



# REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

**Dr. Ignacio Rodríguez Iturbe - Zuliano ilustre**  
Ingeniero civil, hidrólogo profesor universitario,  
doctor honoris causa de la Universidad del Zulia,  
ciudadano ejemplar con numerosos premios nacionales e internacionales.

# Obtención de Arrabio Aleado con Ni y Cr por Reducción Carbotérmica en un Horno de Arco de Corriente Continua de Colas de Nicaro de la Producción de Níquel

Amado Cruz-Crespo<sup>1\*</sup>, Jesús Ortiz-Bárceñas<sup>2</sup>, Lorenzo Perdomo-González<sup>1</sup>, Rafael Quintana-Puchol<sup>1</sup>, José Pons-Herrera<sup>3</sup>, Gualberto Rosales-Martín<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, CP 54 830, Cuba.

<sup>2</sup>Departamento de Desarrollo, Grupo Empresarial de la Industria Sidero Mecánica, La Habana, CP 10800, Cuba

<sup>3</sup>Departamento de Química y Metalurgia, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Universidad de Moa “Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Holguín, CP 83330, Cuba.

<sup>4</sup>Departamento Técnico, ACINOX Tunas, Ministerio de Industrias, Las Tunas, CP 75100, Cuba.

\*Autor de correspondencia: [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)

<https://doi.org/10.22209/rt.v46a07>

Recepción: 16 noviembre 2022 | Aceptación: 21 agosto 2023 | Publicación: 16 septiembre 2023

## Resumen

La existencia de residuales de la producción de níquel (Ni) que pueden ser usados para obtener materiales metalizados en la producción de acero, junto a la insuficiente disponibilidad de coque, lleva a pensar en procesos alternativos sustentables, basados en reductores de mayor accesibilidad, como carbones no coquificables. El objetivo de la investigación fue evaluar la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr, mediante la reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua de colas del proceso de producción de Ni en Nicaro (Cuba), sin beneficiar, empleando carbón antracita como reductor, con vistas a la sustitución de chatarra en el proceso de obtención de aceros aleados. Para ello, se realizaron cálculos teóricos para la obtención de arrabio por reducción carbotérmica para establecer la composición de la carga y se realizó la validación experimental de la obtención del arrabio. Se determinaron las cantidades de los productos de colada, sus rendimientos, la composición del arrabio obtenido y los recobrados de Fe, Ni y Cr. El estudio muestra que es viable la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr mediante la reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua de colas de Nicaro sin beneficiar, empleando carbón antracita como reductor.

**Palabras clave:** arrabio; colas de la producción de níquel; fusión reductora; reducción carbotérmica; sustitución de chatarra.

## Obtaining Pig Iron Alloyed With Ni and Cr by Carbothermic Reduction in a Direct Current Arc Furnace of Nicaro Tails from Nickel Production

### Abstract

The existence residuals from nickel (Ni) production that could be used to obtain metallized materials in the steel production along with the insufficient availability of coke, leads us to think of alternative sustainable processes, based on more accessible reducers, such as non-coking coals. The objective of the research was to

evaluate the production of pig iron alloyed with Ni and Cr by carbothermal reduction in a direct current arc furnace of tailings from the Ni production process in Nicaro, Cuba, without benefiting, using anthracite coal as a reducer in order to substitute scrap in the process to obtain alloy steels. For this purpose, theoretical calculations to obtain pig iron by carbothermal reduction were carried out to establish the composition of the charge and the experimental validation of obtaining pig iron was conducted. The amounts of the foundry products, their yields, the composition of the pig iron obtained and the recovery of Fe, Ni and Cr were determined. The study shows that it is viable to obtain pig iron alloyed with Ni and Cr, by means of carbothermal reduction in a direct current arc furnace of untreated Nicaro tailings, using anthracite coal as a reducer.

**Keywords:** carbothermic reduction; nickel production tailings; pig iron; reductive fusion; scrap replacement.

## Obtenção de Ferro Gusa Ligado com Ni e Cr por Redução Carbotérmica em Forno a Arco de Corrente Contínua de Rejeitos de Nicaro da Produção de Níquel

### Resumo

A existência de resíduos da produção de níquel (Ni) que podem ser aproveitados para a obtenção de materiais metalizados na produção de aço, aliada à insuficiente disponibilidade de coque, leva a pensar em processos alternativos sustentáveis, baseados em redutores mais acessíveis, como os carvões não coqueificáveis. O objetivo da pesquisa foi avaliar a obtenção de ferro-gusa ligado a Ni e Cr, através de redução carbotérmica em forno a arco de corrente contínua de rejeitos do processo de produção de Ni em Nicaro (Cuba), sem benefício, utilizando carvão antracito como redutor, visando a substituição de sucata no processo de obtenção de aços-acos ligados. Para tanto, foram realizados cálculos teóricos para obtenção de ferro gusa por redução carbotérmica para estabelecer a composição da carga e realizada validação experimental da produção de ferro gusa. Foram determinadas as quantidades dos produtos fundidos, seus rendimentos, a composição do ferro gusa obtido e as recuperações de Fe, Ni e Cr. O estudo mostra que é viável obter ferro gusa ligado com Ni e Cr através da redução carbotérmica em um forno a arco de corrente contínua de rejeitos de Nicaro sem aproveitamento, utilizando carvão antracito como redutor.

**Palavras-chave:** ferro gusa; rejeitos da produção de níquel; fusão redutiva; redução carbotérmica; substituição de sucata.

### Introducción

La obtención de arrabio en altos hornos para su posterior procesamiento en la elaboración de acero, ha sido históricamente el esquema tradicional de procesamiento (Grobler y Minnitt, 1999). Sin embargo, dadas las dificultades asociadas a la disponibilidad de coque como reductor y la falta de disponibilidad de chatarra, también se han desarrollado esquemas alternativos, buscando fundamentalmente el uso de combustibles y reductores más accesibles y baratos (Von-Bogdandy y Engell, 1971; Begman *et al.*, 1978; Grobler y Minnitt, 1999; Takao *et al.*, 2005; Anduze-Nogueira, 2010; Emre-Benkli *et al.*, 2018). En tal sentido, son múltiples los procesos alternativos a la vía alto horno-horno de aceración (Grobler y Minnitt, 1999); aunque, no se ha logrado satisfacer todas las expectativas de aquellos países que no disponen de carbón coqueificable. Tal es el caso particular de Cuba, que, pese a las reservas de minerales de hierro (Fe) que posee, incluidas las colas residuales de la producción de níquel (Ni), hasta la fecha solo produce acero a partir de chatarra, aun cuando no dispone de suficiente materia prima para satisfacer la demanda, en correspondencia con las capacidades instaladas (Ferreiro, 2014; Ortiz, 2015). En este sentido, durante décadas se han realizado esfuerzos enfocados al empleo de los minerales de hierro cubanos como materia prima para la obtención de semiproductos para la elaboración de acero, que van desde los estudios experimentales hasta pruebas en condiciones industriales (Ferreiro, 2014; Ortiz, 2015). En esos esfuerzos, a las colas de la producción de Ni se les ha prestado interés especial, asociado a las ventajas que implica su aprovechamiento, que incluye, junto a los aspectos técnicos y económicos, los criterios de sostenibilidad medioambiental porque se les daría una salida a grandes volúmenes de residuales almacenados (Ferreiro, 2014; Permatasari *et al.*, 2021).

En todos los estudios hasta ahora realizados con las colas de la producción de Ni en Nicaro (población cubana de la provincia de Holguín), enfocados a la obtención de materiales prerreducidos para la sustitución de

chatarra, se ha concebido la obtención previa de un concentrado, considerando que estos residuales no presentan el contenido de Fe requerido para garantizar la eficiencia del procesamiento reductivo (Ferreiro, 2014). Sin embargo, todos coinciden en el valor agregado que tendría el material prerreducido a partir de estas colas, por los significativos contenidos de Ni y cromo (Cr) que aportarían al acero (Ferreiro, 2014; Ortiz, 2015).

Por otra parte, según Von-Bogdandy y Engell (1971) y Astuti *et al.* (2018), una de las vías alternativas al alto horno, el cual consiste en la obtención de arrabio con empleo de coque como fuente de energía y como reductor de los óxidos, es la obtención de arrabio por reducción carbotérmica a partir de minerales de hierro en hornos eléctricos de arco de corriente continua. En los años 70 operaba en Matanzas, Venezuela, la planta de mayor volumen de producción de arrabio por esta vía a nivel mundial (Von-Bogdandy y Engell, 1971). También se han reportado experiencias de obtención de arrabio por reducción carbotérmica en hornos de pequeña escala, enfocadas a la revalorización de residuales con significativos contenidos de Ni (Liu *et al.*, 2019). En su esencia, esta vía de procesamiento de minerales de hierro es similar a la obtención de ferroaleaciones por reducción carbotérmica en hornos de arco eléctrico de corriente continua (Riss y Khodorovsky, 1975); sobre lo cual, los autores poseen experiencia en la obtención de ferroaleaciones enfocadas a la producción de consumibles para la soldadura y reacondicionamiento de piezas y concibiendo el empleo de residuales y minerales no convencionales como materias primas; así como, previendo siempre, el aprovechamiento de las escorias resultantes de la fusión-reducción que se ejecuta (Cruz-Crespo *et al.*, 2005; 2019; Perdomo-González, *et al.*, 2003; 2017; 2018; Quintana-Puchol *et al.*, 2002; 2004).

La obtención de arrabio por reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua, a partir de colas sin beneficiar de la producción de Ni en Nicaro, es una variante no explorada hasta el presente. Por tanto, el objetivo del trabajo consistió en evaluar la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr, mediante la reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua de colas sin beneficiar de la producción de Ni en Nicaro, empleando carbón antracita como reductor, con vistas a la sustitución de chatarra en la obtención de aceros aleados.

## Materiales y Métodos

El procedimiento metodológico seguido en el presente trabajo, se describe a continuación. En un primer momento se realizaron los cálculos teóricos para la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr, por reducción carbotérmica de colas sin beneficiar de la producción de Ni en Nicaro, empleando carbón antracita como reductor. Como resultado fundamental de dichos cálculos, se obtuvo la composición de la carga (compuesta por colas, carbón antracita como reductor y cal como fundente) para la obtención de arrabio aleado con Cr y Ni. En un segundo momento, se realizaron coladas experimentales de obtención de arrabio en horno de arco de corriente continua, mediante el procesamiento de cargas conformadas según lo determinado por cálculos teóricos.

### Cálculos de la reducción de los óxidos y la formación del arrabio en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro sin beneficiar

En la Tabla 1 se muestra la composición química de las materias primas utilizadas en el presente trabajo (colas residuales de la producción de Ni en Nicaro, antracita y cal), reportadas por Ferreiro (2014).

**Tabla 1.** Composición química de los componentes de carga para la obtención de arrabio por fusión reductora de colas de la producción de Ni (% en masa) (Ferreiro, 2014).

Colas de la producción de Ni en Nicaro										
Fe <sub>T</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	NiO	CoO	S
42,60	58,83	17,49	11,24	3,84	2,93	0,79	0,47	0,46	0,09	0,11
Antracita					Cal					
C <sub>F</sub>	Volátiles	Cenizas	S	Fe <sub>T</sub>	(FeO)	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	
77,7	8,3	14,0	0,6	0,127	(0,16)	0,76	0,58	0,44	79,05	

Fe<sub>T</sub>: contenido de hierro total, C<sub>F</sub>: contenido de carbono fijo en el carbón antracita.

Para estos cálculos se tomó como base 100 g de colas (Tabla 1), considerándose que el Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> se redujo a Fe por las Ecuaciones 1 y 2, pasando luego a la aleación (Begman *et al.*, 1978; Liu *et al.*, 2019; Yusfin *et al.*, 1982). En el caso del Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la eficiencia de la reacción (Ecuación 3) se consideró en un 90 % (Ortiz, 2015; Perdomo-González *et al.*, 2003), por lo que el 10 % de este óxido, contenido en las colas (Tabla 1), no se redujo y pasó a la escoria. Para el MnO, se estimó que el 80 % se redujo (Ecuación 4) y pasó al arrabio como Mn y que un 10 % se redujo a altas temperaturas y pasó a los gases. El 10 % del MnO restante pasó a la escoria sin reducir

(Cruz-Crespo *et al.*, 2005; 2019). Finalmente, se consideró que el NiO y el CoO, contenidos en las colas (Tabla 1), se redujeron y pasaron como Ni y Co al arrabio, de acuerdo con las Ecuaciones 5 y 6 (Ferreiro, 2014; Ortiz, 2015):



Los contenidos de silicio (Si: 1,0 %), fósforo (P: 0,2 %), manganeso (Mn: 0,8 %) y azufre (S: 0,04 %) fueron asumidos de acuerdo a lo reportado por Begman *et al.* (1978). El contenido de carbono (C: 4 %) fue estimado por la Ecuación 7 (Begman *et al.*, 1978). O sea, de lo asumido, la suma de los contenidos de C, Si, P y S, fue igual a 5,24 %, representando el resto de los elementos del arrabio (Fe, Cr, Mn, Ni, Co) el 94,76 %. Con base en ello, se determinó la masa total de arrabio, la masa en gramos correspondientes a los contenidos porcentuales de C, Si, P y S; así como los contenidos porcentuales de Fe, Cr, Mn, Ni y Co. Se asumió que el silicio pasó al arrabio por la reducción del SiO<sub>2</sub>, contenido en las colas (Tabla 1), mediante la reacción de la Ecuación 8 (Ferreiro, 2014; Cruz-Crespo *et al.*, 2019) :

$$[\text{C}] = 4,23 - 3,12[\text{Si}] - 0,33 [\text{P}] + 0,066 [\text{Mn}] \quad (7)$$

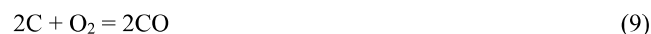


#### **Cálculos de la cantidad de carbón antracita para la obtención del arrabio en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro sin beneficiar**

La cantidad de carbono requerida para la reducción de cada uno de los óxidos se calculó por las reacciones de las Ecuaciones 1 a 6 y 8. También se determinó la cantidad de carbono, en gramos, requerida para la formación del arrabio. Se sumaron todas las cantidades independientes de carbono para estimar el total para la obtención del arrabio. Varios autores han reportado un rango amplio del carbono en exceso, que va desde 10 hasta 30 % (Begman *et al.*, 1978; Yusfin *et al.*, 1982; Ferreiro, 2014; Ortiz, 2015; Liu *et al.*, 2019). De esta manera, en los cálculos del presente trabajo se consideraron todos los procesos teóricamente posibles de consumo de carbono, incluyendo también la reducción frente al carbono sólido y no frente a la fase gaseosa, se asumió un 15 % de carbono en exceso. Se obtuvo que se requiere de 20,03 g de carbono para 100 g de colas. Dicho aporte de carbono se realizó por adición de 25,77 g de carbón antracita (Tabla 1) a la carga, con base al carbono fijo presente en el mismo.

#### **Cálculos de la formación de los gases durante la obtención del arrabio en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro sin beneficiar**

Al ser considerado que la reducción de todos los óxidos se realizó directamente con carbono, el producto de las reacciones resultó ser el CO (Ecuaciones 1 a 6 y 8). Se estableció que el exceso de carbono interactuó con el oxígeno, formando CO por la Ecuación 9. Se enfatiza en que se realizaron algunas simplificaciones para ejecutar los cálculos, pues la reducción de los óxidos de Fe es termodinámicamente muy probable por las reacciones indirectas con la participación de CO como reductor, al tiempo que el CO<sub>2</sub> formado participaría en la reacción de Boudouard (CO<sub>2</sub> + C = 2CO) (Von-Bogdandy y Engell, 1971; Begman *et al.*, 1978; Yusfin *et al.*, 1982; Astuti *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019), según:



La cantidad en gramos de Mn que se obtuvo de la reducción del MnO y que pasó a los gases, se determinó con base en la Ecuación 4. Se consideró que un 10 % del MnO se redujo a altas temperaturas, se volatilizó y pasó a los gases (Cruz-Crespo *et al.*, 2005; 2019). En los cálculos también se estableció que a los gases pasaron los compuestos volátiles de la antracita (Tabla 1).

### Cálculos de la formación de la escoria durante la obtención del arrabio en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro sin beneficiar

A la escoria, durante la obtención del arrabio, pasaron todos los óxidos de las colas (Tabla 1) que no fueron reducidos ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$ ). Del  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y del  $\text{MnO}$  de las colas (Tabla 1) pasó a la escoria el 10 % que no se redujo por las Ecuaciones 3 y 4. Del  $\text{SiO}_2$  de las colas (Tabla 1) pasó a la escoria el que no se redujo por la Ecuación 8; así como el que aportó la ceniza de la antracita (se asumió que toda la ceniza de la antracita estaba constituida por  $\text{SiO}_2$ ) (Begman *et al.*, 1978). Pasó también a la escoria el azufre del mineral (Tabla 1) que no entró al arrabio y el de la antracita.

De acuerdo con la composición de las colas (Tabla 1) y los procesos de fusión-reducción que se evaluaron, la escoria inicial estuvo representada por el sistema ternario de óxidos  $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Committee for Fundamental Metallurgy, 1981). Se realizó la adición en la carga de  $\text{CaO}$  en forma de cal (Tabla 1), para mejorar la fusibilidad de la escoria, obteniéndose una nueva composición de esta, con propiedades más favorables en cuanto a basicidad y viscosidad (Begman *et al.*, 1978). Para definir la adición de  $\text{CaO}$ , la composición calculada de la escoria inicial (escoria sin fundente) fue recalculada al sistema  $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  y se ubicó su composición en el sistema pseudoternario  $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$ - $\text{SiO}_2$  con 10 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Committee for Fundamental Metallurgy, 1981). Se previó entonces migrar hacia un punto en dirección al vértice del  $\text{CaO}$  del diagrama pseudoternario  $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$ - $\text{SiO}_2$  con 10 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , manteniéndose constante la relación  $\text{MgO}:\text{SiO}_2$ . La composición del nuevo punto se determinó a partir de haber sido prefijado el contenido de  $\text{CaO}$  y de considerar lo siguiente:

$$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 = 100 \quad (10)$$

$$\text{MgO}:\text{SiO}_2 = \text{constante} \quad (11)$$

De la solución del sistema de Ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{MgO}$  en el sistema pseudoternario  $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$ - $\text{SiO}_2$ , con 10 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El  $\text{CaO}$  que se requirió añadir fue de 14,69 g, pero ya las colas (la escoria primaria) tenía 0,47 g; o sea, se añadió la diferencia (14,22 g). Con base en la composición de la cal (Tabla 1), correspondió adicionar 17,99 g de esta a la carga. Se consideró en la conformación de la nueva escoria el aporte de  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de la cal.

### Obtención experimental de arrabio aleado con Cr y Ni por reducción carbotérmica de las colas de Nicaro sin beneficiar en horno de arco de corriente continua

Con el propósito de comprobar experimentalmente la viabilidad de obtención de arrabio aleado con Cr y Ni, a partir del procesamiento carbotérmico en horno eléctrico de arco de corriente continua de la carga establecida por cálculos teóricos (100 g de colas de Nicaro; 25,77 g de carbón antracita y 17,99 g de cal), se procesaron tres cargas para 0,5 kg de colas cada una. Las colas y la cal tenían granulometría fina, inferiores a 0,15 mm (Ferreiro, 2014); mientras que la antracita se llevó por molienda y tamizado a una granulometría entre 1,0 y 3,0 mm, en correspondencia con experiencias experimentales previas de los autores en procesos de reducción carbotérmica de minerales (Cruz-Crespo *et al.*, 2005; 2019; Perdomo-González *et al.*, 2017; 2018). Los componentes de carga fueron pesados en una balanza técnica y luego homogenizados en un tambor rotatorio durante 15 min. El proceso de fusión-reducción fue realizado en un horno eléctrico de arco con crisol de grafito del Centro de Investigaciones de Soldadura de la Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas, empleando corriente continua, con intensidad en el entorno de 475 A y con tensión del arco de alrededor de 30 V (Cruz-Crespo *et al.*, 2005; Perdomo-González *et al.*, 2017; 2018). La alimentación de la carga durante la colada, se realizó de manera gradual alrededor del electrodo.

Se determinó también la cantidad de arrabio y de escoria obtenidos en cada una de las tres coladas; así como los valores medios, desviación estándar, intervalo de confianza y error estándar. Al arrabio obtenido en cada colada se le determinó la composición química por análisis espectral de emisión óptica, que es una técnica de uso frecuente en la determinación de la composición química de este tipo de aleación (Astuti *et al.*, 2018; Belec Vario Lab, 2023; Cruz-Crespo *et al.*, 2019), con empleo de un equipo de marca Beleg, modelo 2C, en el laboratorio de la empresa Planta Mecánica "Fabric Aguilar Noriega". Se calculó el rendimiento frente a lo teórico (RA y RE- Rendimiento de arrabio y rendimiento de escoria) por la Ecuación 12 (la masa media de arrabio (MMA) o de escoria (MME) obtenidas experimentalmente se dividió entre 5, ya que las cargas experimentales correspondieron a 500 g de colas, mientras que los cálculos teóricos se realizaron para cargas de 100 g de colas):

$$RA (RE) = \frac{MMA (MME) \text{ experimental}}{M.\text{arrabio (escoria) calculada}} * 100 \quad (12)$$

Se cuantificaron los valores de recobrado (Rec) de Fe, Cr y Ni (Me- representa al Fe, al Cr o al Ni; MAexp- Masa de arrabio experimental; %MeAexp- % de Me en el arrabio experimental) por la Ecuación 13 (Yildrian *et al.*, 2013; Astuti *et al.*, 2018; Gou *et al.*, 2021). Los contenidos de Fe, Cr y Ni (%Me en las colas) se establecieron a partir de los contenidos de sus óxidos (%Me<sub>x</sub>O<sub>y</sub> en las colas), considerando la estequiometría, la masa atómica del metal (MA del metal) y la masa molecular del óxido (MM de Me<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, de acuerdo con la Ecuación 14:

$$RecMe = \frac{MAexp * \%MeAexp}{Masa \text{ de colas} * \%Me \text{ en las colas}} * 100 \quad (13)$$

$$\%Me \text{ en las colas} = \frac{\%Me_xO_y \text{ en las colas} * x * MA \text{ del metal}}{MM \text{ del } Me_xO_y} \quad (14)$$

## Resultados y Discusión

### Análisis de la formación por cálculos del arrabio en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro

La composición del arrabio obtenido por cálculos en la reducción carbotérmica de 100 g de colas de Nicaro es mostrada en la Tabla 2. Como era esperado, en la composición del arrabio hay contenidos de Cr, Ni y Co, que lo hacen diferir de una aleación convencional de este tipo para la obtención de acero (Begman *et al.*, 1978; Ferreiro, 2014; Ortiz, 2015). La presencia de estos elementos en el arrabio le confiere un valor agregado para la obtención de acero con estos componentes de aleación (Isnugroho y Birawidha, 2018; Astuti *et al.*, 2018).

**Tabla 2.** Composición del arrabio obtenido por cálculos a partir de la reducción carbotérmica de 100 g de colas.

Elemento	Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	P	S	Σ
Masa (g)	42,67	1,92	0,49	0,48	1,80	0,36	0,07	0,10	0,02	47,90
Contenido (%)	89,08	4,00	1,02	1,00	3,76	0,75	0,15	0,20	0,04	100,00

La composición del arrabio obtenida por cálculos en el presente trabajo desde la reducción carbotérmica de colas de Nicaro sin beneficiar (Tabla 2), coincide, de manera general, con resultados experimentales reportados por Ferreiro (2014) de la obtención de lupias de arrabio a partir de concentrado de colas de Nicaro. Ello significa que el beneficio de estas colas ejerce su efecto fundamental en la eliminación de elementos formadores de escoria, presentes en la ganga del mineral. El arrabio que se produciría en el horno de arco de corriente continua durante la reducción carbotérmica de las colas cuando el proceso fuera llevado a escala industrial, debe ser cargado en estado líquido al horno de aceración, logrando en ello un significativo aprovechamiento del calor latente, que contribuiría a la sostenibilidad del proceso. En este mismo sentido de la búsqueda de sostenibilidad, dado que la producción de acero y sus productos genera como residuales el polvo de acería y la cascarilla de laminación con altos contenidos de óxidos de Fe (Alencastro-De Araujo y Schalch, 2014; Walburga-Keglevich *et al.*, 2017; Shidqi-Khaerudini *et al.*, 2018; Małecki *et al.*, 2021; Nowacki *et al.*, 2021), puede ser valorada como alternativa la posible incorporación de estos residuales en la carga para la fusión-reducción.

### Análisis de la formación por cálculos de los gases en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro

En la Tabla 3 se presenta la masa de los gases en gramos y su expresión porcentual, encontrada mediante los cálculos de obtención de arrabio de la reducción carbotérmica de 100 g de colas de Nicaro, empleando carbón antracita como reductor. La suma total del CO que se formó en las reacciones de reducción fue de 31,33 g, el cual se incrementó en 6,09 g por la combustión incompleta del carbono en exceso, que ocurrió según la reacción de la Ecuación 9. Como fue planteado en la sección de materiales y métodos, considerando que no constituyó un objetivo del trabajo el análisis en detalle de los gases, se realizaron simplificaciones para facilitar los cálculos; por ello, a diferencia de lo que reportan muchos autores, en los gases no se refleja la formación de CO<sub>2</sub>, que desde el punto de vista termodinámico sería posible (Von-Bogdandy y Engell, 1971; Begman *et al.*, 1978; Yusfin *et al.*, 1982; Astuti *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019). En la obtención práctica a nivel industrial de arrabio por reducción carbotérmica, la previsión de aprovechamiento de los gases de salida en el precalentamiento de los materiales de carga implica un ahorro de la energía consumida y de tiempo en el horno para eliminar su humedad y calentarlos desde la temperatura ambiente.

**Tabla 3.** Composición obtenida por cálculos de los gases de salida en la obtención de arrabio a partir de 100 g de colas.

Componente	CO	Mn	Volátiles	$\Sigma$
Masa (g)	37,42	0,06	2,14	39,62
Contenido (%)	94,45	0,15	5,40	100,00

**Análisis de la formación por cálculos de la escoria en la reducción carbotérmica de colas de Nicaro**

La composición de la escoria obtenida por cálculos de la reducción carbotérmica de 100 g de colas de Nicaro, se muestra en la Tabla 4. Como se observa, dicha escoria se corresponde en el entorno del 97 % al sistema ternario de óxidos SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; que llevándolo al 100 % de estos tres óxidos, quedaría: SiO-56,98 %; MgO-32,07 % y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10,96 %. En el sistema ternario de equilibrio de fases, esta escoria se ubica en la región de la fosterita (2MgO.SiO<sub>2</sub>), entre las isoterma de 1500 y 1600 °C (Committee for Fundamental Metallurgy, 1981). La basicidad de la escoria [B = (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)], determinada con base en su composición (Tabla 4), fue igual a 0,49; es decir, se clasifica como ácida, de acuerdo a lo que reporta la literatura (Begman *et al.*, 1978).

**Tabla 4.** Composición de la escoria obtenida por cálculos de la obtención de arrabio por reducción carbotérmica.

Componente	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	S	$\Sigma$
Masa (g)	19,97	11,24	3,84	0,293	0,08	0,47	0,24	36,13
Contenido (%)	55,26	31,11	10,63	0,81	0,22	1,30	0,66	100,00

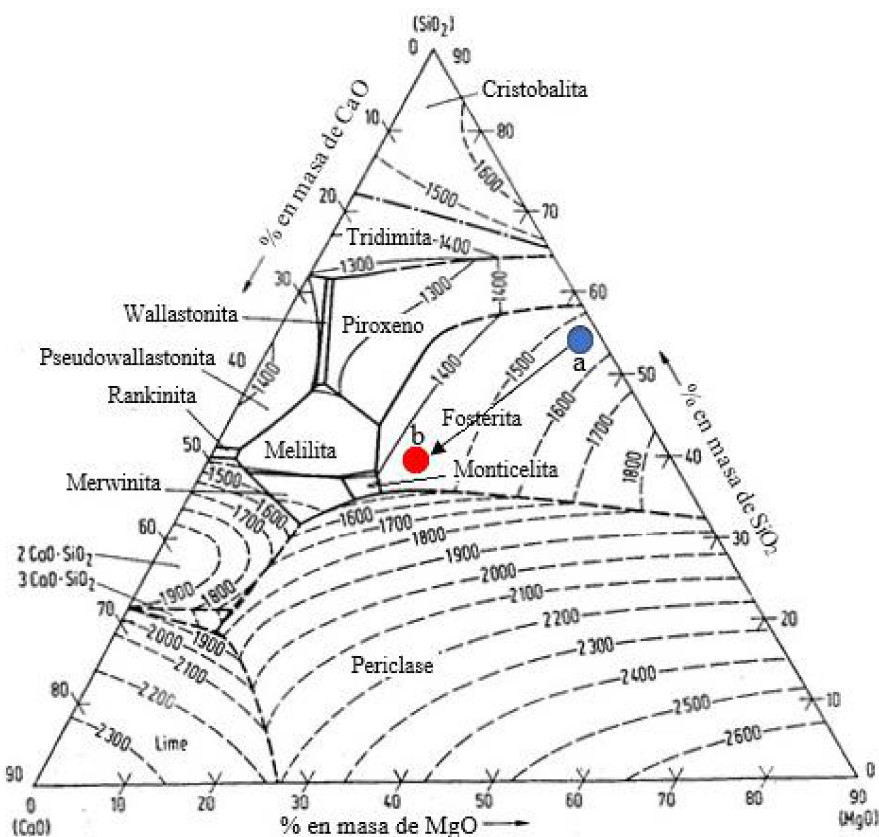
De acuerdo con la composición (Tabla 4) y consecuentemente la basicidad y temperatura de fusión, y los resultados de varios autores que abordan la obtención de arrabio (Begman *et al.*, 1978; Astuti *et al.*, 2018; Isnugroho y Birawidha, 2018), las escorias obtenidas por cálculos de la reducción carbotérmica de colas de Nicaro, requieren la adición de un fundente que aumente su basicidad, para adecuar su desempeño. Una mayor basicidad favorece la reducción de los óxidos de Fe, de Ni y de Cr para que haya mayor capacidad desulfurante y que disminuya la viscosidad para facilitar el vertido, como resultado de la ruptura de los enlaces del enrejado silicático (Begman *et al.*, 1978; Cruz-Cespo *et al.*, 2019). Para tal propósito, la composición de la escoria de la reducción carbotérmica de las colas de Nicaro de la Tabla 4 (escoria sin adición de fundente), de acuerdo a lo planteado en la sección de materiales y métodos, fue recalculada al sistema cuaternario CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabla 5) y se ubicó en el punto “a” del diagrama pseudoternario CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> con 10 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 1). Dicho punto “a” se enmarca en la región de la fosterita (2MgO.SiO<sub>2</sub>), entre las isoterma de 1500 y 1600 °C, cercana a la arista binaria MgO-SiO<sub>2</sub>, coincidiendo con lo ya planteado al analizar la Tabla 4, cuando fue evaluada por el sistema ternario SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Tabla 5.** Composición de la escoria de la obtención de arrabio por reducción carbotérmica recalculada al sistema cuaternario.

Componente	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\Sigma$
<b>Escoria sin adición de fundente</b>					
Masa (g)	19,97	11,24	0,47	3,84	35,52
Contenido (%)	56,22	31,64	1,32	10,81	100,00
<b>Escoria con adición de fundente</b>					
Masa (g)	20,07	11,38	14,69	3,92	50,06
Contenido (%)	40,10	22,73	29,34	7,83	100,00

Sin alterar la relación MgO:SiO<sub>2</sub>= 0,563 del punto “a” (Figura 1), se prefijó la adición de 32 % de CaO para migrar al punto “b” y fue resuelto el sistema de Ecuaciones 10 y 11, de acuerdo a lo descrito en la sección de materiales y métodos. Se obtuvo que: SiO<sub>2</sub> = 43,51 % y MgO = 24,49 %. Así, en la Tabla 6 se muestra la composición de la escoria luego de considerar el incremento de CaO, mediante la adición de cal (Tabla 1) en la carga y habiendo tomado en cuenta también los aportes de otros componentes de la cal.





**Figura 1.** Diagrama pseudoternario de fases del sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> con 10 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (modificado de Committee for Fundamental Metallurgy, 1981). a: escoria sin adición de fundente (azul), b: escoria con adición de fundente (rojo).

**Tabla 6.** Composición de la escoria obtenida por cálculos de la reducción carbotérmica de las colas con adición de fundente.

Componente	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	S	FeO	Σ
Masa (g)	20,07	11,377	3,92	0,293	0,08	14,69	0,24	0,03	50,7
Contenido (%)	39,59	22,44	7,73	0,58	0,16	28,97	0,47	0,06	100,00

La escoria, luego de la adición de fundente, fue recalculada al sistema cuaternario (Tabla 5) y le fue determinada la basicidad [ $B = (\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = 1,09$ ], corroborándose su ubicación en el punto “b” del diagrama pseudoternario CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> para 10 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 1), en la región de la fosterita (2MgO·SiO<sub>2</sub>), en el entorno de la isoterma de 1400 °C, en la vecindad de la melilita [Ca<sub>2</sub>Mg(Si, Al)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>] y la monticelita [(Ca,Mg)O·MgO·SiO<sub>2</sub>]. La ubicación en el punto “b” es adecuada, de acuerdo con lo reportado en la literatura para escorias de la obtención de arrabio de composiciones similares a la del presente trabajo (Begman *et al.*, 1978; Committee for Fundamental Metallurgy, 1981; Ferreiro, 2014). Dichos autores declaran que la composición de las escorias gobierna sus propiedades y desempeño, influyendo en la reducción de los óxidos del mineral, la desulfuración del arrabio y la viscosidad de la escoria. Plantean que el incremento de la basicidad en general es favorable, ya que significa un aumento de los óxidos MeO, que rompen los enlaces Si-O del enrejado silicático disminuyendo la viscosidad, al tiempo que aumentan la actividad de los óxidos de Cr, Ni y de Fe, favoreciendo su reducción. Sin embargo, reconocen que cuando las escorias de este sistema de óxidos son muy básicas, un pequeño descenso de la temperatura les provoca un gran aumento de la viscosidad, dificultando la evacuación del metal del horno. Así, hay coincidencia en que, con escorias de este tipo (sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la basicidad en el entorno de 1,0 (entre 0,8 y 1,12) garantiza el buen comportamiento del proceso (Begman *et al.*, 1978; Committee for Fundamental Metallurgy, 1981; Ferreiro, 2014; Astuti *et al.*, 2018), caracterizándose por una viscosidad entre 3,0 y 6,0 P a 1400 °C (Begman *et al.*, 1978; Committee for Fundamental Metallurgy, 1981).

Considerando su composición (Tabla 6), las escorias obtenidas por cálculo con adición de fundente poseen mucha similitud con el cemento Portland (Zemri y Bachir-Bouiadjra, 2020); por tanto, son viables de ser utilizadas en la fabricación de un material cementicio, si se les realiza un enfriamiento rápido que aumente su amorfismo y garantice sus propiedades hidráulicas (Committee for Fundamental Metallurgy, 1981; Zemri y Bachir-Bouiadjra, 2020). Esto implica que la escoria en lugar de actuar como residual del proceso, puede ser valorada como un semiproducto de alto valor agregado.

#### **Análisis de los resultados de la obtención experimental de arrabio por reducción carbotérmica de las colas de Nicaro sin beneficiar**

Los resultados de las coladas experimentales para cargas con 0,5 kg de colas de Nicaro cada una, en cuanto a la masa de metal y de escoria, así como a la composición química, se muestran en las Tablas 7 y 8, respectivamente. En correspondencia con los valores de desviación estándar, de intervalo de confianza y de error estándar, de manera general hubo poca dispersión de los resultados con respecto a la media y, para una probabilidad de un 95 %, los resultados son reproducibles bajo condiciones experimentales iguales.

**Tabla 7.** Resultados de masa de arrabio y de escoria obtenidos de la reducción carbotérmica experimental de colas de Nicaro en horno de arco de corriente continua.

Colada	Masa (g)	
	Arrabio	Escoria
1	213,4	186,3
2	196,6	188,1
3	202,6	187,5
Media	204,2	187,3
Desviación estándar	8,5	0,9
Intervalo de confianza	21,1	2,3
Error estándar	4,915	0,5292

**Tabla 8.** Composición química del arrabio obtenido experimentalmente de la reducción carbotérmica de colas de Nicaro en horno de arco de corriente continua (% en masa).

Colada	C	Mn	Si	Ni	Cr	Co	P	S
1	4,383	1,192	2,732	0,720	3,735	0,141	0,052	0,127
2	4,471	1,205	2,674	0,743	3,746	0,135	0,050	0,116
3	4,452	1,189	2,723	0,739	3,729	0,139	0,053	0,128
Media	4,435	1,195	2,710	0,734	3,737	0,138	0,052	0,124
Desviación estándar	0,046	0,009	0,031	0,012	0,009	0,003	0,002	0,006
Intervalo de confianza	0,115	0,021	0,078	0,031	0,022	0,008	0,004	0,017
Error estándar	0,027	0,005	0,018	0,007	0,005	0,002	0,001	0,004

Los valores de rendimiento fueron de 84,8 y 73,9 % para el arrabio y la escoria, respectivamente. Dichos rendimientos se determinaron, de acuerdo a lo indicado en la sección de materiales y métodos, como la relación de los valores medios de cantidad de arrabio y de escoria (Tabla 7), respecto a las masas de arrabio y de escoria obtenidas por los cálculos teóricos (Tablas 2 y 6). Los valores de rendimiento en general son adecuados en comparación con resultados previos en estudios de reducción carbotérmica de minerales de Cr y manganeso en hornos de arco de corriente continua (Quintana-Puchol *et al.*, 2002; Cruz-Crespo *et al.*, 2005; 2019; Perdomo-González *et al.*, 2017; Perdomo-González *et al.*, 2018). No obstante, no se tienen referentes de trabajos previos sobre el rendimiento en la obtención de arrabio por reducción carbotérmica, ya que los autores que han abordado el tema, entre los cuales se encuentran Begman *et al.* (1978), Ferreiro (2014), Astuti *et al.* (2018), Isnugroho y Birawidha (2018), Liu *et al.* (2019) y Nowacki *et al.* (2021), no han calculado la masa teórica de arrabio y de escoria, y consecuentemente, no han determinado el rendimiento. Se considera que el rendimiento del presente trabajo puede ser mejorado; ya que, durante un tiempo prolongado, con relación al tiempo de colada, el arco no estuvo sumergido a causa del pequeño volumen de las cargas, lo cual motivó a pérdidas por arrastre de los componentes de carga finos, debido a la presión de los gases alrededor del electrodo. En tal sentido, con el propósito de mejorar el rendimiento en trabajos futuros, por disminución de la posibilidad de arrastre de los componentes de carga por los gases del horno, se recomienda realizar coladas de mayor volumen de carga para mantener el arco sumergido y peletizar los componentes de carga, como han realizado diversos autores (Ferreiro, 2014; Walburga-Keglevich *et al.*, 2017; Isnugroho y Birawidha, 2018).

La composición media del arrabio obtenido experimentalmente en las tres coladas (Tabla 8) confirma, por el contenido de carbono, que la aleación obtenida corresponde a un arrabio aleado con Cr, Ni y Co (Ferreiro,

2014; Ortíz, 2015; Liu *et al.*, 2015; Astuti *et al.*, 2018; Isnugroho y Birawidha, 2018), con un contenido de Fe igual a 86,875 %, como valor medio de las tres coladas, que corresponde al balance; por tanto, puede ser utilizado en sustitución de la chatarra para la elaboración de aceros aleados con estos elementos.

Al comparar los resultados experimentales de masa de escoria y de arrabio, y de composición química (Tablas 7 y 8) con los obtenidos por cálculos (Tablas 2 y 6), se advierte que los valores de cálculo no se enmarcan dentro del intervalo de confianza de los resultados experimentales. Ello se explica en que, para la realización de los cálculos en el presente trabajo se asumieron criterios y simplificaciones que no consideraron toda la realidad de las condiciones experimentales; por ejemplo, se ejecutaron los cálculos con base a la composición de las materias primas reportada previamente por Ferreiro (2014), que, aun siendo las mismas materias primas, pudieron diferir de las muestras específicas utilizadas en el presente trabajo en determinados rangos; tampoco se tomó en cuenta la granulometría de las materias primas, ni si estas fueron peletizadas o no para la fusión-reducción, ni las particularidades del horno a utilizar. En cuanto a la composición química del arrabio, los valores que más difieren entre lo teórico y lo experimental fueron los de C, Si, Mn, P y S (Tablas 2 y 8), cuyos contenidos fueron prefijados para los cálculos por elección de un valor dentro del rango de composición de los arrabios reportados por Begman *et al.* (1978). Cabe destacar que los cálculos en general se consideran válidos, ya que su objetivo fundamental era definir la composición de la carga (cantidad de colas de Nicaro, carbón antracita y cal) para la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr, mediante reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua, lo cual ha quedado corroborado por los resultados de la Tabla 8. Se destaca que, los trabajos que han abordado la reducción carbotérmica de minerales y residuales con vistas a la obtención de arrabio, entre los que se encuentran Begman *et al.* (1978), Ferreiro (2014), Astuti *et al.* (2018), Isnugroho y Birawidha (2018), Liu *et al.* (2019) y Nowacki *et al.* (2021), realizaron mayores simplificaciones que las del presente estudio, ya que concibieron el cálculo de la carga únicamente con base en la determinación del carbono para la reducción de los óxidos de Fe del mineral y de la basicidad de este para definir la cantidad de fundente, a la vez que no calcularon la composición, ni cantidad del arrabio a obtener.

El recobrado (determinado con base en los contenidos de Fe, Cr y Ni en las colas (Tabla 1) y lo real experimental obtenido (Tabla 8), y considerando la masa de arrabio que se obtiene (Tabla 7) del procesamiento de 500 g de colas de Nicaro) fue de 81,84 % para el Fe, de 76,31 % para el Cr y de 82,81 % para el Ni, enmarcándose en el entorno de los valores reportados por diferentes autores en la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr (Yildrian *et al.*, 2013; Astuti *et al.*, 2018; Gou *et al.*, 2021). El hecho de que el recobrado del Cr sea inferior, seguido por el del Fe y el del Ni, y que los dos últimos sean muy próximos, se explica por el comportamiento de las energías libres de Gibbs frente a la temperatura (Liu *et al.*, 2019). En trabajos futuros de obtención de arrabio por reducción carbotérmica de colas de Nicaro sin beneficiar en horno de arco de corriente continua, el recobrado de Fe, Cr y Ni puede ser mejorado, en correspondencia con lo planteado para aumentar el rendimiento mediante el aumento del volumen de las cargas para mantener el arco sumergido y de la aglomeración (peletización) de los componentes de carga, que redundaría en disminución de pérdidas por arrastre de componentes de carga y consecuentemente en el aumento de la masa de arrabio a obtener.

El contenido de S (Tabla 8) resultó ligeramente alto respecto al que se recomienda para un arrabio convencional (Begman *et al.*, 1978; Ferreiro, 2014; Isnugroho y Birawidha, 2018); sin embargo, está enmarcado en lo que reportan varios autores para arrabios aleados con Cr y Ni (Ferreiro, 2014; Ortíz, 2015; Seok *et al.*, 2021). Dado que siempre es favorable para las propiedades de un acero que el contenido de S sea el menor posible, en estudios futuros deben ser evaluadas dos alternativas: i) disminuir el contenido de azufre en el arrabio con base al aumento de la basicidad del sistema de escoria y ii) procesar el arrabio con alto azufre mediante desulfuración directamente en la obtención del acero. La presencia de elementos formadores de carburos (Cr y Mn) en el arrabio (Tabla 8) ha propiciado que el contenido de carbono en este sea relativamente alto dentro del rango reportado para este tipo de aleación (Begman *et al.*, 1978; Ferreiro *et al.*, 2014). También el contenido de Mn (Tabla 8) fue relativamente alto, aunque enmarcado en la composición de un arrabio (Begman *et al.*, 1978; Isnugroho y Birawidha, 2018), mientras el de Si si resultó ligeramente alto (Begman *et al.*, 1978; Ferreiro, 2014; Isnugroho y Birawidha, 2018; Seok *et al.*, 2021). No obstante, se considera que esto es favorable para el empleo del arrabio en la obtención de aceros aleados con Cr y Ni, ya que el Mn y el Si actúan como desoxidantes, evitando la oxidación de los elementos de aleación (Ferreiro, 2014).

## Conclusiones

Se demostró la viabilidad en la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr mediante la reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua de colas sin beneficiar de la producción de Ni en Nicaro, empleando carbón antracita como reductor, para la sustitución de chatarra en la obtención de aceros aleados. El recobrado de los elementos fue adecuado; no obstante, puede ser mejorado si se aumenta el volumen de las

cargas y se aglomeran (peletizan) las materias primas. Además del Ni y el Cr como elementos de aleación, los contenidos de Mn y Si en el arrabio son favorables para su empleo en la obtención de aceros aleados, ya que actúan como desoxidantes. Con vistas a mejorar las propiedades del acero a obtener, el S puede ser disminuido por aumento de la basicidad en la obtención del arrabio o por desulfuración directamente en el horno de aceración.

La escoria obtenida por cálculos al concebir la carga a procesar, se ubicó, en el sistema pseudoternario CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>, con 10 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en la región de la fosterita (2MgO.SiO<sub>2</sub>), en la vecindad de la melilita [Ca<sub>2</sub>Mg(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>] y la monticelita [(Ca,Mg)O.MgO.SiO<sub>2</sub>], en el entorno de la isoterma de 1400 °C, caracterizándose por una basicidad de alrededor de 1.

Desde el enfoque de la sostenibilidad ambiental el procesamiento propuesto no genera nuevos residuales sólidos, ya que no se realizó beneficio de las colas, y la escoria del proceso de obtención de arrabio al presentar una composición cercana al cemento Portland, puede usarse en la obtención de un material cementicio. También se recomendó para la introducción a la práctica industrial, valorar el empleo de los gases de salida del horno de fusión-reducción en el precalentamiento de la carga a reducir; así como la incorporación de polvos de acería y de cascarilla de laminación, que son residuales endógenos de la producción de acero, en la carga para la fusión-reducción.

## Referencias Bibliográficas

Alencastro-De Araujo, J., Schalch, V. (2014). Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(3), 274-279.

Anduze-Nogueira, A. E., Breda-Mourão, M., Takano, C., Martins dos Santos, D. (2010). Effect of slag composition on iron nuggets formation from carbon composite pellets. *Materials Research*, 13(2), 191-195.

Astuti, W., Andika, R., Nurjaman, F. (2018). Effect of basicity and reductant amount in the nickel pig iron (NPI) production from Indonesian limonite ore in submerged electric arc furnace (SAF). *Mineral Processing and Technology International Conference 2017. IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering*, 285, 012023.

Begman, E. F., Cherebin, A. N., Pojvisnev A. N., Yusfín, Y. S. (1978). *Metalurgia del arrabio*. Moscú: Ediciones Metalurgia.

Belec Vario Lab. (2023). High spectrómeter for metal analysis [en línea] disponible en: <http://koreainstech.co.kr/bbs/download/D%20Belec%20Vario-Lab.pdf> [consulta: 3 agosto 2023].

Committee for Fundamental Metallurgy. (1981). *Slag atlas*. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M. B. H.

Cruz-Crespo, A., Perdomo-González, L., Quintana-Pucho, R., Scotti, A. (2019). Fundente para recargue por soldadura con arco sumergido a partir de ferrocromo-manganeso y escoria de la reducción simultánea de cromita y pirolusita. *Revista Soldagem & Inspeção*, 24, 1-10.

Cruz-Crespo, A., Quintana-Puchol, R., Perdomo-González, L., Gómez-Pérez, C., García-Sánchez, L. L., Jimenez-Vilesa, G., Cores-Sánchez, A. (2005). Carbothermic reduction of pirolusite to obtain carbon-bearing ferromanganese and slag suited to the development of welding materials. *Welding International*, 19, 544-551.

Emre-Benkli, Y., Boyrazli, M., Lule Senoz, G. M., Cizmecioglu, Z. (2018). Investigation of reduction of magnetite based carbon composite pellets under semi-fusion conditions. *Physicochemical Problem of Mineral Processing*, 54(3), 621-628.

Ferreiro, Y. (2014). *Obtención de lupias de arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro*. Tesis doctoral. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.

Grobler, F., Minnitt, R. C. A. (1999). The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2, 111-116.


Guo, X., Chengyan, Xu C., Wang, Y., Li, X., Sun, T. (2021). Recovery of nickel and iron from low-grade laterite ore and red mud using co-reduction roasting: Industrial-scale test. *Physicochemical Problem of Mineral Processing*, 57(3), 61-72.

- Isnugroho, K., Birawidha, D. C. (2018). The production of pig iron from crushing plant waste using hot blast cupola. *Alexandria Engineering Journal*, 57, 427-433.
- Liu, Sh., He, A., Wu, N., Zeng, J. (2019). Physical simulation of recovering cast iron from Bayer Red Mud. *Procedia Manufacturing*, 37, 443-449.
- Małeck, S., Gargul, K., Warzecha, M., Stradomski, G., Hutny, A., Madej, M., Dobrzynski, M., Prajsnar, R., Krawiec, G. (2021). High-Performance method of recovery of metals from EAF dust – processing without solid waste. *Materials*, 14, 6061.
- Nowacki, K., Macia, T., Lis, T. (2021). Recovery of iron from mill scale by reduction with carbon monoxide. *Minerals*, 11 (5), 529, 1-13.
- Ortiz, J. (2015). *Obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (nickel pig iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí de Nicaro*. Tesis doctoral. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Perdomo-González, L., Quintana-Puchol, R., Cruz-Crespo, A., Castellanos-Estupiñán, L., García-Sánchez, L., Formoso-Prego, A., Cores-Sánchez, A. (2003). Empleo de cromitas refractarias para la obtención de fundentes aglomerados utilizados en la soldadura automática por arco sumergido (SAW). *Revista de Metalurgia*, 39, 268-278.
- Perdomo-González, L., Quintana-Puchol, R., Cruz-Crespo, A., Gómez-Pérez, C. R. (2017). Obtaining of components of fluxes for submerged arc welding from the carbothermic reduction of chromite refractory. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Zulia*, 40(1), 42-51.
- Perdomo-González, L., Quintana-Puchol, R., Cruz-Crespo, A., Gómez-Pérez, C. R. (2018). Obtención en horno eléctrico de arco de aleaciones del sistema Fe-Mn-Cr-C y escorias destinadas al desarrollo de consumibles de soldadura. *Minería y Geología*, 33 (1), 92-107.
- Permatasari, N. V., Warsito, B., Kawigraha, A., Ikhwan, N. (2021). Iron recovery from residue of lateritic nickel leaching industry. *E3S Web of Conferences*, 317, 04033.
- Quintana-Puchol, R., Perdomo-González, L., Cruz-Crespo, L., Gómez-Rodríguez, L., García-Sánchez, L. L., Cerpa-Naranjo, A., Cores-Sánchez, A. (2004). Obtención simultánea de ferroaleación multicomponente y escoria a partir de arenas negras, para el desarrollo de consumibles de soldadura por arco eléctrico. *Revista de Metalurgia*, 40, 294-303.
- Quintana-Puchol, R., Perdomo-González, L., Gómez-Pérez, C., Cruz-Crespo, A., Rodríguez-Pérez, M., Castellanos, G. (2002). *Procedimiento de obtención simultánea de escoria esponjosa y aleaciones de cromo destinadas a la confección de fundentes aglomerados para la Soldadura Automática bajo fundente (SAW)*. Patente No. C22C 33/00. C22C 19/05. La Habana: Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual.
- Riss, A., Khodorovsky, Y. (1975). *Production of ferroalloys*. Moscow: Foreign Languages Publishing House.
- Seok, C. W., Lee, K. H., Son, W. Y., Park, J. K., Kang, Y. (2021). *Study on the refining conditions of nickel pig iron for high purity nickel matte production*. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Ferro-Alloys Congress (INFACON XVI). Trondheim: SINTEF/NTNU/FFF, 1-7.
- Shidqi-Khaerudini, D., Ilham Chanif, I., Dita Rama-Insyanda, D., Fredina Destyorini, F., Alva, S., Pramono, A. (2019). Preparation and characterization of mill scale industrial waste reduced by biomass-based carbon. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5(4), 510-518.
- Takao Harada, T., Tsuge, O., Kobayashi, I., Tanaka, H., Uemura, H. (2005). The development of new iron making processes. *Kobelco Technology Review*, 26, 92-97.
- Von-Bogdandy, L., Engell, H. J. (1971). *The reduction of iron ores*. Berlin: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH.
- Walburga-Keglevich, P. J., Heck, N. C., Faria-Vilela, A. C. (2017). EAF dust: an overview on the influences of physical, chemical and minera features in its recycling and waste incorporation routes. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(2), 194-202.

Yildirim, H., Morcali, H., Turan, A., Yucel, O. (2013). *Nickel pig iron production from lateritic nickel ores*. Proceedings of the Thirteenth International Ferroalloys Congress. Almaty: Ferronickel Production and Operation, 238-244.

Yusfin, Y. S., Danshin, V. V., Pashkov, N. F., Pitateliev, V. A. (1982). *Teoría de la metalización de minerales de hierro*. Moscú: Ediciones Metalurgia.

Zemri, C., Bachir-Bouiadjra, M. (2020). Comparison between physical–mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and Slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature. *Case Studies in Construction Material*, 12, 1-12, e00339.

**Editor Asociado:** *Carlos Francisco Torres Monzón*   
Departamento de Ciencias Térmicas, Universidad de Los Andes (ULA)  
Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Mérida, 5101, Venezuela



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen 46. Año 2023, Edición continua \_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en septiembre 2023, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela***

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)  
[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[www.produccioncientificaluz.org](http://www.produccioncientificaluz.org)