

Caracterización del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL para uso refractario y de construcción

Characterization of Serpentinite Reject from HPAL Technology for Refractory and Construction Use

Adianes Ferrer-Batista^{1*}, José Alberto Pons-Herrera¹, Popov Yurii Vitalievich², María Caridad Ramírez-Pérez¹, Sharova Tatiana Viktorovna²

¹Universidad de Moa, Holguín, Cuba

²Universidad Federal del Sur, Rostov del Don, Rusia

*Autor para la correspondencia: afbatista@ismm.edu.cu

Resumen

El material serpentinitico que se rechaza en la planta de preparación de minerales de la empresa Moa-Nickel S.A. con tecnología de lixiviación ácida a presión, constituye un pasivo ambiental minero-metalúrgico sólido con potencial de revalorización. El objetivo de esta investigación fue caracterizar física, química, mineralógica y térmicamente el rechazo serpentinitico para evaluar su posible utilización como material para la construcción y como refractarios. Mediante el método de conos y anillos se obtuvieron muestras representativas que fueron sometidas a análisis granulométrico por tamizado seco (ASTM C136), espectrometría de absorción atómica, difracción de rayos X y análisis térmico. Los resultados mostraron que aproximadamente un 24 % del rechazo, correspondiente a la fracción -3,33 mm +1,4 mm, puede emplearse como árido para hormigones y pavimentos, mientras que cerca de un 20 % de fracciones finas menores de 1,4 mm presenta interés para aplicaciones refractarias como arenas de moldeo y pinturas refractarias. Predominaron los óxidos de magnesio (33,20%) y silicio (29,16 %), con una relación MgO/SiO₂ de 1,14 que le confieren al material un carácter básico. Se identificaron las fases principales de serpentina (lizardita y crisotilo), olivino rico en forsterita y arcillas caoliníticas. Los análisis térmicos revelan una pérdida de masa del 4 % asociada a la eliminación del agua higroscópica (hasta 260 °C) y del 12 % correspondiente a la deshidroxilación y recristalización de los minerales de serpentina y olivino (390 °C - 825 °C), lo que fundamenta su utilización como material refractario.

Palabras clave: rechazo serpentinitico, pasivos ambientales, materiales refractarios, materiales para construcción

Abstract

The serpentinite material rejected in the ore preparation plant of the nickel company Moa-Nickel S.A. constitutes a solid mining-metallurgical environmental liability with potential for revalorization. The purpose of this research was to characterize the physical, chemical, mineralogical, and thermal properties of the serpentinite reject in order to assess its potential as a raw material for construction and refractory applications. Dry sieving (ASTM C136), atomic absorption spectrometry, X-ray diffraction, and thermal analysis tested samples obtained with the cones and rings method. The results showed that approximately 24 % of the reject, corresponding to the $-3.33\text{ mm} + 1.4\text{ mm}$ fraction, can be used as aggregate for concrete and pavements, while about 20 % of the fine fractions smaller than 1.4 mm is of interest for refractory applications such as molding sands and refractory paints. Magnesium oxide (33.20 %) and silicon dioxide (29.16 %) predominated, with an MgO/SiO_2 ratio of 1.14 that imparts a basic character to the material. The main phases identified were serpentine (lizardite and chrysotile), forsterite-rich olivine, and kaolinitic clays. Thermal analysis revealed a mass loss of 4 % associated with the removal of hygroscopic water (up to 260°C) and a 12 % loss corresponding to the dehydroxylation and recrystallization of serpentine and olivine minerals (390°C – 825°C), supporting its use as a refractory material.

Keywords: serpentinite reject, environmental liabilities, refractory materials, construction materials

1. INTRODUCCIÓN

El macizo montañoso Mayarí-Moa-Baracoa en el nordeste de Cuba forma parte del complejo ofiolítico septentrional y alberga grandes reservas de minerales de cromo y ferroniquelíferos. La explotación prolongada de estas reservas ha dado lugar a grandes volúmenes de residuos sólidos que, al acumularse en depósitos superficiales, se convierten en Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos (PAMMs) (Lewis *et al.*, 2006; Domínguez-Carretero *et al.*, 2024).

En la región de Moa, la industria del níquel con tecnología de lixiviación ácida a alta presión (HPAL, por sus siglas en inglés), en particular la empresa Pedro Sotto Alba-Moa Nickel S.A., reporta un promedio del 30 % de rechazo del total de las menas que se suministran a la planta de preparación de pulpas, lo que constituye más de un millón de toneladas anuales. Esta situación ha

motivado a numerosos investigadores a explorar alternativas para el aprovechamiento del material serpentinitico rechazado (rechazo serpentinitico en lo adelante), en consonancia con los principios de la economía circular y la gestión sostenible de residuos (Longos *et al.*, 2020; Pons-Herrera *et al.*, 2021).

En el ámbito de los materiales para la construcción, Kattel (2017) realiza una valoración técnica del rechazo serpentinitico para su posible uso industrial; Herrera-Casas (2018) propone su utilización preliminar como material de construcción, hormigones, pavimentos, balasto para ferrocarriles y fundentes. Años antes, López-Peña (2006) conforma morteros con mezclas de material de rechazo de distintas tecnologías de Moa y obtiene resultados satisfactorios; Montero-Gil (2007) utiliza el rechazo serpentinitico como árido en la confección de hormigones de hasta 20 MPa de resistencia.

En cuanto a las aplicaciones refractarias, Pons-Herrera *et al.* (2019, 2021) investigan las perspectivas de utilización industrial del pasivo ambiental rechazo serpentinitico y el uso sustentable de los PAMMs sólidos generados por la industria del níquel en Moa, demostrando la posibilidad de formar, a partir de serpentinas, forsterita, producto de gran interés industrial para la fabricación de refractarios básicos.

El objetivo de este estudio fue caracterizar física, química, mineralógica y térmicamente el rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL de la empresa Pedro Sotto Alba-Moa Nickel S.A., con el fin de evaluar su potencial como material refractario y para la construcción, adoptando la hipótesis de que las fracciones gruesas del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL son aptas para la construcción, mientras que las fracciones finas presentan características adecuadas para aplicaciones refractarias, en virtud de su composición química rica en óxidos de magnesio y silicio, su mineralogía dominada por serpentina y olivino, y su comportamiento térmico favorable.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Contexto geológico-tecnológico del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL

Las muestras estudiadas proceden de los depósitos generados por acumulación del material que se rechaza en la planta de preparación de mineral de la empresa Pedro Sotto Alba-Moa Nickel S.A. (Figura 1), la cual emplea tecnología HPAL para el tratamiento de las menas lateríticas de Ni-Co. En esta ruta de procesamiento, la mena es previamente triturada, homogeneizada y acondicionada granulométricamente antes de la lixiviación ácida a presión, generándose, en áreas adyacentes a la planta, un cúmulo de

material de rechazo con predominio de minerales ultramáficos, constituido mayoritariamente por fases serpentínicas y olivínicas.



Figura 1. Depósito del rechazo serpentínico en la planta de preparación de pulpa de la empresa niquelera de tecnología HPAL.

2.2 Muestreo y preparación de las muestras

Para garantizar la representatividad se realizó un muestreo compuesto mediante el método de conos y anillos en el cuerpo del depósito de rechazo, conforme a la norma ASTM D75/D75M. Se recolectaron inicialmente 9 kg del rechazo serpentínico (Figura 2), que fueron homogeneizados, sometidos a reducción de tamaño y cuarteo sucesivo hasta obtener tres réplicas de 1 kg cada una, destinadas a los análisis químicos, mineralógicos y térmicos.



Figura 2. Muestras del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL.

Las muestras se secaron al aire a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) durante 48 horas hasta peso constante, alcanzando una humedad inicial de equilibrio del 3,5 % (determinada gravimétricamente). Se desagregaron manualmente los terrones sin triturar las partículas individuales y se almacenaron en recipientes con cierre hermético para evitar contaminación y absorción de humedad.

2.3 Caracterización granulométrica

Los análisis granulométricos se llevaron a cabo por tamizado seco conforme a la norma ASTM C136/C136M, utilizando un juego de tamices con aberturas normalizadas entre 10 mm y 0,10 mm. El tamizado se realizó de forma manual con una combinación de movimiento lateral, vertical y sacudida, durante un tiempo de diez minutos por réplica hasta alcanzar la separación estable de las fracciones (variación de masa menor al 0,5 % en un minuto adicional).

Se determinó la masa retenida en cada tamiz con precisión de 0,01 g y se calcularon los porcentajes en peso correspondientes. Se definieron como fracciones de interés tecnológico los intervalos: +10; -10+8,9; -8,9+6; -6+4,7; -4,7+3,33; -3,33+1,4; -1,4+0,8; -0,8+0,35; -0,35+0,20; -0,20+0,10 y -0,10 mm, abarcando desde partículas gruesas hasta fracciones finas.

2.4 Caracterización química

La composición química de los principales óxidos se determinó mediante espectrometría de absorción atómica (AA) en el Centro de Investigaciones y Desarrollo del Níquel (CEDINIQ), utilizando un equipo UNICAM SOLAR 929 de haz simple.

La preparación de muestras para análisis por AA consistió en: (1) digestión ácida de 0,5 g de muestra molida a -0,074 mm con una mezcla de HCl (37%) y HNO₃ (65 %) en proporción 3:1; (2) calentamiento a 120 °C durante dos horas en placa calefactora; (3) dilución a 100 mL con agua desionizada; (4) filtración mediante membrana de 0,45 µm. Se cuantificaron Si, Al, Mg, Ni, Co, Mn, Cr, Fe, Cu y Zn, expresados en forma de óxidos, siguiendo los procedimientos técnicos de ensayo UPL-PT-A-26 (límite de detección: 0,001 %). El hierro ferroso (FeO) se determinó por titulación volumétrica con dicromato de potasio (método UPL-PT-V-03).

Las pérdidas por ignición (PPI) se evaluaron gravimétricamente según el procedimiento UPL-PT-G-01: calcinación de 1 g de muestra en crisol de porcelana a 1 000 °C durante una hora en atmósfera de aire.

2.5 Caracterización mineralógica

El análisis mineralógico se efectuó en el laboratorio de Mineralogía del Centro de Investigación para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM), utilizando un difractómetro de rayos X Bruker AXS D8 Focus con las siguientes condiciones de medición: radiación Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), voltaje 40 kV, corriente 40 mA,

rango 2θ de 5° a 70° , paso de $0,02^\circ$, tiempo de conteo de 0,5 s por paso, usando portamuestras de silicio monocristalino.

Las fases se identificaron mediante comparación con la base de datos ICDD-PDF4+ (2022) utilizando el software DIFFRAC.EVA v6.0. La estimación semicuantitativa de las principales fases presentes tiene una incertidumbre estimada del $\pm 5\%$, se realizó por el método de intensidades relativas de picos característicos, con especial atención a serpentinas (lizardita, crisotilo), olivino rico en forsterita y arcillas caoliníticas.

2.6 Caracterización térmica

Los análisis térmicos se realizaron en un equipo NETZSCH STA 449 F3, registrando la variación de masa (TG). Las condiciones experimentales fueron: crisoles de Al_2O_3 de tamaño estándar, horno de SiC, atmósfera de argón (Ar) con flujo de 20 mL/min como gas protector, velocidad de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, rango de temperatura de 27 a 1000°C , masa de muestra de 25,30 mg, masa de referencia de Al_2O_3 de 60,20 mg.

3. RESULTADOS

3.1 Características granulométricas

La distribución granulométrica del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL (Figura 3) evidencia una distribución dominada por fracciones gruesas. Las partículas mayores de 1,4 mm hasta 10 mm representan el 56 % del total de las muestras analizadas, mientras que las fracciones de tamaño menores de 3,33 mm representan el 44 %.

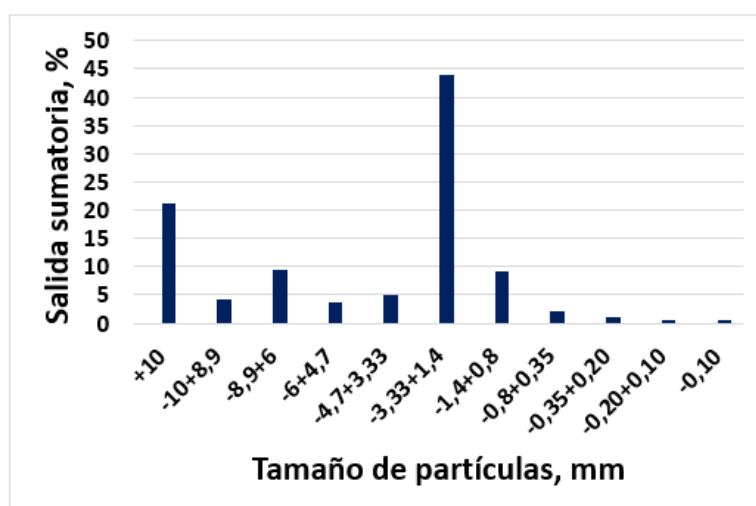


Figura 3. Distribución granulométrica del rechazo serpentinitico (tecnología HPAL). Las partículas mayores de 10 mm, representadas por aproximadamente un 21 % de las muestras, se presentan en forma de terrones y rocas

formadas por partículas irregulares, lo que influye significativamente en su distribución granulométrica. Las fracciones intermedias (-10+3,33 mm) representan un 11 % adicional del material, susceptible de clasificación para uso como árido grueso.

A partir de la combinación de las características granulométricas y de la experiencia previa en el empleo de desechos serpentiniticos como agregados, se determinó que aproximadamente un 24 % del rechazo, correspondiente a la fracción -3,33+1,4 mm, puede emplearse como árido para hormigones, pavimentos y balastos. Cerca de un 20 % de fracciones finas menores de 1,4 mm presenta interés como base para arenas de moldeo y pinturas refractarias, implicando la posibilidad de reconducir una fracción hacia cadenas productivas de la industria de la construcción y de fundición.

3.2 Características químicas

El contenido de los elementos químicos en forma de óxidos (Tabla 1) en el rechazo serpentinitico muestra un predominio significativo de óxidos de magnesio (33,20 %) y silicio (29,16 %), propio de minerales serpentiniticos, confirmando la naturaleza ultramáfica y su afinidad con los silicatos de magnesio, indicio positivo para aplicaciones refractarias.

Tabla 1. Composición química (en %) del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL

NiO	CoO	MnO	MgO	Cr₂O₃	SiO₂	Al₂O₃
0,57	0,02	0,16	33,20	0,62	29,16	0,86
FeO	Fe₂O₃	PPI	Otros / No determinados	Total		
2,02	3,34	8,21	20,55	98,72		

La suma total de óxidos analizados, más las pérdidas por ignición y la fracción no determinada, alcanza el 98,72 %, valor aceptable para este tipo de materiales. Los valores no determinados (20,55 %) incluyen volátiles no cuantificados individualmente, trazas de óxidos menores (CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅) presentes en concentraciones inferiores al límite de detección del método, carbonatos, sulfatos y posibles errores sistemáticos inherentes a la conversión de elementos a óxidos. Los elementos restantes (1,28 %) corresponden a trazas de otros componentes no cuantificados.

Cabe destacar que existe un predominio de los óxidos de hierro de aproximadamente 5,36 % (FeO + Fe₂O₃), los que pueden reaccionar con la alúmina y la sílice formando compuestos estables que no afectan las propiedades del material.

Además, existen óxidos de manganeso, magnesio, cromo y aluminio de importancia para los materiales refractarios dado que les confieren resistencia mecánica y estabilidad térmica. La relación de basicidad (MgO/SiO_2) de 1,14 es superior a la de acidez (SiO_2/MgO) de 0,88, lo que muestra información relevante para el uso del rechazo serpentinitico como material refractario.

3.3 Características mineralógicas

El rechazo serpentinitico está compuesto principalmente por partículas mayores de 0,84 mm, que contienen importantes elementos químicos. Destacan entre las principales fases mineralógicas la lizardita y el crisotilo, fases que tienen incorporados en sus estructuras al aluminio, silicio, níquel, cobalto y magnesio mayoritariamente, además de olivino (forsterita), junto con arcillas caoliníticas (Figura 4).

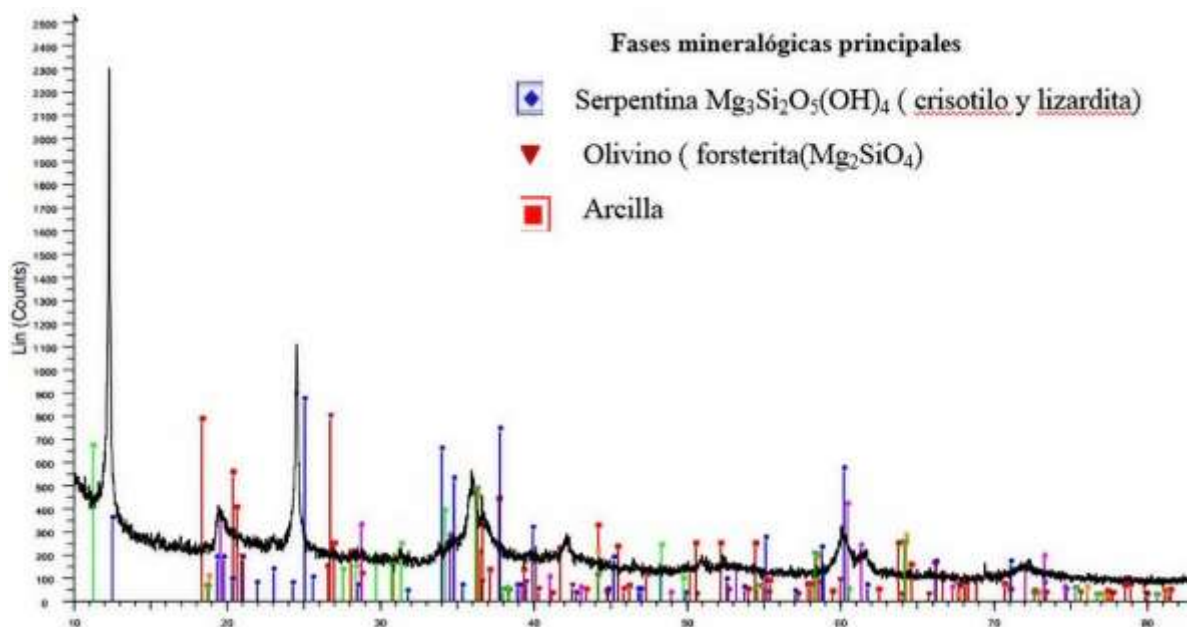


Figura 4. Difractograma del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL.

La estimación semicuantitativa de las fases por el método de intensidades relativas de picos indica contenidos aproximados de 34 % de olivino y 33 % de arcillas, acompañados por proporciones significativas de serpentinas que integran en sus estructuras Mg, Si, Al, Ni y Co, coherentes con el origen laterítico del depósito. La coexistencia de serpentinas y olivino en proporciones comparables, con fuerte presencia de forsterita, aproxima la composición mineralógica de estos rechazos a la de depósitos de olivino empleados tradicionalmente como materia prima para refractarios básicos.

3.4. Características térmicas

Las características térmicas del rechazo serpentinitico son comunes a los minerales de olivino de la región nororiental de Cuba. El análisis termogravimétrico (TG) realizado mostró las siguientes etapas térmicas principales: hasta los 260 °C existe una pérdida de masa de 4 % asociado a la eliminación del agua higroscópica; en el intervalo de 390 °C a 825 °C se registra una pérdida de 12 % correspondiente a la eliminación del agua estructural (deshidroxilación de serpentinas) y a la recristalización y reestructuración de los minerales de olivino y serpentina.

Aunque en la curva termogravimétrica (Figura 5) estos procesos se manifiestan de manera solapada debido a la velocidad de calentamiento de 10 °C/min, la combinación de señales térmicas (TG-DTG) y la información mineralógica permiten inferir las etapas típicas de descomposición de serpentinas descritas para la obtención de forsterita a partir de residuos serpentiniticos.

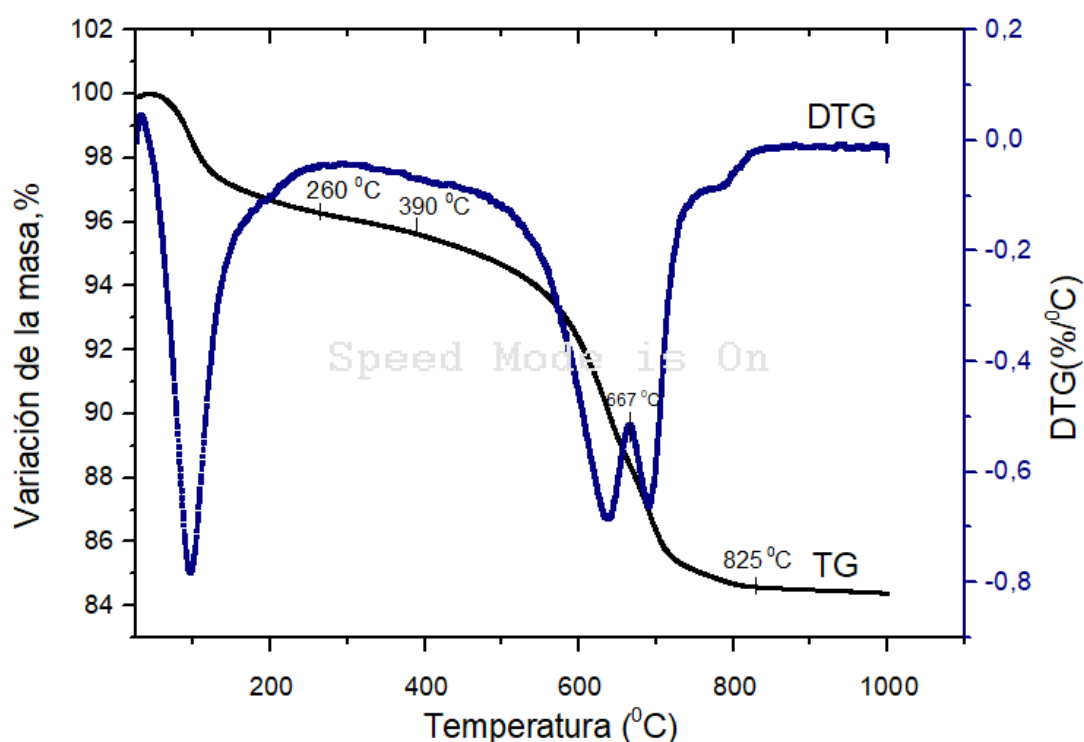


Figura 5. Termograma del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL.

Es importante señalar que la pérdida total de masa medida por TG en atmósfera de argón (16 %) difiere del valor de PPI determinado en aire (8,21 %). Esta discrepancia se explica porque en la PPI realizada en aire ocurre simultáneamente la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} , proceso que implica

ganancia de masa por incorporación de oxígeno, compensando parcialmente la pérdida por volatilización del agua. En la TG en argón (atmósfera inerte) no ocurre esta oxidación, registrándose únicamente la pérdida de masa por deshidratación.

4. DISCUSIÓN

Los resultados granulométricos de este estudio demuestran que el rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL presenta una distribución de tamaños que permite su aprovechamiento diferenciado. El 56 % de partículas entre los 1,4 mm y 10 mm constituye una fracción adecuada para aplicaciones como árido grueso en hormigones y pavimentos, siempre que se someta a un proceso de trituración selectivo para eliminar los terrones mayores a 10 mm (21 % del total).

La fracción -3,33+1,4 mm (24 %) presenta características óptimas para uso como árido de construcción, con tamaños que cumplen las especificaciones técnicas para hormigones de resistencia media (hasta 25 MPa). Estos resultados son consistentes con los reportados por Montero-Gil (2007), quien obtuvo hormigones de 20 MPa utilizando rechazos similares del yacimiento Moa Occidental, y los de Herrera-Casas (2018), quien propuso el uso de rechazos del yacimiento Moa Oriental para aplicaciones de construcción.

Desde el punto de vista químico, el predominio de MgO (33,20 %) y SiO₂ (29,16 %) con una relación MgO/SiO₂ de 1,14 sitúa al material bajo estudio en el campo de los silicatos de magnesio de carácter básico, aptos para la fabricación de refractarios. Estos valores son comparables con los reportados por Pons-Herrera *et al.* (2000) para dunitas serpentinizadas de la región de Moa-Baracoa (MgO: 35-40 %; SiO₂: 28-32 %), y por Gámez-Matos (2011) para desechos serpentiniticos de la mina Pedro Sotto Alba (MgO: 32,5 %; SiO₂: 30,1 %).

El contenido de FeO + Fe₂O₃ (5,36 %) es adecuado para aplicaciones refractarias, ya que actúa como fundente moderado que facilita la sinterización sin comprometer la refractariedad del producto final. Los bajos contenidos de NiO (0,57 %) y CoO (0,02 %) representan una ventaja desde el punto de vista ambiental y económico, ya que no constituyen pérdidas significativas en la tecnología HPAL.

No obstante, la discrepancia observada entre la PPI (8,21 %) y la pérdida de masa por TG (16 %) amerita una discusión detallada. En atmósfera de argón, la TG registra únicamente la pérdida de masa por deshidratación (agua higroscópica + agua estructural), alcanzando el 16 %. En contraste, la PPI en aire implica simultáneamente la oxidación del hierro ferroso a férrico, con

ganancia de masa por incorporación de oxígeno que compensa parcialmente la pérdida por volatilización. Este fenómeno, consistentemente reportado para minerales ferromagnesianos (Pons-Herrera *et al.*, 2019; Ojeda-Pardo *et al.*, 2023) explica la diferencia observada.

La identificación mineralógica de serpentinas (lizardita y crisotilo), olivino rico en forsterita y arcillas caoliníticas es coherente con el origen ultramáfico del depósito y su historia de alteración supergénica (Zhou *et al.*, 2023). La presencia de forsterita (Mg_2SiO_4) como componente principal del olivino es particularmente relevante, ya que este mineral posee un punto de fusión de 1 890 °C, que lo hace apto para refractarios de alta resistencia térmica (Pons-Herrera *et al.*, 2019). Aunque la información cualitativa y semicuantitativa obtenida permite establecer el potencial del material como materia prima refractaria, los porcentajes semicuantitativos obtenidos por el método de intensidades relativas de picos (olivino ~34 %, arcillas ~33 %, serpentinas ~30 %) deben interpretarse como estimaciones aproximadas con una incertidumbre del ± 5 %.

El comportamiento térmico observado puede interpretarse a través de los mecanismos de descomposición típicos de las serpentinas. La primera etapa (hasta 260 °C, 4 % pérdida de masa) corresponde a la eliminación de agua higroscópica y adsorbida en la superficie de las partículas. La segunda etapa (390-825 °C, 12 % pérdida de masa) involucra procesos más complejos: (1) deshidroxilación de la serpentina (lizardita y crisotilo) según la reacción $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{MgSiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \uparrow$; (2) recristalización de la forsterita (Mg_2SiO_4) a partir de la descomposición de la serpentina; y (3) transformación de la enstatita (MgSiO_3) en fases cristalinas estables. Estos mecanismos son consistentes con los reportados por Aleixandre-Ferrandis y González-Peña (1972) para la formación de refractarios de forsterita a partir de serpentinas, así como con los publicados por Kalaitzidou *et al.* (2022) para la valorización de rechazos serpentiniticos de Moa.

La temperatura de inicio de la deshidroxilación (390 °C) es ligeramente inferior a la reportada para serpentinas cristalinas puras (450-500 °C), lo que puede atribuirse a la presencia de impurezas y a la naturaleza parcialmente alterada del material. Desde el punto de vista tecnológico, los rangos de temperatura descritos permiten identificar las temperaturas idóneas para transformar las serpentinas en forsterita sin necesidad de tratamiento térmico. Para arenas de moldeo, temperaturas entre 600 °C - 700 °C proporcionarían una estructura porosa con buena capacidad de absorción de agua y gases. Para pinturas refractarias, tratamientos a 800 °C - 900 °C generarían una matriz más densificada con mayor resistencia mecánica,

conforme a lo reportado para dunitas de Cayo Guam (Loyola-Brefe *et al.*, 2020).

La comparación de los resultados del presente estudio con trabajos previos de investigadores cubanos revela consistencia en las tendencias generales, pero diferencias específicas atribuibles a la variabilidad del depósito y a las condiciones del proceso HPAL. Mientras que Montero-Gil (2007) y Gámez-Matos (2011) trabajaron con rechazos como productos, el presente estudio se enfoca en los rechazos de la tecnología HPAL que presentan diferencias en la distribución granulométrica debido a las etapas de preparación mecánica. Esta diferenciación tecnológica constituye una contribución original del presente trabajo, ya que la literatura internacional sobre valorización de rechazos HPAL es aún escasa, predominando los estudios sobre escombros lateríticos de procesos pirometalúrgicos.

Es importante reconocer las limitaciones del presente estudio. En primer lugar, el muestreo fue puntual en el tiempo y espacio, por lo que la variabilidad estacional del depósito no fue caracterizada. En segundo lugar, la cuantificación mineralógica fue semicuantitativa y requeriría refinamiento mediante métodos más precisos como Rietveld. En tercer lugar, el estudio no incluyó ensayos tecnológicos de productos fabricados (hormigones, morteros, pinturas refractarias), por lo que las aplicaciones propuestas requieren validación experimental adicional.

5. CONCLUSIONES

- Un 24 % del rechazo serpentinitico generado por la tecnología HPAL en Moa (fracción $-3,33+1,4$ mm) puede emplearse como material de construcción y un 20 % (fracciones $<1,4$ mm) como material refractario, lo que abre posibilidades de aprovechamiento diferenciado como áridos y materias primas refractarias.
- El predominio en el rechazo de los óxidos de magnesio (33,20 %) y silicio (29,16 %) y una relación MgO/SiO_2 de 1,14, confirma el carácter ultramáfico del material y su afinidad con silicatos de magnesio aptos para la generación de forsterita y refractarios básicos. La discrepancia entre PPI (8,21 %) y pérdida de masa por TG (16 %) se explica por la oxidación del hierro ferroso a férrico durante la calcinación en aire.
- El potencial del material como materia prima refractaria queda confirmado mineralógicamente por la presencia de fases principales de serpentinas (lizardita y crisotilo), olivino rico en forsterita y arcillas caoliníticas, y se justifica por su comportamiento térmico con la

deshidroxilación y recristalización de los minerales de olivino entre los 390 °C - 825 °C.

- Los hallazgos del estudio sugieren que la gestión adecuada de estos pasivos ambientales puede contribuir significativamente a la disminución de importación de arenas silíceas y pinturas refractarias en Cuba, sin embargo, deben considerarse las limitaciones siguientes: (1) el muestreo fue puntual y no caracterizó la variabilidad temporal del depósito; (2) la cuantificación mineralógica fue semicuantitativa con una incertidumbre estimada del $\pm 5\%$; (3) no se realizaron ensayos tecnológicos de productos fabricados con el rechazo; (4) no se evaluó la presencia potencial de fibras de crisotilo en las fracciones finas.

6. REFERENCIAS

- Aleixandre-Ferrandis, V., & González-Peña, J. (1972). Propiedades tecnológicas de refractarios de forsterita obtenidos a partir de la Serpentina del Barranco de San Juan (Granada). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 11(1), 3-10.
- Domínguez-Carretero, D., Proenza-Fernández, J. A., Villanova-de Benavent, C., Aiglsperger, T., Tauler, E., Rojas-Purón, A., Duque, N., González-Jiménez, J. M., García-Casco, A., Galí, S. (2024). The geology, geochemistry, and mineralogy of the Moa Bay Ni laterite mining district, Cuba. *Economic Geology*, 119(3), 551-578. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5101>
- Gámez-Matos, A. (2011). Caracterización de los desechos serpentiniticos de la mina de la Empresa Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A, para su empleo como material de construcción alternativo. (Tesis doctoral, Instituto Minero Metalúrgico, Moa).
- Herrera-Casas, S. S. (2018). *Caracterización del rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, para su posible uso industrial*. (Tesis doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa).
- Kalaitzidou, K., Pagona, E., Stratigousis, P., Ntampou, X., Zaspalis, V., Zouboulis, A., & Mitrakas, M. (2022). Hematite nanoparticles addition to serpentinite/pyroxenes by – products of magnesite mining enrichment process for the production of refractories. *Applied Sciences*, 12(4), 2094. <https://doi.org/10.3390/app12042094>

- Kattel, V. (2017). *Valoración técnica de los desechos serpentiniticos de la empresa Moa Nickel S.A como material de construcción alternativo*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Lewis, J. F., Draper, G., Proenza, J. A., Espaillet, J., & Jiménez, J. (2006). Ophiolite - related ultramafic rocks (serpentinites) in the Caribbean region: A review of their occurrence, composition, origin, emplacement and Ni - laterite soil formation. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 4(1-2), 237-263.
- Longos, A. Jr., Tigue, A. A., Dollente, I. J., Malenab, R., A., Bernardo- Arugay, I, Hinode, H., Kurniawan, W., & Promentilla, M. A. (2020). Optimization of the mix formulation of geopolymer using nickel - laterite mine waste and coal fly ash. *Minerals*, 10(12), 1144. <https://doi.org/10.3390/min10121144>
- López-Peña, L. (2006). Caracterización geológica de las materias primas de los municipios de Moa-Sagua de Tánamo y su empleo como áridos para la construcción. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Loyola-Brefe, O., Hernández-Suárez, Y., Pons-Herrera, J. A., & Pires-Cuienga, C. A. G. (2020). Evaluación de las dunitas de Cayo Guam para su posible uso como material refractario. *Ciencia y Futuro*, 10(4), 1-11.
- Montero-Gil, E. (2007). Caracterización y perspectivas de uso del rechazo de la Empresa Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A como árido. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Ojeda-Pardo, F. R., Pons-Herrera, J. A., Ramírez-Pérez, M. C., Quiroz-Cubascango, V. E & Mosquera-Urbano, A. P. (2023). Scientific fundamentals for the use of serpentinitized rocks from the eastern region of Cuba. *Journal of Physics: Conference Series*, 2573, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2573/1/012033>
- Pons-Herrera, J. A., Leyva-Rodríguez, C. A, Rodríguez-Martínez, G., & Ramírez-Pérez, M. C. (2000). Características físico-químicas de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa - Baracoa (Zona Amores y Miraflores). *Minería y Geología*, 17(3), 95-99. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/171>
- Pons-Herrera, J. A., Ramírez- Pérez, M. C., & Ortiz-Bárcenas, J. (2021). Uso sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos, generados por la industria del Níquel en Moa, Cuba. *Revista Angolana de Geociencias*, 11(2), 145-154.

- Pons-Herrera, J., Ramírez Pérez, M. C., Quintana-Puchol, R., Salazar-Moreno, A, Montero-Gil, E., & Álvarez-Ortiz, A. (2019). Comportamiento térmico y mineralógico de las dunitas serpentinizadas de la región Moa - Baracoa bajo temperaturas de hasta 1600 °C. *Minería y Geología*, 35(2). <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art4-No2-2019>
- Zhou, Z., Sun, H., & Peng, T. (2023). Serpentinization of forsterite under hydrothermal conditions and controlled synthesis of lizardite. *Mineralogical and Petrological Sciences*, 118(1). <https://doi.org/10.2465/jmps.220630b>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses para la publicación de estos resultados

Contribución de autores

AFB: Diseño del estudio, colección de datos, desarrollo experimental, interpretación de resultados, redacción y revisión del original, y aprobación de la versión final. JAPH: revisión crítica y correcciones del artículo, aprobación de la versión final. PYV y STV: Asesoría científica, planeación de la parte experimental. MCRP: Correcciones del artículo y planeación de los experimentos.

ORCID

AFB, <https://orcid.org/0009-0005-8515-5961>

JAP, <https://orcid.org/0000-0002-5265-2962>

PYV, <https://orcid.org/0000-0002-0216-5998>

MCRP, <https://orcid.org/0000-0003-1262-7057>

STV, <https://orcid.org/0000-0003-1413-0239>

Recibido: 20/10/2025

Aceptado: 02/04/2026