

Determinación del calor específico del mineral laterítico mediante el método de calorimetría diferencial de barrido

Zalazar-Oliva, Carlos; Góngora-Leyva, Ever; Legrá-Lobaina, Arístides A.; Retirado-Mediaceja, Yoalbys; Van Caneghem, Jo

Determinación del calor específico del mineral laterítico mediante el método de calorimetría diferencial de barrido
Minería y Geología, vol. 37, núm. 3, 2021

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

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223568401005>



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

Determinación del calor específico del mineral laterítico mediante el método de calorimetría diferencial de barrido

Specific heat determination of lateritic ore by differential scanning calorimetry

Carlos Zalazar-Oliva
Universidad de Moa, Cuba
czalazar@ismm.edu.cu


Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223568401005>

 <https://orcid.org/0000-0003-0301-606X>

Ever Góngora-Leyva
Universidad de Moa, Cuba

 <https://orcid.org/0000-0001-5418-5512>

Aristides A. Legrá-Lobaina
Universidad de Moa, Cuba

 <https://orcid.org/0000-0002-4793-4754>

Yoalbys Retirado-Mediaceja
Universidad de Moa, Cuba

 <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>

Jo Van Caneghem

 <https://orcid.org/0000-0002-4052-1260>

Recepción: 06 Abril 2021
Aprobación: 22 Septiembre 2021

RESUMEN:

Para el diseño, evaluación o caracterización de cualquier proceso termofísico, como lo es el secado, son decisivas las propiedades homónimas de los materiales que intervienen en dicho proceso. Hasta el momento, en las investigaciones desarrolladas sobre el secado del mineral laterítico se han empleado propiedades que no son específicamente la de este material, por lo cual, en la presente investigación se establece su calor específico para los rangos de temperatura entre 20°C a 100°C y concentraciones de humedad de 3 % y 37 %. Para ello se empleó la técnica experimental denominada como calorimetría diferencial de barrido en la cual se obtuvo que el calor específico varía entre 0,459 kJ/kg.°C y 0,902 kJ/kg.°C para la muestra con humedad de 3 % y 1,169 kJ/kg.°C a 1,456 kJ/kg.°C para las muestras con 37 %. Además, se establecen ecuaciones que correlacionan la variación del calor específico en función de la temperatura y la humedad.

PALABRAS CLAVE: calor específico, mineral laterítico, calorimetría diferencial de barrido.

ABSTRACT:

To evaluate, design, or characterize any thermo physical process such as drying, the homonymous properties of materials involved in such process are decisive. Until now, in researches carried out on drying lateritic mineral, properties that are not specifically of this material have been used, therefore, in the present study its specific heat is established for temperature ranges between 20°C to 100°C and moisture concentrations of 3% and 37%. To this purpose, experimental technique called differential scanning calorimetry was used, in which it was obtained that the specific heat varies between 0.459 kJ/kg.°C and 0.902 kJ / kg.°C for sample with 3% humidity and 1.169 kJ/kg.°C to 1.456 kJ / kg.°C for samples with 37% humidity. In addition, equations that correlate the variation of specific heat as a function of temperature and humidity are established.

KEYWORDS: specific heat, lateritic ores, differential scanning calorimetry.

1. INTRODUCCIÓN

El secado es uno de los múltiples procesos al que es sometido el mineral laterítico dentro de la tecnología de Lixiviación Carbonato Amoniacal para la obtención del sulfuro de níquel. Se realiza con el objetivo de reducir su humedad hasta valores que faciliten el transporte y la molienda (Díaz 2016; Zalazar-Oliva et al. 2019) para luego pasar a los restantes procesos metalúrgicos. Por lo general, en esta tecnología el secado se lleva a cabo mediante intercambiadores de masa y energía denominados secadores rotativos de contacto directo. Estos consisten en una carcasa cilíndrica ligeramente inclinada con respecto a la horizontal que gira apoyado sobre rodillos. Por uno de sus extremos se añaden simultáneamente el flujo de sólido húmedo y un fluido caliente (aire o gases de la combustión) que se trasladan a través del interior del cilindro en la misma dirección, hasta el otro extremo por donde sale el producto seco.

A pesar de que estos equipos son muy utilizados por su elevada productividad y disponibilidad para procesar diversos materiales tienen la desventaja de tener bajo rendimiento energético y elevado consumo de combustible (Krokida et al. 2007; Zalazar et al. 2019). Por estas razones se han desarrollado numerosos trabajos con la finalidad de crear herramientas de predicción, facilitar su operación, e incrementar su eficiencia térmica (Castaño 2003; Ponce et al. 2018; Goyal & Bushra 2018; Rindang et al. 2019; Hernández et al. 2013).

En la mayoría de las investigaciones relacionadas con el secado de mineral laterítico (Torres et al. 2000; Bachir 2001; Castillo 2007; Retirado-Mediaceja 2012; Delgado-Drubey 2013) se han empleado las propiedades mostradas en la Tabla 1, las cuales fueron reportadas por la Prior Industries Australia Pty. Ltd (Page et al. 1998) para el mineral laterítico reducido.

TABLA 1.
Propiedades termofísicas del mineral laterítico reducido

k (W/m·°C)	C_p (J/kg·°C)	ρ (kg/m ³)
0,11	970	3 726

k : conductividad térmica; C_p : calor específico; ρ : densidad

Estos valores se obtuvieron a través de un análisis térmico basado en la medición de la distribución radial de la temperatura. En ese caso se tomó una muestra de mineral laterítico reducido el cual fue colocado en un cilindro y calentado mediante una resistencia situada en su eje central. Mediante termopares, se midió periódicamente la temperatura para cuatro radios internos del cilindro y se calculó para cada radio la conductividad térmica y el calor específico. Es importante destacar que a pesar de que el mineral laterítico reducido es un producto que se obtiene del tratamiento de las menas lateríticas ambos materiales tienen diferentes características físicas.

Dado al desconocimiento de las propiedades termofísicas de mineral laterítico en cuestión y la importancia que tienen para el diseño, evaluación y modelación matemática de instalaciones como los secadores, en la presente investigación se tiene como objetivo determinar el calor específico del mineral laterítico mediante la aplicación de la Calorimetría Diferencial de Barrido.

1.1. Calorimetría Diferencial de Barrido

Los análisis térmicos se basan en el monitoreo de ciertas propiedades del sistema en el cambio continuo o escalonado de la temperatura de la muestra. Los métodos más comunes son el Análisis térmico diferencial (DTA), Calorimetría diferencial de barrido (DSC), Termo-gravimetría (TG) y la termo dilatación (TD).

La calorimetría diferencial de barrido, o como comúnmente se conoce por sus siglas en inglés DSC, (Differential Scanning Calorimetry), es un método experimental dinámico, importante en el campo de la ciencia de los materiales debido a su elevado grado de sensibilidad y a su rápida velocidad de análisis, que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es sometida a una temperatura constante, durante un tiempo determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante en un determinado intervalo de temperaturas (Suriñach et al. 1992).

Como resultado del análisis se establecen las relaciones entre la temperatura y las propiedades físicas del material a través de curvas características, relacionadas con eventos térmicos de la muestra (picos, discontinuidades o cambios de pendiente).

Los principales eventos que se identifican con el análisis de las curvas obtenidas con el DSC son el punto de transición vítrea (Figura 1 a), la cristalización (Figura 1 b) y la fusión (Figura 1 c) según lo mostrado en la Figura 1 (Zaccai et al. 2018; Akash & Rehman 2020).

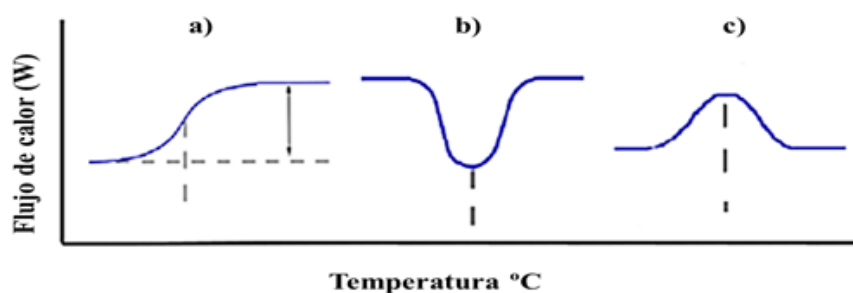


FIGURA 1.
Curvas características de DSC.

El DSC se realiza a partir del análisis de dos muestras de masa conocida colocadas en pequeñas cápsulas, las cuales se calientan o se enfrían y los cambios en su capacidad calórica se siguen como cambios en el flujo de calor. Los datos se obtienen como entradas diferenciales de calor en función de la temperatura (Clas et al. 1999; Sandoval et al. 2005) según lo mostrado en la Figura 2.

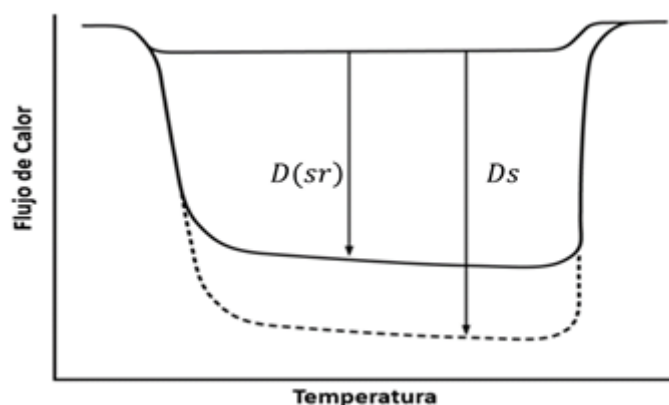


FIGURA 2.

Comparación de los flujos de calor suministrados a la muestra estudiada, la muestra de valores conocidos y la bandeja vacía.

Una de las muestras es un material de referencia del cual se conocen sus propiedades y una bandeja de muestra vacía para la calibración y comparación. La medición de los flujos de calor se realiza en calefactores individuales para cada muestra y un sistema de control comprueba las diferencias de temperatura entre la muestra y el material de referencia (Figura 3).

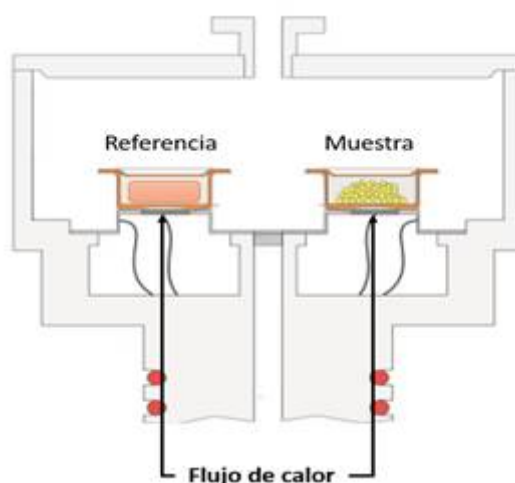


FIGURA 3.

Esquema de funcionamiento de la instalación experimental para la aplicación del método DSC

Al detectar cualquier diferencia, los calefactores individuales se corregirán de tal manera que la temperatura se mantendrá igual en ambas cápsulas. Es decir, cuando tiene lugar un proceso exotérmico o endotérmico, el instrumento compensa la energía necesaria para mantener la misma temperatura en ambas muestras.

Determinada la diferencia entre los flujos de calor suministrado a la muestra estudiada y la de referencia con respecto al flujo de calor suministrado a la cápsula vacía según lo mostrado en la Figura 2, el calor específico se calcula por la ecuación 1 (E1269-11 2018).

$$Cp(s) = Cp(sr) \cdot \frac{Ds \cdot m_{sr}}{D(sr) \cdot m_s} \quad (1)$$

$c_{p(s)}$ - Calor específico de la muestra estudiada; J/g·K

$c_{p(sr)}$ - Calor específico del material conocido; J/g·K

D_s - Diferencia del flujo de calor entre la bandeja vacía y la muestra estudiada; mW

$D(sr)$ - Diferencia del flujo de calor entre la bandeja vacía y la muestra de referencia; mW

m_r - Masa del material de la referencia; g

m_s - masa del material estudiado; g

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del mineral laterítico analizado

El mineral laterítico estudiado está compuesto por materiales esencialmente ferrosos con un elevado porcentaje de Fe_2O_3 que varía entre 67,79 % y 71,74 %. La granulometría predominantemente oscila entre 0 mm y 50 mm que representa el 80,72 % del peso total de las muestras (Sierra 2010), con humedades (en base a la masa seca) comprendidas entre 34 % y 38 %. La composición mineralógica se caracteriza por el predominio de la Goethita la cual representa el 64,58 % al 70,68 % como promedio (Rojas 1995; Oliveira et al. 2001; Rojas 2001).

2.2. Diseño de experimento e instalación experimental

Para la determinación del calor específico del mineral laterítico se realizaron dos experimentos, uno para el mineral laterítico con una concentración de humedad en base a la masa seca de 3 % y otro para una concentración de 37 %. En cada uno de los experimentos se le hicieron tres réplicas y se determinó el promedio entre las tres.

La experimentación se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Católica de Leuven, Bélgica y los materiales e instrumentos fueron los siguientes:

- a) DSC Q2000
- b) Capsulas para las muestras
- c) Balanza digital
- d) Ordenador con la interfaz para en enlace con el DSC Q2000

EL DSC Q2000 es un equipo especializado (Figura 4 a) para la aplicación del análisis térmico DSC, tiene las prestaciones de realizar de forma programada una serie de experimentos que permiten:

a) **La evaluación de propiedades térmicas como:** calores de fusión y de cristalización; estabilidad térmica; capacidad calorífica.

b) **Caracterización e identificación térmica de muestras:** determinar temperatura y tiempo de curado de una resina; estado oxidativo; y complementario para establecer compatibilidad entre polímeros.

Las características de desempeño del DSC Q2000 son las siguientes:

Rango de Temperatura: Ambiente a 725°C

Con accesorios de enfriamiento: -180 °C a 725°C

Exactitud de temperatura: $\pm 0,1^\circ\text{C}$

Reproducibilidad de temperatura: $\pm 0,01^\circ\text{C}$

Reproducibilidad calorimétrica: 0,05 %

Precisión calorimétrica: $\pm 0,05$ %

Margen Dinámico de Medición $>\pm 500$ mW

Curvatura de Línea base (-50° a 300°C) 10 μ W
 Reproducibilidad de línea base: $\pm 10 \mu$ W
 Sensibilidad calorimétrica: 0,2 μ W (2:1 señal a ruido)

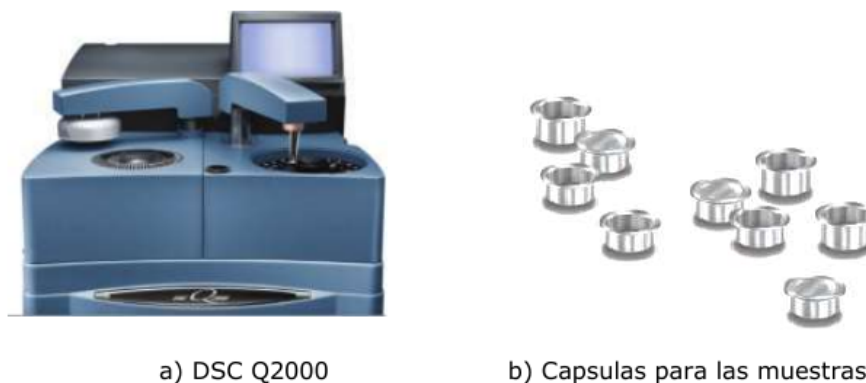


FIGURA 4.

Instalación experimental para la aplicación de la Calorimetría Diferencial de Barrido.

2.3. Procedimiento realizado para la experimentación

El procedimiento ejecutado durante la experimentación fue según el método estándar de medición ASTM E-1269 (E1269-11 2018) el cual se describe a continuación:

a) Preparación de la muestra

Las muestras de mineral se colocaron en cápsulas de aluminio (ver Figura 4 b) con una masa entre 30 mg y 33 mg para las muestras con humedad de 3 % y de entre 53 mg a 68 mg para las muestras con humedad de 37 %.

b) Calibración: Se realizó mediante la comprobación del flujo de calor tomando como muestra un disco sintético de zafiro y una bandeja de muestra vacía.

c) Procedimiento para la medición del DSC

- Se toma una capsula vacía con su tapa y se pesa en una balanza de precisión con $\pm 0,01$ mg de error y se registra el peso.

- Se coloca en el DSC Q2000 la capsula vacía y una capsula con la muestra a estudiar.

- Se enfría o se calienta la cámara del DSC Q2000, según el diseño de experimento, hasta la temperatura inicial, en el caso particular de la presente investigación se enfría hasta -20°C con una velocidad de 20°C/min.

- Luego de alcanzar la temperatura deseada se mantiene constante durante 4 min para lograr un equilibrio térmico en la cámara.

- Se calientan las muestras desde la temperatura inicial hasta la temperatura final con una velocidad de 20°C/min.

- Los cambios de temperatura y del flujo de calor son medidos y registrados para posteriormente calcular el calor específico.

- Se repite el procedimiento para cada una de las réplicas.

d) Procesamiento de los datos

El cálculo de la variación del calor específico en función de la temperatura se realiza a través de la ecuación 1 y con los valores correspondientes de la masa de las muestras de mineral y de los flujos de calor obtenidos de las tres réplicas de cada experimento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de la medición del flujo de calor

En las Figuras 5 y 6 se muestran dos de los termogramas obtenidos para dos de las réplicas realizadas en la experimentación con el DSC Q2000, una para el mineral laterítico con humedad de 3 % y la otra para la muestra con humedad del 37 %.

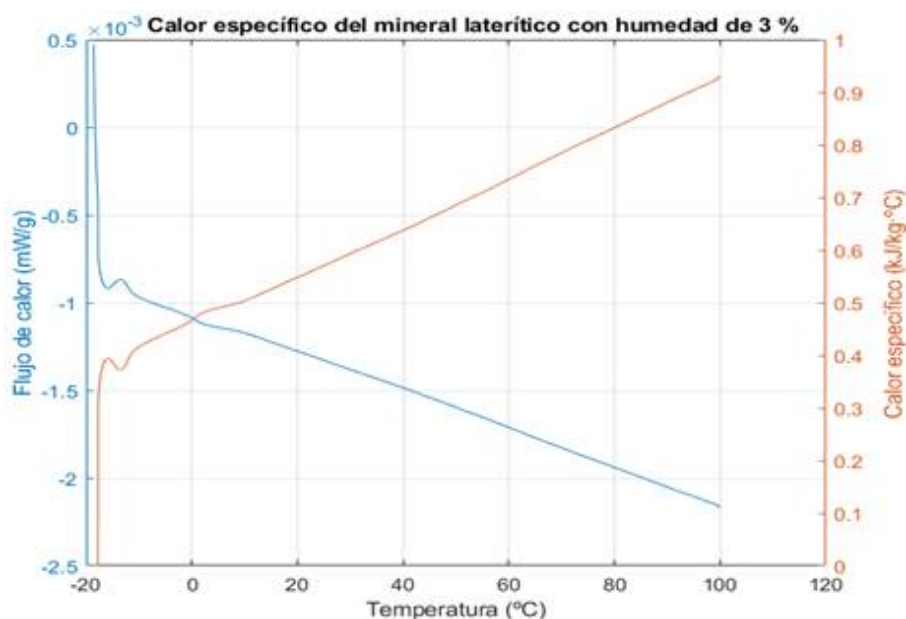


FIGURA 5.

Resultados del DSC para la muestra de mineral laterítico con humedad de 3%.

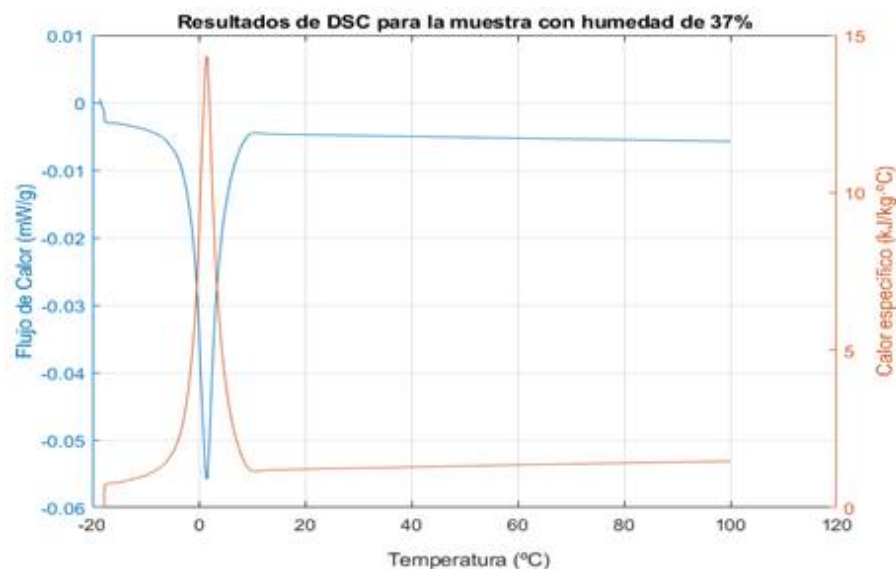


FIGURA 6.

Resultados del DSC para la muestra de mineral laterítico con humedad de 37 %.

En cada una de estas figuras se exponen el flujo de calor suministrado y la variación del calor específico en función del incremento de la temperatura. Los resultados obtenidos en las restantes réplicas en cada uno de los experimentos son similares.

De la Figura 6 se deduce que en el mineral laterítico con humedad de 37 % ocurre un proceso de congelación entre los valores de temperatura de -10°C a 10°C . Este proceso provoca la absorción acelerada de calor y por consiguiente el incremento del calor específico en este intervalo, dando lugar a la formación de los picos negativo en el flujo de calor y positivo en el calor específico. Se observa además que a partir de 10°C se muestra un incremento paulatino del calor específico en correspondencia con el aumento de la temperatura.

Del análisis del termograma obtenido de la muestra de mineral laterítico con humedad de 3 % (Figura 5) se obtiene un incremento del calor específico y un decrecimiento del flujo de calor desde el comienzo del análisis hasta el final sin que ocurra cambios bruscos en estos dos parámetros.

Cuando se compararon los valores del calor específico de las muestras de mineral con humedad de 3 % y con los de humedad de 37 % para los rangos de temperatura de 20°C hasta 100°C , se comprobó que los valores son superiores en el mineral con humedad de 37 % tal como se muestra en la Figura 7.

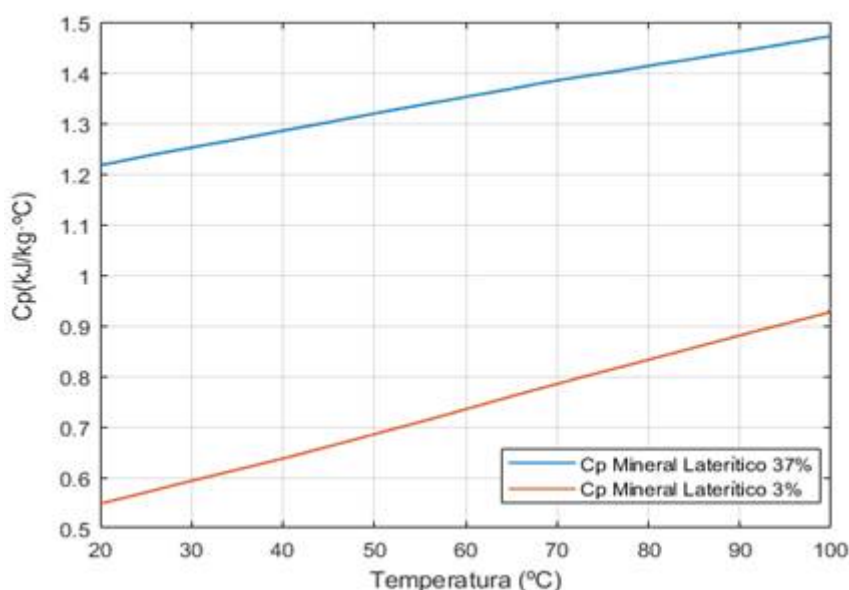


FIGURA 7.

Variación del calor específico del mineral laterítico en función de la temperatura.

Los resultados del DSC se muestran en la Tabla 2 según el diseño de experimentos. En esta tabla se exponen los valores del calor específico obtenido en las tres réplicas y el promedio de cada experimento para los rangos de temperatura de 20°C a 100°C .

TABLA.2.
Resultados del experimento para el establecimiento del calor
específico del mineral laterítico para 37% y 3% de humedad

Temp °C	Calor específico del mineral laterítico (kJ/kg.°C)											
	R _{1.1}		R _{1.2}		R _{1.3}		Prom		Desv. Est.		Cv (%)	
	37%	3%	37%	3%	37%	3%	37%	3%	37%	3%	37%	3%
20	1,226	0,555	1,271	0,548	1,237	0,564	1,245	0,556	0,024	0,008	1,904	1,406
25	1,244	0,578	1,283	0,571	1,256	0,587	1,261	0,578	0,020	0,008	1,600	1,371
30	1,261	0,600	1,294	0,594	1,273	0,609	1,276	0,601	0,017	0,008	1,339	1,315
35	1,277	0,621	1,305	0,616	1,289	0,631	1,290	0,623	0,014	0,008	1,088	1,258
40	1,294	0,643	1,315	0,638	1,307	0,653	1,305	0,644	0,011	0,008	0,812	1,172
45	1,311	0,664	1,325	0,662	1,324	0,675	1,320	0,667	0,008	0,007	0,580	1,026
50	1,328	0,686	1,334	0,686	1,341	0,697	1,335	0,689	0,006	0,006	0,472	0,905
55	1,345	0,706	1,345	0,710	1,358	0,718	1,349	0,711	0,008	0,006	0,554	0,800
60	1,362	0,729	1,354	0,735	1,375	0,740	1,363	0,735	0,010	0,006	0,760	0,777
65	1,378	0,751	1,364	0,761	1,391	0,763	1,377	0,758	0,013	0,006	0,973	0,822
70	1,394	0,773	1,372	0,785	1,407	0,785	1,391	0,781	0,018	0,007	1,278	0,887
75	1,408	0,795	1,382	0,810	1,422	0,808	1,404	0,804	0,020	0,008	1,446	0,973
80	1,423	0,816	1,389	0,833	1,437	0,828	1,416	0,826	0,025	0,009	1,755	1,090
85	1,438	0,836	1,396	0,857	1,451	0,849	1,428	0,848	0,029	0,011	2,034	1,246
90	1,452	0,857	1,402	0,881	1,466	0,870	1,440	0,869	0,034	0,012	2,361	1,417
95	1,469	0,880	1,414	0,904	1,481	0,894	1,455	0,893	0,036	0,012	2,446	1,349
100	1,485	0,902	1,423	0,928	1,496	0,916	1,468	0,915	0,039	0,013	2,667	1,443

R: réplica del experimento; los sub índices (1.1;1.2...2.3): indican el número de experimento y número de la réplica del experimento respectivamente; Prom: promedio de las réplicas; Des.Est: la desviación estándar de las réplicas; Cv: Coeficiente de variación

Según los datos mostrados en la Tabla 2 el calor específico varía entre 1,244 a 1,476 kJ/kg.°C para la muestra con humedad de 37% y entre 0,559 a 0,9152 kJ/kg.°C para la muestra con humedad de 3%. Por otro lado, de la comparación de los resultados obtenidos con DSC para el mineral laterítico con los planteados por Page et al. (1998) para el mineral reducido se comprobó que existe una notable diferencia entre ambos resultados. Los valores obtenidos del calor específico de la muestra con humedad de 37% son mayores, causado principalmente por la humedad presente en la muestra. En cambio, los resultados obtenidos de la muestra de mineral con humedad de 3 % son ligeramente inferiores a lo reportado por Page et al. (1998).

Otras de las cuestiones que se debe aclarar es que, según los resultados mostrados hasta este momento en la presente investigación el calor específico del mineral analizado varía en función de la temperatura y la humedad. Por lo cual para obtener resultados con mayor veracidad en las futuras investigaciones relacionadas con el secado de mineral laterítico en secadores rotativos es recomendable considerarlo como un parámetro variable en función de la temperatura y no como una constante.

Se calculó el coeficiente de variación de las réplicas de cada experimento y los resultados son todos inferiores al 3 % de lo cual se deduce que existe alto valor de homogeneidad entre los valores de las réplicas realizadas en cada experimento.

Considerando lo antes expuesto y con los valores promedios de los calores específico se establecen las ecuaciones 2 y 3 las cuales se obtuvieron mediante la correlación entre ambas propiedades. En las mismas se obtuvo, respectivamente, un coeficiente de correlación $R = 0,99930023$ y $R = 0,99997279855$.

$$Cp_{m\dot{h}} = 1,9395 + 0,00277122549T_m \quad (2)$$

$$Cp_{m\dot{s}} = 0,465185294117647 + 0,00450005T_m \quad (3)$$

Donde

$Cp_{m\dot{h}}$: Calor específico del mineral húmedo; kJ/kg.°C

$Cp_{m\dot{s}}$: Calor específico del mineral seco; kJ/kg.°C

T_m : Temperatura del mineral; °C

Con este enfoque también es posible obtener una ecuación que modele los resultados del calor específico simultáneamente respecto a la temperatura del mineral y a la humedad tal como se muestra en la ecuación 4, cuyo coeficiente de correlación es $R = 0,997867205$.

$$Cp_{m\dot{L}}(H_m, T) = 0,46189827 + 0,018383391H_m + 0,003635637T_m \quad (4)$$

H_m : Humedad del mineral; %

$Cp_{m\dot{L}}(H_m, T)$: Determinación del calor específico del mineral laterítico en función de la temperatura y la humedad; kJ/kg.°C

Según los resultados mostrados, estas expresiones pueden ser empleadas con bastante exactitud para la simulación, modelación y evaluación de los procesos de transferencia de calor para los valores de temperatura entre 20 y 100°C.

4. CONCLUSIONES

Mediante la calorimetría diferencial de barrido se determinó que el calor específico del mineral laterítico húmedo varían entre 1,249 kJ/kg.°C y 1,46 kJ/kg.°C para los rangos de temperatura de 20 °C a 100 °C mientras que para el mineral laterítico seco los valores están entre 0,5559 kJ/kg.°C y 0,902 kJ/kg.°C para los mismos valores de temperatura.

Se obtienen tres ecuaciones lineales (2, 3 y 4) que establecen la variación del calor específico del mineral laterítico en función de la temperatura y la humedad.

De la comparación de los resultados con los propuestos por la Prior Industries Australia Pty. Ltd se determinó que existe una notable diferencia entre los valores experimentales del calor específico del mineral laterítico en función de la temperatura y la humedad, principalmente para las muestras con humedad de 37 %.

5. REFERENCIAS

Akash, M. S. H. & K. Rehman. 2020: Differential Scanning Calorimetry. In., p. 199-206.

Bachir, H. 2001: Balance térmico y de masa del secador # 3 en la empresa CMDTE Ernesto Guevara. ISMM Moa.

- Castaño, L. F. C. 2003: Aportaciones al modelado y control de secaderos rotatorios. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Castillo, U., Arioldis. 2007: Influencia de la humedad del mineral laterítico en el consumo de energía y combustible de los secadores cilíndricos rotatorios. Tesis Ingeniería Universidad de Moa 2007.
- Clas, S.-D., C. R. Dalton & B. C. Hancock. 1999: Differential scanning calorimetry: applications in drug development. *Pharmaceutical Science & Technology Today*, 1999/08/01/. 2(8): 311-320.
- Delgado-Drubey, Y. 2013: Método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales. Posgrado ISMM.
- Díaz, B., Sandra Consuelo. 2016: Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica. Doctorado en Ingeniería- Ciencia y Tecnología de los Materiales Universidad Nacional de Colombia.
- E1269-11, A. 2018: Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. In.: ASTM International, West Conshohocken, PA
- Goyal, A. & A. Bushra. 2018: Modelling and Simulation of Rotary Dryer for Wheat drying. *Journal of Postharvest Technology*. 06(1): 63-68.
- Hernández, W. N., F. J. Hernández, Z. Vargas, G. C. Rodríguez, *et al.* 2013: Coff grain rotary dryer optimization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 12(2): 315-325.
- Krokida, M., D. Marinos-Kouris & A. Mujumdar. 2007: *Rotary Drying, In Handbook of Industrial Dryin*. Taylor & Francis, Philadelphia.
- Oliveira, S., C. Partiti & J. Enzweiler. 2001: Ocherous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba. *Journal of South American Earth Sciences*. 1(14): 307-317.
- Page, N., D. Bisset, G. Daly & E. Kisi. 1998: Ore cooler evaluation. Australia.
- Ponce, D. L. C., R., R. F. & R. A. García. 2018: Modelo matemático de un secadero rotatorio: secado de biomasa sólida lignocelulósica. *Ingeniería Mecánica Tecnología Y Desarrollo*. 6(2): 031 - 043
- Retirado-Mediaceja, Y. 2012: Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas. Tesis de Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
- Rindang, A., S. Panggabean & F. Wulandari. 2019: CFD Analysis of Temperature Drying Chamber at Rotary Dryer With Combined Energy. In I. PUBLISHING. *Conf. Series: Journal of Physics*:. 1155: 012037.
- Rojas, A. 1995: Principales fases minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos. Tesis Doctorado ISMM.
- Rojas, A. E. 2001: Evidencias a favor de que la Goethita es la fase principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos. *Minería & Geología*. 18 (3-4): 21 - 31.
- Sandoval, A., E. Aldana & A. Fernandez 2005: Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *DYNA*. 72: 45-53.
- Sierra, R. 2010: Optimización energética en el diseño de los transportadores de bandas utilizados en la industria del níquel. Doctorado ISMM.
- Suriñach, S., M. D. Baro, S. Bordas, N. Clavaguera, *et al.* 1992: La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr*. 31(1): 11-17.
- Torres, E., R. Galano, E. Fernández & A. García. 2000: Behavior of the entrainment of particles in the gases during the drying of the laterite ore in rotating cylindrical drums. *Minería y Geología*. 17(2): 73-77.
- Zaccai, N., I. Serdyuk & J. Zaccai. 2018: Differential Scanning Calorimetry. In., p. 126-140.
- Zalazar-Oliva, C., E. Góngora-Leyva, Y. Retirado-Mediaceja & A. A. Sánchez-Escalona. 2019: Determinación de la conductividad térmica de menas lateríticas a partir del método de Hot-Ball. *Minería & Geología*. 35 (4): 419-429.
- Zalazar, C. O., E. L. Góngora, D. Haseldonckx, J. V. Caneghem, *et al.* 2019: Energetic and environmental analysis of the drying of mineral with the use of residual gases. *Latin American Applied Research*. 3(49): 13-17.

INFORMACIÓN ADICIONAL

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

Contribución de los autores: CZO: realizó la experimentación, análisis, procesamiento de datos e interpretación de resultados, redacción, revisión y aprobación de la versión final. EGL: planificación del diseño de experimentos, interpretación de resultados y redacción. AALL: determinación de las ecuaciones en función de la temperatura y humedad, procesamiento de datos e interpretación de resultados y redacción. YRM: redacción, procesamiento e interpretación de resultados. JVC: desarrollo de la parte experimental y aprobación de la versión final.