

Artículo Original

***OBTENCIÓN ALUMINOTÉRMICA DE ALEACIÓN DE HIERRO Y
CERÁMICA UTILIZANDO CASCARILLA DE LAMINACIÓN
COMO MATERIA PRIMA PRINCIPAL***

***ALUMINOTHERMIC OBTAINING OF IRON ALLOY AND CERAMIC USING
MILL SCALE AS THE MAIN RAW MATERIAL***

Lorenzo Perdomo González^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-3425-1487>
Anniel Martín Delgado¹ <https://orcid.org/0000-0002-1933-8568>
Amado Cruz Crespo¹ <https://orcid.org/0000-0003-0227-9853>
Laura Ailin Perdomo Gómez² <https://orcid.org/0000-0002-8374-3015>

¹Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

²Departamento de Licenciatura en Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Enero 8, 2026; Revisado: Enero 17, 2026; Aceptado: Enero 22, 2026

RESUMEN

Introducción:

La cascarilla de laminación constituye un residuo del proceso de laminación en caliente del acero, que representa aproximadamente el 2 % de la producción de acero. En Cuba se genera en las empresas Antillana de Acero y Acinox Las Tunas, con un uso actual muy limitado.

Objetivo:

Obtener aleaciones de hierro y cerámicas refractarias, mediante procesamiento aluminotérmico usando cascarilla de laminación como materia prima fundamental.

Materiales y Métodos:

Se empleó un diseño de experimentos McLean Anderson, variando las proporciones de cascarilla, virutas de aluminio y caliza. Se conformaron siete cargas, procesadas en un reactor de grafito para obtener las aleaciones y cerámicas.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Lorenzo Perdomo, Email: lperdomo@uclv.edu.cu



Resultados y Discusión:

Las aleaciones presentaron composiciones de carbono (0,3 – 0,67 %), silicio (0,3 – 1,61 %), manganeso (0,1 – 0,96 %) y aluminio (0,25 – 1,88 %), con una recuperación metálica del 73 – 91 %. Las cerámicas, compuestas principalmente por óxidos de aluminio y de hierro, mostraron una recuperación del 93 – 110 %.

Conclusiones:

Los resultados demostraron la factibilidad técnica del proceso. Este método permite obtener aleaciones de hierro de aplicación industrial y cerámicas aptas para el desarrollo de materiales abrasivos y refractarios. La propuesta constituye una solución viable para la valorización de la cascarilla, contribuyendo a la preservación ambiental.

Palabras clave: aleaciones; aluminotermia; cascarilla de laminación; cerámica abrasiva y refractaria; residuales industriales.

ABSTRACT

Introduction:

Mill scale is an industrial waste generated during the hot rolling of steel, representing approximately 2 % of the produced steel. In Cuba, it is generated by companies like Antillana de Acero and Acinox Las Tunas and is currently underutilized.

Objective:

To obtain iron alloys and refractory ceramics through aluminothermic processing using lamination scale as the fundamental raw material.

Materials and Methods:

A McLean Anderson experimental design was used, varying the proportions of mill scale, aluminum chips, and limestone. Seven charges were prepared and processed in a graphite reactor to obtain the corresponding alloys and ceramics.

Results and Discussion:

The resulting alloys contained carbon (0.3 – 0.67 %), silicon (0.3 – 1.61 %), manganese (0.1 – 0.96 %), and aluminum (0.25 – 1.88 %), with a metal recovery rate of 73 – 91 %. The ceramics, composed mainly of aluminum and iron oxides, showed a recovery rate of 93 – 110 %.

Conclusions:

The results demonstrate the technical feasibility of the process. This method allows for obtaining iron alloys for industrial use and ceramics suitable for developing abrasive and refractory materials. The proposal represents a viable solution for valorizing this waste, contributing to environmental preservation.

Keywords: alloys; aluminothermy; mill scale; abrasive and refractory ceramic; industrial waste.

1. INTRODUCCIÓN

La cascarilla de laminación es un residuo sólido generado en la industria siderúrgica, cuyo reciclaje permite, tanto el aprovechamiento de su contenido de hierro, como la reducción de compuestos contaminantes en el medio ambiente (Solmaz et al., 2024; wasteOptima,

2025; Machado et al., 2025). Esta se produce durante la laminación en caliente del acero, formándose de 35 a 40 kg por tonelada métrica de acero procesado (Christwardana et al., 2023; Bugdayci et al., 2018), y representa aproximadamente el 2 % de la producción total de acero a nivel global (Iluțiu – Varvara et al., 2020; Deves et al., 2013), lo que equivale a cerca de 13,5 millones de toneladas métricas anuales con potencial para diversas aplicaciones industriales (Bugdayci et al., 2018; Christwardana et al., 2023).

Desde el punto de vista químico, la cascarilla consiste en una mezcla de hierro y sus óxidos (hematita, magnetita y wustita), junto con trazas de elementos no ferrosos, compuestos alcalinos y contaminantes, como grasas y lubricantes, provenientes del proceso de laminación (Sen et al., 2015). La cascarilla de laminación es apta para el reciclaje directo en alto horno a través de una planta de sinterización, reciclándose aproximadamente el 90 % de ella para la industria siderúrgica (Alghtani et al., 2022).

Estudios previos han explorado su uso en la producción de polvos de hierro, depuración de aguas, fabricación de briquetas y producción de cemento, entre otras aplicaciones (Iluțiu – Varvara et al., 2020; Deves et al., 2013; Nowacki et al., 2021).

En Cuba, la generación de cascarilla de laminación se concentra en las empresas Antillana de Acero (La Habana) y Acinox-Las Tunas (Las Tunas). Dado que estas industrias planean incrementar su capacidad productiva, la acumulación de este residuo representa un creciente desafío ambiental y logístico que requiere soluciones urgentes (Redacción de Corresponsales, 2023).

La relativa alta pureza de la cascarilla, junto con su composición de óxidos de hierro, la convierte en una materia prima adecuada para mezclas aluminotérmicas dirigidas a la obtención de materiales cerámicos y aleaciones (Perdomo et al, 2021; Martín et al., 2023; Wongsawan et al., 2024; Kongkajun et al. 2024). Por ello, el trabajo tiene como objetivo: obtener aleaciones de hierro y cerámicas refractarias, mediante procesamiento aluminotérmico usando cascarilla de laminación como materia prima fundamental.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materias primas

Se utilizaron como materias primas: cascarilla de laminación (ACINOX Las Tunas), virutas de aluminio (Empresa Antenas de Santa Clara) y caliza (yacimiento El Purio, Villa Clara). La composición química de los materiales se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química de las materias primas (en % p/p)

<i>Cascarilla de laminación</i>							
<i>Fe₂O₃</i>	<i>Fe₃O₄</i>	<i>FeO</i>	<i>Fe_{metal}</i>	<i>Fe_{prom}</i>	<i>O_{2,prom}</i>	<i>Otros</i>	
20-30	40-60	15-20	2-5	70,3	24,1	5	
<i>Virutas de aluminio</i>							
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>	<i>Al</i>
0,45	0,20	0,10	0,10	0,15	0,15	0,05	Balance
<i>Caliza</i>							
<i>CaCO₃</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>			
98,58	0,34	0,23	0,17	0,68			

2.2 Formulación de las mezclas para el procesamiento aluminotérmico

Se empleó un diseño de mezcla McLean Anderson para estudiar la influencia de los tres componentes en los rendimientos:

- X₁: Cascarilla (65 - 75 %)
- X₂: Aluminio (20 - 30 %)
- X₃: Caliza (0 - 15 %)

El contenido de aluminio se varió desde la cantidad estequiométrica (calculada a partir de los óxidos de hierro en la cascarilla) hasta un 35 % en exceso. La caliza se incorporó en proporciones de 0 - 15 % para modular la intensidad de la reacción exotérmica.

Las variables de respuesta seleccionadas fueron el rendimiento de metal y el rendimiento de cerámica, calculados como el porcentaje del producto obtenido respecto al potencial teórico determinado por balance de masa.

El número inicial de experimentos se determinó mediante la expresión: $N = q^{2^q-1}$ (donde q = número de variables), resultando en 12 experimentos. Tras aplicar el criterio de normalidad ($\sum X_i = 1$) y eliminar puntos duplicados o fuera de los rangos establecidos, se definieron las mezclas finales. El punto central del diseño se replicó para evaluar la reproducibilidad. La Tabla 2 muestra las composiciones para cargas de 200 g.

Tabla 2. Plan experimental

<i>Experimento</i>	<i>Cascarilla (g)</i>	<i>Aluminio (g)</i>	<i>Caliza (g)</i>
a	130	40	30
b	130	60	10
c	150	40	10
d	150	50	0
e	140	60	0
abcde	140	50,4	9,6

El procesamiento estadístico se realizó con el software *STATGRAPHICS Centurion XV.v15.2.14*.

2.3 Obtención de las aleaciones y escorias (cerámicas)

Las materias primas se trituraron y tamizaron hasta alcanzar la granulometría inferior a los 3 mm, mezclándose homogéneamente durante ~30 min en un mezclador rotatorio tipo tambor. Posteriormente, la mezcla se secó en una estufa (40 min, 230-250 °C) y se procesó mediante aluminotermia en un reactor con crisol de grafito.

La reacción se inició mediante arco eléctrico, mostrando en todos los casos un encendido eficiente y autosostenimiento adecuado. Tras la fusión-reducción, el sistema se dejó enfriar hasta la solidificación, obteniéndose dos fases claramente diferenciadas: metal en la zona inferior y cerámica en la superior. La baja miscibilidad en la interfase facilitó la separación mecánica de ambos productos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación del procesamiento metalúrgico

El procesamiento aluminotérmico de las mezclas permitió la obtención de dos productos claramente diferenciados: una aleación metálica y una fase cerámica (escoria). Como se muestra en la figura 1, se logró una separación total entre ambos productos en la mayoría de los casos, a excepción de la aleación (A) correspondiente a la colada 'b' que presentó grietas e irregularidades superficiales.

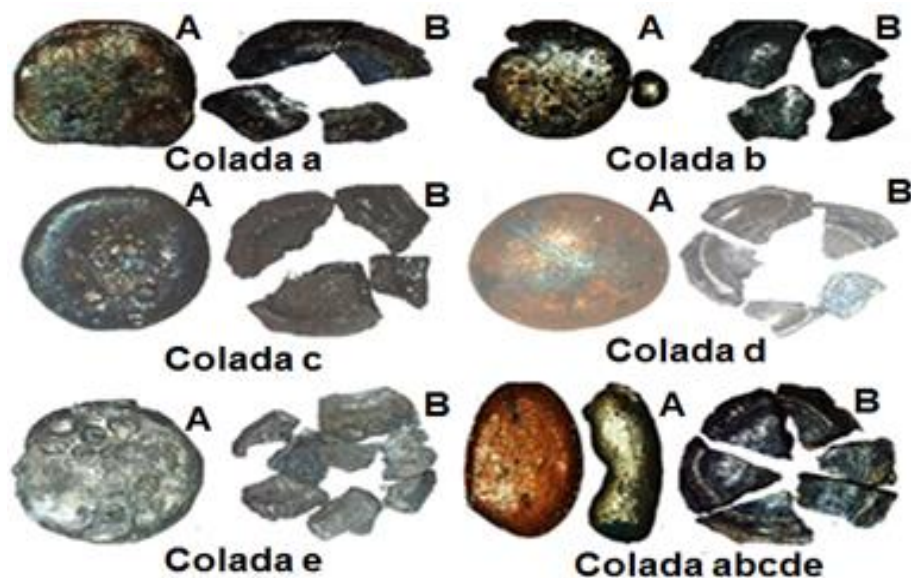


Figura 1. A: Metal y B: cerámica, obtenidos en cada una de las coladas

Los rendimientos del proceso se determinaron a partir de la relación entre la cantidad teórica de producto a obtener, de acuerdo a un balance de masa, y la cantidad real obtenida en cada punto experimental. Los resultados del proceso son mostrados en la tabla 3. Los productos útiles del procesamiento (metal + cerámica) representaron más del 91 % de la carga inicial en la mayoría de los experimentos, con una fracción no reactiva generalmente inferior al 4 %.

Tabla 3. Resultados del procesamiento aluminotérmico

<i>Experimento</i>	<i>Metal (g)</i>	<i>% del teórico</i>	<i>Cerámica (g)</i>	<i>% del teórico</i>	<i>No reaccionó (g)</i>	<i>Productos útiles (g)</i>	<i>% de la carga inicial</i>
a	67	73,3	105,5	106,9	13	172,5	86,3
b	98	91,6	90,7	102,4	6	188,7	94,4
c	82	77,8	110	109,8	6	192	96,0
d	96,5	91,5	89	93,1	5	185,5	92,8
e	101	91,3	92,6	103,7	4	193,6	96,8
abcde	88	88,35	95,5	101,2	7,3	183,5	91,8

Los rendimientos metálicos variaron entre 73,3 % y 91,6 %, siendo los experimentos b, d y e los más eficientes (>91 %), lo cual evidencia que los niveles de reducción estuvieron

por debajo de los valores tomados como referencia para realizar el balance de masa. Los rendimientos de la cerámica (escoria) fueron superiores al 100 % para la mayoría de los experimentos. Los altos rendimientos de cerámica se deben a que se parte de un balance de masa, donde la conversión de metal estuvo por debajo del 100 % (entre 73 - 91 %), por los que los óxidos metálicos que no se redujeron quedan en la cerámica o escoria. Esto hace que el rendimiento de cerámica aumente resultando superior al esperado, superando el 100 %. Se señalar también que el teórico esperado se basa en la consideración del equilibrio termodinámico; sin embargo, dada la alta velocidad a la que se verifican las reacciones de reducción aluminotérmica de los óxidos de hierro, y al relativamente pequeño intervalo de tiempo de permanencia en estado líquido, pueden ocurrir procesos en estado de desequilibrio que inducen al alejamiento del teórico esperado. A ello se añade que la wustita presenta con frecuencia estequiometría variable, que puede llevar a la alteración de las condiciones teóricas de equilibrio.

El procesamiento de los datos mediante el software *STATGRAPHICS* permitió obtener modelos de regresión lineal con un alto ajuste ($R^2 > 99\%$), cuantificando la influencia de cada materia prima.

3.1.1 Rendimiento de metal

$$\text{Rendimiento metal} = 0,31 * \text{Cascarilla} + 0,86 * \text{Aluminio} - 0,02 * \text{Caliza} \quad (1)$$

$R^2 = 99,94\%$ y $R^2_{aj.} = 99,90\%$

El modelo confirma el papel crucial de la cascarilla (comburente) y el aluminio (combustible) en la formación del metal. La influencia negativa de la caliza se atribuye a su efecto diluyente, que reduce el calor generado por unidad de masa y puede disminuir la cinética de reducción.

3.1.2 Rendimiento de cerámica

$$\text{Rendimiento cerámica} = 0,52 * \text{Cascarilla} + 0,44 * \text{Aluminio} + 0,77 * \text{Caliza} \quad (2)$$

$R^2 = 99,82\%$ y $R^2_{aj.} = 99,70\%$

La cascarilla, como fuente de oxígeno, es la variable más significativa. El aluminio, al oxidarse a Al_2O_3 , y la caliza, que se descompone con la formación de CaO , pasan íntegramente a la fase cerámica, explicando su alta influencia positiva.

3.2 Caracterización de los productos obtenidos

3.2.1 Aleaciones metálicas

El análisis químico de las aleaciones (tabla 4) confirma la obtención de aceros al carbono. Es notable que el carbono (entre 0,12 % y 0,67 %) proviene del crisol de grafito, sin necesidad de adiciones externas. Los contenidos de manganeso y silicio varían según la mezcla, mientras que los niveles de fósforo y azufre se mantienen generalmente bajos. Los defectos superficiales de la aleación “b” impidieron su caracterización.

Tabla 4. Composición química de las aleaciones obtenidas (en % p/p)

<i>Experimento</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
A	0,67	1,61	0,331	0,049	0,079
C	0,12	0,23	0,140	0,052	0,119

D	0,26	0,30	0,513	0,052	0,001
E	0,54	1,24	0,964	0,057	0,075
abcde	0,30	1,53	0,77	0,05	0,07

3.2.2 Cerámicas y su potencial aplicación

La composición inicial de las cerámicas, calculada asumiendo una reducción completa del hierro, indicaba un predominio de Al_2O_3 (hasta ~ 99 %) con altas temperaturas de fusión teóricas (>2000 °C). Sin embargo, considerando la eficiencia de reducción medida a partir de los resultados reales del procesamiento aluminotérmico (tabla 3), se recalculó la composición incluyendo los óxidos de hierro residuales, y se obtuvo la composición mostrada en la tabla 5. En todos los casos la suma de Al_2O_3 y Fe_2O_3 supera el 85 %, por lo que se considera válido el empleo del diagrama de fases de este sistema binario para evaluar la composición fásica y consecuentemente la temperatura de fusión (la refractariedad) de las cerámicas (escorias) obtenidas.

Las composiciones de la tabla 5 fueron recalculadas al 100 % de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, determinándose la relación en % masa $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, ubicando los puntos de las temperaturas del líquido de las cerámicas experimentales, en correspondencia con sus composiciones en la figura 2 (HotVeGas, 2020).

Tabla 5. Composición química recalculada de las cerámicas (en % p/p) y temperatura de fusión (T.F) en °C

Sustancia	Experimento					
	a	b	c	d	e	abcde
Al_2O_3	54,42	79,98	66,10	87,06	85,23	75,76
CaO	13,88	5,92	3,93	0	0	7,48
Fe_2O_3	31,36	13,83	29,81	12,82	14,61	16,51
MgO	0,27	0,23	0,14	0,12	0,16	0,22
SiO_2	0,09	0,036	0,02	0	0	0,05

En la figura 2 se observa que todas las cerámicas obtenidas tienen temperatura de fusión por encima de 1800 °C. La alta presencia de Al_2O_3 y óxidos de hierro forman fases corindón y espinela (e.g., hercinita), respectivamente, con temperaturas de fusión elevadas, lo cual avala sus propiedades refractarias (Perdomo et al., 2023).

Además, la presencia de corindón (Al_2O_3 , dureza ~9 Mohs) y hercinita (dureza ~7,5 Mohs) sugiere un potencial abrasivo (ACOMET Metales y Minerales, S.L. (s. f.). (2025), (Hercinyte. (s. f.), 2025). Esto fue validado experimentalmente, ya que todas las cerámicas fueron capaces de rayar el vidrio (dureza 5 - 5,5 Mohs) (Mineral Properties, s. f., 2025). Por lo tanto, los productos cerámicos obtenidos presentan propiedades adecuadas para su uso en la fabricación de materiales abrasivos y refractarios.

Independientemente a los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos, todas las mezclas fueron procesadas obteniéndose determinadas cantidades de metal y de cerámicas de uso industrial, lo cual evidencia la factibilidad de realización del mismo. El metal puede ser usado como materia prima de alta calidad para la elaboración de acero y las cerámicas para producir materiales abrasivos o refractarios.

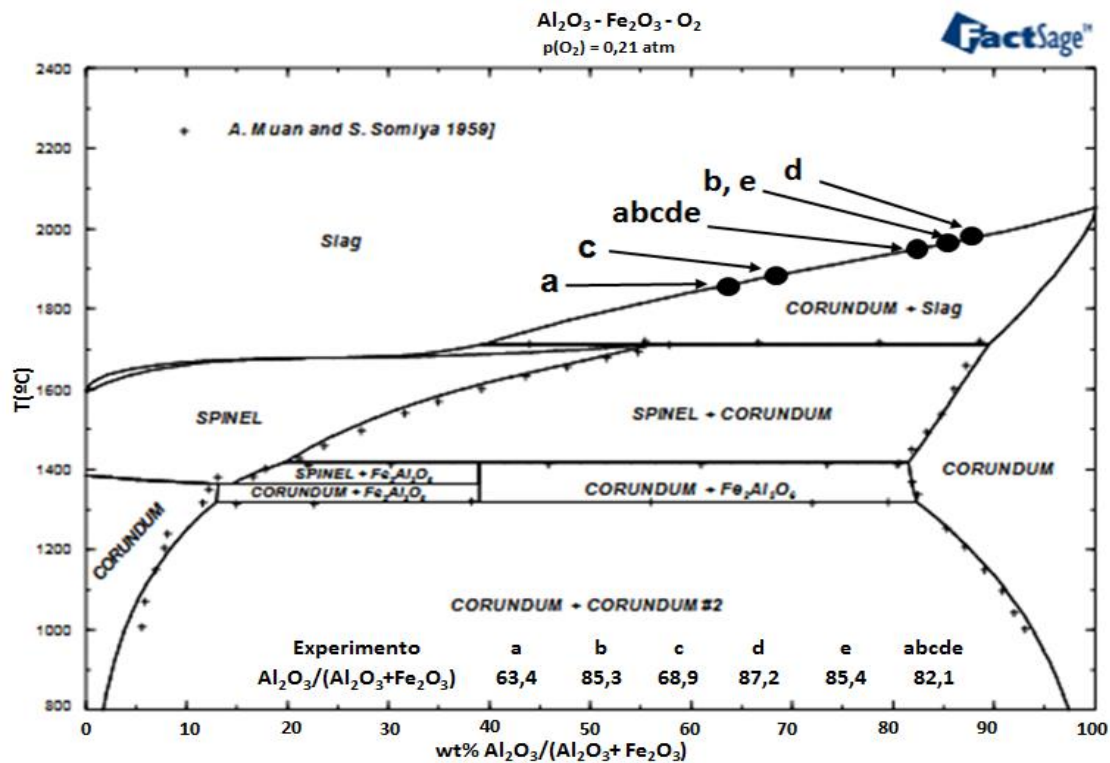


Figura 2. Diagrama de fases $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ en %-masa (HotVeGas, 2020)

El procesamiento, mediante aluminotermia, se caracteriza por su bajo consumo de energía, ya que el mismo se fundamenta en el desarrollo de reacciones tipo redox, lo cual, unido a que se procesa una mezcla donde la materia prima fundamental es la cascarilla de laminación de pocas aplicaciones en Cuba, representa una solución ambientalmente sostenible para la gestión de residuales industriales.

Esta tecnología ha sido validada en la práctica industrial con el montaje de la Planta Piloto de abrasivos Dr.Sc. Rafael Quintana Puchol, en el Combinado de Hormigón y Terrazo “Rolando Morales Sanabria” de Cifuentes, perteneciente a la Empresa de Materiales de Construcción de Villa Clara, la cual produce los polvos abrasivos que demanda la empresa y comercializa los excedentes a otras entidades del país (Martín et al., 2023).

4. CONCLUSIONES

1. Se demostró la viabilidad del proceso aluminotérmico para valorizar la cascarilla de laminación, lográndose una separación efectiva metal-cerámica y recuperaciones metálicas de hasta el 91,6 %. Los modelos estadísticos de alto ajuste ($R^2 > 99 \%$) confirmaron que el aluminio y la cascarilla son las variables clave para el rendimiento metálico, mientras que la caliza actúa como moderador de la reacción.
2. Se obtuvieron aleaciones (acero al carbono) con composiciones variables (C: 0,12 – 0,67 %, Si: 0,23 – 1,61 %, Mn: 0,14 – 0,96 %), donde el carbono fue incorporado desde el crisol de grafito, sin necesidad de aditivos externos.
3. Las cerámicas resultantes, compuestas principalmente por Al_2O_3 (54 – 87 %) y óxidos de hierro residuales y una recuperación del 93 – 110 %, presentan temperaturas de fusión estimadas entre 1775 y 1960 °C y una dureza superior a

5,5 Mohs, lo que las hace aptas para aplicaciones como materiales refractarios y abrasivos.

4. La metodología desarrollada constituye una solución técnica y ambientalmente sostenible para la gestión de la cascarilla de laminación, residuo industrial en Cuba, con bajo consumo energético y uso de materiales locales.

REFERENCIAS

- Alghtani, A., Alsharef, M., & El-Aziz, K. (2022). Characterization of Iron Powder Produced by Reduction of Hot-Rolled Mill Scale In Hydrogen Gas. *Materials Research*, 25, e20210575. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0575>
- ACOMET Metales y Minerales, S.L. (s. f.). (2025). *Corindón blanco. Óxido de Aluminio Abrasivo*. Consultado el 22 diciembre de 2025. <https://www.acomet.es/brochures/Dossier%20Corindon%20blanco%2020170929.pdf>
- Bugdayci, M., Alkan, M., Turan, A., & Yücel, O. (2018). Production of Iron Based Alloys from Mill Scale through Metallothermic Reduction. *High Temperature Materials and Processes*, 37(9-10), 889-898. <http://dx.doi.org/10.1515/htmp-2017-0073>
- Christwardana, M., Kurniawan, Z., & Shidqi, D. (2023). From Mill Scale to Hematite: Processing and Electrophoresis Deposition Coating for Sustainable Secondary Battery Electrodes. *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry*, 15(8), 622-636. <https://scholar.undip.ac.id/en/publications/from-mill-scale-to-hematite-processing-and-electrophoresis-deposi/>
- Deves, B., Vemdrame, I., Bagatini, M., Osório, E., & Vilela, A. (2013). Study on reducing and melting behavior of mill scale/petroleum coke blend. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 10(4), 365-374. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.050>
- Hercinyte. (s. f.), (2025). Mindat.org. Consultada el 20 de diciembre de 2025. <https://www.mindat.org/min-1875.html>
- HotVeGas. (2020). GTT-Technologies, Slagatlas. Versión 16. Your GTT-Team, 1459 pp. <https://gtt-technologies.de/wp-content/uploads/2021/04/Schlackenatlas-Vers.-16.0-without-references.pdf>
- Iluțiu – Varvara, D. A., Aciu, C., Tintelecan, M., & Sas – Boca, I.M. (2020). Assessment of Recycling Potential of the Steel Mill Scale in the Composition of Mortars for Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 46, 131-135. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197892030891X#section-cited-by>
- Kongkajun, N., Cherdhirunkorn, B., & Kongkara, S. (2024). Upcycling Mill Scale and Aluminum Dross for Sustainable Materials Processing: Synthesis of Hercynite via Fe₂O₃-Al₂O₃-C Combustion. *Recycling*, 9(5), 80. <https://doi.org/10.3390/recycling9050080>
- Machado, E., Machado, E., Gonçalves, A., De Noni, A., Machado, C., & Peterson, M. (2025). Steel mill scale nanoparticles prepared via high-energy wet milling. *Materials Chemistry and Physics*, 340, 130855. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130855>
- Martín, A., Perdomo, L., Coello, N., & Glistau, E. (2023). Obtaining a ceramic by
-

- aluminothermia for use as an abrasive material. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*. Tome XVI. Fascicule 4, october – December. <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2023-4/ACTA-2023-4-15.pdf>
- Mineral Properties. (s. f.), (2025). LibreTexts Geociencias. Consultada el 20 de diciembre de 2025. [https://geo-libretexts-org.translate.goog/Bookshelves/Geology/Introduction to Historical Geology \(Johnson et al.\)/03%3A Minerals/3.05%3A Mineral Properties? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=wa](https://geo-libretexts-org.translate.goog/Bookshelves/Geology/Introduction+to+Historical+Geology+(Johnson+et+al.)/03%3A+Minerals/3.05%3A+Mineral+Properties?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=wa)
- Nowacki, K., Maciag, T., & Lis, T. (2021). Recovery of Iron from Mill Scale by Reduction with Carbon Monoxide. *Minerals*, 11, 529. <https://doi.org/10.3390/min11050529>
- Perdomo, L., Quintana, R., Rodríguez, M., Rabassa, D., & Cruz, A. (2021). Recuperación del vanadio contenido en catalizadores agotados de la Fábrica Patricio Lumumba mediante aluminotermia. *Minería y Geología*, 37(3), 303-317. <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v37n3/1993-8012-mg-37-03-303.pdf>
- Perdomo, L., Quintana, R., Alujas, A., Perdomo, L. A., Ruíz, R., & Cruz, A. (2023). Aluminothermic synthesis of ceramics from the hercynite-alumina system, using mill scale and aluminum chips. *DYNA*, 90(229), 106-113. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n229.109737>
- Redacción de Corresponsales, (2023), 24 diciembre. Inversiones apuntan a la recuperación de la producción de acero. *Granma*. <https://www.granma.cu/cuba/2023-12-24/inversiones-apuntan-a-la-recuperacion-de-la-produccion-de-acero-24-12-2023-22-12-52>
- Sen, R., Dehiya, S., Pandel, U., & Banerjee, M. (2015). Utilization of Low Grade Coal for Direct reduction of Mill. Scale to obtain Sponge Iron: Effect of reduction Time and. Particle Size. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 8–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.003>
- Solmaz, A., Saltuk, O., & Abidin, Z. (2024). Green industry work: production of FeCl₃ from iron and steel industry waste (mill scale) and its use in wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 19795–19814. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32451-6>
- wasteOptima, (2025), 28 diciembre. Industrial Mill Scale Management & Recycling. <https://www.wasteoptima.com/heavy-industrial-recycling/mill-scale>
- Wongsawan, P., Boonlom, N., Vantar, M., & Kongkarat, S. (2024). Synthesis of Magnesia–Hercynite-Based Refractories from Mill Scale and Secondary Aluminum Dross: Implication for Recycling Metallurgical Wastes. *Ceramics*, 7(4), 1440–1458. <https://doi.org/10.3390/ceramics7040093>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Conceptualización, investigación, metodología, supervisión, redacción - primera redacción.
-

- M.Sc. Anniel Martín Delgado. Investigación.
- Dr.C. Amado Cruz Crespo. Redacción - revisión y edición.
- M.Sc. Laura Ailín Perdomo Gómez. Redacción - revisión y edición.