

Evaluación de la factibilidad de sustituir al FeCr por cromitas refractarias en los consumibles de soldaduras

Evaluation of the feasibility for substituting the FeCr, by refractory chromites in welding consumables

Pablo Oñoz Gutiérrez¹, Manuel Rodríguez Pérez²,
Lorenzo Perdomo González², Alejandro Oñoz Marín², Jesús Fernández del Risco²

¹Universidad de Camagüey, Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas, Carretera Circunvalación Norte entre Camino Viejo a Nuevitas y Avenida Ignacio Agramonte, CP: 74650, Camagüey, Cuba.

²Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Centro de Investigaciones de Soldadura, Carretera de Camajuaní, km 5 ½, CP: 50100, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

e-mail: pablo.onoz@reduc.edu.cu, mrodriguez@uclv.edu.cu, lperdomo@uclv.edu.cu, alejandro.onoz@reduc.edu.cu, jesus.fernandez@reduc.edu.cu

RESUMEN

En el trabajo se evalúa la factibilidad de utilizar la cromita refractaria como fuente de aporte de Cr al cordón de soldadura a partir de un revestimiento compuesto por mezcla de rutilo, cromita refractaria, grafito y caliza. Las proporciones en las mezclas para los revestimientos se establecieron con base en un diseño experimental de tipo Mc Lean Anderson, donde las variables de entrada son: X1- la cromita, X2- el grafito y X3- la caliza. A los electrodos, los revestimientos se aplicaron mediante prensado en una extrusora manual, con un posterior secado al aire y calcinado en horno. Se evaluaron los depósitos de recargue de siete composiciones de revestimientos desde el punto de vista de composición química y de dureza. Se constata que la composición del revestimiento ejerce una marcada influencia sobre la composición química y la dureza del metal depositado. Además, se comprueba que es posible alear el cordón de soldadura con más de 2 % de Cr 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. Finalmente, se demuestra la posibilidad sustituir al FeCr en la fabricación de consumibles con aportes no elevados de Cr destinados al recargue, utilizando las cromitas refractarias en el revestimiento del electrodo.

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

ABSTRACT

The feasibility of using refractory chromite as a source of Cr to the weld bead is evaluated from a lining composed of a mixture of rutile, refractory chromite, graphite and limestone. The proportions in the mixtures for the coatings were established based on an experimental design of the Mc Lean Anderson type, where the input variables are: X1- chromite, X2- graphite and X3- limestone. The coatings were applied to the electrodes by pressing in a manual press, with subsequent air drying and calcined in oven. The recharge deposits of seven coating compositions were evaluated from the standpoint of chemical composition and hardness. Finding that the composition of the coating exerts a marked influence on the chemical composition and hardness of the deposited metal. What's more, it was found that it is possible to allocate the weld bead with more than 2 % chromium by carbothermic reduction of the refractory chromite, from the heat provided by the electric arc during manual recharging by welding with coated electrodes. Finally, the possibility of substituting FeCr in the manufacture of consumables with low Cr contributions for recharging is demonstrated, using refractory chromites in the electrode coating.

Key words: coated electrodes; refractory chromite; carbothermic reduction; recharge by electric welding.

1. INTRODUCCIÓN

En Cuba existen yacimientos de minerales los cuales pueden ser utilizados para la producción de ferroaleaciones. En el caso de los minerales con contenidos de Cr, existen grandes reservas de cromitas en las provincias de Holguín y Camagüey pero de características refractarias, aspecto que encarece de manera significativa la producción del FeCr [1, 2, 3]. El contenido de Cr₂O₃ de estas cromitas al ser superior al 30 %, las convierte en una fuente potencial de Cr para fabricar consumibles de soldadura, y sustituir bajo ciertas condiciones al FeCr, como habitualmente se realiza en la producción de electrodos.

En trabajos de XIANFENG [4] se reporta que la aleación directa con Cr a partir de la cromita es una tecnología de fundición alentadora para producir aceros aleados. No obstante en la bibliografía no se han encontrado reportes acerca del empleo de cromitas refractarias como fuente de Cr, en mezclas para revestimientos de electrodos de recargue por soldadura, lo cual puede favorecer desde el punto de vista económico su producción, considerando que el precio de este mineral triturado (375 USD/t) es inferior al del FeCr en polvo de bajo por ciento de C (2000 a 4000 USD/t) [5, 6].

En el caso particular de los procesos de soldadura, si se garantiza la reducción carbotérmica de determinadas cantidades de cromita refractaria utilizada en la masa del revestimiento de los electrodos bajo el efecto del calor del arco eléctrico, es posible la transferencia de Cr al metal depositado. De esta manera se conseguiría obtener recargues con aportes no elevados de Cr, recomendados para piezas expuestas al desgaste por adhesión y baja abrasión, de acuerdo a lo reportado por la norma A5.13 de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) [7]. Otros consumibles de baja aleación utilizando el Cr como elemento principal en el sistema, son reportados por firmas productoras de electrodos como por ejemplo: INDURA [8]; ESAB [9] y KOBELCO [10] para contrarrestar el desgaste adhesivo y la abrasión.

Para garantizar la reducción carbotérmica de la cromita es necesario la utilización de un agente reductor que en este caso puede ser el C, utilizado con éxito en otros trabajos [11, 12]. Este elemento adicionado al revestimiento en forma de grafito, también es importante como fuente de C al depósito, y favorecer la presencia en la capa de recargue de determinadas microestructuras, como por ejemplo; la martensita, la cual favorece la resistencia al desgaste por abrasión [13, 14].

El desgaste es parte de los procesos productivos, ya que los metales sufren los efectos de las partículas abrasivas que provocan pérdidas sensibles en los mismos. La investigación sobre nuevos materiales para recargue es uno de los campos de mayores potencialidades para enfrentar fenómenos como el desgaste de piezas y componentes [15, 16].

A partir de lo anteriormente señalado, en el trabajo se evalúa la factibilidad de utilizar un revestimiento compuesto por cromita refractaria, grafito, y otros minerales empleados en la fabricación de los electrodos base rutilo, para obtener un consumible que aporte Cr y C al cordón de soldadura, destinado al recargue de piezas expuestas al desgaste por adhesión y baja abrasión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Composición de los revestimientos

Con el objetivo de garantizar un buen comportamiento operativo de los electrodos, en el estudio se decidió mantener en la composición del revestimiento, un 50 % de la masa utilizada en la fabricación de electrodos para soldadura del tipo rutilo (E 6013), de acuerdo a la clasificación de la norma AWS A5.1. La composición de la masa empleada se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de la masa rútilica utilizada en el revestimiento, en % masa [17]

RUTILO	CELULOSA	CALIZA	FELDESPATO	MICA	CAOLÍN	FERROMANGANESO
46	7	7	16	7	5	12

El resto de la composición del revestimiento de los electrodos (50 %), se completó con la adición de cromita refractaria previamente beneficiada como fuente de Cr, cuya composición se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición química del concentrado de cromo, en %-masa [2, 18]

Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	FeO	CaO
31,13	28,05	19,71	5,62	13,60	0,5

Como agente reductor se empleó el C en forma de grafito de tipo plateado con pureza técnica, y como suplemento a la mezcla se utilizó la caliza (CaCO₃: 98,57 %; MgO: 0,68 %; SiO₂: 0,34 %; Al₂O₃: 0,23 %; Fe₂O₃: 0,17 %). La utilización de la caliza también se justifica, debido a que puede incrementar la fluidez de la escoria y la basicidad. Una escoria con buena fluidez facilita la velocidad de las reacciones y los intercambios entre escoria y metal. Además, un aumento de la basicidad, disminuye la actividad química de la escoria, aumentando la reducción y transferencia de los elementos metálicos al cordón de soldadura [3, 19, 20].

Los componentes empleados en las mezclas fueron triturados en un molino de bolas y tamizados hasta un tamaño de grano $0,08 \leq X \leq 0,125$ mm. Para aglutinar los componentes de la mezcla del revestimiento se utilizó el silicato de sodio, constituido por (SiO₂: 29,29 %, Na₂O:10,20 % y H₂O: 60,51 %) y un módulo de 2,8. Para el núcleo de los electrodos se utilizó un alambre de 4 mm de diámetro de acero AISI 1009.

2.2 Planificación experimental

Como se ha señalado, para la investigación se ha asumido que el 50 % del total de la composición de cada revestimiento a estudiar está constituido por una mezcla base rutilo (matriz). Esto conlleva a que la suma del resto de los componentes de las mezclas (cromita, grafito y caliza) sea dosificada en base a un 50 %. Para establecer las corridas experimentales variando la composición del revestimiento se ha utilizado un diseño de mezclas del tipo ternario, definiéndose como variables independientes: (X1: % cromita, X2: % grafito y X3: % caliza). En este caso, hay que utilizar un diseño de experimento con restricciones del tipo Mc Lean Anderson [21], debido a que las cantidades de cromita y grafito deben de tener una determinada relación en cada una de las mezclas estudiadas, para garantizar el fenómeno de la reducción carbotérmica. A partir de estudios realizados por PERDOMO *et al.* [11, 22], se ha determinado que las variaciones de cromita y grafito de acuerdo a las mezclas a utilizar en los experimentos deben de estar en un rango que se enmarca dentro de las fronteras: $25 \leq X1 \leq 40$ %; $10 \leq X2 \leq 25$ %, para garantizar la reducción carbotérmica por el efecto del calor generado por el arco eléctrico. Esto hace que la variable correspondiente al mineral que completa el 50 % de las mezclas (caliza) esté en el rango de: $0 \leq X3 \leq 10$ %, cumpliéndose $\sum Xi = 50$ %.

Según GUTIÉRREZ y DE LA VARA [21], CRUZ *et al.* [23], el número de experimentos N se puede determinar mediante la expresión:

$$N = q * 2^{q-1} \quad (1)$$

donde q-número de variables independientes. Dado que q = 3, resulta que N = 12. De estas combinaciones, solo 6 no presentan variables fuera de rango y cumplen la condición de normalidad ($\sum Xi = 50$ %), Tabla 3.”

En las pruebas se adicionó otro punto experimental (centroide “C”), obtenido de las medias de cada una las variables. Finalmente, se obtiene una región experimental enmarcada por un polígono irregular, cuyos vértices se denotan como: 1, 2, 3, 4, 5, 6, Figura 1.

Tabla 3: Combinaciones que cumplen las condiciones del diseño de experimentos y la matriz experimental

Nº	X1	X2	X3	Nº	X1, %	X2, %	X3, %	TOTAL, %
2 (1)	73	18	9	1	36,5	9	4,5	50
3 (2)	45	45	10	2	22,5	22,5	5	50
6 (3)	73	27	0	3	36,5	13,5	0	50
7 (4)	45	37	18	4	22,5	18,5	9	50
10 (5)	55	45	0	5	27,5	22,5	0	50
11 (6)	64	18	18	6	32	9	9	50
C (7)	59	32	9	7	29,5	16	4,5	50

Se asumieron como variables dependientes: la composición química del depósito (Y1= % Cr, Y2= % Si, Y3= % C) y la dureza en el cordón de soldadura en HRC como (Y4= HRC). El procesamiento de los re-

sultados a partir del diseño y la obtención de los modelos se realizaron mediante el software Stafgraphics Centurion XV versión 15.2.14.

Para la fabricación de los electrodos se asumió un revestimiento grueso [24] ($D > 1,55 * d \Rightarrow 10 > 1,55 * 4 = 10 > 6,2 \text{ mm}$); donde “D” es el diámetro del electrodo con el revestimiento y “d” es el diámetro del núcleo, en mm.

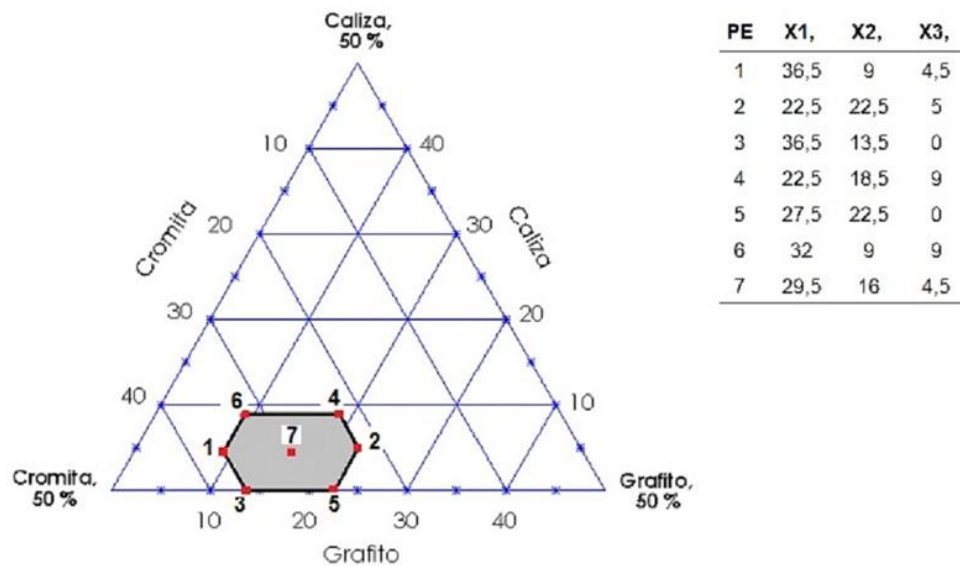


Figura 1: Diagrama ternario: cromita – grafito – caliza.

2.3 Obtención de los electrodos

Las mezclas fueron dosificadas mediante el peso de cada componente en una balanza técnica con precisión de 0,01g, y la homogenización se realizó en un tambor rotatorio durante 30 min. La masa seca obtenida fue aglutinada con un 30 % de silicato de sodio para facilitar la aplicación del revestimiento mediante una extrusora manual. Los electrodos revestidos (Figura 2) fueron secados al aire durante 24 h y luego en una estufa a $80 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, por un tiempo de 2 h.

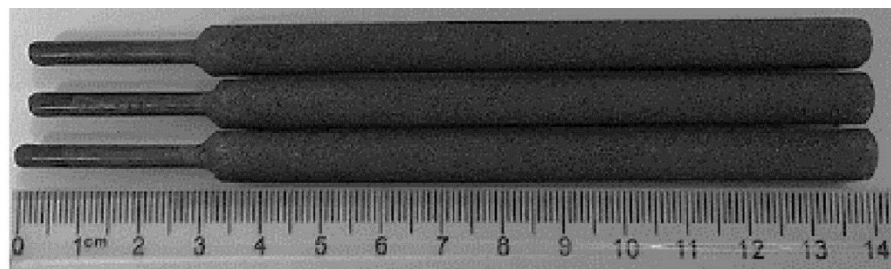


Figura 2: Electrodo experimental.

2.4 Determinación de la composición química y la dureza del metal depositado

Para estimar la composición química de los consumibles sin dilución se hicieron soldaduras superficiales con cada electrodo sobre platinas de acero AISI 1010 hasta obtener un recargue con un espesor mayor que 16 mm de acuerdo con la norma AWS A5.13:2000 [7, 25]. La operación se llevó a cabo por un soldador calificado depositando cordones rectos sin oscilación, utilizando un rectificador de corriente marca BESTER SPB 350. Se empleó polaridad normal con una intensidad de corriente de $140 \pm 5 \text{ A}$. Una vez obtenido el cupón de prueba, se realizó un amolado, pulido y limpieza de las superficies para realizar la medición de composición química por el método de espectrometría de emisión óptica con un equipo de espectrometría por emisión óptica, marca SPECTRO, modelo Spectromax de 2017 [26].

Para determinar la dureza del recargue se depositaron cordones de soldadura de $\approx 60 \text{ mm}$ de longitud en probetas de acero AISI 1010 de $100 \times 50 \times 10 \text{ mm}$. Se obtuvieron depósitos de una, dos y tres capas y el ensayo de dureza se realizó siguiendo las indicaciones de la norma ISO 6508 en un durómetro Rockwell uti-

lizando la escala C. Las mediciones se realizaron en cada capa siguiendo la siguiente secuencia: soldadura, limpieza de la escoria, enfriamiento al aire y esmerilado de la superficie.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Efecto de la cromita, grafito y caliza en la composición química de los depósitos.

El procesamiento estadístico de los resultados se realizó tomando como base el plan experimental (Tabla 3) y los resultados de composición de los depósitos mostrados en la Tabla 4.

Mediante un análisis de regresión múltiple, se determinó la dependencia de los diferentes elementos de aleación del metal depositado respecto a la composición de la mezcla aditiva del revestimiento, demostrándose que las variables dependientes, derivadas de la composición química (% C, % Cr y % Si) tienen una relación estadísticamente significativa con las variables independientes; % cromita, % grafito y % caliza.

A continuación se presentan los modelos obtenidos:

$$\% C = -0,001 \text{ Cromita} + 0,16 \text{ Grafito} - 0,03 \text{ Caliza} \quad (\text{I})$$

$$R^2_{\text{ajustada}} = 96,8 \%$$

$$\% Si = -0,012 \text{ Cromita} + 0,08 \text{ Grafito} - 0,02 \text{ Caliza} \quad (\text{II})$$

$$R^2_{\text{ajustada}} = 97,3 \%$$

$$\% Cr = 0,066 \text{ Cromita} + 0,03 \text{ Grafito} - 0,01 \text{ Caliza} \quad (\text{III})$$

$$R^2_{\text{ajustada}} = 99,2 \%$$

Tabla 4: Composición química del depósito (resumen), en %-masa

MUESTRAS	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	0,94	0,33	0,15	0,027	0,030	2,77
2	3,15	1,65	0,55	0,011	0,011	2,15
3	2,31	0,50	0,22	0,012	0,015	2,91
4	2,85	0,87	0,42	0,011	0,011	2,08
5	3,42	1,53	0,57	0,010	0,017	2,28
6	0,89	0,23	0,13	0,030	0,025	2,02
7	3,19	0,76	0,36	0,011	0,015	2,59

El grafito como es de suponer, y comprobado mediante el modelo (I), tiene una influencia favorable sobre la cantidad de C en el cordón de soldadura, y puede estar en solución sólida con el Fe o formando carburos de Fe o de Cr. Mientras que la cromita no contribuye a la transferencia del C al cordón de soldadura. Esto se debe a que los óxidos FeO; SiO₂ y Cr₂O₃ son reducidos por el C según las reacciones (2; 3; 4), lo cual consume parte del C adicionado a la mezcla.



De igual modo, la caliza no facilita el aporte de C al depósito debido a que el CaCO₃ a la temperatura de 990 °C se descompone en CaO y CO₂ [27, 28]. El resultado es que el CaO pasa a la escoria, mientras el CO₂ al saturar la atmósfera del arco, se produce la reacción endotérmica determinada por la ecuación (5), donde se consume inevitablemente el C.

Según el modelo (II) el grafito contribuye a la presencia de Si en el cordón de soldadura ya que al facilitar el fenómeno de la reducción del SiO_2 , parte del Si se transfiere al metal depositado. Sin embargo, la cromita no favorece la obtención del Si en el depósito de soldadura, ya que los óxidos de Cr_2O_3 y FeO presentes en la cromita consumen parte del C durante el proceso de reducción, y por tanto hay menos C disponible para la reducción del SiO_2 [29]. De forma similar, la caliza resulta desfavorable, debido a que el CO_2 formado producto de su descomposición debe ser eliminado para mantener una elevada concentración de CO, para lo cual se consume C.

De acuerdo al modelo (III) existe una contribución favorable de la cromita sobre la composición química del cordón de soldadura en cuanto al aporte de Cr. Este resultado es totalmente lógico debido a que el componente portador del Cr es el Cr_2O_3 y con el aumento de su concentración se favorece la obtención de este elemento al metal depositado. El grafito ayuda a la transferencia del Cr debido a que el C reduce al Cr_2O_3 y propicia la presencia de este elemento en el cordón de soldadura en solución sólida o formando carburos. En este caso, resulta más probable desde el punto de vista termodinámico la formación del carburo del tipo Cr_7C_3 , a partir de la reducción carbotérmica, al requerir una temperatura más baja para su formación [30]. La caliza por otra parte, no beneficia la presencia de Cr en el depósito debido a que su contenido en la mezcla (0 a 10 %), no es suficiente para que el CaO presente en la escoria modifique la basicidad de la misma ($B < 0,75$), y facilite la transferencia del Cr hacia el cordón. Además, la caliza consume energía para su descomposición lo cual pudiera influir sobre los procesos de reducción [31].

A partir de los resultados de la composición química mostrados en la Tabla 4, se puede hacer un análisis de las particularidades de las aleaciones obtenidas con los electrodos fabricados con las diferentes variantes de revestimientos. En el caso del C, los contenidos están en un rango desde 0,89 % hasta 3,42 %, lo que está en correspondencia con los aceros hipereutectoides y las fundiciones. Específicamente los electrodos con los revestimientos de las mezclas 1 y 6 ofrecen como resultado un depósito con un alto por ciento de C aleado al Cr. Según la norma AISI/SAE [32], esta composición química es comparable con la del acero AISI 52 100, el cual se caracteriza por su alta dureza después del tratamiento térmico (temple + revenido) y elevada resistencia al desgaste adhesivo. En los depósitos obtenidos con los electrodos fabricados con las mezclas de revestimientos: 2; 3; 4; 5 y 7, el contenido de C en el metal depositado, es equivalente al de las fundiciones hipoeutécticas. Si además se considera el contenido de Cr, las aleaciones son semejantes a una fundición blanca aleada al Cr (1-3 %), caracterizadas por su alta dureza y resistencia a varios tipos de desgastes [33].

Los contenidos de Cr obtenidos (Tabla 4), están en correspondencia con los obtenidos por XIANG-FENGU [4] para la producción de aceros aleados al Cr empleando el principio de reducción directa (cromita + óxido de hierro + coque). Esto valida la posibilidad de obtener recargues aleados al Cr usando cromita refractaria como fuente aportadora de Cr.

3.2 Efecto de la cromita, grafito y caliza en los resultados de la dureza de los depósitos

Los valores de dureza de las aleaciones obtenidas en los depósitos, realizados con los electrodos fabricados a partir de las diferentes mezclas según el diseño de experimento, se muestran en la Tabla 5. La dureza en la primera capa con enfriamiento al aire, varía entre 51 y 57 HRC, con un valor promedio de 53 HRC. Mientras que en la tercera capa, depositada con iguales condiciones que la primera, la dureza varía entre 54 y 61 HRC, con valor promedio de 57 HRC. Cabe señalar que en la tercera capa las diferencias entre las aleaciones no superan 5 HRC en promedio, o sea, menos de 10 %.

Tabla 5: Dureza en los depósitos de soldadura (resumen), en HRC

CAPAS	MUESTRAS						
	1	2	3	4	5	6	7
1 ^{ra}	56	52	54	52	51	57	51
2 ^{da}	59	56	54	57	59	58	55
3 ^{ra}	61	57	54	57	58	60	55

De acuerdo al resultado del procesamiento de los datos del diseño de experimento en cuanto a los valores de dureza, existe un efecto significativo sobre esta propiedad de las variables independientes, según el modelo (IV), el cual se presenta a continuación:

$$Y4-_{HRC} = 1,172 \text{ Cromita} + 1,04 \text{ Grafito} + 1,39 \text{ Caliza} \quad (\text{IV})$$

$$R^2_{\text{ajustada}} = 99,5 \%$$

Las tres variables resultan significativas para la magnitud de la dureza. Esto se debe a que el grafito aporta C a la aleación y la cromita es fuente de Cr. El Cr aumenta la dureza y la resistencia mecánica y mejora la templabilidad de la aleación [34]. En estado de fusión el Cr es capaz de sustituir los átomos de hierro del acero y formar una solución sólida que aumenta la resistencia mecánica y la dureza del cordón [35]. Además, la atmósfera gaseosa de alta temperatura y alto CO favorece el proceso de formación de carburos en el metal depositado.

La temperatura de inicio de la transformación martensítica para aleaciones Fe-C disminuye a medida que aumenta el porcentaje de carbono en estas aleaciones [36]. Para los contenidos de C obtenidos en las aleaciones (0,89...3,42 %) este efecto es muy acentuado. El contenido de C en la aleación ferrosa de recargue tiene un gran efecto sobre la microestructura, así como el contenido de aleantes ya que determina, la microestructura, la resistencia al desgaste y el costo [37].

Las aleaciones 2; 4; 5 y 7 (Tabla 4) atendiendo a su composición química responden a una fundición blanca de baja aleación, aleada al Cr, con una dureza entre 54-58 HRC. En correspondencia a estos parámetros (composición química y dureza) se obtiene una microestructura caracterizada por la presencia de una zona eutéctica con carburos del tipo $(Fe\ Cr)_3C$ [38], Figura 3 (2; 3; 4; 5; 7).

Este tipo de microestructura ofrece buenos resultados en cuanto a la resistencia al desgaste por fatiga superficial y baja abrasión [14, 39].

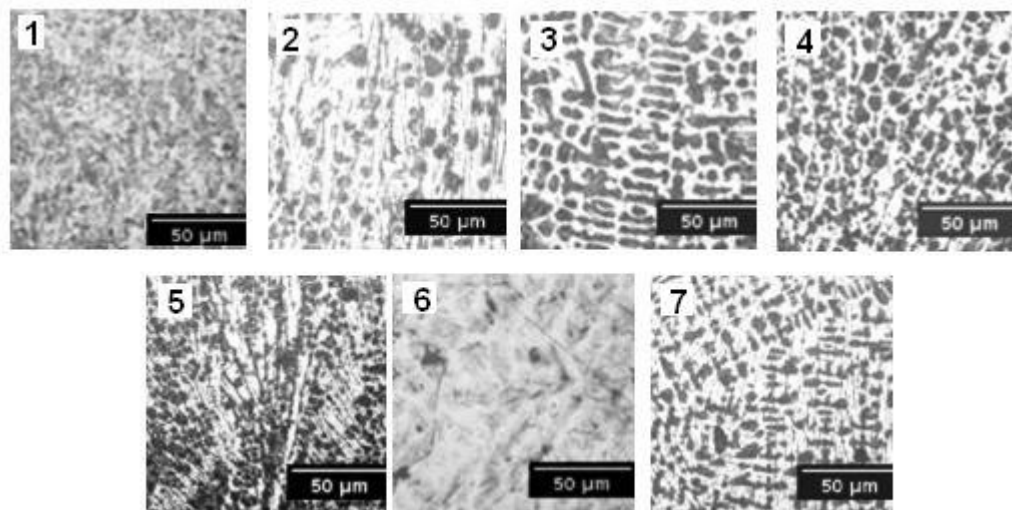


Figura 3: Microestructuras de los depósitos de soldadura en la tercera pasada.

En las aleaciones 1 y 6 (Tabla 4) se puede observar la presencia de la martensita como se muestra en la Figura 3 (1; 6), en correspondencia al contenido de C y Cr (0,89 - 0,94 % y 2,02- 2,77 %), así como a los valores de dureza en el orden de 60 HRC, producto del enfriamiento al aire del metal aportado una vez depositado. Estas aleaciones son recomendadas para el recargue de piezas expuestas al desgaste adhesivo y baja abrasión [40].

4. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad de alear el cordón de soldadura con Cr (hasta 2,9 %) utilizando un electrodo de revestimiento de rutilo con cromita refractaria, grafito y caliza durante el recargue por soldadura mediante el proceso manual por arco eléctrico. Esto se debe a que se garantiza la reducción carbotérmica de la cromita, a partir del calor aportado por el arco eléctrico.

Los contenidos de Cr (2 a 2,9 %) y C (0,9 a 3,42 %) obtenidos en los cordones de soldadura, así como la dureza (54 a 61 HRC), hacen posible que los electrodos correspondientes según la variante, puedan emplearse para el recargue de piezas expuestas a desgaste por adhesión, fatiga superficial y baja abrasión, a partir de la comparación con electrodos similares, comercializados en el mercado internacional.

Las variantes de electrodos evaluadas según el diseño experimental, utilizando las cromitas refractarias en el revestimiento como fuente de Cr, demuestran la posibilidad sustituir al FeCr en la fabricación de consumibles con aportes no elevados de este elemento destinados al recargue.

5. AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de TECAL SA por la ayuda en los análisis de composición química y metalografía.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] HENARES, S., GONZÁLEZ, J.M., GERVILLA, F., *et al.*, “Las cromitas del Complejo Ofiolítico de Camagüey, Cuba: un ejemplo de cromitas ricas en Aluminio”, *Sociedad Geológica Mexicana*, v. 62, n. 1, pp. 173-185, Ene. 2010.
- [2] CHANG, A., CABRERA, I., TOLEDO, C., “Estudio mineralógico de cromitas de la mina “Victoria I”, Camagüey, Cuba”, *Infomin*, v.10, n. 2, pp. 3-13, Nov. 2018.
- [3] OÑOZ, P., RODRÍGUEZ, M., PERDOMO, L. *et al.*, “Evaluación de las cromitas refractarias de Camagüey como fuente potencial de cromo para electrodos revestidos de recargue por soldadura”, *Minería y Geología*, v. 37, n. 1, p. 44-57, enero-marzo, 2021.
- [4] XIANFENG, H., “*Studies on carbothermic reduction of chromite in the presence of FeOx*”, Tesis de D. Sc., Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. Luleå University of Technology, Sweden, 2016.
- [5] ALIBABA, <https://m.spanish.alibaba.com/amp/goods/ferrochrome-price.html>. Accedido en octubre de 2021.
- [6] ALIBABA, <https://m.spanish.alibaba.com/amp/goods/price-of-chromite.html>. Accedido en octubre de 2021.
- [7] AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.13/A5.13M, “*Specification for surfacing electrodes for shielded metal arc welding*”, Miami, AWS, 2010.
- [8] ESAB, “*Electrodos: características y aplicaciones*”, <http://www.esab.com>. Accedido en octubre de 2020.
- [9] INDURA, “*Manual de materiales y sistemas de soldadura*”, http://www.indura.netmanuaisOutros/soldadura/manual_catalogo%20soldadura.pdf. Accedido en octubre de 2020.
- [10] KOBELCO, “*Catálogo de consumibles de soldadura*”, <https://www.kobelco-welding.jp/handbook/products/index>. Accedido en octubre de 2020.
- [11] PERDOMO, L., QUINTANA, R., CRUZ, A., *et al.*, “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*, v. 34, n. 1, pp. 92-107, Mar. 2018.
- [12] PERDOMO, L., QUINTANA, R., CRUZ, A., *et al.*, “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 del Zulia*, v. 40, n.1, p. 42-51, Mar. 2017.
- [13] RODRÍGUEZ, M., PERDOMO, L., ALFONSO, I., “Mejora de la resistencia al desgaste abrasivo de un revestimiento Fe-Cr-Mn-C mediante la adición de V”, *Rev. Matéria*, v. 24, n.1, pp. s/n, May. 2019.
- [14] PÉREZ, J.A., ESPEJO, E., “Influencia de la microestructura en el comportamiento a desgaste abrasivo de depósitos de soldadura antidesgaste aplicados sobre sustratos de acero de baja aleación y bajo carbono”, *Dyna*, v.86, no.211, pp. 327-336, Oct.-Dec. 2019.
- [15] GONZÁLEZ, O., GÓMEZ, C.R., BERNABÉ, U., “Metodología para la selección de la mejor variante entre electrodos de doble revestimiento para recargue”, *TecnoLógicas*, v.23, n.49, pp. 72-81, sep.-dic. 2020.
- [16] CRUZ, A., RODRÍGUEZ, M., SCOTTI, A., “Estudio comparativo de los parámetros de consumo y geometría de los depósitos de electrodos tubulares revestidos para recargue”, In: *8º Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*, pp. 83- 93, Cusco, Oct. 2007
- [17] REINA M. *Soldadura de los aceros: aplicaciones*, 5a ed., Weld Work S.L., España, 2012.
- [18] GONZÁLEZ, A., *Resultado de ensayos de composición química de cromitas del proyecto cromo Victoria I*, In: Reporte IR 21 102018, Laboratorios DELABEL, Santiago de Cuba, 2018.
- [19] VOLSHENCO, V.H., YAMPOLSKII, B. M., VINOKUROV, V.A., *et al.*, *Teoría de los procesos de soldadura*, 1ª ed., Vyzhaia Zhkola, Moscú, 1988.
- [20] MODENESI, P.J., MÁRQUEZ, P., SANTOS, D.B., *Introducción a la metalurgia de la soldadura*, 1ª ed., Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- [21] GUTIÉRREZ, H., DE LA VARA, R., *Análisis y diseño de experimentos*, 3a ed., México DF, McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [22] PERDOMO, L., QUINTANA, R., CASTELLANOS, J., *et al.*, “Empleo de cromitas refractarias para la obtención de fundentes aglomerados utilizados en la soldadura automática por arco sumergido (SAW)”, *Rev. Metalurgia*, v. 39, n. 4, pp. 268-278, Dic. 2003.
- [23] CRUZ, A., DÍAZ, E.D., SCOTTI, A., “Efecto de la pirolusita, la caliza+fluorita y el ferrocromomanganeso sobre el desempeño de un electrodo básico con revestimiento periférico”, *Minería y Geología*, v. 31, n. 4, pp. 84-99, Dic. 2015.
- [24] HERNÁNDEZ, G., *Manual del soldador*, 27ª ed., CESOL, Madrid, 2020.
- [25] EUROPEAN STANDARD. “*Welding consumables - Welding consumables for hard-facing*”. EN 14700: 2014.
- [26] LEÓN, H., BEDOYA, A. D., FRANCO, C., *et al.*, “Evaluación de la Soldabilidad de Rieles Endurecidos Grado

- R350HT para la Reparación de Ferrovías con Recargues Superficiales”, *Soldagem & Inspeção*, 25:e2537, pp.1-15, 2019.
- [27] ARANGURENT, F., MALLOL, A., *Siderurgia*. 2ª ed., Dorssat S.A., Madrid, 1963.
- [28] VOSKOBONIKOV, V., KUDRIN, V., YAKUSHEV, A., *Metalurgia general*, 3ª ed., MIR, Moscú, 1982.
- [29] OÑOZ, P., RODRÍGUEZ, M., PERDOMO, L., “Electrodo cinta con revestimiento de rutilo y cromita refractaria destinado al recargue de piezas expuestas a desgaste adhesivo”, *Revista Cubana de Ingeniería*, v.12, n. 4 e302, 2021.
- [30] POTAPOV, N.N., FEKLISTOV, S.I., VOLOBUEV, Y.S., “A method of selecting fused fluxes in welding pearlitic-ferritic steels”, *Welding International*, v. 23, n.10, pp. 800-803, Mar. 2009.
- [31] CRUZ, A., PERDOMO, L., QUINTANA, R., et al. “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*, v.24, e2424, 2019.
- [32] MATWEB, <http://matweb.com>. Accedido en enero de 2021.
- [33] ORTIZ, T., CRUZ, A., RODRÍGUEZ, M. “Caracterización de depósitos de un electrodo tubular del sistema Fe-Cr-Mn-Si-C destinado al recargue de piezas sometidas a desgaste abrasivo”, *Centro Azúcar*, v.44, no.3, jul.-set. 2017
- [34] KENCHI, K. M., THANUSHA, K., “Effect of Chromium Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hard facing Layers”, *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, v.13, n.1, pp.72-79, jan.-feb. 2016.
- [35] YIE, T., JIANG, J., HANGUANG, F., et al., “Effect of chromium content on microstructure, hardness, and wear resistance of as-cast Fe-Cr-B alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.28, n.10, pp. s/n, Oct. 2019.
- [36] SMITH, W., HASHEMI, J., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, 5ª ed., McGraw-Hill, Madrid, 2014.
- [37] DE SOUZA, A.H., RIBEIRO, F., BELTRÃ, M.A., et al., “Aspectos microestruturais e do comportamento mecânico de revestimento duro depositado pelo processo arame tubular”, *Revista Matéria*, v.25, n.1, 2020.
- [38] DAN, W., SHUJIAN, Z. QINGDONG, Z., “The influence of Cr on the microstructure and electrochemical behavior of high strength low-alloy steel”, *Materials Research Express*, v.7, n.6, pp. 1-9, Jun. 2020.
- [39] GARCÍA, A., RÍO, C., VÁRELA, A., et al., “Influencia del carbono y el cromo en el comportamiento tribológico de aleaciones férreas”, *Rev. Metalurgia*, v. Extr., pp. 493-497, 2005.
- [40] GERARD, B., *Fundamentals of hardfacing by arc welding*. WELDING ALLOYS GROUP France, june. 2018.

ORCID

Pablo Oñoz Gutiérrez	https://orcid.org/0000-0001-8704-8450
Manuel Rodríguez Pérez	https://orcid.org/0000-0002-4092-3470
Lorenzo Perdomo González	https://orcid.org/0000-0002-3425-1487
Alejandro Oñoz Marin	https://orcid.org/0000-0002-8438-5395
Jesús Fernández del Risco	https://orcid.org/0000-0003-4476-2413