

# Fundente para Recargue por Soldadura con Arco Sumergido a Partir de Ferrocromo-manganeso y Escoria de la Reducción Simultánea de Cromita y Pirolusita

Amado Cruz-Crespo<sup>1</sup> , Lorenzo Perdomo-González<sup>1</sup>, Rafael Quintana-Puchol<sup>1</sup> , Américo Scotti<sup>2,3</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Centro de Investigaciones de Soldadura, Santa Clara, Cuba

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Laboratório para Desenvolvimento de Processos de Soldagem, Uberlândia, MG, Brasil

<sup>3</sup> Department of Engineering Science, University of West, Trollhättan, Sweden

**Como citá:** Cruz-Crespo A, Perdomo-González L, Quintana-Puchol R, Scotti A. 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*. 2019;24:e2424. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.24>

**Resumen:** Se aborda la obtención de un fundente para recargue duro por Soldadura con Arco Sumergido (SAW), empleando ferrocromo-manganeso y escoria obtenidos de la reducción carbotérmica simultánea de cromita y pirolusita. El ferrocromo-manganeso y la escoria fueron obtenidos, concibiendo que ambos productos satisfagan los requisitos de los componentes (sistema de aleación y matriz) de un fundente aglomerado para el recargue. El proceso de fusión-reducción para la obtención de la aleación y la escoria fue realizado en horno de arco eléctrico de corriente continua. El vertido fue realizado en agua para facilitar la separación y molienda de los productos de colada. Fue elaborado un fundente experimental, empleando la aleación y escoria obtenida. Fueron obtenidos depósitos por SAW, los cuales fueron caracterizados en cuanto a: composición química, microestructura y dureza. Se concluyó que el fundente obtenido a partir de ferrocromo-manganeso y escoria de la reducción carbotérmica simultánea de cromita y pirolusita, permite depositar un metal apropiado para el trabajo en condiciones de abrasión, que se caracteriza por significativos contenidos de carbono y cromo y una microestructura predominantemente martensítica, con dureza de 63 HRC.

**Palabras-clave:** Fundente; SAW; Recargue duro; Escoria; Ferroaleaciones.

## Flux for Hardfacing by Submerged Arc Welding from Ferrochrome-manganese and Slag from the Simultaneous Reduction of Chromite and Pyrolusite

**Abstract:** The obtaining of a flux for hardfacing by Submerged Arc Welding (SAW), using ferrochrome-manganese and slag obtained from the simultaneous carbothermal reduction of chromite and pyrolusite is addressed. The ferrochrome-manganese and the slag were obtained, conceiving that both products satisfy the requirements of the components (alloy system and matrix) of an agglomerated flux for hardfacing. The fusion-reduction process to obtain the alloy and the slag was carried out in a direct current electric arc furnace. The pouring was carried out into water to facilitate the separation and grinding of the cast products. An experimental flux was manufactured, using the obtained alloy and slag. Deposits were obtained by SAW, which were characterized in terms of: chemical composition, microstructure and hardness. It was concluded that the flux obtained from ferrochrome-manganese and slag from the simultaneous carbothermal reduction of chromite and pyrolusite, allows to deposit an appropriate metal for work under abrasion conditions, characterized by significant carbon and chromium contents and a martensitic microstructure predominantly, with hardness of 63 HRC.

**Key-words:** Flux; SAW; Hardfacing; Slag; Ferroalloys.

### 1. Introducción

La presencia de ferromanganeso de alto carbono en consumibles de recargue para enfrentar la abrasión con impacto, contribuye a aumentar la transferencia de los elementos formadores de carburo, como el cromo, y favorece la formación de la austenita residual que aumenta la capacidad de soportar impactos. Por su parte, el ferrocromo de alto carbono es de uso frecuente en la carga de aleación de consumibles para el recargue de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo, ya que aumenta la templabilidad del acero y para altos contenidos de carbono propicia la formación de carburos de alta dureza [1-3]. En tal sentido, para la fabricación de consumibles de recargue por soldadura es favorable contar con una aleación de ferrocromo-manganeso de alto carbono, ya que una

Recibido: 10 Jun., 2019. Acepto: 09 Set., 2019.

E-mails: [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu) (ACC), [lperdomo@uclv.edu.cu](mailto:lperdomo@uclv.edu.cu) (LPG), [rquin@uclv.edu.cu](mailto:rquin@uclv.edu.cu) (RQP), [ascotti@ufu.br](mailto:ascotti@ufu.br), [americo.scotti@hv.se](mailto:americo.scotti@hv.se) (AS)



Este es un artículo publicado en acceso (*Open Access*) abierto bajo la licencia [Creative Commons Attribution Non-Commercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, sin restricciones siempre que sin fines comerciales y que el trabajo original sea debidamente citado.

sola aleación aportaría los tres elementos esenciales del sistema de aleación, el manganeso, el cromo y el carbono. No obstante, la siderurgia a nivel comercial solo contempla la obtención de ferromanganeso y ferrocromo como aleaciones independientes, ya que el mayor interés está dirigido a la obtención de acero [2,4,5].

La combinación de mineral de manganeso y de cromo en un solo proceso de reducción tiene como criterio de partida el comportamiento termodinámico de sus óxidos fundamentales, pirolusita ( $MnO_2$ ) y cromita ( $Cr_2O_3$ ). De acuerdo con Cruz et al. [6], la pirolusita ( $MnO_2$ ) experimenta una serie de transformaciones como resultado del calentamiento, pasando por bixbyta ( $Mn_2O_3$ ) y hausmanita ( $Mn_3O_4$ ), hasta llegar a manganosita ( $MnO$ ). De acuerdo con Riss & Khodorovsky [4], durante el procesamiento de mineral de manganeso en un horno con presencia de coque, la transformación de  $Mn_3O_4$  a  $MnO$  ocurre con la participación de  $CO$  como reductor. Si se observa el comportamiento de las energías libres del  $MnO$  y el  $Cr_2O_3$  con respecto a la temperatura, se hace visible que la reducción simultánea de estos óxidos es viable: Ambos presentan un comportamiento paralelo, iniciándose la reducción frente al carbono a partir de aproximadamente  $1250\text{ }^\circ C$  para el  $Cr_2O_3$  y de  $1400\text{ }^\circ C$  para el  $MnO$  [5].

Para el empleo de las ferroaleaciones en la fabricación de consumibles de soldadura se requiere reducir el tamaño de grano hasta  $0,1\text{-}0,25\text{ mm}$ , que incide sobre los costos por el alto gasto energético, a la vez que provoca pérdidas en forma de finos ( $\leq 0,1\text{ mm}$ ). Los gastos y pérdidas en la trituración y molienda pueden ser disminuidos mediante el vertido en agua, que provoca la granulación y fragilización de la aleación, a la vez que se obtiene una escoria esponjosa de fácil trituración, lo cual facilita también la separación de ambos productos [2], [7-9]. Los gastos de procesamiento de materia prima se reducen si se procesa una sola aleación que contiene varios elementos, ferrocromo-manganeso en este caso.

El producto fundamental en la metalurgia ferrosa lo constituye por regla general la aleación, siendo considerada la escoria un residual o un producto intermedio en la obtención de una aleación en varias etapas, donde la escoria final termina siendo un residual [4,5]. Por ello, en los últimos tiempos se han desarrollado trabajos para preconcebir aplicaciones a las escorias procedentes de los procesos de obtención de ferroaleaciones [2], [7-9].

El hecho que se desarrolle un proceso que concibe el aprovechamiento del residual, reduce los costos a la par que, desde el punto de vista ambiental, se hace sustentable. Otro aspecto no menos importante es que, en la producción de materiales de recargue por soldadura los volúmenes de demanda de ferroaleaciones son sustancialmente pequeños frente a los de la siderurgia; por tanto, pequeños hornos eléctricos de arco de instalaciones experimentales pueden asumir producciones para satisfacer una demanda empresarial significativa [2].

En correspondencia con lo abordado, el objetivo del presente trabajo se dirige a la obtención de un fundente para recargue por SAW de piezas sometidas al desgaste abrasivo en base al empleo de ferrocromo-manganeso y escoria de la reducción carbotérmica simultánea de cromita y pirolusita.

## 2. Metodología

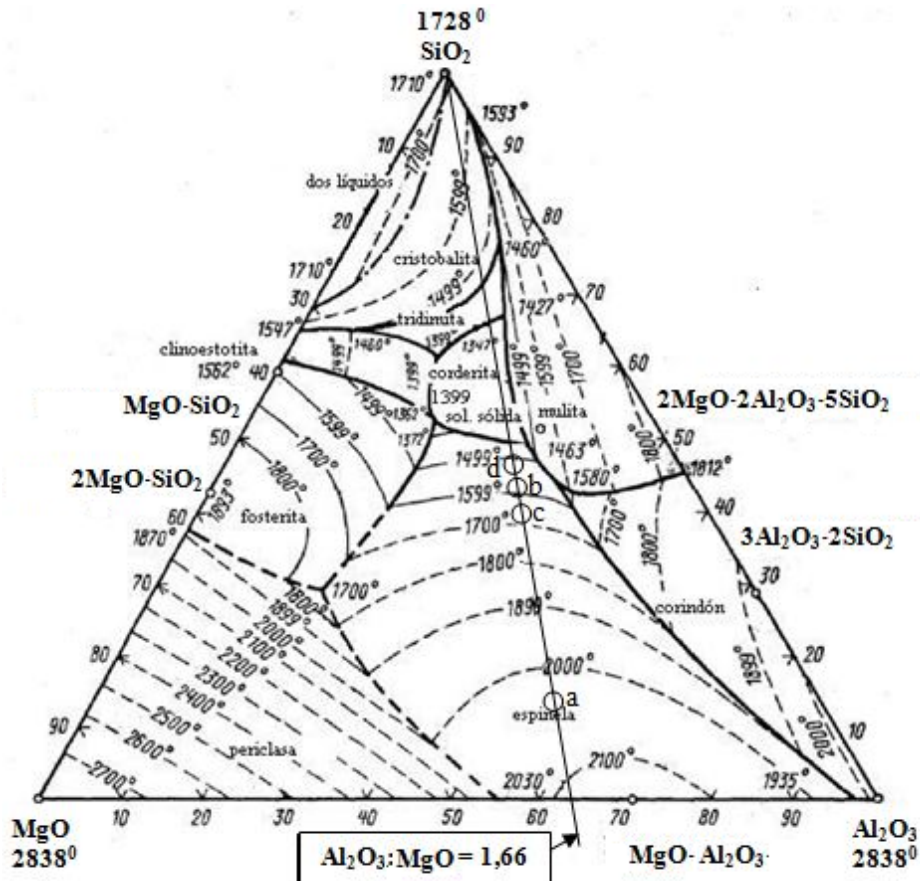
### 2.1. Obtención analítica de la aleación y la escoria por reducción carbotérmica

En base a experiencias previas en la obtención independiente de ferrocromo y ferromanganeso de alto carbono [2,8], se definió una mezcla con 75% de cromita y 25% de pirolusita, cuyas composiciones se muestran en la Tabla 1, de tal modo que el aporte de  $SiO_2$  del mineral de manganeso provoque un corrimiento en el diagrama ternario de óxidos representativo de la escoria de la reducción de la cromita hacia una región de menores temperaturas de fusión (Figura 1) [10], lo que constituye un elemento ventajoso desde el punto de vista del procesamiento por fusión-reducción.

**Tabla 1.** Composición química de los minerales, % en masa [2,8].

Componente	Cromita	Arena sílice	Caliza	Pirolusita	Fluorita
$Cr_2O_3$	32,87	-	-	-	-
$MnO_2$	-	-	-	76,86	-
$SiO_2$	5,79	90,32	0,34	8,60	3,24
$TiO_2$	-	0,48	-	-	-
$Al_2O_3$	26,06	0,73	0,23	2,06	0,43
$Fe_2O_3$	16,16	1,30	0,17	1,17	-
$CaO$	0,42	1,63	55,20	2,00	0,22
$MgO$	16,00	0,90	0,68	0,32	0,10
$K_2O$	-	0,73	-	-	-
$Na_2O$	-	0,81	-	-	-
$CaF_2$	-	-	-	-	96,1
$P_2O_5$	-	-	-	0,27	-
PPI	-	2,01	44,37	10,61	-

Los cálculos para el procesamiento reductivo se realizaron en base a 100 g de mineral (75 g de cromita y 25 de pirolusita), considerando las reacciones involucradas y su eficiencia según la experiencia metalúrgica. Para facilitar los cálculos y porque ello no altera significativamente el resultado, fue considerado que la reducción se desarrolla directamente con el carbono. La adición requerida de carbono se realizó por la aportación en la carga de coque con 87% de carbono fijo. La cantidad de coque demandada para satisfacer lo estequiométricamente necesario de carbono fue acrecentada en un 25% para compensar las pérdidas [2,8].



**Figura 1.** Diagrama de fases del sistema  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2$ . Punto "a" escoria calculada de la reducción sin correctores, punto "b" escoria calculada de la reducción con correctores, punto "c" escoria experimental de la reducción, punto "d" composición de la matriz del fundente.

La escoria resultante del proceso de la reducción fue recalculada al sistema ternario de óxidos  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  y, a partir de su ubicación en el diagrama de equilibrio de la Figura 1, fue considerada la migración hacia una región de mayor fusibilidad. Para ello, fue incrementado el  $\text{SiO}_2$  en el sistema, adicionado a la carga en forma de arena de sílice, cuya composición se muestra en la Tabla 1. Como es objetivo del trabajo el empleo de la escoria obtenida de la reducción carbotérmica en la matriz de un fundente de recargue por SAW, se evaluó la adición de  $\text{CaF}_2$  y  $\text{CaO}$  como modificadores del sistema ternario, los cuales fueron aportados a la carga en forma de fluorita y caliza, respectivamente (Tabla 1). La adición de correctores, al tiempo que adecua la composición de la escoria a los requerimientos de un fundente para el recargue por soldadura, favorece el procesamiento de reducción carbotérmica en el horno de arco, ya que aumenta la basicidad del sistema y aumenta la fluidez de la escoria.

## 2.2. Obtención experimental de la aleación y la escoria

Con el propósito de comprobar experimentalmente el comportamiento de la carga establecida analíticamente, fueron procesadas 3 cargas para 3 kg de cromita + pirolusita cada una. Los componentes de carga fueron llevados a una granulometría entre 0,25 mm y 5 mm y pesados en una balanza técnica. Las cargas fueron homogenizadas en un mezclador de tambor rotatorio durante 30 min. El proceso de fusión-reducción fue realizado en un horno eléctrico de arco con crisol de grafito, empleando corriente continua con 400 A y 40 V. La alimentación de la carga se realizó de manera gradual alrededor del electrodo.

Luego que el fundido alcanzó alrededor de 1600 °C, se realizó el vertido en una cubeta con agua para la granulación y fragilización de los productos. La escoria y la aleación obtenidas fueron secadas al aire y separadas por tamizado.

### 2.3. Aplicación de la aleación y la escoria a la obtención de un fundente para recargue

Para la obtención de la matriz del fundente, a la escoria de la obtención del FeCrMn se le añadió  $\text{CaF}_2$  que, como fue planteado arriba, no fue realizada a la carga del horno en la obtención de la aleación para evitar una excesiva disminución de la temperatura de fusión que afectaría el proceso. La matriz representa el 84% de la mezcla del fundente, a la cual se le añadió como sistema de aleación 15% del ferrocromo-manganeso obtenido y un 1% de grafito, en base a experiencias previas en la elaboración de fundentes para aplicaciones similares [2].

Los componentes de carga fueron llevados a sus granulometrías correspondientes:  $\leq 0,25$  mm para los componentes de la matriz y entre 0,1 mm y 0,25 mm para los componentes de carga de aleación. La mezcla fue homogenizada en un mezclador de tambor rotatorio durante 30 min, y luego peletizada en un peletizador de disco con adición de silicato de sodio como aglomerante, de composición 29,39%  $\text{SiO}_2$ ; 10,10%  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 60,51%  $\text{H}_2\text{O}$ . El silicato añadido, representa un 30% de la masa seca del fundente. El fundente obtenido fue secado al aire y clasificado por tamizado a 1,6/0,25 mm, siendo calcinado posteriormente en un horno mufla a 400 °C durante 2 h [2,8].

Fue realizada la evaluación del comportamiento del fundente en la obtención de depósitos sobre chapa de acero AISI 1020, con dimensiones 150x80x8 mm, empleando alambre electrodo AWS EL12 (0,06% C; 0,5% Mn; 0,07% Si;  $\leq 0,025\%$  S;  $\leq 0,025\%$  P) de 3 mm de diámetro [11]. Fueron depositados tres cordones con solape para atenuar la dilución. Entre pasadas el depósito se enfrió al aire estático. El procedimiento de soldadura utilizado fue el siguiente: Tensión,  $U_s = 30$  V; intensidad,  $I_s = 400$  A y velocidad,  $V_s = 30$  m/h. Durante la deposición el fundente mostró buen desempeño cualitativo, en lo relativo a estabilidad del arco, el desprendimiento de la escoria y la apariencia de los cordones.

Del depósito fueron extraídas muestras en una tronzadora metalográfica. Una muestra fue preparada en su sección transversal y atacada con nital al 3% para revelar la macrografía. Luego, la muestra fue nuevamente pulida y atacada con Nital al 1% para revelar la microestructura, observada por microscopía óptica y por microscopía electrónica de barrido. La observación metalográfica fue realizada en la parte centro-superior del tercer cordón del depósito. A la muestra metalográfica le fue determinada la dureza Vickers con un microdurómetro, empleando una carga de 1000 g y un tiempo de indentación de 15 s. Dos de las secciones cortadas fueron rectificadas en su parte superior para la determinación de la composición química por análisis espectral de emisión atómica en una y para la realización de difracción de RX en la otra. Los difractogramas fueron obtenidos con radiación  $\text{CuK}\alpha$  en el rango 20° a 100°, con una velocidad de 2°/min.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Obtención de la aleación y la escoria por reducción carbotérmica simultánea de cromita y pirolusita

La aleación y la escoria obtenidas por cálculos responden a las composiciones químicas mostrada en las Tablas 2 y 3. Del resultado de los cálculos se obtuvo que para el procesamiento de 100 g de mineral (75 g de cromita y 25 g de pirolusita) deba ser añadido a la carga 22,5 g de coque. La masa de aleación obtenida es de 39,71 g y la de escoria es de 44,05 g.

**Tabla 2.** Composición de la aleación obtenida por cálculos y experimentalmente, % en masa.

Fe	Cr	Mn	C	Si	P
Obtenida por cálculos					
24,98	39,31	27,02	6,98	1,66	0,05
Obtenida experimentalmente					
Bal.	36,54	24,08	5,1	5,12	0,02

A partir de la Tabla 3 fue establecido que el sistema de óxidos mayoritario de la escoria responde a la composición:  $\text{SiO}_2$ -13,82%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 53,81%,  $\text{MgO}$ - 32,37% ( $\text{SiO}_2$ : $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{MgO}$  = 0,43:1,66:1). De acuerdo a su ubicación en el sistema ternario de óxidos (Punto "a" en el sistema de la Figura 1) se enmarca en la región de la espinela ( $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), entre las isoterms de 2000 °C y 2100 °C, significando que se requiere un corrimiento hacia el vértice del  $\text{SiO}_2$  con el objetivo de buscar menores temperaturas para el procesamiento de reducción carbotérmica y a su vez enmarcar la escoria en un contenido de este óxido más adecuado para el desempeño como matriz de un fundente para el recargue por soldadura [4,8,12]. Para ello, se realizó en el diagrama (Figura 1) una migración desde el punto "a" hasta el punto "b", con 35% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , manteniendo la relación  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : $\text{MgO}$  = 1,66 (migración sobre una recta en dirección al vértice de  $\text{SiO}_2$ ), lo que se satisface para un 21,08% de  $\text{MgO}$  y para completar el 100% del sistema ternario se requiere de 43,92% de  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_2$ : $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{MgO}$  = 2,08:1,66:1). Esta composición se ubica en una región próxima a la isoterma de 1600 °C. Para satisfacer el requerimiento de  $\text{SiO}_2$  en el sistema de óxidos se hace necesario añadir en la carga 22,81 g de arena sílice de composición mostrada en Tabla 1.

**Tabla 3.** Composición de la escoria obtenida por cálculos y experimentalmente de la reducción carbotérmica, % en masa.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	CaF <sub>2</sub>	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Por cálculos sin adición de correctores								
12,03	46,83	28,17	5,77	3,93	1,93	-	1,29	0,05
Por cálculos con adición de correctores								
36,06	28,72	17,28	3,54	2,40	6,18	5,00	0,79	0,03
Obtenida experimentalmente								
30,76	30,07	18,45	4,13	2,90	7,15	5,55	0,96	0,03

En correspondencia con el objetivo de conjugar la obtención de ferrocromo-manganeso de alto carbono para su empleo como carga de aleación de un fundente de recargue por SAW, con el de una escoria aplicable a la matriz de dicho fundente, se consideró el incremento a la escoria de la Tabla 3 en un 5% de CaF<sub>2</sub> y de CaO, respectivamente, lo cual se corresponde a la adición en la carga de 6,5 g de caliza y 3,74 g de fluorita (Tabla 1). La adición de CaF<sub>2</sub>, de acuerdo a los requerimientos para la matriz de un fundente, debería ser mayor [8], [12], pero ello se ve limitado, ya que una excesivamente baja temperatura de fusión de la escoria podría llevar a un enfriamiento de la aleación en el horno y dificultar el vertido de la misma [4,8]. La escoria, luego de las adiciones de SiO<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> y CaO, quedó con la composición mostrada en la Tabla 3, siendo su masa total de 71,83 g.

Como resultado de los cálculos y las consideraciones realizadas, la carga a procesar en el horno, para 100 g de mineral (cromita + pirolusita) a reducir, responde a la composición siguiente: 75 g de cromita; 25 g de pirolusita; 22,5 g de coque; 22,81 g de arena sílice; 6,5 g de caliza; 3,74 g de fluorita (48,2% de cromita; 16,10% de pirolusita, 14,46% de coque, 14,66% de arena sílice; 4,18 de caliza; 2,40% de fluorita).

Los resultados de coladas experimentales para cargas con 3 kg de cromita + pirolusita se reflejan en la Tabla 4. Luego de obtenida la aleación y la escoria, en el tamizado conjunto de ambos productos más del 97% de la aleación fue retenida por el tamiz de 2 mm, siendo su tamaño promedio de 8 mm. La escoria, de apariencia vítrea-porosa, durante el tamizado se desmenuzó mecánicamente por las fracciones de aleación, pasando por el tamiz de 2 mm.

**Tabla 4.** Resultados de coladas experimentales.

Colada	Masa, g		Rendimiento, %	
	Aleación	Escoria	Aleación	Escoria
1	943	1947	79,16	90,37
2	921	1979	77,31	91,85
3	935	1919	78,49	89,03
Promedio	933	1948	78,32	90,42

Como se observa (Tabla 4), el rendimiento es alto en todos los casos en comparación con los resultados teóricos (para el cálculo del rendimiento fueron consideradas las masas de escoria y aleación de las Tablas 2, 3 y 4, llevando el teórico a una masa de cromita + pirolusita de 3000 g). Los resultados de coladas son próximos entre sí, como prueba de una buena reproducibilidad del proceso. El índice de multiplicidad de la escoria (relación entre la masa de escoria y la masa de aleación) es cercano a 2, aunque este aspecto no adquiere gran importancia para la eficiencia del proceso de obtención de la aleación, ya que la escoria ha sido concebida como un producto a utilizar en calidad de matriz de un fundente para el recargue por soldadura.

La composición química media de la aleación que se obtuvo experimentalmente se muestra en la Tabla 2. Los contenidos de los elementos son próximos a los resultados teóricos pronosticados, mostrados en la misma Tabla. La diferencia más significativa se observa en el contenido de silicio, que resultó superior al pronosticado, lo cual se atribuye a la reducción del SiO<sub>2</sub>, a causa de su alta concentración en la escoria (SiO<sub>2</sub> + C → Si + CO<sub>2</sub>). La aleación obtenida, con altos contenidos de Cr, Mn y C, debe estar caracterizada en su composición fásica por la presencia de carburos, favorables para la aplicación como carga de aleación de consumibles de recargue por soldadura para enfrentar el desgaste abrasivo.

Como era esperado de los resultados de cálculos, la escoria obtenida experimentalmente (Tabla 3) responde al sistema mayoritario de óxidos SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO con la presencia de CaO y CaF<sub>2</sub> como modificadores fundamentales del sistema. Al recalcular el sistema a los tres óxidos mayoritarios se obtiene la composición siguiente: SiO<sub>2</sub>- 38,80%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 37,93%; MgO- 23,28% (SiO<sub>2</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:MgO = 1,67:1,63:1). Esta escoria se sitúa en el diagrama de equilibrio de fases de la Figura 1 en la región de la espinela, próxima a la isoterma de 1700 °C (punto "c"), muy cercana a lo planificado por cálculos (punto "b"). En el resultado experimental se ha mantenido relativamente similar a lo esperado la relación Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:MgO = 1,63. El leve descenso en el diagrama de fases del punto "c" con respecto al "b" se atribuye a la reducción, referida arriba, que ha experimentado el SiO<sub>2</sub> frente al carbono.

La alta presencia de SiO<sub>2</sub> en la escoria (Tabla 3) hace que la estructura principal del sistema sea el tetraedro oxisilicático SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>. El átomo tetravalente de silicio en el tetraedro SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> es sustituido por el aluminio trivalente Al<sup>3+</sup> contenido en la escoria, aumentando así la carga negativa. Si en el (Si<sub>4</sub>O<sub>8</sub>) se sustituyen dos átomos Si por dos Al se forma el anión bivalente (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)<sup>2-</sup>,

que se une al  $Me^{2+}$ , formando alumosilicato de alta estabilidad. Los óxidos tipo MeO en la escoria (Tabla 3), presentan una coordinación octaédrica ( $MeO_6$ ). Estos óxidos contribuyen al debilitamiento de los enlaces del enrejado silicático, ya que transfieren aniones  $O^{2-}$  al  $SiO_2$  [12-14].

La presencia de  $CaF_2$  en la escoria (Tabla 3) influye significativamente en la estructura del enrejado alumosilicático: Por una parte, los aniones  $F^-$  sustituyen a los aniones  $O^{2-}$  ( $1,33\text{Å}$  de tamaño para el  $F^-$  y  $1,36\text{Å}$  para el  $O^{2-}$ ), rompiendo el enlace Si-O. Por otra parte, los cationes de  $Ca^{2+}$  se insertan en las cavidades octaédricas, con el consecuente debilitamiento de los enlaces Si-O. Ambos sucesos contribuyen a disminuir la energía de atomización, que se refleja en una mayor fluidez de la escoria [12, 13].

A partir de los resultados de composición química de la escoria (Tabla 3) y en base a las Ecuaciones (1) y (2), fue determinada la basicidad y la actividad química relativa de la escoria. De acuerdo con estos resultados, la escoria es prácticamente neutra ( $B = 0,97$ ) y activa ( $A = 0,45$ ) (un fundente es neutro cuando su índice de basicidad es igual a 1 y es activo cuando su actividad se enmarca entre 0,3 y 0,6) [12].

$$B = \frac{0,018CaO + 0,025MgO + 0,006CaF_2 + 0,014(Na_2O + K_2O) + 0,007(MnO + FeO)}{0,017SiO_2 + 0,005(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (1)$$

$$A = \frac{SiO_2 + 0,5(TiO_2) + 0,4(Al_2O_3 + ZrO_2) + 0,42B^2(MnO)}{100B} \quad (2)$$

### 3.2. Evaluación del fundente experimental para la obtención de depósitos de recargue

De acuerdo a la composición reportada de fundentes comerciales con sistemas de óxidos que responden a composiciones similares a la escoria obtenida de la reducción conjunta de la cromita y la pirolusita en el presente trabajo (Tablas 3), el  $CaF_2$  se mueve en un rango de 12-25% [8,12]. En correspondencia con ello, se adicionó a la composición de la matriz del fundente un 10% de  $CaF_2$ , por encima del ya presente en la escoria, para lo cual fue agregado 10,41 g de fluorita, cuya composición se da en la Tabla 1. Se ha considerado también la adición del silicato de sodio como aglomerante en un 30% de la masa seca del fundente (mezcla de escoria, fluorita, y sistema de aleación) y de cuya masa la matriz representa el 84% y el 16% es el sistema de aleación. Al considerar la adición de fluorita y el aporte de  $SiO_2$  y  $Na_2O$  del silicato de sodio, que también pasan al sistema matricial, se obtiene la matriz de composición mostrada en la Tabla 5. En base a dicha tabla fueron determinadas la basicidad y la actividad por las ecuaciones (1) y (2), de donde se establece que el sistema es ácido ( $B = 0,88$ ) y activo ( $A = 0,50$ ). Al recalculer el sistema a los tres óxidos mayoritarios se obtiene:  $SiO_2$ - 46,56%;  $Al_2O_3$ - 33,12%;  $MgO$ - 20,32% ( $SiO_2: Al_2O_3:MgO = 2,29:1,63:1$ ). En el diagrama de equilibrio de fases de la Figura 1 esta composición se sitúa en la región de la espinela (punto "d"), entre las isoterms de 1500 y 1600 °C. La relación  $Al_2O_3:MgO = 1,63$  se mantuvo similar a la de la escoria del proceso reductivo (Tabla 3). Un mayor contenido de  $SiO_2$  en la matriz del fundente con relación a la escoria ha hecho ascender, en dirección al vértice del  $SiO_2$ , hacia una composición de menor temperatura (Figura 1). Un contenido mayor de  $CaF_2$  en la matriz del fundente, con relación a la de la escoria del proceso reductivo (Tabla 3), hace que sea mayor la fusibilidad del fundente en la soldadura y que el desprendimiento de la escoria y el acabado de los cordones sean mejores. La presencia de  $Cr_2O_3$  en la matriz del fundente favorece la transferencia hacia el depósito del cromo contenido en el sistema de aleación, a causa del efecto de la concentración de este óxido en la escoria sobre el desplazamiento del equilibrio hacia los reaccionantes en la reacción de oxidación ( $2Cr + 3/2O_2 = (Cr_2O_3)$ ).

**Tabla 5.** Composición química media de la matriz del fundente, % en masa.

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$MgO$	$Cr_2O_3$	$MnO$	$CaO$	$CaF_2$	$FeO$	$P_2O_5$	$Na_2O$
33,69	23,97	14,71	3,29	2,31	5,70	12,39	0,77	0,02	3,15

En la Figura 2 se muestra la macrografía de la sección transversal del depósito, a partir de la cual fueron determinadas las áreas de penetración (área de metal fundido, localizada por debajo del borde superior de la chapa y cuyo valor fue de  $51,2\text{ mm}^2$ ) y refuerzo (área de metal fundido, localizada por encima del borde superior de la chapa y cuyo valor fue de  $70,68\text{ mm}^2$ ) con el empleo del software IMAGEJ y con dichas áreas fue determinado el coeficiente de dilución ( $D = A_p/(A_p+A_R)$ ; donde  $A_p$ - área de penetración,  $\text{mm}^2$  y  $A_R$ - área de refuerzo,  $\text{mm}^2$ ), cuyo valor fue de 0,42. En base al coeficiente de dilución y la composición del depósito experimental con dilución fue determinada la composición sin dilución (Tabla 6). Para ello, fue considerado que la composición del metal depositado experimentalmente fue conformada con una participación del 42% del metal de base y 58% del metal aportado (aporte conjunto del alambre y el fundente). Ello significa que la composición del metal depositado sin dilución corresponde a un 100% de participación del metal del aporte, por lo que el valor de cada elemento se determina por simple cálculo de regla de tres.

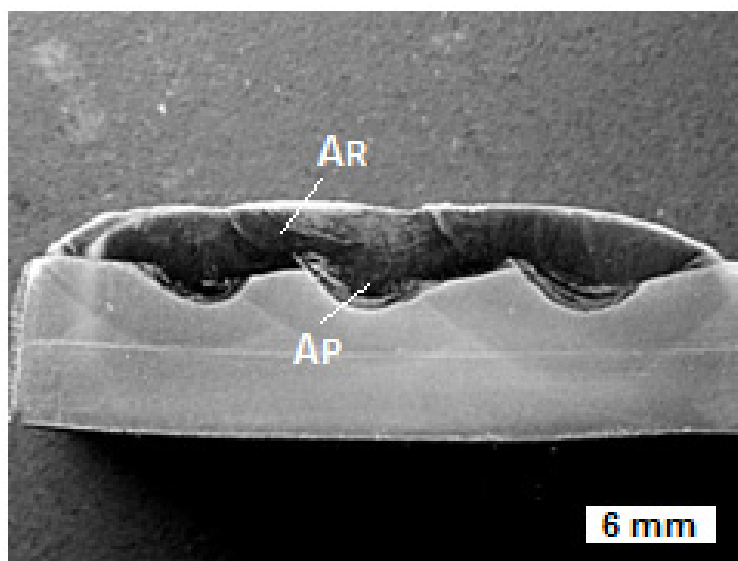


Figura 2. Macrografía del depósito obtenido con el fundente.

Tabla 6. Composición química media del depósito obtenido con el fundente experimental, % en masa.

Nivel de dilución	C	Cr	Mn	Si	P	S
Con dilución	1,02	4,09	1,76	0,85	0,003	0,020
Sin dilución	1,76	7,05	3,03	1,47	0,01	0,03

Si a partir de la composición del depósito de la Tabla 6, se lleva a su composición exclusiva para el sistema ternario Fe-Cr-C [15], y se ubica en el diagrama de la Figura 3 (Punto "a" para el depósito diluido y Punto "b" para el depósito sin dilución), se observa que se enmarca en la región austenítica (La presencia de manganeso enfatiza la formación de austenita). Entonces, la cristalización primaria de la aleación ocurre con la formación de dendritas de austenita. En el enfriamiento rápido posterior en estado sólido, propio del proceso de recargue por soldadura, la austenita se transforma en martensita, mediante mecanismos no difusivos. El manganeso y el cromo presentes (Tabla 6) retardan el inicio de la transformación martensítica, lo que junto a la alta velocidad de enfriamiento conduce a que no toda la austenita sea transformada, quedando austenita residual en la microestructura. Lo anterior se confirma en la microestructura obtenida por microscopía óptica, donde se observa la presencia predominante de martensita (M) con austenita residual (A) en la región interdendrítica (Figura 4a) y en el difractograma de la Figura 5, donde se muestran picos característicos de las fases con las distancias interplanares correspondientes. En la figura 4b se muestra con mayor aumento una imagen de la región martensítica, obtenida por microscopía electrónica de barrido, en la cual se observa la presencia de agujas de martensita con su ángulo de orientación característico. Se corresponde con tal microestructura del depósito, el valor medio de dureza obtenido de  $706 \pm 4 \text{ HV}_{1000}$  (63 HRC), propio de alta presencia de martensita en la microestructura.

El fundente obtenido brinda un depósito de composición química (Tabla 6) relativamente similar a la de depósitos de consumibles comerciales destinados para enfrentar la abrasión, como es el caso del depósito obtenido con un fundente para recargue por Soldadura Automática con Arco Sumergido (C- 0,38%; Si- 0,63%; Mn- 2,19%; Cr- 6,96%) o su equivalente, pero obtenido por soldadura manual con electrodo revestido (SMAW por sus siglas en inglés) (C- 0,48%; Si- 0,77%; Mn- 2,58%; Cr- 2,5%) [16]. A su vez, AWS 5.13 reporta el depósito EFe5, concebido para enfrentar la ligera abrasión (C- 0,3-0,8%; Si- 0,9%; Mn- 1,5-2,5%; Cr- 1,5-3,0%) [16]. La microestructura del depósito obtenido con el fundente experimental (Figura 4), caracterizada por la presencia de martensita y austenita residual; así como la dureza que supera los 60 HRC, es coincidente con las reportadas para los referidos depósitos de consumibles comerciales [16,17].

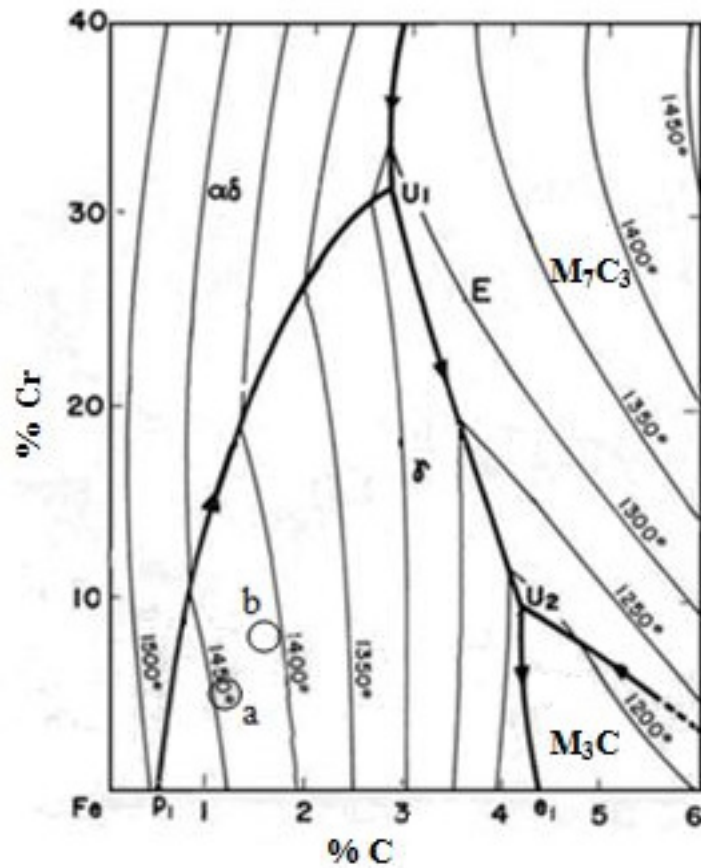
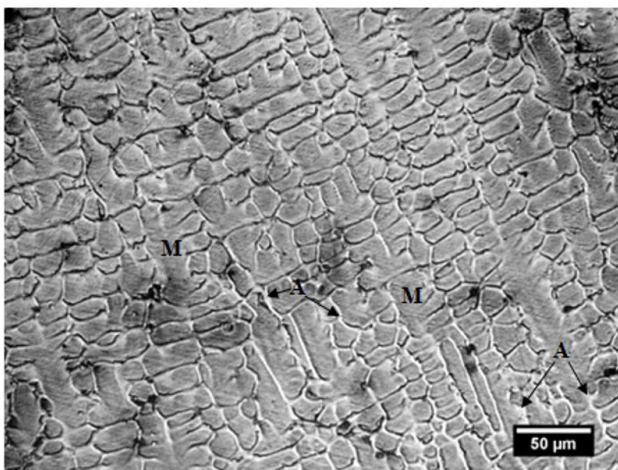
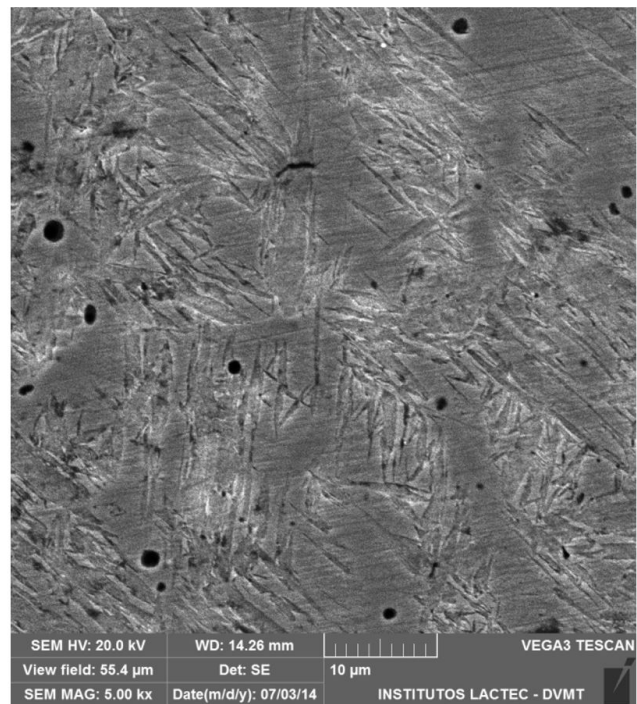


Figura 3. Superficie líquida del diagrama Fe-Cr-C. Punto "a" depósito con dilución y punto "b" depósito sin dilución.



(a)



(b)

Figura 4. Microestructura de la aleación del depósito. a) Microscopía óptica (M-martensita y A- Austenita residual), b) Microscopía electrónica de barrido.



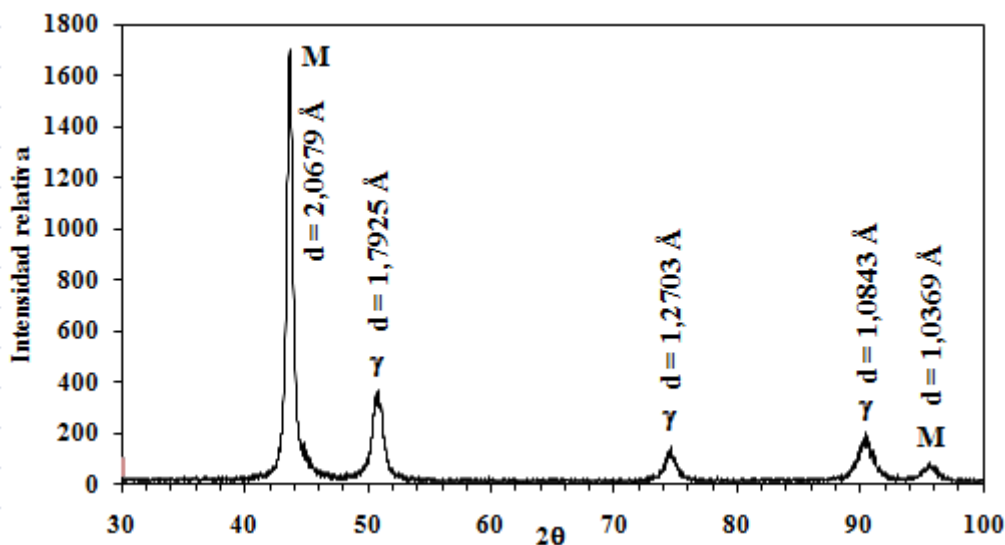


Figura 5. Diffractograma de la aleación del depósito. M-martensita,  $\gamma$ -Austenita, d- Distancia interplanar.

#### 4. Conclusiones

La aleación obtenida del proceso de fusión-reducción, para una carga mineral de 25% de cromita y 75% de pirolusita, se caracteriza por altos contenidos de cromo, manganeso y carbono (36,54%, 24,08% y 5,1%, respectivamente), lo cual la hacen viable para su aplicación en el sistema de aleación de un fundente para enfrentar el desgaste abrasivo.

La escoria obtenida se caracteriza por contenidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  que la ubican en la región superior de la espinela en el sistema ternario, con relaciones de composición muy próximas a las de una matriz de un fundente de recargue.

El fundente experimental elaborado con el empleo de la escoria en la matriz y del ferrocromo-manganeso en el sistema de aleación, brinda un depósito que se caracteriza por contenidos de cromo, manganeso y carbono que condicionan la formación de una microestructura predominantemente martensítica, con presencia de austenita residual, con dureza de 63 HRC. Por sus características, el depósito es apropiado para enfrentar la abrasión con ligero impacto.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a CAPES y a la UFU de Brasil por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

#### References

- [1] Quintana R, Cruz A, Perdomo L, Castellanos G, García LL, Formoso A, et al. Eficiencia de la transferencia de elementos aleantes en fundentes durante el proceso de soldadura automática por arco sumergido. *Revista de Metalurgia*. 2003;39(1):25-34. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i1.314>.
- [2] Cruz-Crespo A, Quintana-Puchol R, González LP, Gómez-Pérez CR, García-Sánchez LL, Ejiménez-Vielsa G, et al. Carbothermic reduction of pirolusite to obtain carbon-bearing ferromanganese and slag suited to the development of welding materials. *Welding International*. 2005;19(7):544-551. <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2005.3448>.
- [3] Mendez PF, Barnes N, Bell K, Borle SD, Gajapathi SS, Guest SD, et al. Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014;16(1):4-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>.
- [4] Riss A, Khodorovsky Y. *Production of ferroalloys*. Moscow: Foreign Languages Publishing House; 1975. 278 p.
- [5] Lucio A, Camille C, Andrade L, Minelli R, Santos R, Corre R. *Metallurgia das ferro-ligas*. Belo Horizonte: UFMG; 1980. 610 p.
- [6] Cruz A, Quintana P, Perdomo L, Garcia LL, Formoso A, Cores A. Characterization of a manganese ore to define its use in the synthesis of fluxes for submerged arc welding. *Welding International*. 2004;18(3):195-201. <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2004.3224>.
- [7] Quintana R, Perdomo L, Gómez C, Cruz A, Rodríguez M, Castellanos G, inventor. 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). Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual, Cuba, Patente No. C22C 33/00. C22C 19/05. 2002.
- [8] Perdomo-Gonzalez L, Quintana-Puchol R, Cruz-Crespo A, Castellanos-Estupiñán L, García-Sánchez L, Formoso-Prego A, et al. Empleo de cromitas refractarias para la obtención de fundentes aglomerados utilizados en la soldadura automática por arco sumergido (SAW). *Revista de Metalurgia*. 2003;39(4):268-278. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i4.338>.

- 
- [9] Quintana-Puchol R, Perdomo-González L, Cruz-Crespo A, Gómez-Rodríguez L, García-Sánchez LL, Cerpa-Naranjo A, et al. Obtención simultánea de ferroaleación multicomponente y escoria a partir de arenas negras para el desarrollo de consumibles de soldadura por arco. *Revista de Metalurgia*. 2004;40(4):294-303. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2004.v40.i4.277>.
- [10] Committee for Fundamental Metallurgy. *Slag atlas*. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H.; 1981. 282 p.
- [11] American Welding Society. AWS A5.17: specification for carbon steel electrodes and fluxes for Submerged Metal Arc Welding., Miami: AWS; 2001. 28 p.
- [12] Potapov NN. *Materiales para soldar: T 1 - gases protectores y fundentes*. Moscú: Mashinoestroyeniye; 1989. 544 p.
- [13] Potgaestki VV, Kuzmenko G. *Teoría de las escorias*. Kiev: Naukova Dumka; 1988. 255 p.
- [14] Cruz-Crespo A, Quintana-Puchol R, Perdomo-Gonzalez L, Gómez-Pérez C, Catellanos G, Díaz-Cedré E, et al. Study of relationship between the composition of a fused flux and its structure and properties. *Welding International*. 2009;23(2):120-131. <http://dx.doi.org/10.1080/09507110802349668>.
- [15] Albertin E, Beneduce F No, Teixeira IO. Adequação da composição química e do tratamento térmico de ferros fundidos de alto cromo utilizando termodinâmica computacional. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2011;8(4):223-229. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2011.035>.
- [16] Kobelco. *Welding handbook: welding consumable and processes*. Tokyo: Kobe Steel Ltd Welding Company; 2012. 265 p.
- [17] American Welding Society. AWS A5.13: specification for surfacing electrodes for shielded metal arc welding. Miami: AWS; 2000. 23 p.