

## **POTENCIALIDADES DE LAS ESCORIAS DE AFINO DEL ACERO EN LA OBTENCIÓN DE UN FUNDENTE PARA RECARGUE POR SOLDADURA**

### **POTENCIALITES OF THE STEEL REFINING SLAGS TO OBTAINING A FLUX FOR HARDFACING BY WELDING**

*Rodolfo Najarro Quintero<sup>1</sup>, Amado Cruz-Crespo<sup>2\*</sup>, Lorenzo Perdomo González<sup>2</sup>, José  
Ramírez Torrez<sup>3</sup> y Ringo John López Bustamante<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi-La Maná, Av. Los Almendros y calle Pujili sector La Virgen  
La Maná - Ecuador.

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad  
Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>3</sup> ACINOX Tunas, Ministerio de Industrias, Circunvalante Norte Km 3 ½, Las Tunas, Cuba.

Recibido: Septiembre 27, 2017; Revisado: Febrero 20, 2018; Aceptado: Mayo 25, 2018

#### **RESUMEN**

Las escorias de acería constituyen el residual más importante de la producción de acero, cuyo aprovechamiento fundamental se enfoca a la producción de materiales de la construcción, aunque en muchos casos quedan en los vertederos sin que se le de algún aprovechamiento. Dentro de estas escorias, las del proceso de afino representan 20-30 kg/t<sub>acero</sub>. En el presente trabajo se abordan la utilización de escorias blancas de acería como componente de la matriz de un fundente aglomerado para el recargue de piezas sometidas a desgaste abrasivo. A partir de la composición química de las escorias (sistema CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y su ubicación en el sistema de equilibrio de fases se evalúa la adición de modificadores al sistema de óxidos para adecuar sus propiedades. A la matriz se le añade un sistema de aleación para obtener un fundente que deposite una aleación apropiada para condiciones de desgaste abrasivo. Se concluye que el prototipo de fundente obtenido, posibilita obtener un depósito con martensita y austenita residual en la microestructura, similar al de fundentes comerciales para similar aplicación.

**Palabras clave:** reciclado de escoria de acería; recargue por soldadura; fundente.

## **ABSTRACT**

Steel slag is the most important residual of steel production, whose main use is focused on the production of building materials and in many cases remains as contaminants in landfills. Within these slags, those of the refining process represent 20-30 kg/t<sub>steel</sub>. In present work, the use of white slag from steelmaking as a component of the matrix of agglomerated flux for the hardfacing of parts subjected to abrasive wear is addressed. From the chemical composition of the slag (CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system) and its location in the phase equilibrium diagram, the addition of modifiers to oxide system is evaluated to suit its properties. An alloy system is added to the matrix to obtain a flux that deposits an alloy suitable for abrasive wear conditions. It is concluded that the obtained prototype of the flux makes possible to obtain a deposit with martensite and residual austenite in the microstructure, similar to commercial fluxes.

**Key words:** steel slags recycle; hardfacing by welding; flux.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En el caso particular de la producción de acero en horno de arco eléctrico, las escorias pueden ser de dos tipos: oxidantes y reductoras (también se conocen como negras y blancas). La escoria blanca se genera en el proceso de afino, su volumen es mucho menor en relación a las oxidantes y se caracteriza por mucho menor contenido de hierro y por poseer una cantidad alta de finos a causa del fenómeno de pulverización del silicato bicálcico durante el enfriamiento de la escoria (Boza, 2011).

La valorización más probada hasta el presente para las escorias blancas consiste en su reutilización en la producción de cemento, aunque presenta ciertas desventajas en comparación con las negras debido al pobre contenido en hierro (Méndez, 2011), (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2014). Se reporta de modo puntual el empleo de la escoria blanca como aditivo de componentes refractarios (Guzzon et al., 2007); (Memoli et al., 2006).

Muchas empresas siderúrgicas en el mundo, entre ellas las dos empresas cubanas (Antillana de Acero y ACINOX Tunas), no dan un destino útil a las escorias, convirtiéndolas en residuos sólidos. En el caso de Cuba, se han realizado un grupo importante de investigaciones sobre las escorias con intencionalidad tecnológica que incluyen como principal enfoque su aplicación en la construcción civil y como fertilizante, pero hasta la fecha no se ha sistematizado ninguna aplicación concreta (Zaragoza et al., 2000); (Suwardjo et al., 2005); (Tourón-Alonso et al., 2016); (Mondelo y Valdés., 2016); (Boza, 2011).

Los reportes referentes a la utilización de las escorias como materia prima alternativa en la obtención de consumibles para la soldadura son muy limitados. Según Patón (Patón et al., 1948) durante la segunda guerra mundial en la URSS se utilizaron escorias de altos hornos para producir fundentes para la SAW. En Cuba se reporta el empleo de escorias de soldadura SAW del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> en la obtención de un fundente aglomerado para el recargue (Cruz-Crespo et al., 2005). Por su parte, (Jerez-Pereira et al., 2007) aborda la obtención de la matriz de un fundente de recargue por Soldadura Automática por Arco Sumergido a partir de escorias de cubilote.

Dadas las particularidades de las escorias blancas de la producción de aceros en Horno Cuchara, en cuanto a composición química y la facilidad de molienda, constituyen una fuente de materia prima ideal para el desarrollo de un fundente para recargue por soldadura con proceso SAW. El consumo de escoria para la elaboración de fundente sería apenas un pequeño por ciento de la escoria blanca que se genera, por lo que seguirían siendo válidas otras propuestas de valorización de estas escorias.

Por otra parte, es consustancial a la Agroindustria del Arroz la generación de la cáscara como residual de la limpieza de los granos en los molinos, de cuya combustión se obtiene como residual una ceniza rica en  $\text{SiO}_2$ , que por sus características en composición y granulométricas podría constituir una materia prima ideal como aditivo de un fundente para SAW que requiera de la adición de  $\text{SiO}_2$ .

En base a lo planteado, el objetivo del presente trabajo se dirige a evaluar las potencialidades de las escorias de horno cuchara en el desarrollo de un fundente para el recargue por soldadura por arco sumergido para enfrentar el desgaste abrasivo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Caracterización de las escorias y metodología de obtención del fundente.

Las escorias blancas de Horno Cuchara de ACINOX Tunas, de acuerdo a los contenidos de sus óxidos mayoritarios (tabla 1) está representada por el sistema cuaternario  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ , que se valora en base al análisis del sistema ternario  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$  con diferentes contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o del sistema  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  con diferentes contenidos de MgO (Committe for Fundamental Metallurgy, 1981).

**Tabla 1.** Rangos de composición de la escoria del Horno Cuchara, en % masa

CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
35-60	13-28	3,5-10	3,0-11

En base al rango de composición de las escorias (tabla 1), fue realizado el análisis de su adecuación a las características de la matriz de un fundente para Soldadura por Arco Sumergido (SAW por sus siglas en inglés). Para ello, fue utilizado el sistema ternario  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$  con adición de 5 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Committe for Fundamental Metallurgy, 1981), valorando la migración en el sistema hacia una región más favorable desde el punto de vista de la fusibilidad. Complementariamente, fue valorada la adición de algún compuesto modificador del sistema con el propósito de favorecer las propiedades de la matriz del fundente en su desempeño.

Con el propósito de obtener el fundente, a la matriz le fueron adicionados los componentes del sistema de aleación para garantizar la composición y microestructura del depósito que responda a los requerimientos del desgaste abrasivo.

Los componentes de la matriz fueron llevados a tamaños de grano inferior a 0,25 mm y los del sistema de aleación al rango de tamaños entre 0,1 mm y 0,25 mm. Los componentes de carga fueron mezclados en un tambor rotatorio con 5° de inclinación durante 30 min, para garantizar la homogeneidad de la mezcla. La adición de componentes al tambor fue realizada en orden creciente de sus densidades para facilitar el mezclado a flujo contracorriente.

Luego de homogenizada la mezcla, el fundente fue fabricado por peletización,

utilizando como aglomerante silicato de sodio en una proporción de 30 % en relación a la masa seca de la carga. El fundente fue secado en una estufa a 120 °C durante 120 min, luego fue tamizado a una granulometría de 0,25 - 2,5 mm y calcinado en un horno mufla durante 120 min a 350 °C.

## **2.2. Obtención de los depósitos y preparación de muestras.**

Con el fundente obtenido se realizó un depósito sobre chapa de acero AISI 1020 de 300x100x8 mm, para lo cual se utilizó un alambre EL12 de 3 mm, con una corriente de 450 A con polaridad inversa, una velocidad de 27,8 cm/min, un voltaje de arco de 32 V y una altura de capa de fundente de 20 mm.

Para el análisis químico fue extraída una probeta mediante cortes transversales del depósito, a la que se le desbaste la parte superior de tal modo que se obtuvo una superficie plana con suficiente área para el análisis. Dicho análisis fue realizado por Análisis Espectral de Emisión Atómica.

La extracción de probeta para el análisis metalográfico se realizó mediante cortes transversales al depósito en una tronzadora metalográfica. La preparación metalográfica de dicha sección transversal del depósito fue realizada mediante desbaste con lija y pulido posterior con óxido de cromo. El ataque fue realizado con Nital al 2 %. La microestructura fue observada por microscopía óptica en la parte centro superior del área del depósito.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Concepción de la matriz y el fundente.**

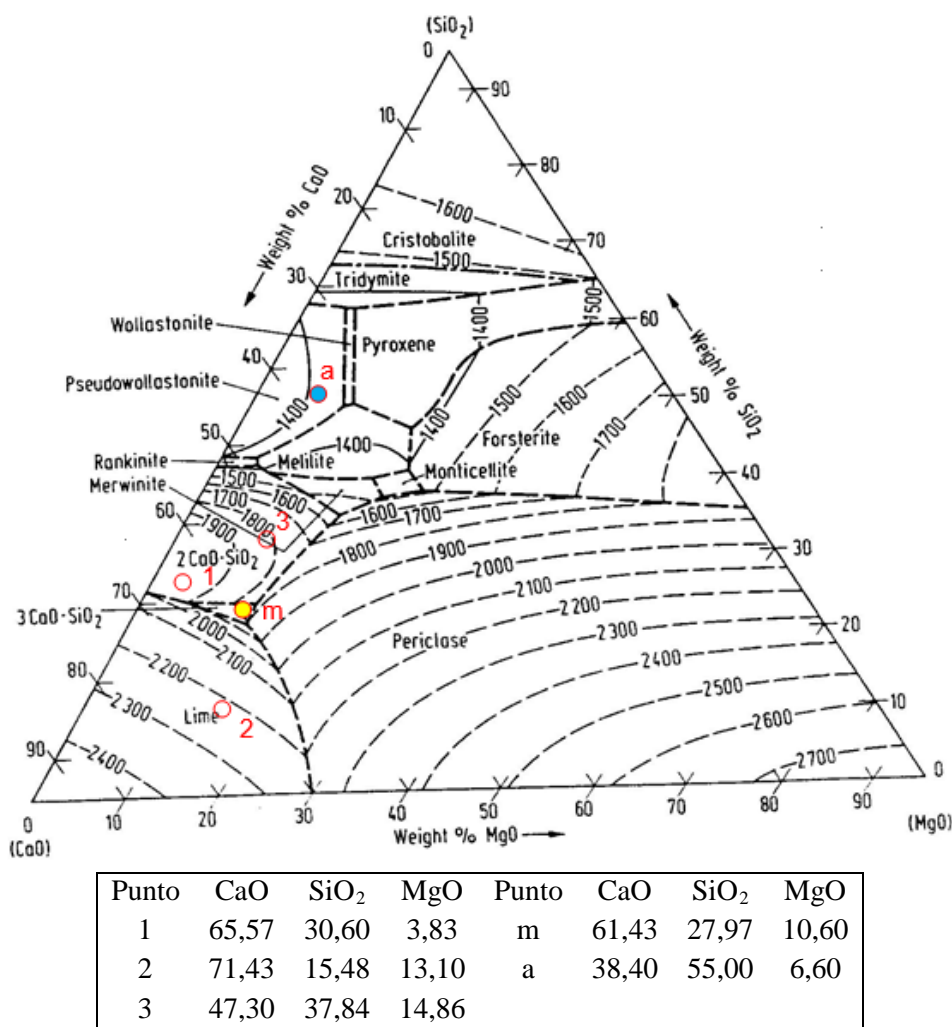
Los contenidos medios de los elementos del sistema (tabla 1), fueron llevados al 100 %, considerando tres puntos: Cuando el CaO y el SiO<sub>2</sub> son máximos y el MgO es mínimo, cuando el CaO y el MgO son máximos y el SiO<sub>2</sub> es mínimo y cuando el CaO es mínimo y el SiO<sub>2</sub> y el MgO son máximos (Figura 1). Se observa que los puntos 1 y 3 se ubican en la región de 2CaO·SiO<sub>2</sub>, con temperaturas de fusión superiores a los 1600 °C. El punto 3 se ubica en la región del CaO con temperatura de fusión superior a los 2000 °C. Las altas temperaturas de fusión de los tres puntos reflejan que para el empleo de las escorias como matriz de un fundente de recargue por soldadura con arco sumergido deben ser realizadas adiciones de SiO<sub>2</sub>, que provoquen un corrimiento en la dirección del vértice de este compuesto hacia las regiones de la wallastonita o la pseudowallastonita, con temperaturas de fusión en el entorno de los 1400 °C. De acuerdo con (Jerez-Pereira et al., 2007), es un requisito básico de un fundente para recargue por SAW que su temperatura de fusión sea inferior a la temperatura del acero, para que funda antes que el metal base y proteja al baño fundido de la contaminación.

Con el propósito de facilitar el análisis de adiciones de SiO<sub>2</sub> en base a una sola composición representativa de la escoria, fue insertado el punto medio “m” (Figura 1), el cual se enmarca en la zona de altas temperaturas, superiores a los 1800 °C.

La adición de SiO<sub>2</sub> a partir del punto medio (Figura 1), manteniendo constantes la relación CaO/MgO=5,8, conduce a un desplazamiento sobre una línea en dirección al vértice de SiO<sub>2</sub> (Figura 1). Si el punto se lleva hasta una ubicación media en la región de la pseudowallastonita, correspondiente al 55 % de SiO<sub>2</sub>, entonces % CaO + % MgO = 45 %. De la solución del sistema de ecuaciones de la suma y la relación del CaO y el

MgO se obtienen los contenidos de estos óxidos, correspondientes al punto (a) (Figura 1).

Con el propósito de aumentar la fusibilidad del sistema, se puede adicionar  $\text{CaF}_2$ , que actuaría positivamente sobre el índice de basicidad, con su efecto beneficioso sobre el desprendimiento de la escoria y sobre la transferencia de elementos de aleación. El  $\text{CaF}_2$  actúa sobre el enrejado silicático, bloqueando los enlaces Si-O por la sustitución del anión  $\text{O}^{2-}$  por F, lo que conduce a una mayor fluidez. De acuerdo a la composición de fundentes de este sistema, según (Quintana-Puchol, 2003) el valor de  $\text{CaF}_2$  podría estar en el entorno de 10 %, en relación al sistema cuaternario de óxidos.



**Figura 1.** Sistema ternario CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO, con 5 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Committe for Fundamental Metallurgy, 1981)

En base al análisis realizado arriba, la matriz del fundente estaría constituida mayoritariamente de escoria blanca. El aporte de SiO<sub>2</sub>, requerido para alcanzar el punto (a) en la figura 1, se realiza con adición a la escoria de ceniza de la combustión de paja de arroz, en este caso del CAI Sur del Jíbaro, Cuba, cuya composición se refleja en la tabla 2. El aporte de  $\text{CaF}_2$  se realiza mediante la adición de fluorita (tabla 2), que contiene casi exclusivamente este compuesto.

La adición de ceniza se ha determinado en base a la diferencia de SiO<sub>2</sub> (27,03 % de SiO<sub>2</sub> a añadir) entre el punto medio (m) y el punto (a) (Figura 1 y Tabla 1). De acuerdo con la tabla 2, la ceniza (100 % ceniza) contiene 93,5 %, entonces: (27,03 % SiO<sub>2</sub>\*100

g ceniza) /93,5 %SiO<sub>2</sub>= 28,91 g ceniza.

La adición de fluorita se ha determinado en base a la adición de 10 % de CaF<sub>2</sub>. Si, de acuerdo con la tabla 2, la fluorita (100 % fluorita) contiene 95,00 %, entonces: (10 %CaF<sub>2</sub>\*100 gfluorita) /95 %CaF<sub>2</sub>=10,53 gfluorita.

**Tabla 2.** Composición química, en % masa, de componentes adicionados a la matriz y al sistema de aleación del fundente

<i>Composición química de los minerales empleados en la matriz</i>							
	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>CaO</i>	<i>CaF<sub>2</sub></i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	<i>Otros</i>
Ceniza, %	90-97	*	-	-	-	-	*
Fluorita, %	2,87	1,12	95,00	0,88	0,10	0,03	-
<i>Composición química de los componentes del sistema de aleación</i>							
	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	-
FeCrMn	19,45	59,02	0,11	2,17	0,0036	0,17	*
Grafito	-	-	99	-	-	-	-

\*Contenidos variables de los óxidos de Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, etc. En dependencia de las características de los suelos (Cruz, 2009).

\*\*El balance para el 100 % se considera al Fe.

La carga de la matriz fue llevada a relaciones porcentuales, quedando de la siguiente forma: 71,73 % de escoria, 20,74 % de ceniza y 7,53% de fluorita.

Para que el depósito responda a la abrasión con ligero impacto se decide añadir un sistema de aleación al fundente que garantice la presencia de cromo, manganeso y carbono que propician una microestructura de martensita con austenita residual. La composición de los componentes del sistema de aleación a añadir se muestra en la tabla 2 (Cruz-Crespo et al., 2005). Será añadida una carga de aleación que representa el 17 % del fundente, siendo el resto (83 %) la matriz. La carga en por ciento masa del fundente queda constituida como: Escoria - 59,54 %; ceniza - 17,21 %; fluorita- 6,25 %; grafito – 3 %; FeCrMn – 14 %.

El hecho que más del 75 % de las materias primas para la obtención del fundente sean la suma de dos residuales, escoria y cenizas, se valora de manera altamente positivo desde el punto de vista medioambiental.

### 3.2. Caracterización del depósito.

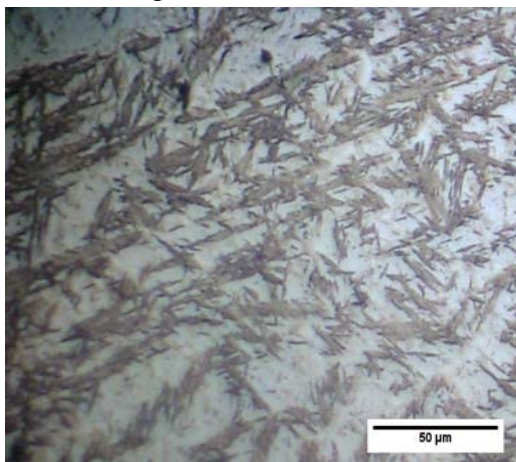
En la tabla 3 se muestra la composición química media del depósito experimental. Este presenta contenidos relativamente similares al de depósitos de consumibles comerciales propios para enfrentar la ligera abrasión, como es el caso del obtenido con el fundente MF-30/USH-600, destinado también para recargue por SAW, cuya composición es: C-0,38 %; Si-0,63 %; Mn-2,19 %; Cr-6,96 % (Kobelco Welding Handbook, 2012). Esta misma fuente reporta el depósito HF600, equivalente al anterior, pero obtenido por soldadura manual con electrodo revestido (SMAW por sus siglas en inglés), cuya composición es: C-0,48 %; Si-0,77 %; Mn-2,58 %; Cr-2,5 %. Por su parte, la AWS 5.13 reporta el depósito EFe5 destinado al recargue para enfrentar la ligera abrasión, cuya composición es: C-0,3-0,8 %; Si-0,9 %; Mn-1,5-2,5 %; Cr-1,5-3,0 % (AWS A5.13, 2000).

**Tabla 3.** Composición química de los depósitos, en % masa

<i>Depósito</i>	C	Si	Mn	Cr	P	S
<i>Experimental</i>	0,66	1,13	3,62	1,05	0,004	0,046

En el caso particular del manganeso el depósito experimental presenta un contenido ligeramente superior al de los comerciales, lo cual puede favorecer la capacidad de este para soportar impactos por la presencia de austenita residual. A su vez, el Cr es ligeramente inferior en el experimental, pero ello estaría compensado por el alto contenido de carbono.

La microestructura del depósito, caracterizada por la presencia de agujas de martensita y austenita residual, es mostrada en la figura 2. Esta microestructura es coincidente con las reportadas para depósitos de consumibles comerciales destinados a enfrentar el desgaste abrasivo (Kobelco Welding Handbook, 2012; AWS A5.13, 2000).



**Figura 2.** Microestructura del depósito

#### 4. CONCLUSIONES

1. Las escorias blancas de Horno Cuchara de la producción de aceros al carbono son viables de emplear en el desarrollo de un fundente para recargue por Soldadura Automática bajo Arco Sumergido (SAW), ya que presentan un sistema mayoritario de óxidos ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ ), que posibilita la conformación de matrices de fundentes para estas aplicaciones y no presentan altos contenidos de compuestos indeseados como los óxidos de hierro, de cromo, de fósforo o altos contenidos de azufre.
2. El fundente obtenido da un depósito caracterizado por contenidos de carbono, cromo y manganeso y una microestructura de martensita y austenita residual, propios para enfrentar el desgaste abrasivo con ligero impacto, similar a los que se obtienen con fundentes comerciales destinados para las mismas condiciones de servicio.
3. En la conformación del fundente se emplean como materias primas mayoritarias dos residuales sólidos: escoria (59,54 % de la carga) y ceniza de paja de arroz (17,21% de la carga). Esto significa que la elaboración del fundente tributa de manera positiva al cuidado del medio ambiente.

## REFERENCIAS

- AWS, A5.13, Specification for surfacing electrodes for Shielded Metal Arc Welding., 2000, pp. 303-324.
- Boza, M., Utilización de las escorias de acería como material de construcción., *Ciencia & Futuro*, Vol.1, No. 4, 2011, pp. 31-40.
- Committe for Fundamental Metallurgy, Slag atlas., Ed. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Germany, 1981, pp. 80-84.
- Cruz, J.C., Empleo de la cáscara del arroz como material auxiliar en la fundición de piezas de acero al carbono., Tesis presentada en opción al grado académico de Máster en Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2009. Cuba.
- Cruz-Crespo, A., Quintana-Puchol, R., García, L.L., Perdomo, L., Jiménez, G., Gómez, C.R., Alguacil, F.J. y Cores, A., Empleo de escorias de soldadura del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la obtención de un nuevo fundente aglomerado aleado., *Rev. Metal. Madrid*, Vol. 41, No. 1, 2005, pp. 3-11.
- Guzzon, M., Mapelli, C., Memoli, F., Marcozzi, M., Recycling of ladle slag in the EAF: improvement of the foaming behaviour and decrease of the environmental impact., *La Revue de Métallurgie-CIT*, Vol. 104, No. 4, 2007, pp. 171-178.
- Jerez-Pereira, R., Cruz-Crespo, A., Quintana, R., Perdomo, L., Aprovechamiento de escorias de fundición de empresas del sector azucarero en la obtención de matriz de un fundente aglomerado para recuperación de piezas del propio sector., *Centro Azúcar*, Vol. 34, No. 2, 2007, pp. 43-49.
- Kobelco Welding Handbook: Welding consumable and processes., Kobe Steel, LTD., Welding Company, 2012, pp. 276-279.
- Memoli, F., Brioni, O., Mapelli, C., Guzzon, M., Sonetti, O., Recycling of ladle slag in the EAF: A way to improve environmental conditions and reduce variable costs in the steel plants. The results of Stefana SpA (Italy)., *Proceedings Volume II, AISTech 2006*, pp. 1171-1179.
- Méndez, A., Proyecto sobre residuos: Utilización de escorias como sustitutos de áridos., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster Profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Escuela de Organización Industrial, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011, España.
- Mondelo, F.M., Valdés, A., Empleo de escoria blanca del horno cuchara como fundente parcial, sustituyendo la cal en el horno de arco eléctrico., *Convención y exposición Internacional de la Industria Cubana, CUBAINDUSTRIA 2016*, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, junio de 2016, pp. 1-10.
- Patón, E.O., Soldadura automática bajo fundente., Kiev. Editorial Mashqiz, 1948, pp. 1-344.
- Quintana-Puchol, R., Cruz-Crespo, A., Perdomo, L., Castellanos, G., García, L.L., Formoso, A. y Cores, A., Eficiencia de la transferencia de elementos aleantes en fundentes durante el proceso de soldadura automática por arco sumergido., *Rev. Metal. Madrid*, Vol. 39, No. 1, 2003, pp. 25-34.
- Sociedad Pública de Gestión Ambiental., IHOBE, S.A. Libro blanco para minimización de residuos y emisiones: Escorias de acería, IHOBE, S.A, 2014, pp. 1-127.
- Suwardjo, W., Fidalgo, Y., García, L., Santiesteban, A., Bolivar, J., Kindelan, M.,



- Perez, H., Caracterización, formulación y micro peletización de escorias metalúrgicas para su empleo en la agricultura., XI Congreso Metalúrgico Cubano, METALURGIA 2005, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, julio de 2005, pp. 1-11.
- Tourón-Alonso, G., Herrera-Valdés, G., Skerrit-García, M., Fabelo-Rodríguez, A., Barceló-Reyes, O., Barrera-Leyva, Y., Requisitos para las escorias de horno de arco eléctrico y metalurgia secundaria en antillana de acero., Convención y exposición Internacional de la Industria Cubana, CUBAINDUSTRIA 2016, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, junio de 2016, pp. 1-7.
- Zaragoza, R., Nasur, A., Alix, A., Gómez, C., Tápanes, D., Utilización de las escorias del horno de arco eléctrico como árido en la fabricación de bloques para la construcción., 5ta Convención y Feria Internacionales, METANICA 2000, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, julio de 2000, pp. 1-18.