

## Coeficientes de corrección para las curvas características en bombas centrífugas que trasiegan pulpa laterítica

Correction coefficients for the characteristic curves in centrifugal pumps that transfer lateritic slurry

Michel Rodríguez-Ismar <sup>1\*</sup> <http://orcid.org/0000-0001-9763-4605>

Luis Enrique Sablón-Fernández <sup>2</sup> <http://orcid.org/0000-0003-2526-9009>

Hugo Javier Angulo-Palma <sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5012-0348>

Rodney Martínez-Rojas <sup>1</sup> <http://orcid.org/0000-0002-6846-1183>

Carlos Hernández-Pedraza <sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2572-0891>

<sup>1</sup>Universidad de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Holguín, Cuba

<sup>2</sup>Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa, Holguín, Cuba

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba

<sup>4</sup> Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Santiago de Cuba

\*Autor para correspondencia. Correo electrónico: [hangulo@cil.moa.minem.cu](mailto:hangulo@cil.moa.minem.cu)

### RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio relacionado con el cálculo de los coeficientes de corrección para las curvas características carga-capacidad, potencia-caudal, eficiencia-caudal en bombas centrífugas, con el empleo de pulpa laterítica cruda a temperatura de 27 °C y concentración de sólidos en peso de 41,93 %. Se efectuaron experimentos de estrangulación con la válvula en la descarga de la bomba, con el objetivo de obtener las curvas características del sistema de bombeo para varios números de revoluciones del motor de la bomba. Los resultados mostraron que los modelos matemáticos se ajustan a un polinomio de orden dos, puesto que  $R^2$  alcanza un valor próximo a la unidad. La determinación de los coeficientes de corrección experimentales de altura, caudal, eficiencia y potencia en el transporte de pulpa laterítica cruda, permite ajustar las curvas características en bombas centrífugas, lo que mejora la selección y explotación de la misma, considerando las características reales del fluido a manipular.

**Palabras clave:** coeficientes de corrección; pulpa laterítica; curvas características; bombas centrífugas.

## ABSTRACT

In the present work, a study related to the calculation of the correction coefficients for the characteristic curves load-capacity, power-flow, efficiency-flow in centrifugal pumps is carried out, with the use of crude lateritic slurry at temperature of 27 °C and concentration solids by weight of 41,93 %. Choking experiments were performed with the valve at the pump discharge, in order to obtain the characteristic curves of the pumping system for various numbers of revolutions of the pump motor. The results showed that the mathematical models fit a polynomial of order two, since  $R^2$  reaches a value close to unity. The determination of the experimental correction coefficients of load, flow, efficiency and power in the transport of crude lateritic slurry, allows to adjust the characteristic curves in centrifugal pumps, which improves the selection and exploitation of the same, considering the real characteristics of the fluid to manipulate.

**Keyword:** correction coefficients; lateritic slurry; characteristic curves; centrifugal pumps.

Recibido: 06/09/2024

Aceptado: 12/12/2024

## Introducción

En las investigaciones precedentes se demostró la importancia que tiene la utilización de adecuados modelos reológicos en la exactitud del cálculo y selección de los sistemas de bombeo de la pulpa laterítica, para la industria cubana productora de níquel y cobalto.<sup>(1,2,3,4,5)</sup>

Algunos autores <sup>(6)</sup> reconocen que para lograr mayor precisión en el cálculo y selección de los sistemas de bombeo no solo es importante tener en cuenta las propiedades reológicas de los fluidos viscosos, sino que resulta necesario la determinación experimental de los coeficientes de corrección específicos para cada fluido; tomando como referencia los resultados de eficiencia, carga, capacidad, potencia y caudal del sistema de bombeo bajo estudio al trasegar agua en las condiciones de operación requeridas.

Otros autores <sup>(7)</sup> determinaron los parámetros tecnológicos, de diseño y funcionamiento de la instalación semi-industrial de hidrotransporte de la

Universidad de Moa al obtener las curvas características de carga-capacidad, potencia-capacidad y rendimiento-capacidad del sistema para varios números de revoluciones para el transporte de agua cruda a temperatura de 26 °C al utilizar una bomba centrífuga 1G 126/25. Los modelos obtenidos durante el estudio correspondieron a polinomios de segundo orden, ver ecuación 1, con coeficientes de determinación superiores a 0,947.

$$V_{ar} = a + bQ + cQ^2 \dots (1)$$

donde:

$V_{ar}$ : corresponde a las variables de Carga (m), Potencia (kW) y Rendimiento (%).

a, b y c: son las constantes del polinomio.

Q: Corresponde a los valores del Caudal (m<sup>3</sup>/h).

Respecto a la determinación de los coeficientes de corrección para la pulpa laterítica se reportan escasos estudios en la literatura especializada resaltando investigaciones realizadas <sup>(8, 9)</sup> donde se obtuvo un modelo matemático para determinar el coeficiente de corrección de la altura en función de la concentración de sólidos, la temperatura y el número de mineral. Es importante destacar que ambos estudios presentaron como limitante el no tener en cuenta otras características operacionales como la capacidad, rendimiento y potencia para varios números de revoluciones de la bomba.

De acuerdo a lo antes planteado se impone la necesidad de dedicar este trabajo investigativo a determinar los coeficientes de corrección para las curvas características carga-capacidad, potencia-capacidad y eficiencia-capacidad, aplicables al bombeo de hidromezclas lateríticas, para diferentes números de revoluciones del motor de la bomba.

## **Materiales y métodos**

La investigación se realizó en la instalación semi-industrial de hidrotransporte de la Universidad de Moa, siendo descritos sus principales sistemas mecánicos, de instrumentación y control en investigaciones precedentes.<sup>(3,7,8)</sup> Los resultados se procesaron con la ayuda del software Microsoft Excel.

## Materiales

Como material a transportar se utilizó pulpa laterítica cruda con una concentración de sólidos en peso de 41,93%, a temperatura ambiente de 27 °C y una densidad de 1 426 kg/m<sup>3</sup>.

### Metodología para determinar los coeficientes de corrección para las curvas características en bombas centrífugas $\pi G$

1. Determinar la altura manométrica total suministrada por la bomba a partir del método de estrangulación con una válvula en la descarga <sup>(3,7,9)</sup>, utilizando la ecuación 2.

$$H = \frac{H_d - H_s}{\gamma} \dots (2)$$

donde:

H: Altura manométrica total (m).

H<sub>d</sub>: Presión en la brida de impulsión (Pa).

H<sub>s</sub>: Presión en la brida de aspiración (Pa).

$\gamma$ : Peso específico de la pulpa laterítica (N/m<sup>3</sup>).

2. Determinar la potencia hidráulica, utilizando la expresión 3.

$$P_h = \gamma \times Q \times H \dots (3)$$

donde:

P<sub>h</sub>: Trabajo útil por unidad de tiempo realizado por la bomba (kW).

Q: Caudal transportado por la bomba (m<sup>3</sup>/s).

3. Determinar la eficiencia de bombeo por la ecuación 4.

$$\eta = \frac{P_h}{P} \dots (4)$$

donde:

$\eta$ : Eficiencia de la bomba (%).

P: Potencia suministrada a la bomba o potencia del motor (kW).

4. Graficar los valores de altura de presión, potencia y rendimiento desarrolladas por la bomba centrífuga en función del flujo volumétrico, al transportar agua y pulpa laterítica para las revoluciones del motor de la bomba de 800, 1 000 y 1 400 r/min respectivamente.
5. Determinar los coeficientes de corrección experimental del caudal, altura de presión, potencia y rendimiento para las revoluciones del motor de la bomba bajo estudio, utilizando el método gráfico y las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 respectivamente.

$$f_Q = \frac{Q_p}{Q_a} \dots (5)$$

$$f_H = \frac{H_p}{H_a} \dots (6)$$

$$f_P = \frac{P_p}{P_a} \dots (7)$$

$$f_\eta = \frac{\eta_p}{\eta_a} \dots (8)$$

donde:

$f_Q$ : Coeficiente de corrección experimental del caudal (adimensional).

$Q_p$ : Caudal transportado por la bomba con pulpa laterítica ( $m^3/s$ ).

$Q_a$ : Caudal transportado por la bomba con agua cruda ( $m^3/s$ ).

$f_H$ : Coeficiente de corrección experimental de altura de presión (adimensional).

$H_p$ : Altura de presión desarrollada por la bomba con pulpa laterítica (m).

$H_a$ : Altura de presión desarrollada por la bomba con agua cruda (m).

$f_P$ : Coeficiente de corrección experimental de potencia (adimensional).

$P_p$ : Potencia desarrollada por la bomba con pulpa laterítica (W o kW).

$P_a$ : Potencia desarrollada por la bomba con agua cruda (W o kW).

$f_\eta$ : Coeficiente de corrección experimental del rendimiento (adimensional).

$\eta_p$ : Eficiencia desarrollada por la bomba con pulpa laterítica (%).

$\eta_a$ : Eficiencia desarrollada por la bomba con agua cruda (%).

## Resultados y discusión

### Comportamiento de la curva carga-capacidad para la bomba centrífuga $\pi G$

En la figura 1 se relacionan los valores de la altura de elevación en función del caudal de la bomba centrífuga  $\pi G$  con pulpa laterítica y agua cruda a temperatura ambiente. Se observa que el comportamiento mostrado en cada una de las curvas, independientemente del fluido transportado y el número de revoluciones que se utilizó, es de disminuir la carga de altura a medida que se incrementa el flujo de la bomba, semejante al que se reporta en la literatura científico-técnica.<sup>(9,11,12,13)</sup>

Respecto al efecto que presentaron las curvas carga-capacidad al variar el número de revoluciones del motor de la bomba se observa un aumento de la carga de la bomba al fijar los flujos volumétricos analizados, proporcional al incremento del número de revoluciones, corroborando los resultados reportados por Kenneth.<sup>(12)</sup>

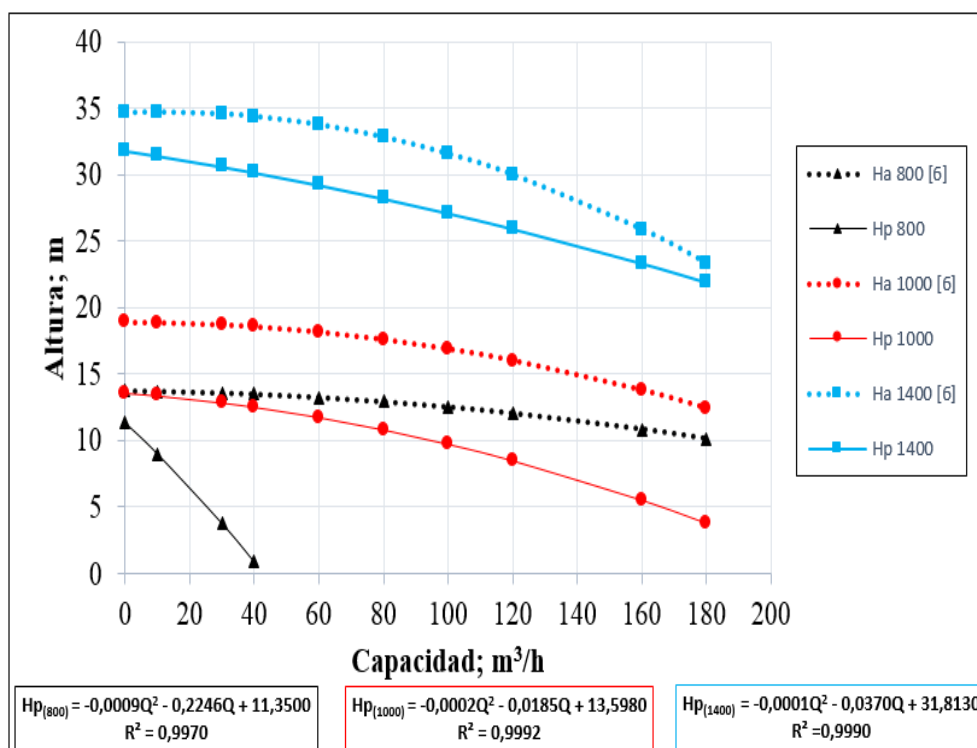
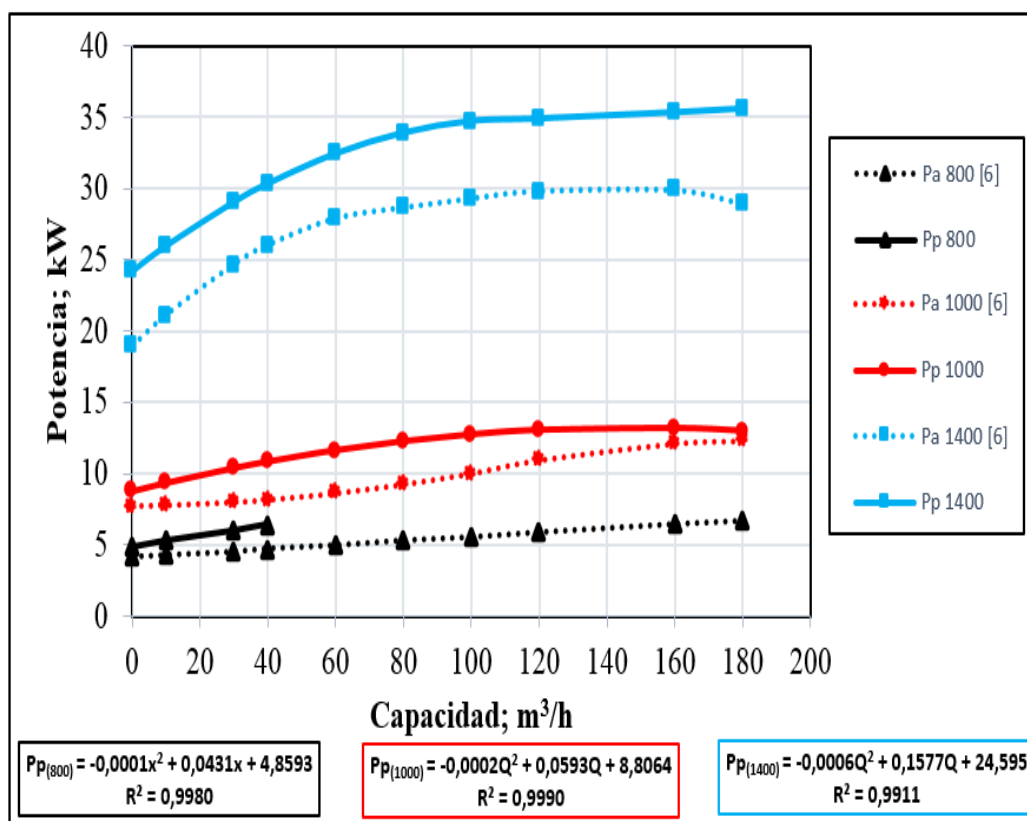


Fig. 1- Curvas características de carga-capacidad de la bomba centrífuga  $\pi G$

## Comportamiento de la curva potencia-capacidad para la bomba centrífuga $\mu\text{G}$

En la figura 2 se muestran las curvas de potencia-capacidad para el agua y la pulpa laterítica en los diferentes números de revoluciones que se evaluaron. Se observa que la demanda de potencia activa por el motor tiende a aumentar a medida que se incrementa el número de revoluciones, comportamiento lógico que se justifica por el incremento de la tensión del motor de la bomba.



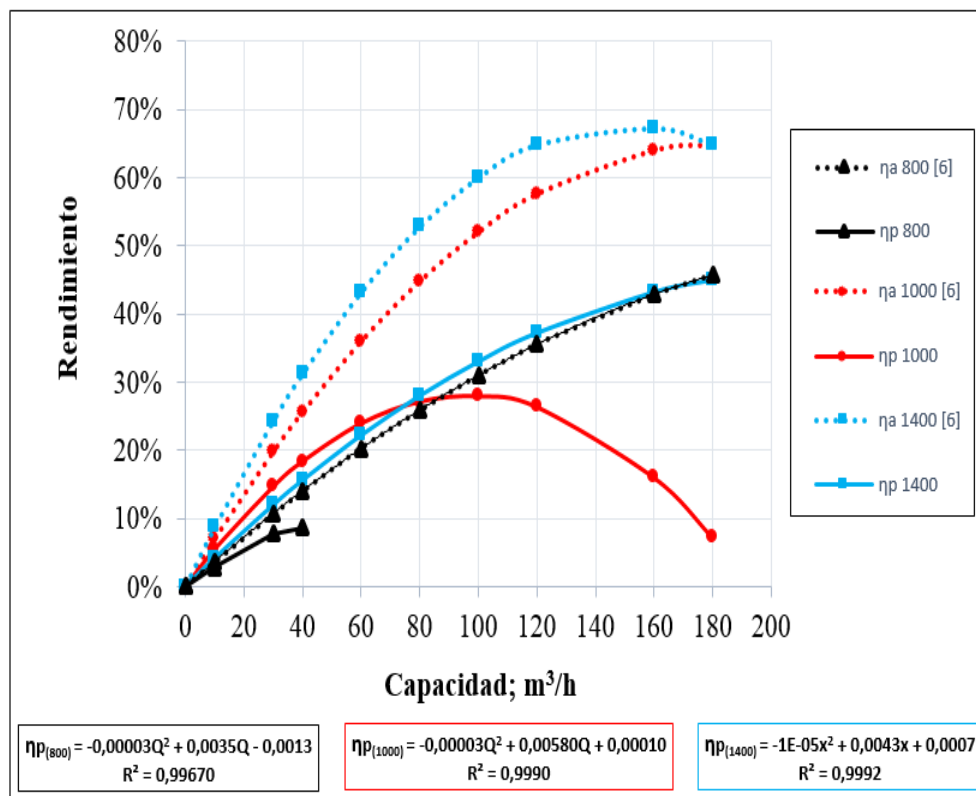
**Fig. 2-** Curvas características de potencia–capacidad de la bomba centrífuga  $\mu\text{G}$

La tendencia que mostraron la pulpa laterítica y el agua cruda en cada una de los números de revoluciones del motor bajo estudio, corrobora los incrementos de potencia que existen al trasegar fluidos con una mayor viscosidad.<sup>(10,12,15)</sup>

Según el comportamiento de las curvas de P–Q correspondiente a la pulpa laterítica, en todos los casos se ajustaron a modelos polinomiales de orden dos con coeficientes de determinación superiores a 0,99, comportamiento similar al que presentan otros tipos de pulpas.<sup>(11,12,15)</sup>

## Comportamiento de la curva rendimiento-capacidad para la bomba centrífuga $\pi G$

En la figura 3 se muestran las curvas características de rendimiento–capacidad de la bomba centrífuga  $\pi G$  para pulpa laterítica y agua cruda a temperatura ambiente, bajo las condiciones de operación que se analizaron.



**Fig. 3-** Curvas características de rendimiento–capacidad de la bomba centrífuga  $\pi G$

Cada una de las curvas se caracterizó por el incremento del rendimiento de la bomba en función del aumento del caudal, hasta llegar a un punto óptimo donde la eficiencia comenzó a decrecer.

El análisis del efecto de la variación del número de revoluciones permitió comprobar que es directamente proporcional al rendimiento de la bomba, independientemente del tipo de fluido bajo estudio.

En todos los parámetros de operación el fluido más viscoso presentó los menores valores de rendimiento, comportamiento lógico que se relaciona con las regularidades que se observaron al analizar las curvas H-Q y P-Q de esta investigación y las conclusiones reportadas por la literatura <sup>(16, 17)</sup> al estudiar otras pulpas.



Las curvas de  $\eta$ -Q correspondiente a la pulpa laterítica para los diferentes números de revoluciones evaluados se ajustaron a modelos polinomiales de orden dos con coeficientes de determinación superiores a 0,99, similares a los resultados reportados por Martínez y Riaño.<sup>(18)</sup>

### **Coeficientes de corrección para las curvas características del sistema de bombeo de hidromezclas lateríticas**

Los valores de los coeficientes de corrección experimental del caudal, altura de presión, rendimiento y potencia, durante el recálculo para la pulpa laterítica cruda se muestran en la tabla 1.

Los coeficientes de corrección de las curvas características referentes al caudal, altura de presión y rendimiento son inferiores a la unidad; mientras que en el caso de la potencia es superior. Resultados lógicos que se relacionan directamente con la facilidad desde el punto de vista mecánico-energético para trasegar fluidos menos viscosos mediante sistemas de bombeo.

El análisis de la variación del número de revoluciones del motor indican que resulta más beneficioso utilizar 1 400 r/min debido a que se logran los coeficientes de correlación más cercanos a la unidad para la capacidad, carga y potencia de la bomba, independientemente de que no se logren los valores más altos de rendimiento.

**Tabla 1-** Coeficientes de corrección de caudal, altura, rendimiento y potencia para la pulpa laterítica cruda

r/min	Coeficiente de corrección experimental $f_Q$
800	0,033...0,025
1000	0,255...0,164
1 400	0,722...0,452
	Coeficiente de corrección experimental $f_H$
800	0,746...0,391
1 000	0,691...0,371
1 400	0,906...0,866
	Coeficiente de corrección experimental $f_\eta$
800	0,805...0,613
1 000	0,787...0,588
1 400	0,638...0,500
	Coeficiente de corrección experimental $f_P$
800	1,463...1,355
1000	1,256...1,170
1 400	1,200...1,178

## Conclusiones

Los modelos matemáticos para la determinación de los parámetros energéticos que condicionan la eficiencia del sistema de bombeo de pulpa laterítica cruda para varios números de revoluciones del motor de la bomba  $\pi G$  resultaron en polinomios de orden dos con coeficiente de determinación superior a 0.99.

Los coeficientes de corrección experimentales presentaron un comportamiento lógico presentando como regularidad valores inferiores a la unidad referentes al caudal, altura de presión y rendimiento, mientras que en el caso de la potencia resultan superiores.

## Referencias bibliográficas

1. ZEYGOLIS, E. N. & DASKALAKIS, K. A. The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. *Materials Proceedings*. 2022, **5**(104): p. 1-12. Doi: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005104>.
2. ROJAS VARGAS, A.; MAGAÑA HAYNES, M.E. & RIVERÓN, A.R. Lixiviación carbonato amoniacal: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación. *Revista de metalurgia*. 2019, **55**(3): p. e149-e149. Doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.149>.
3. MIRANDA, J.L. Breve historia del surgimiento de la tecnología hidrometalúrgica del proceso de lixiviación carbonato-amoniacal del Ni y Co. *Tecnología Química*. 2014, **34**(3): p. 262-265. ISSN 2224 6185
4. ANGULO PALMA, Hugo Javier, et al. Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. In: Bindhu V., R. S. Tavares J.M., Țălu Ș. (eds) *Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore, 2022: p. 515-527. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43).
5. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ-LEGRÁ, Angel, HERNÁNDEZ PEDRERA, Carlos, LAMORÚ URGELLÉS, Alisa, & TORO VILLARROEL, Norman. Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo. *Tecnología Química*. 2020, **40**(1): p. 91-101. ISSN 2224 6185
6. GAINZA DELGADO, Y. & SÁNCHEZ GUILLEN, C. *Pruebas a escala de laboratorio de reducción-lixiviación de mezclas de pasivos mineros para la tecnología carbonato amoniacal*. Informe Final de Proyecto. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Fernández Montes de Oca``. 2020.
7. COELLO VELÁZQUEZ, A.L., et al. Use of the Swebrec Function to Model Particle Size Distribution in an Industrial-Scale Ni-Co Ore Grinding Circuit. *Metals*. 2019. **9**(882): p. 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/met9080882>.
7. COLORADO ARANGO, L., MENÉNDEZ AGUADO, J. M., & OSORIO CORREA, A. (2021). Particle Size Distribution Models for Metallurgical Coke

Grinding Products. *Metals*. 2021. **11**(8), 1288. Doi: <https://doi.org/10.3390/met11081288>.

8. QUIJANO ARTEAGA, V.A.. *Modelación de la distribución de tamaño de los productos de la molienda del mineral laterítico*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales. Universidad de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Metalurgia y Química. 2018.

9. DOMÈNECH, C., et al., Reactive transport model of the formation of oxide-type Ni-laterite profiles (Punta Gorda, Moa Bay, Cuba). *Mineralium Deposita*. 2017. **52**(7): p. 993-1010. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0713-0>.

10. TOIRAC LEYVA, V. & ROJAS PURÓN, A. Caracterización mineralógica de perfiles lateríticos del sector 048 en el yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. *Ciencia & Futuro*. 2021. **11**(4): p. 23-37. ISSN 2306-823X

12. NAMINDO NAMINDO, M. *Cinética de la molienda del carbón bituminoso*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales. Universidad de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Metalurgia y Química. 2015.

13. OUCHTERLONY, F.; SANCHIDRIÁN, J.A. & Genç, Ö. Advances on the fragmentation-energy fan concept and the swabrec function in modeling drop weight testing. *Minerals*. 2021. **11**(11): p. 1262. doi: <https://doi.org/10.3390/min11111262>.

### **Conflictos de interés**

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

### **Contribución de los autores**

Hugo Javier Angulo Palma: realizó el informe previo y dirigió el estudio completo.

Nerlan Manuel Guilarte Rodríguez: realizó el estudio completo.

Ángel Legrá-Legrá: participó en el estudio y revisó el informe final.

Mario Andrés Navarro-Consuegra: participó en el estudio.

Carlos Hernández-Pedreira: orientó metodológicamente y revisó el informe final.