

Evaluación de las cromitas refractarias de Camagüey como fuente potencial de cromo para electrodos revestidos de recargue por soldadura

Evaluating refractory chromites from Camagüey as a potential chromium source for welding recharge coated electrodes

Pablo Oñoz-Gutiérrez¹, Manuel Rodríguez-Pérez², Lorenzo Perdomo-González², Félix Quinta-Caballero¹, Ubaldo Acosta-Cepero³

¹Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.

²Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba.

³Empresa Nacional de Derivados del Acero, Camagüey, Cuba.

*Autor para la correspondencia: pablo.onoz@reduc.edu.cu

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar las potencialidades de las cromitas refractarias del yacimiento Victoria I (Camagüey) como fuente de cromo para producir electrodos destinados al recargue de piezas mediante soldadura manual por arco eléctrico. Como materia prima se utilizó mezcla de rutilo, grafito, cromita refractaria, silicato de sodio y varillas de acero AISI 1009. Los electrodos experimentales se obtuvieron mediante prensado del revestimiento a partir de una mezcla dosificada con los componentes anteriores. El balance de masa vaticinó que es posible alear con carbono y cromo el cordón de soldadura a partir de introducir, en el revestimiento de rutilo, cromita refractaria y grafito. Los resultados experimentales corroboraron que el proceso de soldadura permitió obtener 2,3 % de carbono y 2,89 % de cromo en el metal depositado por los electrodos experimentales. Los resultados muestran que las cromitas refractarias de Camagüey constituyen una fuente potencial de cromo para la fabricación de electrodos con revestimiento de rutilo para el recargue de piezas mediante soldadura manual por arco eléctrico.

Palabras clave: electrodos revestidos; cromita refractaria; cromo; recargue por soldadura.

Abstract

The objective of the research was to evaluate the potential of refractory chromites from Victoria I deposit (in Camagüey, Cuba) as a source of chromium for producing electrodes to recharge parts by manual electric arc welding. A mixture of rutile, graphite, refractory chromite, sodium silicate and AISI 1009 steel rods was used as raw material. The experimental electrodes were obtained by pressing the coating from a dosed mixture with the previous components. The mass balance predicts the weld bead can be alloyed with carbon and chromium by introducing refractory chromite and graphite in the rutile coating. The experimental results corroborated that the welding process allowed obtaining 2.3% carbon and 2.89% chromium in the metal deposited by the experimental electrodes. Results show that refractory chromites from Camagüey constitute a potential source of chromium for manufacturing rutile-coated electrodes for recharging parts by manual electric arc welding.

Keywords: coated electrodes; refractory chromite; chrome; recharge by welding.

1. INTRODUCCIÓN

En Cuba existen dos plantas para la fabricación de electrodos revestidos, con una capacidad instalada de cinco mil toneladas anuales. La producción no se corresponde con la capacidad instalada, fundamentalmente por la falta de materias primas (Empresa Derivados del Acero 2019); tampoco satisface la demanda, ni en variedad ni en cantidad, de los electrodos que requiere la economía del país. Además, los electrodos para el recargue no se producen por lo que es necesario importarlos.

La demanda de electrodos para la recuperación de piezas y, específicamente, para el recargue por soldadura manual por arco eléctrico no se satisface, debido a las limitaciones de financiamiento. Estos electrodos tienen un precio muy superior a los electrodos convencionales para soldadura (E6013 y E7018). Por ejemplo, el electrodo UTP 620 muy utilizado en la industria azucarera para el recargue de una amplia variedad de piezas (coronas de molinos, rueda de la cadena de caña, cuadrado de guijo, cuadrados de molinos, acoplamientos de molino, rueda de la cadena bagazo) tiene un precio 10 veces superior a los electrodos convencionales.

En Cuba existen antecedentes en la fabricación de electrodos para el recargue por soldadura manual destinados fundamentalmente a la industria azucarera (Álvarez-Paneque *et al.* 1998). Retomar la fabricación de estos electrodos a partir de utilizar las capacidades instaladas en las fábricas y emplear una parte de las materias primas de origen nacional para el revestimiento contribuye a reducir importaciones y costos.

A partir del estudio de los catálogos de firmas internacionales de amplia presencia en el mercado se constató que el cromo está presente en la composición química de la mayoría (95 %) de los electrodos para recargue (Indura 2018; Esab-Conarco 2018). Se conoce como un fuerte formador de carburos dentro de este sistema de aleación y el aumento de su contenido incrementa la dureza y resistencia al desgaste (Ortiz-Méndez 2017). La principal fuente de cromo en estos electrodos la constituye el FeCr que se introduce en el revestimiento, el cual es importado en su totalidad (Perdomo-González *et al.* 2018).

Esta ferroaleación no se produce en Cuba debido a que la mayoría de las cromitas son refractarias, lo cual encarece de manera significativa la producción del FeCr y, por otro lado, las ferroaleaciones obtenidas tendrían bajos contenidos de cromo (González-Ruiz *et al.* 2008).

Sin embargo, las grandes reservas de cromitas refractarias disponibles en el país y en particular en la provincia de Camagüey, donde existen yacimientos con más de 59 millones de toneladas, con contenidos de 30 % de Cr_2O_3 en su composición química (Iturralde-Vinent *et al.* 2015; Fuentes-Salas 2019; Chang-Rodríguez, Cabrera-Díaz y Toledo-Sánchez 2018), hacen atractiva la idea de estudiar la posibilidad de obtener cromo en el cordón de soldadura a partir de utilizar esas cromitas en lugar del FeCr.

Económicamente se fundamenta en el bajo costo de una tonelada de cromita refractaria a precio de exportación (cromita rajón USD 54,67/t y arena de cromita USD 48,67/t) (Empresa Geominera Camagüey 2019), mientras el costo del FeCr, en dependencia del contenido de carbono y la granulometría, es de 600 USD/t a 1 200 USD/t (AMVOS 2020).

De aquí que esta investigación tenga el objetivo de evaluar las potencialidades de las cromitas refractarias del yacimiento Victoria I de Camagüey como fuente de cromo para el desarrollo de electrodos para soldadura manual por arco eléctrico destinado al recargue de piezas.

Si	...	...	...	...	...	0,03
Fe	...	...	...	...	...	99,51
C	...	...	100	...	...	0,08
Cr ₂ O ₃	...	31,13	...	...	...	...
FeO	...	...	...	0,2	...	...
H ₂ O	...	...	...	...	60,45	...
Otros	...	...	...	7,1	...	...
Total	100	100	100	100	100	100

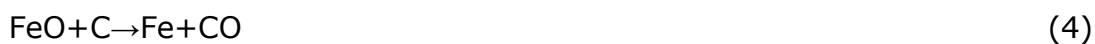
Se empleó la siguiente dosificación de los componentes del revestimiento: mezcla de rutilo: 50 %; cromita refractaria: 30 %, grafito: 15 % y caliza: 5 %, para un 100 % de mezcla (Oñoz-Marín 2018).

2.2. Balance de masa

El balance de masa se realizó a partir de la aplicación del principio de Conservación de la Masa (Perdomo-González *et al.* 2009, 2018), según muestra la ecuación general (1):

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (1)$$

Para evaluar la posibilidad de obtener cromo en la composición del metal depositado en los cordones de soldadura, a partir de la reducción carbotérmica de la cromita por el carbono durante la fusión de los electrodos por el arco eléctrico, se utilizó como herramienta el balance de masa, basado en las diferentes reacciones de oxidación- reducción que deben ocurrir durante el proceso.





Para desarrollar el balance de masa se asume que el 90 % del contenido de Cr_2O_3 y el 95 % de FeO son reducidos durante el proceso de fusión de los electrodos. De igual modo, se consideró que el 60 % del fósforo pasa a la aleación, un 20 % a la escoria y el otro 20 % se volatiliza y que el 10 % del azufre pasa al metal, el 30 % a la escoria y el 60 % se volatiliza (Aranguren y Mallo 1963; Perdomo-González *et al.* 2017).

2.3. Fabricación del prototipo de electrodo

Los componentes del revestimiento fueron dosificados mediante pesaje en una balanza técnica con una precisión de 0,01 g y el mezclado para su homogenización se realizó en una mezcladora de laboratorio. Luego de mezclada, la masa seca fue aglutinada con un 30 % (referido al 100 % de la masa seca) de silicato de sodio y con adiciones complementarias de agua. El mezclado de los componentes con el silicato de sodio se realizó de forma manual hasta lograr la homogeneidad y textura adecuadas de la mezcla para su aplicación al núcleo de los electrodos. Se asumió el método de prensado en un dispositivo con accionamiento manual. Los electrodos obtenidos poseen una longitud de 140 mm y un diámetro de 8 mm, para un espesor del revestimiento de 2 mm (Figura 1). Los electrodos revestidos fueron secados al aire durante 24 h y luego calcinados a 120 °C en una estufa, por un intervalo de 2 h.



Figura 1. Electrodos experimentales.

2.4. Determinación de la composición química del depósito de soldadura

Las probetas para el análisis de composición química se fabricaron siguiendo las indicaciones de las normas AWS (AWS-A.13: 2000), a partir de un acero AISI 1010. El depósito de soldadura se realizó en seis pasadas hasta obtener una altura de 22 mm, un ancho y longitud de 40 mm. En la soldadura se empleó corriente directa con polaridad normal (electrodo negativo) con una intensidad de 140 ± 5 A. Al terminar la soldadura las probetas se dejaron

enfriar al aire hasta la temperatura ambiente y se esmerilaron para uniformar la superficie.

El ensayo de composición química se realizó en el equipo de espectrometría por emisión óptica de marca SPECTRO, modelo Spectromax, de fabricación alemana, año 2015.

3. RESULTADOS

3.1. Balance de masa

La Tabla 2 expone los resultados del balance de masa obtenido con los datos de composición química de los diferentes componentes (Tabla 1) y las reacciones químicas que deben ocurrir.

Tabla 2. Balance de masa para la composición del revestimiento (en g)

Compuesto	Entrada	Generación	Consumo	Salida
C ₆ H ₁₀ O ₅	3,500	0,000	3,500	0,000
SiO ₂	17,536	0,240	0,000	17,776
Al ₂ O ₃	13,715	0,000	0,000	13,715
FeO	5,246	0,000	5,141	0,105
P	0,026	0,000	0,000	0,026
CaCO ₃	3,500	0,000	3,500	0,000
TiO ₂	23,960	0,000	0,000	23,960
MnO ₂	0,004	0,000	0,004	0,000
MgO	7,078	0,000	0,000	7,078
CaO	0,5828	1,960	0,000	2,543
Na ₂ O	3,324	0,000	0,000	3,324
K ₂ O	0,603	0,000	0,000	0,603
Mn	5,101	0,000	2,040	3,061
Si	0,137	0,000	0,112	0,025
S	0,024	0,000	0,000	0,024
Fe	56,138	3,998	0,000	60,137
C	15,104	0,000	11,137	3,968
Cr ₂ O ₃	10,896	0,000	10,242	0,654
CO ₂	0,000	48,079	0,000	48,079
H ₂ O	0,000	1,944	0,000	1,944
Cr	0,000	7,008	0,000	7,008

O ₂	30,190	0,001	30,191	0,000
MnO	0,000	2,637	0,000	2,637
CO	0,000	25,986	25,986	0,000
Otros	1,091	0,000	0,000	1,091
Totales	197,756	91,853	91,853	197,756

La composición de los productos que se obtienen del procesamiento metalúrgico puede ser predeterminada a partir de los resultados del balance de masa y usando la expresión (13) (Tabla 3).

$$\% \text{ elemento} = (\text{masa elemento} / \text{masa total}) \times 100 \quad (13)$$

La aplicación del balance masa permitió predecir la composición química más probable de los productos de la fusión del electrodo por el arco eléctrico, observándose en la Tabla 3 que a partir de la composición del revestimiento se puede obtener un depósito de soldadura (cordón) aleado con cromo (9,44 %) y carbono (5,35 %), además proporciona una escoria formada fundamentalmente por un sistema de óxidos del tipo TiO₂-SiO₂-Al₂O₃.

Tabla 3. Composición química calculada de los productos (en %-masa)

Metal		Escoria		Gases	
Componente	%	Componente	%	Componente	%
Fe	81,030	SiO ₂	24,550	CO ₂	96,075
Cr	9,442	Al ₂ O ₃	18,941	H ₂ O	3,886
Mn	4,124	FeO	0,145	P	0,010
Si	0,033	P	0,007	S	0,029
P	0,021	TiO ₂	33,091	...	...
S	0,003	MnO	3,642	...	...
C	5,346	MgO	9,775	...	...
...	...	CaO	3,512	...	...
...	...	Na ₂ O	4,591	...	...
...	...	K ₂ O	0,832	...	...
...	...	Cr ₂ O ₃	0,903	...	...
...	...	S	0,010	...	...
Total	100	Total	100	Total	100

A partir de la composición química de la escoria se calculó su basicidad (B) y la actividad química (A_e) mediante las ecuaciones (14) y (15), (Volshenco *et al.* 1988; Cruz-Crespo *et al.* 2012, 2019).

$$B = \frac{0,0178\text{CaO} + 0,025\text{MgO} + 0,013\text{CaF}_2 + 0,016\text{Na}_2\text{O} + 0,106\text{K}_2\text{O} + 0,007(\text{MnO} + \text{FeO})}{0,0166\text{SiO}_2 + 0,5(0,01\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,0125\text{TiO}_2 + 0,008\text{ZrO}_2)} \quad (14)$$

$$A_e = \frac{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{TiO}_2) + 0,4(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2) + 0,42B^2(\text{MnO})}{100B} \quad (15)$$

De los resultados anteriores se calcularon las actividades químicas relativas y termodinámicas del MnO y SiO₂, respectivamente según las ecuaciones (16) y (17) (Volshenco *et al.* 1988; Cruz-Crespo *et al.* 2012).

$$A_{\text{SiO}_2} = \frac{(\text{SiO}_2)}{(100B)}; \quad A_{\text{MnO}} = \frac{0,42(\text{MnO})B}{100} \quad (16)$$

$$a_{\text{SiO}_2} = 0,018 + 0,52A_{\text{SiO}_2}; \quad a_{\text{MnO}} = 0,0036 + 0,143A_{\text{MnO}} \quad (17)$$

Los resultados de los valores obtenidos de la basicidad y actividades del sistema de escoria se muestran a continuación:

Basicidad (B): 0,70; actividad química (A): 0,71; actividad química relativa del A_{SiO_2} : 0,1071 y A_{MnO} : 0,1006; actividad química termodinámica del a_{SiO_2} : 0,1071 y a_{MnO} : 0,0051.

El sistema de la escoria clasifica como muy activo 0,71 (según Volshenco 1988, el sistema es muy activo cuando $A_e > 0,6$) y de carácter ácido ($B = 0,7 < 1$). Además, presenta una actividad del manganeso limitada ($a_{\text{MnO}} = 0,0051$) y, en consecuencia, alta actividad del silicio ($a_{\text{SiO}_2} = 0,1071$) lo que define las condiciones de transferencia de los elementos al depósito de soldadura.

3.2. Composición química del depósito de soldadura

Los resultados experimentales de la composición química del metal depositado (Tabla 4) muestran una diferencia respecto a lo previsto en el balance de masa. De esta forma se tiene que el contenido de cromo (2,89 %) representa el 30,6 % de lo previsto, utilizando solo cromita refractaria como fuente de cromo y el proceso de reducción carbotérmica bajo las condiciones del arco eléctrico de soldadura SMAW. Mientras el carbono, con una cuantía de 2,31 % representa el 43,2 % de lo previsto.

Tabla 4. Composición química del metal depositado (%)

Probetas	Fe	Cr	Mn	Si	P	S	C	Otros
1	93,7	2,93	0,22	0,50	0,012	0,015	2,31	0,313
2	93,8	2,89	0,19	0,49	0,012	0,014	2,33	0,274
3	93,6	2,86	0,20	0,51	0,011	0,015	2,28	0,524
Promedio	93,70	2,89	0,20	0,50	0,01	0,01	2,31	0,37

4. DISCUSIÓN

Los resultados están en correspondencia con la baja basicidad de la escoria, cuyo carácter ácido ocasiona una gran actividad química del oxígeno favoreciendo las pérdidas de elementos de aleación; aspecto corroborado en el cálculo realizado a partir del resultado del balance de masa.

Independientemente de los relativamente bajos niveles de reducción y transferencia de cromo registrados, se demostró que es posible alear el cordón de soldadura con cromo empleando como materias primas la cromita refractaria, la mezcla de rutilo de importación y el grafito como elemento reductor, bajo las condiciones del arco de eléctrico. Estos bajos niveles de reducción están relacionados con la utilización de un revestimiento de rutilo, el cual forma escorias ácidas de gran actividad química. Los niveles de transferencia del carbono son muy cercanos a los reportados para grafito electrolítico (45-50) (Quintana-Puchol 2016).

Esta estrategia constituye una oportunidad, ya que es el tipo de revestimiento que se utiliza en la actualidad en las plantas productoras en Cuba, por tanto, pueden fabricarse electrodos de recargue sin necesidad de importar una mezcla seca de otra naturaleza, resultando por tanto más económica. Como ventajas adicionales se tiene que no se requiere de control de hidrógeno en el revestimiento y se manejan menores temperaturas de secado.

Debe destacarse que se reporta la utilización de revestimientos de rutilo en electrodos comerciales para recargue (Ortiz-Méndez 2017; Esab-Conarco 2018; Indura 2018).

En las probetas preparadas para el ensayo de composición química se midió la dureza en la última capa depositada en condición de recién soldada después de esmerilar la superficie, obteniéndose un promedio de 52-54 HRC. Este resultado se fundamenta en el hecho de que tanto el carbono como el cromo ejercen una influencia significativa sobre las propiedades del cordón de soldadura, ya que incrementan la templabilidad de la aleación. Además, el cromo en estado de fusión es capaz de sustituir los átomos de hierro del acero

y formar solución sólida que aumentan la resistencia mecánica y la dureza del metal depositado (Oñoz-Gutiérrez, Oñoz-Marín e Hidalgo-Tan 2020).

El estudio de los catálogos de varias firmas comerciales de amplia presencia en el mercado internacional permitió corroborar que los contenidos de cromo logrados en los depósitos de soldadura están en correspondencia con los producidos por electrodos de estas firmas, destinados para el recargue de piezas expuestas a desgastes metal-metal y por impacto moderado (Indura 2018; Esab-Conarco 2018). Como ejemplos se pueden citar los siguientes electrodos:

CONARCROM 350: Cr=1,19 %, C=0,22%. Dureza: 32-40 HRC; INDURA BUILD UP 4340: Cr=1,1 %, C=0,38 %. Dureza: 34-42 HRC; INDURA BUILD UP 24: Cr=1,05 %, C=0,12 %. Dureza: 21-32 HRC; INDURA ANFITRIX 37: Cr=2,27 %, C=0,22 %. Dureza: 24-40 HRC.

La dureza en estos electrodos es inferior a la obtenida con el electrodo experimental debido a que el contenido de carbono es significativamente inferior. Este aspecto puede ser corregido a partir de la dosificación del contenido de carbono en el revestimiento.

5. CONCLUSIONES

- Las cromitas refractarias del yacimiento Victoria I de Camagüey constituyen una fuente potencial de cromo para la fabricación de electrodos con revestimiento de rutilo para el recargue de piezas mediante soldadura manual por arco eléctrico.
- Es viable alear el cordón de soldadura con cromo mediante la reducción carbotérmica de la cromita refractaria, a partir del calor aportado por el arco eléctrico durante el recargue por soldadura manual con electrodos revestidos.
- Los contenidos de cromo (2,89 %) y carbono (2,31 %) obtenidos en el cordón de soldadura permiten aplicar los electrodos en estudio para el recargue de piezas expuestas a desgaste por fricción metal-metal, a partir de la comparación con electrodos similares presentes en el mercado internacional.

6. REFERENCIAS

Álvarez-Paneque, A.; García-Ojeda, A.; García-Hernández, T.; Paz-Iglesia, A. y Sarria-Popowaki, P. 1998: Electrodos revestidos, desarrollados en Cuba, para la soldadura y el relleno superficial por arco eléctrico manual. En: II Encuentro de Ingeniería de Materiales. Memorias. CUJAE, La Habana, septiembre, 129-132.

- American Welding Society. 2000: Specification for surfacing electrodes for shielded metal arc welding. AWS A5.13/A5.13M:2000. Miami: Ed. AWS.
- AMVOS. 2019: Catálogo de fabricantes de ferrocromo. Consulta: 2020/03/05. Disponible en: <https://m.spanish.alibaba.com/goods/ferro-chrome-price.html>
- Arangurent, F. y Mallol, A. 1963: *Siderurgia*. Madrid: Dorssat. 234 p.
- Chang-Rodríguez, A.; Cabrera-Díaz, I. y Toledo-Sánchez, C. 2018: Estudio mineralógico de cromititas de la mina "Victoria I", Camagüey, Cuba. *Infomin*, 10(2): 3-13.
- Cruz-Crespo, A.; Perdomo-González, L.; Quintana-Puchol, R. y 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. *Soldagem & Inspeção*, 24(e2424): 1-10. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.24>.
- Cruz-Crespo, A.; Quintana-Puchol, R.; Perdomo-González, L.; Gómez-Pérez, C. R.; Díaz-Cedré, E.; García-Jacomino, J. y Morales-Rodríguez, F. 2012: Efecto de la adición de caliza sobre el metal depositado por arco sumergido. *Minería y Geología*, 28(4): 56-71.
- Empresa Derivados del Acero. 2019: Informe de resultados del año 2018. Camagüey. 52 p.
- Empresa Geominera Camagüey. 2019: Informe de resultados del año 2018. Camagüey. 81 p.
- Empresa Geominera Oriente. Laboratorio Delabel. 2018: Proyecto Cromo Victoria I de Camagüey. Informe de Ensayo. 4 p.
- Esab-Conarco. 2018: Electrodo: características y aplicaciones. Consulta: 2020/01/05. Disponible en: <http://www.esab.com/>
- Fuentes-Salas, L. E. 2019: Cromititas en Camagüey. En: Fórum de Ciencia y Técnica, Geominera de Camagüey. Memorias. Camagüey, Cuba, 21 de junio.
- González-Ruiz, J.; Quintana-Puchol, R.; Arniella-Orama, A. y Alujas-Díaz, A. 2008: Evaluación del proceso de reducción aluminotérmica de un concentrado cromífero del yacimiento Merceditas. *Rev. CENIC. Ciencias Químicas*, 39(1): 23-28.
- Indura. 2018: Manual de materiales y sistemas de soldadura. Consulta: 2020/01/15. Disponible en: http://www.indura.netmanuaisOutros/soldadura/manual_catalogo%20soldadura.pdf
- Iturralde-Vinent, M.; Proenza, J.; Butjosa, L.; Aiglsperger, T.; García-Casco, A. y Piñero-Pérez, E. 2015: Primer reporte de vetas de cromititas ricas en aluminio y titanio emplazadas entre gabros cumulativos (ofiolitas) en

- loma iguana (Camagüey, Cuba). En: XI Congreso de Geología, Petrología, Mineralogía y Geoquímica. Sexta Convención cubana de ciencias de la tierra "Geociencias 2015". Memorias de Geociencias. La Habana, Cuba.
- Oñoz-Gutiérrez, P.; Oñoz-Marín, A. e Hidalgo-Tan, R. 2020: *Electrodos para la recuperación de piezas mediante el recargue por soldadura manual por arco eléctrico*. Camagüey: Ediciones Universidad de Camagüey. 46 p. ISBN 978-959-7222-11-8.
- Oñoz-Marín, A. 2018: *Electrodo para la recuperación de piezas con revestimiento de rutilo y aditivos de cromita y grafito*. Trabajo de diploma. Universidad de Camagüey. 96 p.
- Ortiz-Méndez, T. M. 2017: *Desarrollo de un electrodo tubular revestido a partir de una ferroaleación del sistema Fe-Cr-Mn-Si-C para el recargue de piezas sometidas a desgaste abrasivo*. Tesis doctoral. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. 183 p.
- Perdomo-González, L.; Quintana-Puchol, R.; Castellanos-Estupiñan, J. E.; Cruz-Crespo, A. y Gómez-Pérez, C. R. 2009: Uso de los balances de masa y energía como herramienta para evaluar instalaciones experimentales en la producción de ferroaleaciones y escorias. *Revista AFINIDAD*, LXVI(541): 221-226.
- Perdomo-González, L.; Quintana-Puchol, R.; Cruz-Crespo, A. y Gómez-Pérez, C. R. 2017: Obtención de componentes de fundentes para la soldadura por arco sumergido a partir de la reducción carbotérmica de cromitas refractarias. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 40(1): 42-51.
- Perdomo-González, L.; Quintana-Puchol, R.; Cruz-Crespo, A. y 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*, 34(1): 92-107. ISSN 1993 8012
- Quintana-Puchol, R. 2016: *Procesos metalúrgicos de la soldadura por arco eléctrico*. Villa Clara: Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central de Las Villas. 58 p.
- Volshenco, V. H.; Yampolskii, B. M.; Vinokurov, V. A.; Frolov, V. V. y Parajin, B. A. 1988: *Teoría de los procesos de soldadura*. Moscú: Vyszhaia Zhkola. 559 p.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

POG y LPG: concepción del estudio, ejecución de los análisis, evaluación de resultados del balance de masa y de composición química, redacción, revisión y aprobación de la versión final. MRP: evaluación de los resultados experimentales de composición química, redacción, revisión y aprobación de la versión final. UAC y FQC: concepción del trabajo experimental y análisis de los resultados.

ORCID

POG, <https://orcid.org/0000-0001-8704-8450>

MRP, <https://orcid.org/0000-0002-4092-3470>

LPG, <https://orcid.org/0000-0002-3425-1487>

FQC, <https://orcid.org/0000-0001-8065-2663>

UAC, <https://orcid.org/0000-0002-1831-2358>

Recibido: 20/10/2020

Aceptado: 09/02/2020