

Influencia del comportamiento reológico de las pulpas lateríticas en la eficiencia de bombeo

Influence of the rheological behavior of lateritic pulps on pumping efficiency

Liudmila Pérez-García^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-1705-8984>

Gabriel Hernández-Ramírez² <https://orcid.org/0000-0001-6031-5263>

Queilan Rodríguez Laffita³ <https://orcid.org/0000-0003-3494-1987>

Leonel R. Garcell-Puyáns¹ <https://orcid.org/0000-0001-6740-8017>

Arístides Alejandro Legrá-Lobaina² <https://orcid.org/0000-0002-4793-4754>

¹Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Química y Agronomía. Cuba

²Universidad de Holguín. Cuba

³Empresa Moa Nickel S.A. “Pedro Sotto Alba”, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: lp Garcia@uo.edu.cu

RESUMEN

Para el trabajo experimental de esta investigación se tomaron muestras de la pulpa de alimentación al proceso de Lixiviación Ácida a Presión y se evaluaron diferentes concentraciones de sólido (37, 40, 43, 46 y 48 %) y temperaturas (28, 40, 50, 60, 70, 80 y 90°C). Para el análisis químico se empleó la Técnica de Difracción de Rayos X, la distribución granulométrica se determinó en un analizador de tamaño de partículas del tipo Analysette 22 COMPACT y las mediciones reológicas se realizaron con un viscosímetro rotacional de marca HAAKE VT 550. De esta forma, se determinó que el Fe es el elemento predominante en la composición química de las muestras, pero con valores inferiores al normado (47,5 %), debido al incrementando los nocivos (SiO₂, Mg y Al) por el agotamiento de las reservas mineras; y que todas las pulpas analizadas están constituidas mayoritariamente por partículas menores de 50 μm , que le confieren

propiedades plásticas y determinan su comportamiento reológico, el cual puede describirse por los modelos de Bulkley- Herschel y Ostwald de Waele. Se demostró que el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente se incrementan a medida que aumenta el contenido de sólidos en las pulpas y, por lo tanto, se requiere mayor potencia de bombeo; por el contrario, disminuyen con el aumento de la temperatura a un contenido de sólidos fijo. Se comprobó que las bombas evaluadas trabajan en rangos de eficiencia aceptables (de 66 a 74%) y todos los puntos de operación cumplen con los rangos de diseño.

Palabras clave: laterita; reología; polidispersión; potencia.

ABSTRACT

For the experimental work of this research, samples of the pulp fed to the Acid Pressure Leaching process were taken and different concentrations of solid (37, 40, 43, 46 and 48%) and temperatures (28, 40, 50, 60, 70, 80 and 90 ° C). For the chemical analysis the X-ray Diffraction Technique was used, the particle size distribution was determined in a particle size analyzer of the Analysette 22 COMPACT type and the rheological measurements were made with a HAAKE VT 550 brand rotational viscometer. In this way, it was determined that Fe is the predominant element in the chemical composition of the samples, but with values lower than the norm (47.5%), due to the increase in harmful substances (SiO₂, Mg and Al) due to the depletion of mining reserves; and that all the pulps analyzed are mainly constituted by particles smaller than 50 μm , which confer plastic properties and determine their rheological behavior, which can be described by the Bulkley-Herschel and Ostwald de Waele models. It was shown that the shear stress and the apparent viscosity increase as the solids content in the pulps increases and, therefore, more pumping power is required; on the contrary, they decrease with increasing temperature at a fixed solids content. The evaluated pumps were found to work within acceptable efficiency ranges (from 66 to 74%) and all operating points comply with the design ranges.

Keywords: laterite; rheology; polydispersity; power.

Recibido: 18/04/2021

Aceptado: 10/08/2021

Introducción

Uno de los elementos de mayor influencia en el consumo energético de las empresas minero-metalúrgicas ubicadas en el municipio de Moa, es el amplio sistema de bombeo con que cuenta, donde se trasiegan diferentes fluidos; uno de ellos es la pulpa mineral con comportamiento reológico no newtoniano, debido al efecto de diversos factores tales como la concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de las partículas, el pH, la temperatura y la composición mineralógica. ^(1, 2)

Conocer las características reológicas de los fluidos que se trasiegan es imprescindible para la selección adecuada de equipos, tuberías y bombas; o la evaluación de los mismos una vez instalados. El desconocimiento que existe en este sentido conlleva a que se tomen decisiones que, en lugar de mejorar la operación del sistema de transporte de suspensiones, provoca anomalías que no tienen explicación aparente, o se realice una inadecuada selección de tuberías y bombas influyendo de manera significativa en el consumo energético y el costo de producción. ^(3,4)

En el campo minero-metalúrgico, la reología es aplicada al estudio de la dependencia del comportamiento hidráulico de pulpas minerales en relación al tamaño de sus partículas, de la química de sus superficies, de las características y dosificación de floculantes, de su concentración y de la energía que se le aplica a la suspensión. ^(2, 5, 6)

Se ha comprobado que el contenido de sólidos influye grandemente sobre la viscosidad de las suspensiones acuosas de laterita, las cuales presentan un comportamiento reológico fuertemente no newtoniano, que se describe por el modelo de Bulkley-Herschel, a concentraciones entre un 25 y un 47 % de sólido y temperatura ambiente. ^(7, 8, 9)

Aunque se han realizado pocos estudios acerca del efecto de la temperatura, se ha confirmado que el esfuerzo cortante y la viscosidad, así como los demás parámetros reológicos, disminuyen al aumentar la temperatura y este es el comportamiento típico esperado en la mayoría de los líquidos y suspensiones. Los problemas de alta viscosidad que en ocasiones se presentan con las pulpas lateríticas ocurren a temperatura ambiente.

^(8, 9)

Por lo antes expuesto, se decidió realizar el presente trabajo, que tiene como objetivo caracterizar reológicamente la pulpa laterítica en función de la concentración y la temperatura para determinar su influencia en el sistema de bombeo que se encarga de su alimentación al proceso de Lixiviación Ácida a Presión.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de los experimentos se determinó el rango de operación de la Planta de Espesadores y se decidió evaluar los siguientes porcentos de sólido: 37, 40, 43, 46 y 48% a temperaturas desde 28°C hasta 90°C. Para ello se hizo necesario tomar diferentes muestras de pulpa cruda y precalentada para evaluar su comportamiento reológico: a la salida de un sedimentador convencional (TK-A), a la salida del sedimentador de alto rendimiento (TK-D), al que se adiciona un floculante y a la salida de los tanques precalentadores de mineral (P.Prec). También se tomaron muestras de agua de reboso de los tanques sedimentadores para realizar las diluciones necesarias.

La **composición química** de las muestras estudiadas fue determinada por el método de fluorescencia de rayos X, también conocido como Método FRX en un Espectrómetro de Fluorescencia de rayos-X PW 1480 (Philips).

La determinación de las **distribuciones granulométricas** de las muestras estudiadas se realizó mediante un analizador de tamaño de partículas del tipo “Analysette 22” COMPACT.

Para las **mediciones reológicas** se utilizó un viscosímetro rotacional marca HAAKE VT 550, al cual se le conectó una bomba de flujo Master Flex Modelo 77601-10 para hacer recircular el agua a diferentes temperaturas para precalentar la pulpa. Se utilizó un sensor estándar tipo SV DIN, que se emplea para las mediciones con líquidos de alta viscosidad.

Resultados y discusión

Composición química de las muestras utilizadas

Como puede apreciarse en la tabla 1, estas pulpas poseen un alto contenido de hierro, característica típica de las lateritas cubanas, en las que abundan los óxidos de hierro, ⁽¹⁰⁾

aunque se encuentra por debajo del valor normado para el proceso (47,5 %) debido a cambios en el mineral de alimentación por el agotamiento de las reservas mineras. Por este mismo motivo, se han incrementado los nocivos (SiO₂, Mg y Al); lo cual ha sido perjudicial para el proceso porque se ha tenido que operar con relaciones ácido/mineral (RAM) más altas para mantener buenos valores de extracción de Ni y Co. A pesar de lo antes expuesto, el mineral analizado posee buenas características de sedimentación (7 < Nr min < 14).

El Número de Mineral (Nr min) se emplea para predecir el comportamiento de la pulpa cruda en la sedimentación ^(1, 11) y se define por la ecuación 1.

$$Nr\ min = \frac{\%Mg + \%SiO_2}{\%Co + \%Mn} \dots\dots\dots (1)$$

La composición química de la muestra del TK-D difiere un poco de las restantes porque, aunque fueron tomadas en el mismo momento, son minerales diferentes; debido a que el TK-D posee un tiempo de residencia menor (20 h) que los convencionales (8 días).

Tabla 1- Composición química de las muestras seleccionadas

Elemento (%)	Muestras		
	TK-A	TK-D	P.Prec
Ni	1,21	1,3	1,21
Co	0,11	0,121	0,112
Fe	42,9	43,9	43,1
Mg	1,77	1,94	1,61
Al	4,43	4,32	4,44
SiO ₂	6,61	5,21	6,52
Cr	1,55	1,68	1,57
Mn	0,75	0,79	0,73
Cu	0,029	0,03	0,028
Zn	0,036	0,036	0,036
Ni + Co	1,32	1,421	1,322
Nr min	9,74	7,85	9,65

Distribución de tamaño de las partículas que conforman la fase sólida de las muestras utilizadas

Con el análisis de las muestras estudiadas se pudo determinar que están constituidas por partículas pequeñas, inferiores a $50 \mu m$, que son las que les comunican propiedades plásticas a las pulpas. Se comprobó que el modelo definido por la ecuación 2 ^(1, 11) describe la distribuciones granulométricas obtenidas con altos coeficientes de regresión (ver tabla 2).

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \right)^s \dots\dots\dots (2)$$

Tabla 2- Parámetros granulométricos que describen el modelo de polidispersión

Muestras	D ₅₀ (μm)	B _N	s	R
TK-A	2,98	0,1738	4,1989	0,9918
TK-D	3,087	0,3792	1,6098	0,9963
P. Prec	2,907	0,4354	1,4806	0,9949

Para facilitar el procesamiento de los datos se utilizó un software ^(11, 12) que permite el ajuste del modelo (ecuación 2) para la determinación del coeficiente de polidispersión. Se pudo comprobar que el modelo fue capaz de describir la distribución granulométrica de todas las muestras con elevados coeficientes de correlación, a pesar de las pequeñas diferencias existentes entre ellas. La mediana (D₅₀) de la pulpa tomada a la salida del TK-D fue la mayor, lo que puede atribuirse al efecto del floculante, sin embargo, la del TK-A fue la de mayor polidispersión (s).

Resultados de análisis reológico de la pulpa laterítica a diferentes porcentajes de sólidos

Después de preparar las suspensiones de cada muestra, a los porcentajes de sólidos definidos para los experimentos (37, 40, 43, 46 y 48 %S), se comenzaron las mediciones reológicas a temperatura ambiente. Los resultados obtenidos se muestran en las curvas de flujo de las figuras 1 y 2; donde puede apreciarse el comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas por la forma de las curvas. Por otra parte, se aprecia que a medida que aumenta la concentración de sólidos, los esfuerzos cortantes se incrementan para un valor fijo de gradiente de velocidad.

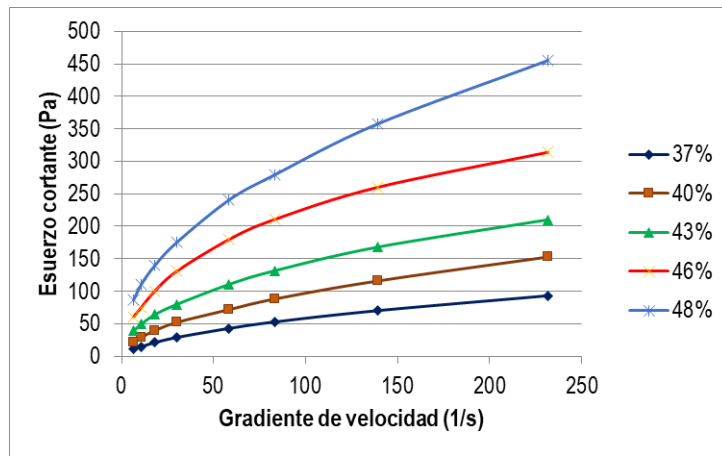


Fig. 1- Curvas de flujo a diferentes porcentos de sólido a 28°C de la muestra TK-A

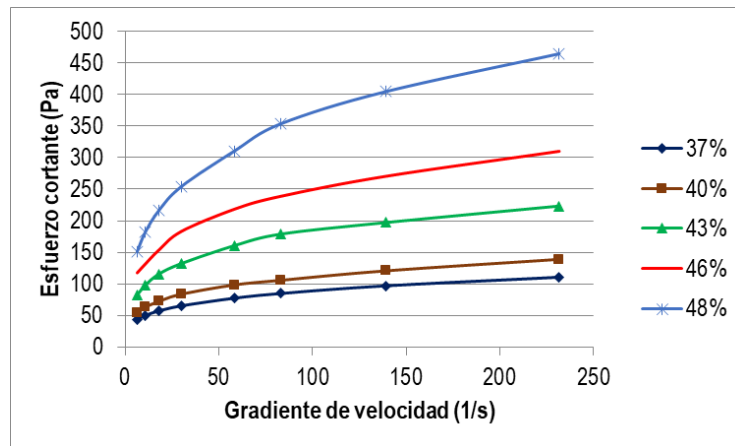


Fig. 2- Curvas de flujo a diferentes porcentos de sólido a 28°C de la muestra TK-D

Los resultados experimentales fueron ajustados al modelo de Bulkley-Herschel, para fluidos plásticos reales empleando una Aplicación Informática desarrollada en el ISMM para describir la distribución granulométrica y la reología de hidromezclas ^(11, 13). Se procedió también al ajuste con el modelo de Ostwald de Waele, que describe a los fluidos pseudoplásticos, con coeficientes de regresión también por encima del 99%; los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3 y 4. Como puede apreciarse, los valores de esfuerzo cortante inicial (τ_0) y del índice de consistencia (K) aumentaron, mientras que los de n disminuyeron, con el incremento de la concentración de fase sólida en la suspensión.

Tabla 3- Parámetros reológicos para cada contenido de sólidos de la muestra TK-A

% Sólidos	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$				$\tau = K\dot{\gamma}^n$		
	τ_0	K	n	R	K	n	R
37	1,978	3,438	0,60	0,9997	3,742	0,59	0,9988
40	4,006	5,721	0,60	0,9998	6,853	0,57	0,9990
43	4,357	10,023	0,55	0,9999	11,069	0,54	0,9997
46	12,953	20,611	0,50	0,9999	23,818	0,48	0,9998
48	16,109	28,943	0,50	0,9999	36,869	0,46	0,9998

Tabla 4- Parámetros reológicos para cada contenido de sólidos de la muestra TK-D

% Sólidos	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$				$\tau = K\dot{\gamma}^n$		
	τ_0	K	n	R	K	n	R
37	9,946	19,792	0,35	0,9999	23,232	0,29	0,9998
40	13,587	24,579	0,34	0,9995	34,451	0,28	0,9992
43	14,388	41,915	0,32	0,9974	50,755	0,27	0,9968
46	17,888	57,801	0,30	0,9988	69,883	0,27	0,9987
48	34,331	65,563	0,30	0,9990	86,373	0,25	0,9988

Las suspensiones más diluidas exhiben menores valores de τ_0 debido a una menor interacción entre las partículas, ya que son mayores las fuerzas de repulsión; sin embargo, en las suspensiones más concentradas las partículas se encuentran cerca unas de otras, prevaleciendo las fuerzas de Van der Waals, lo que contribuye a la formación de flóculos y agregados que dan lugar a estructuras mucho más fuertes y, por lo tanto, a mayores valores de esfuerzo cortante inicial. En las tablas 3 y 4 también puede apreciarse que la muestra del TK-D presenta mayor estructuración que la del TK-A. Esto puede atribuirse a la adición de floculante a la pulpa de alimentación del TK-D, para lograr espesar la pulpa con un menor tiempo de residencia.

Resultados de análisis reológicos de la pulpa laterítica a diferentes temperaturas

Estos experimentos se realizaron variando la temperatura en un rango desde 28 a 90°C, para un contenido de sólido fijo. En la figura 3 se representan las curvas de flujo correspondientes a la muestra de pulpa precalentada a 40 % de sólidos. Las curvas de flujo para 37, 40, 46 y 48 %S a diferentes temperaturas se muestran en presentan el mismo comportamiento. Para estas condiciones los resultados experimentales también responden al Modelo de Bulkley-Herschel, y se procedió el ajuste al modelo de Ostwald de Waele, para el cual los coeficientes de regresión también arrojaron valores mayores de 99%. (11, 13)

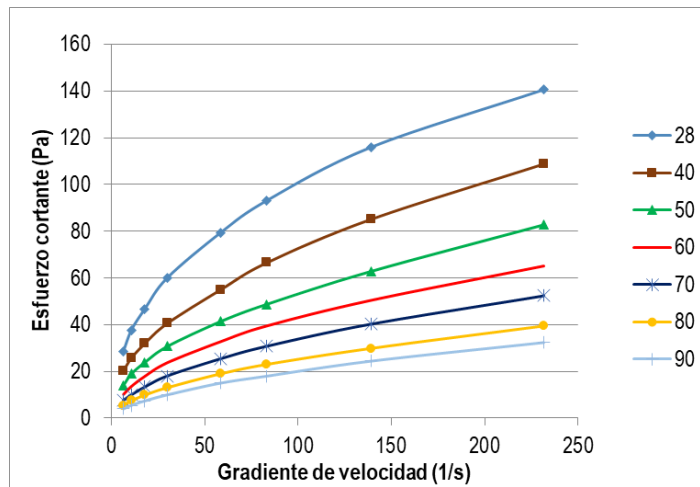


Fig. 3- Curvas de flujo para la muestra de pulpa precalentada a 40 % de sólido y diferentes temperaturas

Como se aprecia, en la tabla 5, los valores de esfuerzo cortante inicial (τ_0) y del índice de consistencia (K) disminuyeron. Los valores del índice de flujo (n) aumentaron, evidenciándose que a medida que aumenta la temperatura, la viscosidad aparente de la pulpa disminuye, y este es el comportamiento típico esperado en la mayoría de los líquidos y suspensiones.

Tabla 5- Parámetros reológicos para la pulpa precalentada a un 40 % de sólido y diferentes temperaturas

T (°C)	$\tau = \tau_0 + K\gamma^n$				$\tau = K\gamma^n$		
	τ_0	K	n	R	K	n	R
28	2,776	12,118	0,45	0,9992	13,024	0,44	0,9990
40	2,438	6,983	0,5	0,9999	8,342	0,46	0,9997
50	1,936	5,509	0,5	0,9996	5,953	0,47	0,9985
60	1,800	3,059	0,55	0,9998	3,761	0,51	0,9991
70	1,499	1,742	0,6	0,9998	2,428	0,54	0,9995
80	0,599	1,433	0,62	0,9996	2,056	0,55	0,9995
90	0,439	0,739	0,73	0,9996	1,316	0,59	0,9993

Se confirma entonces que a altas temperaturas las propiedades plásticas de la pulpa laterítica tienden a disminuir, presentando un comportamiento pseudoplástico, de ahí que los problemas de alta viscosidad que en ocasiones se presenta con las pulpas lateríticas ocurren a temperatura ambiente.^(8, 9)

Determinación de la potencia requerida para el bombeo de la pulpa

El sistema de bombeo de la pulpa que se alimenta al proceso está a cargo de las bombas de flujo inferior, que son bombas centrífugas Denver 10x8, encargadas de succionar la

pulpa espesada en el fondo de los sedimentadores, y las bombas centrífugas Denver 5x4, cuya función es succionar la pulpa precalentada.

Los resultados de las mediciones reológicas revelaron que la pulpa laterítica responde al modelo de Bulkley-Herschel, que representa a los plásticos reales. Por la complejidad que presenta este modelo a la hora de realizar cálculos hidráulicos, en la literatura no existen ecuaciones específicas para el mismo.

Los modelos más utilizados en los cálculos hidráulicos son el Ostwald de Waele comúnmente llamado Ley de Potencia y los plásticos Bingham, ya que además de ser estos modelos los más sencillos matemáticamente, la mayoría de los fluidos no-newtonianos presentan curvas de flujo que se ajustan muy satisfactoriamente a ellos. (2, 14)

Debido a lo anterior se procedió ajustar la pulpa laterítica al modelo de Ostwald de Waele, ya que para este modelo también arrojó valores de coeficiente de regresión mayor de 99 % y los cálculos hidráulicos se realizaron teniendo en cuenta ecuaciones específicas para la determinación del factor de Fanning y el número de Reynolds, según los parámetros reológicos de un fluido seudoplástico.

Una de las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos se expresa mediante la ecuación de balance de energía mecánica para condiciones estacionarias de flujo, que se conoce como ecuación de Bernoulli, y se ilustra sus aplicaciones para el caso particular del flujo newtoniano, constituyendo una de las herramientas teóricas más poderosas en los cálculos de problemas hidráulicos. (14)

En el caso específico del flujo de suspensiones minerales no newtonianas también se aplica la misma ecuación en la cual se considera que:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta V^2}{2a} + g \cdot \Delta h = -\sum F + (-W_s) \dots\dots\dots (3)$$

El término de pérdidas de fricción, ΣF , puede estimarse mediante una de las fórmulas más exactas para cálculos hidráulicos, la de Darcy-Weisbach, definida por la ecuación siguiente: (15)

$$\sum F = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot D} \dots\dots\dots (4)$$

Para los fluidos newtonianos y los que siguen el modelo de Ostwald de Waele (seudoplásticos y dilatantes), el coeficiente de Fanning sólo es función del número de Reynolds ⁽¹⁶⁾ cuando se transportan en régimen laminar:

$$f = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (5)$$

El número de Re se define según la naturaleza reológica del fluido, para el caso de los fluidos seudoplásticos y dilatantes:

$$Re = \frac{8^{1-n} D^n v^{2-n} \rho}{K} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \dots\dots\dots (6)$$

El término W_s es el trabajo por unidad de masa (trabajo por una bomba sobre el fluido) depende del incremento de presión que da la bomba en la descarga, en relación con la succión, y se expresa como:

$$W_s = \frac{\Delta P_b}{\rho} = \frac{P_d - P_s}{\rho} \dots\dots\dots (7)$$

Para evaluar un sistema de bombeo se requiere comprobar si la potencia de la bomba instalada es la adecuada. ^(4, 16, 17)

Si $(-W_s)$ es el gasto de energía (o trabajo de la bomba) por unidad de masa del fluido y Q_m es el flujo másico; la potencia tomada por el fluido es:

$$N = (-W_s) \cdot Q_m = (-W_s) \cdot Q \cdot \rho \dots\dots\dots (8)$$

En las tablas 6, 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el balance de energía mecánica a los tres sistemas de bombeo evaluados, utilizando las ecuaciones relacionadas anteriormente.

Tabla 6- Resultados BEM teniendo en cuenta los parámetros reológicos de la pulpa TK-A

% Sólidos	Re		f		ΣF (J/Kg)	W_s (J/Kg)	N (kW)
	succión	descarga	succión	descarga			
37	464,45	284,27	0,138	0,225	45,10	75,16	78,29
40	287,55	176,00	0,223	0,364	72,84	102,90	88,39
43	194,23	114,97	0,330	0,557	108,51	138,57	99,92
46	111,96	64,09	0,572	0,999	189,46	219,53	125,95
48	81,48	46,64	0,786	1,372	260,35	290,41	151,95

Tabla 7- Resultados BEM teniendo en cuenta los parámetros reológicos de la pulpa TK-D.

% Sólidos	Re		f		ΣF (J/Kg)	Ws (J/Kg)	N (kW)
	succión	descarga	succión	descarga			
37	144,45	71,36	0,4431	0,8968	103,87	496,33	113,57
40	117,20	57,90	0,5461	1,1053	128,02	520,48	122,69
43	80,66	39,85	0,7935	1,6060	186,02	578,48	140,62
46	64,10	31,46	0,9984	2,0345	234,28	626,74	157,25
48	64,83	31,81	0,9872	2,0117	231,66	624,12	160,03

En las tablas 6 y 7 se puede apreciar que a medida que aumenta la concentración de sólidos aumenta la potencia requerida de la bomba. A valores más altos de contenido de sólidos se requiere mayor potencia de bombeo debido a que aumentan los valores del esfuerzo cortante y el índice de consistencia másico, la pulpa se vuelve más viscosa tal y como se comprobó en las mediciones reológicas. También se puede apreciar que las potencias de bombeo requeridas para cada por ciento de sólidos en el TK-D resultan ser mayores que las demás, debido a la adición de floculante, por lo que la pulpa tiende hacerse más viscosa al aumentar la estructuración de sus partículas y, por tanto, se necesita mayor potencia de bombeo.

Para el caso de la pulpa precalentada, se calculó la potencia a diferentes valores de temperaturas y a un 40 % de sólidos, que corresponde al valor promedio de contenido de sólidos de la pulpa precalentada según los datos históricos de la Planta de Lixiviación. Como puede apreciarse en la tabla 8, a medida que aumenta la temperatura se requiere menor potencia de bombeo y esto se debe, precisamente, a que la estructuración de las pulpas disminuye con el incremento de la temperatura; lo cual se refleja en los valores de los parámetros reológicos en la tabla 5.

Tabla 8- Resultados BEM teniendo en cuenta los parámetros reológicos de la pulpa precalentada

% Sólidos	T (°C)	Re		f		ΣF (J/Kg)	Ws (J/Kg)	N (kW)
		succión	descarga	succión	descarga			
40	28	238,91	238,91	0,2679	0,2679	327,40	427,00	29,49
	40	300,53	300,53	0,2130	0,2130	260,27	359,88	24,74
	50	364,96	364,96	0,1754	0,1754	214,32	313,93	21,50
	60	546,80	546,80	0,1170	0,1170	143,05	242,66	16,53
	70	714,76	714,76	0,0895	0,0895	109,43	209,04	14,18
	80	1123,99	1123,99	0,0569	0,0569	69,59	169,20	11,41
	90	1157,94	1157,94	0,0553	0,0553	67,55	167,16	11,22

Determinación del punto de operación de las bombas de pulpa instaladas

Para realizar la determinación del punto de operación de las bombas se trazaron las curvas del sistema, aplicando el mismo balance de energía mecánica (ecuación 3) y teniendo en cuenta las características de la succión y la descarga (diámetro de tubería, rugosidad relativa, longitud total, velocidad, flujo y diferencia de altura); así como los parámetros reológicos de las pulpas. Para conocer los valores de los flujos máximos alcanzados por cada bomba, así como el porcentaje de sólido que promedio se analizaron datos históricos de las Plantas.

La curva de la bomba se trazó a partir de la información que brinda su catálogo (ver tabla 9). La velocidad de rotación de operación actual se determinó con una lámpara electrooscópica y resultó ser de 900 rpm para estas tres bombas; aunque vale destacar que las bombas de flujo inferior de los TKs A y D, poseen variador de velocidad. También se presenta la curva de la bomba a 1000 rpm.

Tabla 9- Curva de la bomba Denver 10x8 a 900 rpm

Q (gpm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
H (pie)	125	127	127	125	124	123,5	122	120	118
Eficiencia (%)	15	20	35	40	50	57	63	67	71

Q (gpm)	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
H (pie)	116	114	110	106	103	98	93	87
Eficiencia (%)	73	75	75	75	75	75	73	71

Como puede apreciarse en la figura 4, para la bomba de flujo inferior del TK-A, a medida que aumentan los porcentos de sólidos la curva del sistema se traslada hacia la izquierda, o sea, la bomba brinda menores flujos y tiene que vencer cargas mayores. Esto se debe a que a medida que aumenta el contenido de sólido, la pulpa se hace más viscosa y existen más resistencias al flujo que se traducen en mayores pérdidas por fricción. Por otra parte, para un valor de 43 % de sólidos, que es el valor promedio que se obtiene en este tanque según los datos históricos, la bomba transporta un flujo de 318 m³/h (1400 gpm) con una altura de 37 m (120 pie) y una eficiencia de 66% según catálogo. Se evidencia entonces que a estas condiciones de operación (900 rpm y 43% de sólidos),

la bomba no alcanza su valor máximo de eficiencia (75%), pero se encuentra operando en el rango de flujo de diseño de 227 a 454 m³/h (1000 a 2000 gpm).

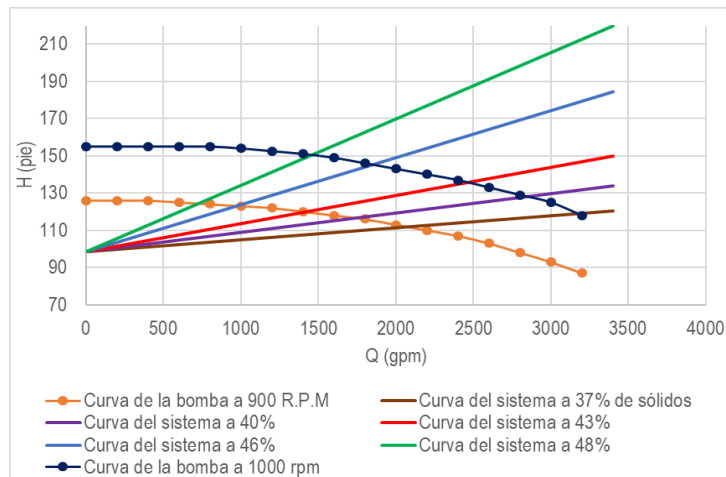


Fig. 4- Curvas del sistema a diferentes porcentajes de sólidos para la bomba de flujo inferior del TK-A

En la figura 5, para la bomba de flujo inferior del TK-D puede apreciarse un comportamiento similar de la curva del sistema a diferentes porcentajes de sólido. De acuerdo con los datos históricos, el porcentaje de sólidos promedio a la salida de este tanque es 46 % de sólido; a estas condiciones la bomba brinda un flujo de 136 m³/h (600 gpm) y una carga de 39 m (127 pie), con una eficiencia por debajo de 50 %. Para lograr una mayor eficiencia se debe incrementar la velocidad de rotación de la bomba, cambiando el motor o las poleas. Si se lograra alcanzar 1000 rpm aumentaría el flujo de operación a 409 m³/h (1800 gpm) con una eficiencia de 73 %.

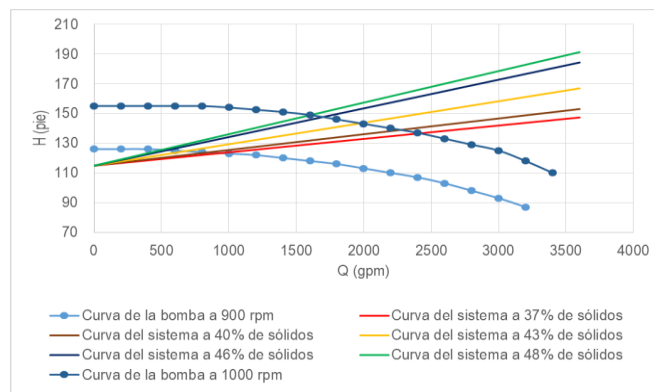


Fig. 5- Curvas del sistema a diferentes porcentajes de sólidos para la bomba de flujo inferior del TK-D

El sistema de bombeo para la pulpa precalentada se determinó con la pulpa a 40% de sólidos, por ser el valor promedio según datos históricos, y se representan las curvas a 70, 80 y 90°C ya que son los valores más cercanos a la temperatura normada (82°C). Esta bomba es centrífuga del tipo Denver 5x4 y está diseñada para una capacidad de 114 m³/h (500 gpm). Según las mediciones, la velocidad de rotación de la bomba es de 1200 rpm. Una vez obtenido este dato, se escogió la curva de la bomba para esa velocidad, según catálogo. Se presenta la tabla 10, con la información que brinda el pasaporte de la bomba.

Tabla 10 - Curva de la bomba Denver 5x4 a 1200 rpm

Q (gpm)	0	100	200	300	400	500	600	700
H (pie)	93	93	91	89	85	82	74	65
Eficiencia (%)	40	40	43	53	61	64	65	65

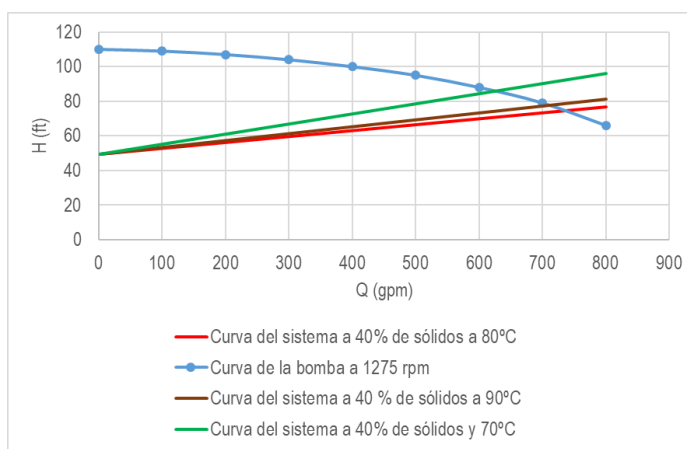


Fig. 6- Curva del sistema a 40 % de sólidos y a diferentes temperaturas (80 °C y 90 °C) para la bomba que trasiega la pulpa precalentada

En el caso de la figura 6, la curva del sistema se desplaza a la derecha con el incremento de la temperatura, al disminuir la viscosidad de la pulpa y, por tanto, la resistencia al flujo; lo que se traduce en mayores caudales. Para un 40 % de sólidos a 80 °C, la bomba trasiega un flujo de 164 m³/h (720 gpm), con una eficiencia de 64 %, mientras que a 90°C, el flujo aumenta a 167 m³/h (735 gpm), manteniendo el mismo nivel de eficiencia. Como se puede apreciar, el flujo de operación es mayor que el de diseño (114 m³/h o 500 gpm). Esto se debe a incrementos de capacidades de operación de la planta, por lo que se han

tenido que introducir mejoras para incrementar los flujos de bombeo, que han consistido en cambios por motores más grandes o cambio en los tamaños de las poleas para alcanzar mayores velocidades.

Conclusiones

Como culminación de este trabajo se ha llegado a las conclusiones siguientes:

1. Todas las pulpas analizadas están constituidas mayoritariamente por partículas menores de $50 \mu_m$, que le confieren propiedades plásticas y determinan su comportamiento reológico.
2. El Fe es el elemento predominante en la composición química de las muestras, pero con valores inferiores al normado (47,5 %); y se han ido incrementando los nocivos (SiO_2 , Mg y Al) debido a cambios en el mineral de alimentación, por el agotamiento de las reservas mineras.
3. A concentraciones entre un 37 y 48% de sólidos a temperatura entre 28 y 90°C las suspensiones lateríticas presentan un comportamiento reológico no newtoniano que puede describirse por el Modelo de Herschel-Bulkley, aunque sus curvas de flujo también pueden ajustarse al modelo de Oswald de Waele.
4. Los mayores valores de potencia se obtuvieron a 48 % de sólido y temperatura ambiente, teniendo en cuenta las ecuaciones correspondientes a los fluidos pseudoplásticos.
5. Se demostró que el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente se incrementan a medida que aumenta el contenido de sólidos en las pulpas y, por lo tanto, se requiere mayor potencia de bombeo; por el contrario, disminuyen con el aumento de la temperatura a un contenido de sólidos fijo.
6. Las tres bombas analizadas trabajan en rangos aceptables de eficiencia (de 66 a 74 %) y, según sus puntos de operación, brindan flujos cercanos a los de diseño, excepto el de la bomba de pulpa precalentada, que brinda un flujo mayor por mejoras introducidas para alcanzar mayor capacidad de operación.

7. Conocer los parámetros reológicos de las pulpas permite determinar el coeficiente de corrección para mantener el punto de máxima eficiencia de las bombas, sobre todo cuando se cae el caudal por el incremento del contenido de sólidos.

Referencias bibliográficas

1. PÉREZ, L. Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2011.
2. HERNÁNDEZ, G., LEGRÁ, A., ROJAS, L., Ramírez, B., Mariño, A. Modelos matemáticos de parámetros reológicos y su influencia en el sistema de bombeo de fluidos no newtonianos. *Rev. Colomb. Quim.* 2018, **47**(3). pp. 52-60, DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n3.70248>.
3. MADIGAN, C., Y.K. LEONG, B.C. Ong. Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *Int. J. Miner. Process.* 2009, **93**. pp. 41-47.
4. HERNÁNDEZ, G., MARTÍNEZ, R., DURÁN, C., PÉREZ, O. Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería y Geología.* 2015, **31** (3).
5. BEYRIS, P., FALCÓN, J. Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. *Minería y Geología.* 2007, **23** (1).
6. ÁLVAREZ A.A., Duménigo M., Castellanos S.J. Estudio de las propiedades físico-químicas de las pulpas acuosas de minerales lateríticos. IV Congreso De Minería. La Habana, 2011.
7. GARCELL, L. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. *Revista Minería y Geología.* 1991, **1**(91), pp. 19-23.
8. PÉREZ, L. Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloidales químicas de las suspensiones lateríticas. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2004.

9. PÉREZ, L., CARDERO, Y., LAMOTH, Y., GARCELL, L. Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita. *Tecnología Química*. 2008, **XXVIII** (1).
10. AGYEI, G. Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba. Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Holguín, 2006.
11. PÉREZ, L., GARCELL, L., HERNÁNDEZ, G. Modelo de viscosidad relativa que describe el comportamiento reológico de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química*. 2020, **40**(2). pp. 327-345.
12. HERNÁNDEZ, G., LEGRÁ, A., GARCELL, L. MARTÍNEZ, R. Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado. *Geología y Minería*. 2016, **32**(3).
13. HERNÁNDEZ, G., LEGRÁ, A., RAMÍREZ, B., PÉREZ, L. Modelos matemáticos para pronosticar parámetros reológicos de hidromezclas lateríticas. *Geología y Minería*. 2017, **33** (4). p. 384-400.
14. DÍAZ, G. A. Manual de Hidráulica Aplicada (E. ISPJAM Ed.). Santiago de Cuba, 1989.
15. RODRÍGUEZ, T. H. Temas de Flujo de Fluidos. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2008. Folleto interno.
16. GARCELL, L. R. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2001. Folleto interno.
17. HERNÁNDEZ, G., León, A., Salazar, E., Beltrán, R., Pino, J. Modelación matemática del coeficiente de corrección de carga del bombeo de hidromezclas lateríticas. *Revista DYNA*. 2019, **86**(208), pp. 19-27, ISSN 0012-7353. DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.7200>

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Queilan Rodríguez Laffita: realizó el estudio completo y elaboró el informe final.

Liudmila Pérez García: dirigió el estudio y elaboró el informe final.

Gabriel Hernández Ramírez: Dirigió el estudio y revisó el informe final.

Leonel R. Garcell Puyáns: participó en el estudio y revisó el informe final.

Arístides Alejandro Legrá Lobaina: participó en el estudio con el procesamiento de los resultados experimentales obtenidos.