la instalación.

La velocidad crítica del flujo de la pulpa se tomó directamente a través de la ventana de cristal.

En el estudio del transporte hidráulico es de especial importancia la influencia que ejerce la concentración de la pulpa sobre los valores de la velocidad crítica de las

pérdidas de presión, así como su influencia sobre la densidad de la hidromezcla. Se ha observado que en el trasiego de los minerales de hierro, el incremento de la concentración puede llegar a disminuir el valor de la velocidad crítica, siempre y cuando, las partículas sólidas finas de la mezcla formen con el agua una solución de densidad incrementada, es decir que la velocidad crítica de granos gruesos disminuye cuando se hacen acompañar por partículas pequeñas que elevan la densidad del medio en la medida en que se incrementó su concentración.

La densidad de la pulpa se determinó cinco veces para cada concentración por métodos gravimétricos. La experimentación se realizó sobre la base de 3 concentraciones volumétricas, 4,84; 7,43; 10,21 % que en peso significa 10,15 y 20 %.

Para comprobar la efectividad de la instalación experimental se previó la posibilidad de transportar un material a distintas concentraciones cuyos principales parámetros de hidrottransportación fueran conocidos con abundante experiencia, el material elegido fue la arena sílice.

De la experimentación con arena se llegó a la conclusión de que los resultados obtenidos son similares a los expuestos en otros trabajos. Este hecho dio garantías de precisión a la instalación montada.

La bibliografía sobre las expresiones teóricas y empíricas del cálculo del transporte por tuberías de las serpentinas no existió; como se dijo antes. En este trabajo teniendo en cuenta la experiencia que se tiene sobre el transporte del carbón y tomando en cuenta la similitud entre las densidades de estos dos materiales, además de otras propiedades, se siguieron dos metodologías, que han sido aplicadas en el transporte del carbón con buenos resultados.

Para la primera metodología la necesidad crítica teórica y la pendiente hidráulica se calcularon por las expresiones que siguen.

$$V_{cr} = 3,25 \sqrt[3]{a \cdot g \cdot D} \cdot \sqrt[6]{S \cdot \psi}$$

- a - Coeficiente que toma en cuenta la densidad del componente sólido
- g - Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- D - Diámetro de la tubería
- S - Concentración volumétrica
- ψ - Coeficiente del estado medio de la suspensión de la resistencia frontal ficticia experimental, que es la fricción del grosor hidráulico de partículas del material.

V<sub>cr</sub> - Velocidad crítica teórica

$$i = i_0 \left[ 1 + 0,13 \left( \frac{V_{cr}^2}{V \sqrt{g \cdot D}} \right)^3 \right]$$

V - Velocidad teórica para el flujo de la pulpa

Los cálculos realizados por la primera metodología son reflejados a través de curvas en la Figura 4, en el caso de la arena los resultados son similares, por eso no se representan.

De la observación se llegó a la conclusión de que es difícil introducir un coeficiente de corrección que haga

coincidir las curvas teóricas y las experimentales; por tanto queda desechada.

En la determinación teórica de la velocidad crítica se utilizó una expresión que ha dado buenos resultados en el transporte de las menas de carbón con diámetro 3 mm, esta es mostrada a continuación.

$$V_{cr} = 6 K_0 \sqrt[3]{2gDW} \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[6]{S}$$

K<sub>0</sub> - Coeficiente que se toma en función del diámetro medio de la partícula, para el caso nuestro d<sub>med</sub> = 2,096 mm

Las pérdidas teóricas se resolvieron de acuerdo con la expresión siguiente:

$$i = 15,8 i_0 \sqrt[4]{\frac{S d_{med}}{D}}$$

i - pendiente hidráulica para el agua

D - diámetro del tubo (m)

S - concentración volumétrica

Los resultados gráficos en este caso tanto para la arena como para la serpentina son similares al igual que en el caso anterior, por eso representamos en la Figura 5 los resultados de la mena objetivo de interés.

De la observación y comprobación de los resultados se pudo comprobar que es posible modificar el coeficiente numérico de las expresiones teóricas de modo que los resultados teóricos coincidan con los experimentales.

Esto se puede ver claramente en la proyección casi paralela de las curvas teóricas y experimentales.

La búsqueda de los nuevos coeficientes se determinó por.

$$K_i = \frac{i_{exp}}{i_t}$$

K<sub>i</sub> - coeficiente de corrección para las pérdidas

i<sub>exp</sub> - pérdidas experimentales

i<sub>t</sub> - pérdidas teóricas

$$K_i = \frac{0,5}{0,95} = 0,5$$

De modo que

$$i = K_i \cdot 15,8 i_0 \sqrt[4]{\frac{S d_{med}}{D}}$$

La expresión final queda

$$i = K_i \cdot 15,8 i_0 \sqrt[4]{\frac{S d_{med}}{D}} = 7,9 i_0 \sqrt[4]{\frac{S d_{med}}{D}}$$

Algo muy similar se efectuó en la velocidad crítica

$$C_v = \frac{2,5}{2,1} = 1,1$$

$$V_{cr} = C_v \cdot 6 \cdot K_0 \sqrt[3]{2gDW} \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[6]{S}$$

$$V_{cr} = 6,6 K_0 \sqrt[3]{2gDW} \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[6]{S}$$

Las últimas dos expresiones de la (V<sub>cr</sub>, i) son las expresiones que en lo adelante podrán aplicarse en los primeros cálculos del transporte hidráulico de las menas serpentiniticas.

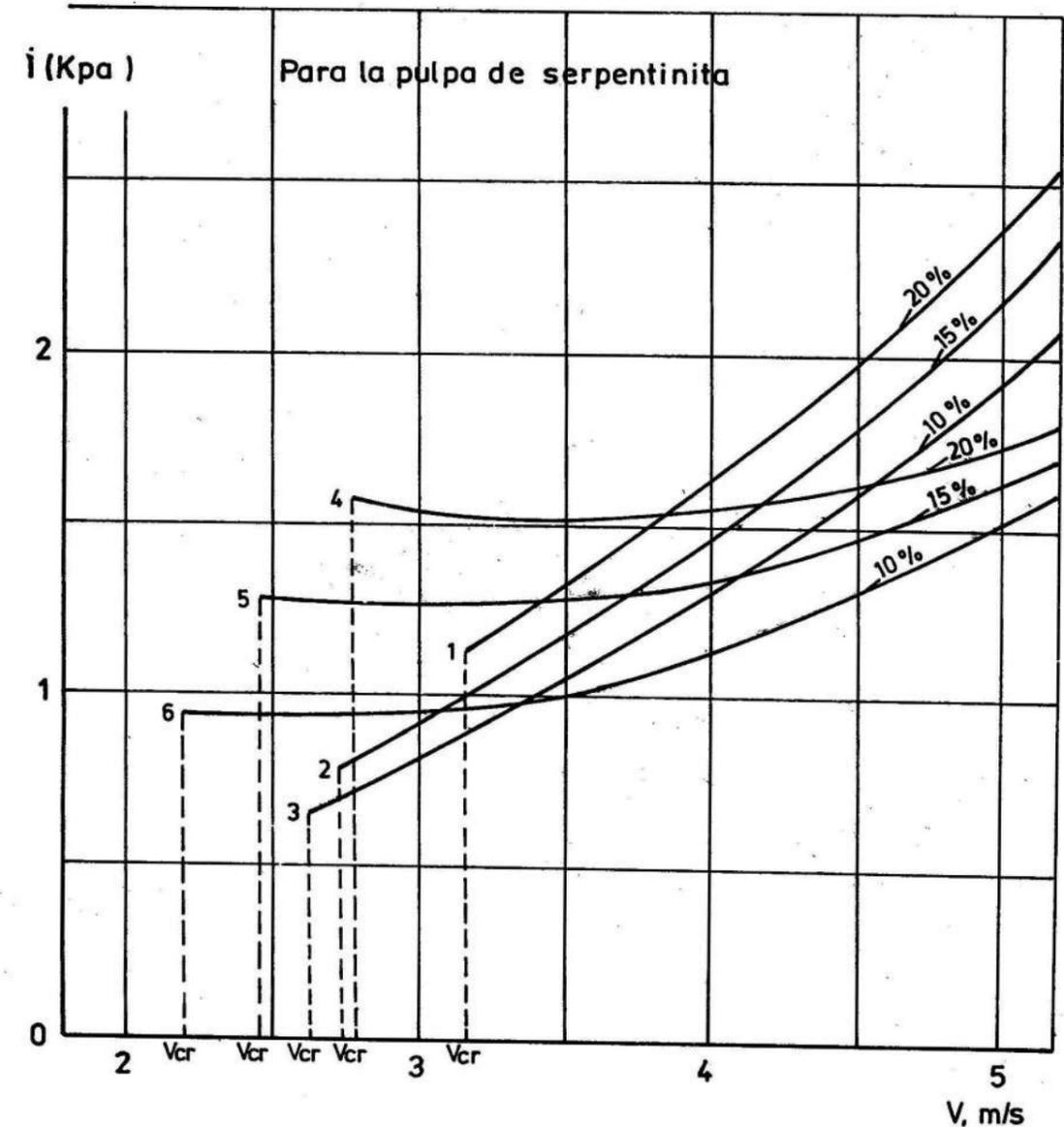


Figura 4 Dependencia (V<sub>cr</sub>) teórica y experimental por la metodología 1. Las curvas 1, 2, 3 experimentales y 4, 5 y 6 teóricas

#### CONCLUSIONES

La construcción de la instalación permitió. Construir la instalación hidráulica y obtener los principales parámetros del hidrottransporte. Estudiar las principales propiedades físico-mecánicas de la hidro-transportación y proponer una fórmula para determinar la velocidad de caída libre. Obtener experimentalmente, por primera vez, el valor de la velocidad crítica del mineral serpentinitico.

Obtener experimentalmente las pendientes hidráulicas del mineral serpentinitico a distintas concentraciones. Proponer las fórmulas para calcular la velocidad crítica y la pendiente hidráulica de la hidrotransportación del mineral serpentinitico.

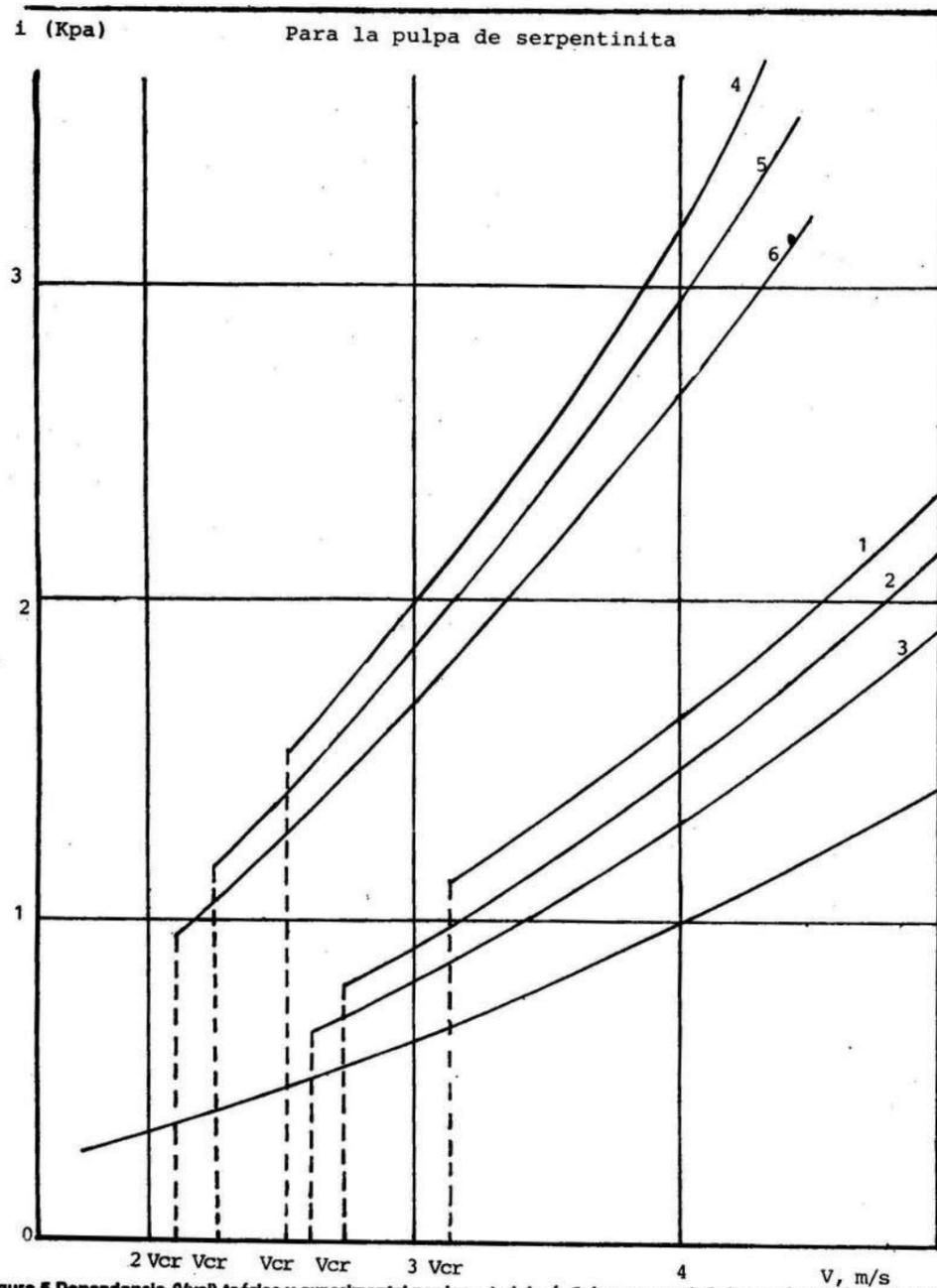


Figura 5 Dependencia ( $V_{val}$ ) teórica y experimental por la metodología 2. Las curvas 1, 2, 3 experimentales y 4, 5, 6 teóricas

#### REFERENCIAS

1. BROW, G. G.: *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. La Habana, Edición Revolucionaria, 1967.
2. COBIELLA R. J.: *Curso de Geología de Cuba*. La Habana, Editorial Pueblo y Educación, 1984.

3. Documentación Técnica. Electrobomba tipo PB 160/40. Empresa Comandante Ernesto Guevara, 1985.
4. FOMENKO, T. G.: *Proceso de Enriquecimiento de Minerales por Gravitación*. Moscú, Editorial Mir, 1980.
5. GONZALEZ, T.: *Características de las serpentinitas desintegradas de algunos yacimientos del macizo Mayarí-Baracoa*. Trabajo de Diploma. Fondo del ISMM, Moa, 1984.
6. PEREZ B. R.: *Investigaciones experimentales de los parámetros de transporte hidráulico de concentrados de hierro*. Serie de artículos Científico-Técnico. Ingeniería de Minas, No. 2, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1973.
7. SILIN, N. A. y otros: *Transporte hidráulico*. Kiev, Editorial Nauka, 1971.



**ACERO  
PARA EL DESARROLLO  
ENTRE EN CONTACTO  
CON NOSOTROS**

EMPRESA IMPORTADORA  
DE METALES, COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES

**STEEL  
FOR DEVELOPMENT  
GET IN TOUCH  
WITH US**

METAL, FUEL AND LUBRICANTS  
IMPORTING ENTERPRISE