

# Influencia de la concentración de sólidos en el coeficiente de corrección de carga-capacidad del transporte de hidromezclas lateríticas

Hernández-Ramírez, Gabriel; Rosa-de Armas, Yordan; Martínez-Rojas, Rodney; Pelegrín-Pérez, Eduardo; Pérez-García, Liudmila

Influencia de la concentración de sólidos en el coeficiente de corrección de carga-capacidad del transporte de hidromezclas lateríticas

Minería y Geología, vol. 37, núm. 4, 2021

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez', Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223569573005>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

## Influencia de la concentración de sólidos en el coeficiente de corrección de carga-capacidad del transporte de hidromezclas lateríticas

Influence of solids concentration on the load-capacity correction coefficient of lateritic hydro mix transport

Gabriel Hernández-Ramírez  
Universidad de Holguín, Cuba  
ghernandez@uho.edu.cu


 <https://orcid.org/0000-0001-6031-5263>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223569573005>

Yordan Rosa-de Armas  
Empresa Pedro Sotto Alba- Moa Níquel S. A., Cuba

 <https://orcid.org/0000-0002-7520-8266>


Rodney Martínez-Rojas  
Universidad de Moa, Cuba

 <https://orcid.org/0000-0002-6846-1183>

Eduardo Pelegrín-Pérez  
Empresa Pedro Sotto Alba- Moa Níquel S. A., Cuba

 <https://orcid.org/0000-0002-1369-4289>

Liudmila Pérez-García  
Universidad de Oriente, Santiago de Cuba,, Cuba

 <https://orcid.org/0000-0002-1705-8984>

Recepción: 05 Septiembre 2020  
Aprobación: 25 Septiembre 2021

### RESUMEN:

Se analiza la influencia de la concentración de sólidos en el coeficiente de corrección de carga-capacidad de las hidromezclas lateríticas del sistema de bombeo para la operación eficaz y energéticamente eficiente en las operaciones de la tecnología ácida a presión. Se modeló el comportamiento de carga, potencia y rendimiento de la bomba cuando se maneja hidromezcla laterítica con interacciones y características de las fases, que permiten determinar el comportamiento y las características reológicas de las muestras analizadas. Se concluye que la utilización de un modelo matemático para el coeficiente de corrección obtenido de forma experimental, que relaciona la concentración de sólidos con los parámetros energéticos del sistema de bombeo, permitirá evaluar las mejoras tecnológicas en la lixiviación ácida a presión, tales como la tecnología de preparación directa que logra mayores concentraciones de sólidos.

**PALABRAS CLAVE:** parámetros reológicos, coeficiente de corrección, potencia de bombeo, fluido no newtoniano.

### ABSTRACT:

The influence of solids concentration in load-capacity correction coefficient of lateritic hydro mixes of the pumping system was analyzed for an effective and efficient operation to work with pressure acid technology. The power, load and pump performance were modeled when handling lateritic hydro mix with interactions and characteristics of the phases, which make it possible to determine performance and rheological characteristics of the analyzed samples. It is concluded that using a mathematical model for correcting the coefficient obtained experimentally; which relates concentration of solids with energy parameters of the pumping system, will allow evaluating technological improvements in acid pressure leaching, such as the direct preparation technology, which achieves higher concentration of solids.

**KEYWORDS:** rheological parameters, correction coefficient, pumping power, non-Newtonian fluid.

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se reconoce que la tecnología más eficiente y económica para la obtención del níquel es la lixiviación ácida a presión, conocida como HPAL. Esta tecnología se basa en la disolución de los óxidos de níquel y cobalto con ácido sulfúrico. Estudios realizados sobre las diferentes tecnologías de producción de níquel (Castellanos y Hernández 2011; Chaviano 2015) indican que el proceso de lixiviación ácida a presión es la alternativa más económica para el procesamiento de minerales de níquel, aún para minerales de baja ley.

Las tendencias actuales en los procesos de lixiviación ácida son: operar las autoclaves con temperaturas de 260 °C -270 °C; calentamiento indirecto de las pulpas de alimentación; tecnología de preparación directa y empleo de agua hipersalina (Castellanos 2016; Chalkley 2016).

Se han desarrollado alternativas para el espesamiento de minerales arcillosos a escala experimental con productos de yacimientos minerales de Moa, Pinares, San Felipe y de Murrin Murrin, que permiten lograr hasta 60 % de sólidos y pulpas bombeables con tecnologías de preparación directa -sin espesamiento- (Castellanos 2009). Se plantea que una pulpa puede ser bombeada cuando presenta una viscosidad menor de 10 Pa·s. Las pulpas limoníticas naturales (no tratadas), con alta concentración de sólidos, se consideran no bombeables por lo que para su bombeo es necesario inyectar agua en el cono del sedimentador. En estas condiciones, se diluye la pulpa a la entrada del precalentador y la autoclave lo que provoca una disminución de la producción (Castellanos 2016; Hernández 2015).

Considerando que las caracterizaciones disponibles de las pulpas lateríticas (Garcell 1991; Cerpa 2001, 2003; Pérez 2010) se realizaron en yacimientos diferentes a los que se encuentran en explotación en la actualidad y se caracterizan como Bingham y Bulkley-Herschell según las concentraciones de sólidos, se hace necesario comprobar si las nuevas caracterizaciones reológicas tienen influencia sobre los parámetros energéticos del sistema de bombeo, pues los valores que se utilizan fueron obtenidos al inicio de la explotación de los yacimientos o consideran las hidromezclas lateríticas como fluidos newtonianos.

Se ha comprobado, teórica y prácticamente, que el contenido de sólidos tiene gran influencia sobre la viscosidad de las suspensiones acuosas de laterita que presentan un comportamiento reológico no newtoniano, que se describe por el modelo de Bulkley-Herschell, a concentraciones entre un 25 % y 47 % de sólidos y temperatura ambiente (Avramidis 1991; Garcell 1991; Cerpa 1996; Pérez 2004; Pérez 2008; Hernández 2015).

El objetivo de esta investigación fue comprobar, en las actuales condiciones de explotación de yacimientos con minerales de baja ley, si el comportamiento de los parámetros reológicos para concentraciones de sólidos tiene influencia en la obtención experimental del coeficiente de corrección de carga-capacidad del bombeo de pulpas lateríticas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Entre los factores involucrados en el proceso de transporte de hidromezclas del proceso de lixiviación ácida, la concentración de sólidos, expresado en por ciento en peso, es una de las variables más controlada y supervisada cada una hora en los puntos de toma de muestras de las plantas, pues de ella depende la eficiencia del proceso de extracción, así como el consumo de ácido requerido para ello.

Para determinar la concentración de sólidos, se procesaron los datos de operación de la planta. Como resultado de este análisis, se determinó que la concentración de sólidos de la pulpa cruda oscila entre 36 % - 46 % de sólidos, aunque el valor de mayor frecuencia se encuentra alrededor del 43 % por la característica del mineral alimentado, de modo que no se alcanza el valor deseado de diseño, correspondiente a 48 % de contenido de sólidos a la descarga de los espesadores que debe enviarse a Lixiviación (Tabla 1).

TABLA 1.  
Histórico de la concentración de sólidos en la pulpa cruda

Análisis Estadístico	Pulpa Cruda	
	Valor	%
Valor Mínimo	36,97	-
Valor Máximo	46,85	-
Valor Promedio	43,17	-
Desviación Estándar	1,62	-
Coefficiente de Variación	3,76	-
Mayor que 45	99	12
Menor que 40	383	47,9
Entre 40 y 45	421	40,1
Total		100

## 2.1. Definición de variables para el diseño de experimentos

En el diseño de experimentos se tuvieron en cuenta variables que se controlan en el proceso, tales como: composición química, contenido de sólidos, granulometría y temperatura; el comportamiento histórico se tuvo en cuenta para definir el dominio de cada una de ellas, así como varios parámetros estadísticos de interés.

De acuerdo con los razonamientos planteados por diferentes autores, sobre los factores reológicos que caracterizan las pulpas lateríticas y las limitaciones de los modelos obtenidos por Pérez (2010) y Hernández (2017), así como por la influencia que tienen en la viscosidad de la pulpa en la operación del sistema de bombeo, se seleccionan como variables independientes las siguientes: *s*: Coeficiente de Polidispersión (parámetro característico de la granulometría); %*S*: por ciento másico de sólidos en la pulpa (contenido de sólidos); *T*: Temperatura de la pulpa. Como variables dependientes o respuestas, los parámetros reológicos siguientes:  $\mu_a$ : viscosidad aparente de la suspensión;  $\tau_0$ : Esfuerzo cortante inicial; *K*: índice de consistencia; *n*: índice de flujo.

A las muestras se le realizaron análisis químico y se tuvo en cuenta el número de mineral (*Nm*) para predecir el comportamiento de la pulpa cruda en la sedimentación. La granulometría de la pulpa cruda se determinó con analizador de tamaños HORIBA LA-910 para conocer el comportamiento de las partículas menores de 0,84 mm (20 mesh).

Para el análisis experimental se seleccionan dos Unidades Demostrativas Productivas (UDP) donde se tomaron las siguientes muestras:

Muestra Compósito #1: pulpa laterítica a temperatura ambiente extraída del fondo del espesador convencional (TK-1A). En este espesador ocurre el proceso de sedimentación, con un tiempo de duración de 10 a 15 días, debido a la formación de la cama y a las características físico-químicas y reológicas del mineral. Debe lograrse un contenido de sólidos óptimo en el cono entre 46% y 48%.

Muestra Compósito #2: pulpa laterítica a temperatura ambiente extraída en la línea de transferencia de la pulpa espesada hacia la Planta de Lixiviación; esta muestra se corresponde a pulpa laterítica espesada en los seis espesadores.

## 2.2. Planeamiento experimental

Se experimentó con dos muestras de 200 g con tres réplicas cada una por UDP, contenidas en frascos tapados de 250 mL. Para la dilución de la pulpa inicial se añadió agua y para obtener concentraciones superiores al 40 % de sólidos se dejó sedimentar la pulpa y se le extrajo agua por decantación.

### 2.2.1. Equipos y utensilios

Equipos: Analizador de tamaños de partícula del tipo HORIBA LA-910. Viscosímetro rotacional marca HAAKE™ 550. Balanza técnica digital. Balanza de sólidos por secado. Agitador mecánico con impelente metálico.

Utensilios: Probetas: 100 mL y 1000 mL. Beaker de 100 mL. Recipientes de 5 L y 20 L. Jeringuillas de 20 mL. Frascos de 250 mL.

### 2.2.2. Obtención experimental de los parámetros operacionales de la bomba centrífuga

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó en la estación experimental de hidrotransporte de la Universidad de Moa. De la muestra compósito #2 se trasladó pulpa mineral para la estación experimental y se realizaron varias corridas con agua y con pulpa mineral a 41,93 % y a 42,36% de sólidos. La bomba para el experimento fue probada a varios números de revoluciones y regulando una válvula de estrangulación para variar el flujo.

### 2.2.3. Instrumentación utilizada para la medición y toma de datos

La instalación experimental de hidrotransporte cuenta con: Sensores de presión (SITRANSP) de 4 mA - 20 mA; Termoresistencia PT-100 (SA TERMIBEL N.V); Flujómetro Electromagnético ABB; Densímetro DT 301 (DensityTransmitter) y Analizador de red PQM II GE Multilin. Todo el sistema está controlado mediante el programa de adquisición de datos CitectSCADA.

## 2.3. Procedimiento experimental para la obtención de los parámetros de hidrotransporte

Las tres operaciones más importantes del procedimiento experimental son: la calibración de los instrumentos; la determinación de las propiedades del fluido viscoso y la determinación de las características de la bomba. El propósito de la prueba de la bomba es establecer las características de funcionamiento cuando bombea fluidos de diferentes materiales. Esta característica se expresa trazando en un gráfico la carga, la eficiencia y la potencia de la bomba contra el flujo de pulpa. Las características de funcionamiento de la bomba se experimentan como sigue:

Calentamiento del equipamiento para bombeo y recirculación del fluido por un tiempo de 30 min aproximadamente y así obtener una buena homogeneidad de la mezcla.

Se drenan las válvulas de la parte superior para eliminar el aire del sistema de tubería y evitar errores de medición de los instrumentos.

Se fija un número de revoluciones con el variador y se comienza a variar el flujo con la válvula de estrangulación comenzando a válvula cerrada (flujo cero).

Los datos son obtenidos en el sistema SCADA y exportados a una tabla Excel para su posterior procesamiento. El procedimiento se repite para los diferentes fluidos experimentados.

Durante el experimento se midieron las siguientes variables: Presión de succión en la bomba  $P_s$  (kPa); Presión de descarga de la bomba,  $P_d$  (kPa); Caudal  $Q$  ( $m^3/h$ ); Número de revoluciones  $n$  (r/min) y Potencia del motor  $P_m$  (kW).

### 2.3.1. Obtención de los coeficientes del modelo matemático de la operación del equipo de bombeo

Mediante la sustitución de las leyes de semejanza en el modelo de la característica de la bomba, se ha propuesto la siguiente relación (Turiño 1996).

$$H = a \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 + b \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right) \cdot Q - c \cdot Q^2 \quad (1)$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los parámetros de diseño de la bomba, obtenidos de la información suministrada por el fabricante al experimentar con agua.

Al obtener los coeficientes de corrección de carga y capacidad de las bombas centrífugas para fluidos viscosos, es posible corregir la característica operacional de estos equipos mediante las conocidas relaciones siguientes:

$$\frac{H_{EXP}}{H_{agua}} = C_H \quad (2)$$

$$\frac{Q_{EXP}}{Q_{agua}} = C_Q \quad (3)$$

Coeficientes de corrección de carga,  $C_H$ ; Coeficientes de corrección de capacidad,  $C_Q$ ; Altura Experimental,  $H_{EXP}$  (m); Altura del agua,  $H_{agua}$  (m); Caudal Experimental  $Q_{EXP}$  ( $m^3/h$ ); Caudal del agua  $Q_{agua}$  ( $m^3/h$ )

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación (1) se obtiene.

$$H = a \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \cdot C_H \pm b \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right) \cdot \frac{C_H}{C_Q} \cdot Q - c \cdot \frac{C_H}{C_Q^2} \cdot Q^2 \quad (4)$$

$$H = a \cdot C_H + b \cdot \frac{C_H}{C_Q} \cdot Q - c \cdot \frac{C_H}{C_Q^2} \cdot Q^2 \quad (5)$$

## 2.4. Procedimiento para la selección de parámetros energéticamente óptimos de operación eficaz de las bombas centrífugas

Con los datos obtenidos a diferentes velocidades y variando el caudal con la válvula de estrangulación, se encuentran las expresiones matemáticas de las curvas características de la bomba de la instalación con una serie de puntos representativos y se aplica el Método de los Mínimos Cuadrados para encontrar curvas características de diseño de las bombas rotodinámicas: Curva carga-capacidad, (H-Q); Curva potencia-capacidad, (P-Q); Curva eficiencia-capacidad, ( $\eta$ -Q).

En el procesamiento de los datos se tienen en cuenta los errores admisibles de los valores de las variables. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son: Altura que desarrolla la bomba a diferentes números de revoluciones; Potencia hidráulica y Rendimiento.

## 2.5. Diseño del experimento para determinar las características de funcionamiento de la bomba

Para determinar la influencia que ejerce el porcentaje de sólidos en peso, contenido en la hidromezcla laterítica, y el número de revoluciones del motor de la bomba sobre la caída de presión experimental, se utilizó un diseño de experimento multifactorial con ayuda del software STAGRAPHICS Centurion XV. Los factores experimentales a considerar fueron: el número de revoluciones del motor de la bomba ( $n$ , r/min) el cual se regula con ayuda del variador de frecuencia y la apertura de la válvula. Las variables de respuesta son el caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), la presión de entrada y salida de la bomba en kPa y la potencia del motor eléctrico, en kW.

El número de revoluciones del motor de la bomba igualmente se estudió a cuatro niveles (1 000; 1 200, 1 400 y 1 600) rev/min y se establecieron cuatro niveles de apertura de la válvula (25; 50; 75 y 100) %. La expresión matemática que describe el experimento factorial multinivel se muestra en la ecuación 6:

$$Ne = n^k \quad (6)$$

Donde:

$Ne$ , número de experimentos;  $k$ , número de factores experimentales;  $n$ , número de niveles. En este caso, se analizó la influencia de dos factores, de aquí que  $k = 2$  luego considerando cuatro niveles, el número de experimento fue  $Ne = 4^2 = 16$  para cada número de revoluciones.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se profundizó en la investigación de las propiedades de la pulpa laterítica cruda, sobre la base del experimento y estudio de sus principales características de transportación; así se pudo determinar el uso de modelos matemáticos específicos que se ajustan al fluido estudiado.

### 3.1. Composición química de las suspensiones lateríticas

La Tabla 2 muestra que la pulpa de la muestra compósito #2 posee un alto contenido de hierro, característica típica de las lateritas cubanas, en las que abundan los óxidos de hierro (Agyei 2006; Proenza 2015). En cada

muestra los elementos nocivos sílice, magnesio y aluminio tienen influencia directa en el número de mineral y este a su vez en el proceso productivo y los parámetros óptimos para la operación de la planta.

TABLA 2.  
Composición química y número de mineral de la muestra #2

Elementos	%
Ni	1,13
Co	0,1
Fe	40,8
Mg	1,77
Al	4,24
SiO <sub>2</sub>	6,07
Mn	0,77
Nm	8,7

En las actuales condiciones de explotación resulta de interés evaluar la composición mineralógica de la mena por el papel importante que juega en la sedimentación de las pulpas de minerales lateríticos y comprobar si en estas se presentan como fases secundarias la gibbsita, cuarzo y antigorita, que son de bajas densidades y que generan baja velocidad de sedimentación, en tanto que la presencia de fases minerales densas como la hematita, magnetita y maghemita aumentan la velocidad de sedimentación.

### 3.2. Análisis granulométrico

Las distribuciones granulométricas de las muestras compósitos indican que están constituidas por partículas pequeñas, inferiores a 0,006872 mm, que son las que le confieren propiedades plásticas a las pulpas. Existe un predominio de las fracciones finas de forma general y el D80 se corresponde con el de partículas menores a 7  $\mu$ m, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor como se muestra en la Figura 1, por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, así como su comportamiento reológico; es decir, las partículas de estos materiales tienen un comportamiento propio de sistemas polidispersos (Hernández 2016).



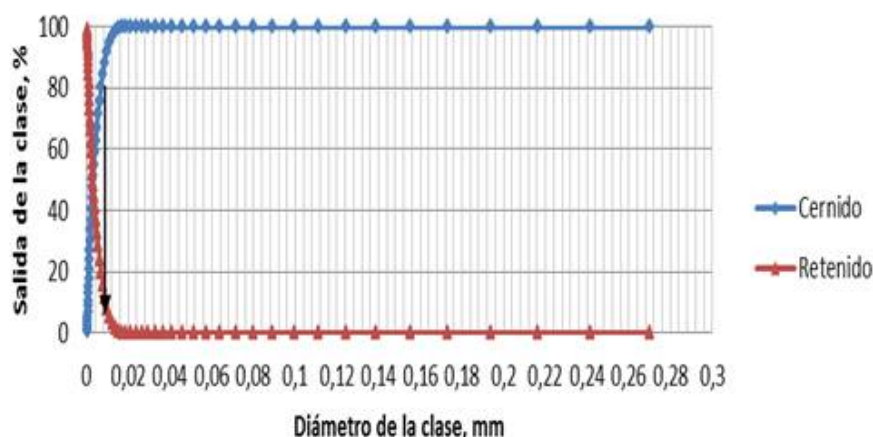


FIGURA 1.

Distribución de tamaño de partículas de la muestra compósito #2.

Las características granulométricas, químicas y mineralógicas de las menas definidas por el tipo de basamento, determinan el comportamiento de la mena en el proceso de lixiviación ácida, por lo que se requiere de un mayor estudio de la relación entre la roca madre, la mena y el comportamiento industrial de la misma, a fin de determinar las regularidades existentes entre la mineralización resultante de las litologías del basamento y el comportamiento de los parámetros industriales en yacimientos de la empresa.

### 3.3. Resultados experimentales de la reología en pulpa cruda

La Tabla 3 describe el comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas del análisis de la muestra compósito #2. A medida que aumenta la concentración de sólidos, los esfuerzos de corte ( $\tau$ ) se incrementan, al igual que el valor de las viscosidades aparentes para un valor fijo de gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ).

TABLA 3.

Parámetros reológicos según el Modelo de Bulkley-Herschel

% Sólidos	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$			
	( $\tau_0$ )	K	n	R
41,9	9,96	3,7	0,68	0,9953

Al representar gráficamente los datos experimentales de gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ) contra esfuerzo de corte ( $\tau$ ) se trazaron las curvas de flujo a partir del diseño de una aplicación informática (Hernández 2017). Los resultados fueron ajustados al modelo Bulkley-Herschel para plásticos reales, indicando la presencia de un esfuerzo de corte inicial, y se obtienen los parámetros reológicos (esfuerzo cortante inicial, índice de consistencia e índice de flujo). Los resultados representan el comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas, lo que permite determinar la influencia de los parámetros reológicos en el sistema de bombeo de hidromezclas lateríticas.

3.4. Curvas características de la bomba

En la Tabla 4 y en la Figura 2 se muestran los resultados de los modelos y de las curvas de carga–capacidad (H-Q) característicos de la bomba centrífuga obtenidos primeramente con agua.

TABLA 4.  
Modelos de las curvas carga – capacidad de la bomba al experimentar con agua

r/min	Modelo carga–capacidad (H-Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1 600	$H_{1600}(Q) = 72,8436 - 0,005147 \cdot Q - 0,00071 \cdot Q^2$	0,97	0,98
1 400	$H_{1400}(Q) = 56,6415 - 0,008479 \cdot Q - 0,00057Q^2$	0,98	0,58
1 200	$H_{1200}(Q) = 42,7798 + 0,001342 \cdot Q - 0,00064 \cdot Q^2$	0,98	0,43
1 000	$H_{1000}(Q) = 31,3192 - 0,01112 \cdot Q - 0,00014 \cdot Q^2$	0,96	0,25

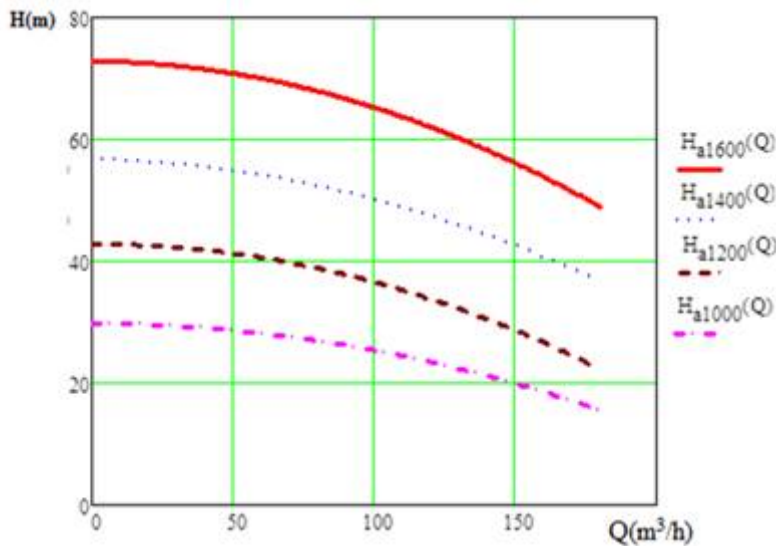


FIGURA 2.  
Curvas de carga – capacidad (H-Q) de la bomba a diferentes números de revoluciones al experimentar con agua.

Posteriormente se obtuvieron las curvas características de la bomba centrífuga experimentando con hidromezcla laterítica al 41,93 % y 42,36 % de sólidos. Los resultados se resumen en la Tabla 5 y la Figura 3.

TABLA 5.  
Modelo de la curva carga–capacidad al experimentar con pulpa al 41,93 % de sólidos

r/min	Modelo carga–capacidad (H-Q)	(R <sup>2</sup> )
1400	$H_p(Q) = 31,71 - 0,037 \cdot Q - 0,0001Q^2$	0,99

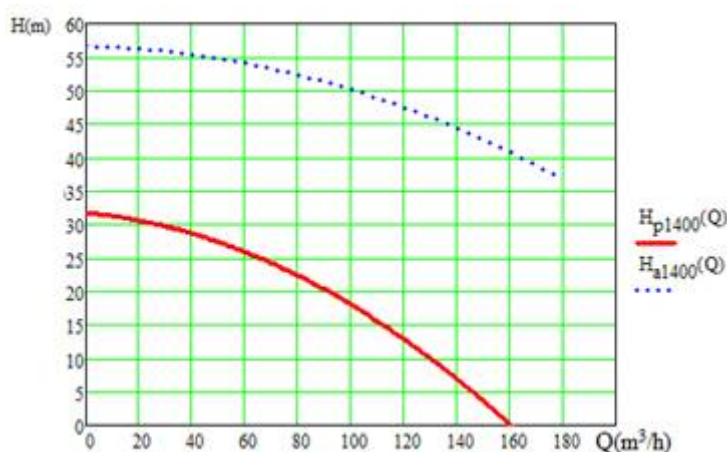


FIGURA 3.

Curvas de carga-capacidad (H-Q) a 1400 r/min de la pulpa. Hp (41,93% de sólidos) y agua Ha

La carga de la bomba disminuye cuando se bombea hidromezcla laterítica al 41,93 % y 42,36 % de sólidos en suspensión. En la Figura 4 se presentan las curvas para los diferentes fluidos y se muestra la disminución de la carga de la bomba cuando maneja agua y sólidos en suspensión, aun cuando la variación del por ciento de sólidos es pequeña, la caída de la carga se incrementa.

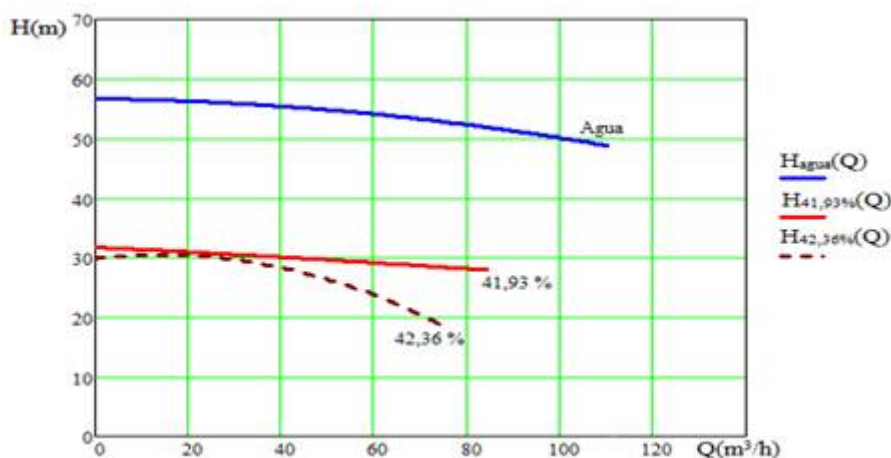


FIGURA 4.

Curvas características de carga-capacidad (H-Q) para la bomba cuando se experimenta con agua y la pulpa laterítica a 41,93 % y 42,36 % de sólidos, a 1400 r/min.

Se determina el coeficiente de corrección experimental mediante la relación de los modelos de las curvas de carga de la bomba cuando maneja pulpa laterítica al 41,93 % de sólidos y el agua. Para ello se utiliza el modelo propuesto por Hernández (2019), ecuación 10 y los resultados del análisis químico de la muestra compuesto #2, donde el porcentaje de sólidos de la pulpa es de 41,93 %, temperatura ambiente y el número de mineral Nm es 8,7. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

$$CH = 1,5436605 - 0,0290001 \%S + 0,0040620 T + 0,0085463 N_m \quad (10)$$

TABLA 6.  
Resultados del cálculo del coeficiente de corrección

<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	0	38,4	76,8	96	134,4	172,8	192
<b>Ha (m)</b>	56,64	55,48	52,65	50,60	45,26	38,24	34,11
<b>Hp (m)</b>	31,71	30,14	28,28	27,24	24,93	22,33	20,92
<b>CH<sub>experimental</sub></b>	0,56	0,54	0,54	0,54	0,55	0,58	0,61
<b>CH<sub>promedio</sub></b>	0,56						
<b>CH modelo matemático</b>	0,54						
<b>Error, %</b>	3,70						

Al calcular para cada variable CH<sub>j</sub> el error medio absoluto porcentual  $e$  (con respecto al valor CH<sub>im</sub> del modelo) se comprueba que, a pequeños cambios en los valores experimentales, no se producen cambios significativos en los resultados y por tanto los pronósticos obtenidos mediante los modelos comprueban su efectividad.

$$e_i = 100 \frac{|Y_{i1} - Y_{im}| + |Y_{i2} - Y_{im}| + |Y_{i3} - Y_{im}|}{3 Y_{im}} \quad (11)$$

Si se realiza un diagnóstico operacional de sistemas de bombeo instalados se obtiene la característica fundamental de los parámetros energéticos del sistema y el punto de operación, el cual exige una serie de datos, los que responden a la nomenclatura mencionada, ver Figura 5.

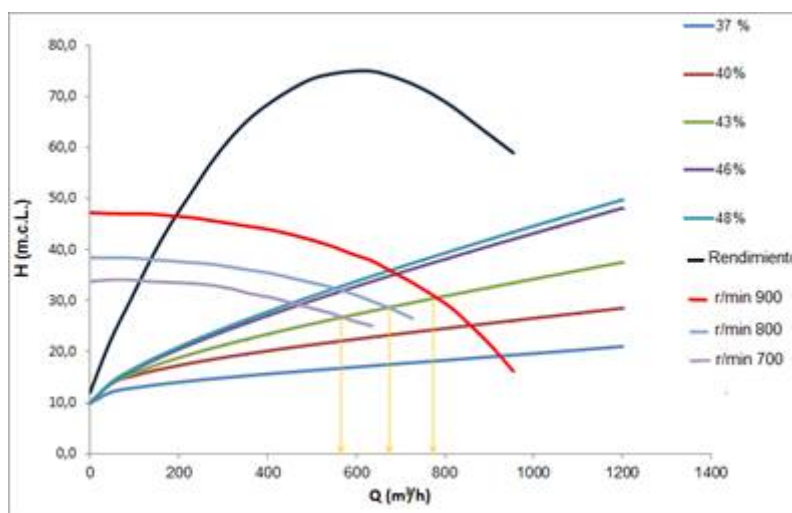


FIGURA 5.  
Punto de operación.

Comparando los resultados del CH experimental con el CH propuesto por Hernández (2019) para las hidromezclas lateríticas, con concentraciones de sólidos superiores a 40 %, la carga dinámica se incrementa en un 50 % cuando se maneja agua en los sistemas de hidrotransporte y tiene lugar una reducción del caudal

sino es corregida la frecuencia de rotación del impelente, que garantizará los caudales requeridos en regímenes de operación energéticamente óptimos.

#### 4. CONCLUSIONES

La utilización del modelo matemático para el coeficiente de corrección obtenido de forma experimental, el cual relaciona la concentración de sólidos con los parámetros energéticos del sistema de bombeo, permitirá evaluar las mejoras tecnológicas en la lixiviación ácida a presión, tal como la tecnología de preparación directa que logra mayores concentraciones de sólidos. Los modelos matemáticos obtenidos de parámetros energéticos determinan la productividad del sistema de bombeo de hidromezcla laterítica cruda como flujos, cargas, pérdidas hidráulicas, potencia y eficiencia en función de los parámetros reológicos de los fluidos que transportan. Se determinó el coeficiente de corrección de carga – capacidad experimental para los sistemas de bombeos de hidromezcla laterítica cruda. Se demostró con el diagnóstico de operación que en las instalaciones analizadas se reduce la capacidad, la carga y el rendimiento de bombeo cuando se manipula hidromezcla laterítica a temperatura ambiente con sólidos en suspensión.

#### 5. REFERENCIAS

- Agyei, G. 2006. *Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa*. Tesis Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Cuba.
- Avramidis, S., Turian, R. M. 1991. Yield Stress of Laterite Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 143 (1) :54.
- Castellanos, J., Hernández, A.N. 2011. El futuro de la laterita de níquel, *Reunión de Experto Interoceanmetal (IDM), Polonia y CUARTA CONVENCION DE LA TIERRA, GEOCIENCIAS*.
- Castellanos, J., Montejo, E. 2009. Procedimiento para aumentar el % sólidos de minerales limoníticos y arcillosos en pulpas de alimentación a las autoclaves en el proceso de lixiviación ácida. In CIPIMM (Ed.). Cuba.
- Castellanos, S. J., Hernández, M. N. 2016. Procesamiento de minerales níquel arcillosos y de mala sedimentación por lixiviación ácida a presión. In CIPIMM (Ed.), *Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. MINEMETAL 2016. ISBN. 978-959.7117-73-5*. Matanzas. Cuba.
- Cerpa, A., García, J., Serna, C. J., Artaj, P. 2001. Relationship Between the Colloidal and Rheological Properties of Mineral Suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79 (4) :608-611
- Cerpa, A., P. Tartaj, M. T., García-González, J., Requena, L., Garcell, L., Serna, L. 1996. Rheological properties of concentrated lateritic suspensions. *Progr Colloid Polym Sci*, 100: 266-270
- Cerpa, A., Tartaj, P., García-González, M. T., Serna, C. J., García, A. 2003. Estudio comparativo del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes yacimientos que procesa la Empresa Moa Níquel S.A. *Rev. Latin. Am. Met. Mat.*, 23 (1) :03-08
- Chalkley, M. E., Matos, W. R., Ellenwood, S. 2016. Successfully adapting to continuing challenges at the Moa joint venture. In CIPIMM (Ed.), *Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. MINEMETAL 2016* Matanza. Cuba.
- Chaviano, L. 2015. *Mejoras tecnológicas para las plantas con Lixiviación Ácida a Presión*. Informe técnico. Centro de Información. Empresa Pedro Soto Alba
- Garcell, L. 1991. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. *Minería y Geología*, 8 (1-3) :19-23.
- Hernández, G., Legrá, A., Garcell, L., Martínez, R. 2016. Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado. *Geología y Minería*, 32 (3) :47-59
- Hernández, G., Legrá, A., Ramírez, B., Pérez, L. 2017. Modelos matemáticos para pronosticar parámetros reológicos de hidromezclas lateríticas. *Geología y Minería*, 33 (4) : 384-400.

- Hernández, G., León, A., . 2019. Mathematical modeling of the coefficient of load correction of the pumping of hydromixtures lateritic *DYNA*, 86 (208) :19-27.
- Hernández, G., Martínez, R., Durán, C., Pérez, O. 2015. Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería y Geología*, 31 (3): 109-127.
- Pérez, L. 2004. *Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloidquímicas de las suspensiones lateríticas*. Tesis Maestría., Universidad de Oriente. Cuba.
- Pérez, L., Cardero, Y., Lamothe, Y., Garcell, L. 2008. Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita. *Tecnología Química*, XXVIII (1) :22-33.
- Pérez, L., Garcell, L., Rojas, A., Simoes, R . 2010. Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa. *Minería y Geología*, 26 (4): 16-35.
- Proenza, J. 2015. Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. *Macla*, 20 3:9
- Turiño, I. M. 1996. *Procedimientos metodológicos para la determinación del punto de operación en sistemas de bombeo mediante modelos matemáticos*. Tesis Doctorado, Universidad Central de las Villas, Cuba

## INFORMACIÓN ADICIONAL

*Conflicto de intereses:* Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

*Contribución de los autores:* GHR: redacción, experimentación y análisis de resultados. YRDA: experimentación. RMR: análisis de resultados y redacción del manuscrito. EPP: experimentación y análisis de resultados. LPG: análisis de resultados y revisión de la versión final.