

**Artículo Original**

**ENFOQUE DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LA OBTENCIÓN DE FUNDENTES PARA EL RECARGUE CON EMPLEO DE ESCORIAS**

**CIRCULAR ECONOMY APPROACH FOR OBTAINING FLUXES FOR HARDFACING WITH THE USE OF SLAG G**

Katty Pilar Jadán Solís<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2388-7607>  
Amado Cruz Crespo<sup>2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0227-9853>  
Rodolfo Najarro Quintero<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6760-4269>  
Lorenzo Perdomo González<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3425-1487>

<sup>1</sup> Departamento de Economía, Facultad de Ciencias Sociales, Económicas y Financiera, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo – Ecuador.

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

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi-La Maná, Ecuador.

Recibido: Diciembre 29, 2022; Revisado: Enero 8, 2022; Aceptado: Enero 30, 2023

**RESUMEN**

**Introducción:**

La producción de fundentes para el recargue mediante soldadura por arco sumergido se basa en el consumo de minerales naturales. Sin embargo, hay escorias que contienen los sistemas de óxidos requeridos para un fundente. El recargue posibilita reincorporar al servicio piezas desgastadas.

**Objetivo:**

Evaluar, con enfoque de Economía Circular, la obtención de fundentes a partir de escorias para el recargue por soldadura por arco sumergido.

**Materiales y Métodos:**

Se plantea un esquema conceptual, con enfoque de Economía Circular, de obtención de fundentes para el recargue, usando escorias y concibiendo el recargue para la restitución al servicio de piezas desgastadas o para fabricar piezas de mayor durabilidad. Son planteadas dos variantes: La producción de ferroaleaciones, usando las escorias como matriz de un fundente, y la obtención de fundentes, utilizando escorias descartadas de otras producciones.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Amado Cruz, Email: [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)



### **Resultados y Discusión:**

Son abordados diferentes casos: 1. Obtención de ferrocromo-manganeso, concibiendo el uso de las escorias como matriz de un fundente de recargue; 2. Obtención de un fundente para recargue, empleando escorias de la soldadura por arco sumergido; 3. Obtención de un fundente para recargue, empleando escorias de la producción de acero. Los fundentes obtenidos posibilitan el recargue, para la rehabilitación de piezas desgastadas o para la fabricación de piezas más resistentes al desgaste.

### **Conclusiones:**

Es validado el esquema conceptual, con enfoque de Economía Circular, en la obtención de fundentes para recargue con empleo de escorias, posibilitando la restitución al servicio de piezas desgastadas o la fabricación de piezas de mayor durabilidad.

**Palabras clave:** economía circular; escorias; fundentes; recargue; soldadura por arco sumergido.

### **ABSTRACT**

#### **Introduction:**

The production of fluxes for hardfacing by submerged arc welding is based on the consumption of natural minerals. However, there are slags that contain the oxide systems required for a flux. Hardfacing makes it possible to reincorporate worn parts into service.

#### **Objective:**

To evaluate, by means of the Circular Economy approach, the obtaining of fluxes from slags for hardfacing by submerged arc welding.

#### **Materials and Methods:**

A conceptual scheme is proposed, with a Circular Economy approach, to obtain fluxes for hardfacing, using slag and conceiving hardfacing for the restitution to service of worn parts or to manufacture parts with greater durability. Two variants are proposed: The production of ferroalloys, using slags as matrix for a flux, and the obtaining of fluxes, using slags discarded from other productions.

#### **Results and Discussion:**

Different cases are addressed: 1. Obtaining ferrochromium-manganese, conceiving the use of slags as a matrix of a hardfacing flux; 2. Obtaining a hardfacing flux, using slags from submerged arc welding; 3. Obtaining a hardfacing flux, using slag from steel production. The fluxes obtained make hardfacing possible, for the rehabilitation of worn parts or for the manufacture of more wear-resistant parts.

#### **Conclusions:**

The conceptual scheme is validated, by a Circular Economy approach, in obtaining fluxes for hardfacing with the use of slag, making possible the restoration to service of worn parts or to manufacture new, higher-quality parts.

**Keywords:** circular economy; slags; fluxes; hardfacing; submerged arc welding.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

La Economía Circular se presenta como una alternativa al actual modelo de producción y consumo, con el potencial de resolver retos medioambientales, al mismo tiempo que abre oportunidades de negocio y crecimiento económico. Se propone como la alternativa lógica y viable, que corrige los principales problemas de la linealidad y pretende conseguir que los productos, componentes y recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento o lo que es lo mismo, residuos cero (Arroyo, 2018). Varios autores abordan la concepción de la Economía Circular como una solución viable en sectores altamente consumidores de recursos minerales naturales y generadores de grandes volúmenes de residuales (Guadagnino y col., 2018; Branca y col., 2020; Sithole y col., 2022).

La producción de consumibles para la soldadura y en particular para la producción de fundentes para el recargue de piezas por arco sumergido ha estado caracterizada por el consumo de recursos minerales naturales (Quintana-Puchol y col., 2011). Sin embargo, se han realizado estudios dirigidos al diseño de procesos de obtención de ferroaleaciones, donde, tanto la aleación como la escoria son concebidos como semiproductos para la obtención de un fundente para el recargue de piezas (Cruz-Crespo y col., 2019). También, se han realizado estudios de utilización de escorias de la unión por soldadura por arco sumergido de elementos de acero, en la obtención de un nuevo fundente para el recargue por arco sumergido de componentes desgastados o para la fabricación por recargue de piezas nuevas (Cruz-Crespo y col., 2017); así como del empleo de escorias de afino del acero en horno cuchara para la obtención de un fundente de recargue de piezas sometidas a abrasión (Najarro y col., 2018). El hecho de que los fundentes para recargue sean destinados a recuperar piezas desgastadas para restituirle su capacidad de trabajo y alargar su vida útil o a fabricar piezas nuevas de alta durabilidad, lleva implícito el concepto de la Economía Circular. Si el fundente es fabricado a base de escorias (residuo sólido), el enfoque de Economía Circular se enfatiza. No obstante, a los estudios realizados con vistas a la búsqueda de sostenibilidad, hasta el presente no se ha sistematizado el enfoque de la Economía Circular, quedando aun aristas de potencialidades no abordadas.

Se añade a lo anterior, que la utilización de una escoria implica también aprovechar la energía que fue consumida en la formación de los silicatos que la componen. De igual modo, la rehabilitación de una pieza desgastada lleva inmerso el ahorro de energía y recursos necesarios para la fabricación de una pieza nueva de repuesto. El recargue posibilita reincorporar al servicio piezas desgastadas o fabricar piezas nuevas de mayor durabilidad.

En base a lo planteado, el presente trabajo tiene como objetivo, evaluar, con enfoque de Economía Circular, la obtención de fundentes a partir de escorias para el recargue por soldadura por arco sumergido.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

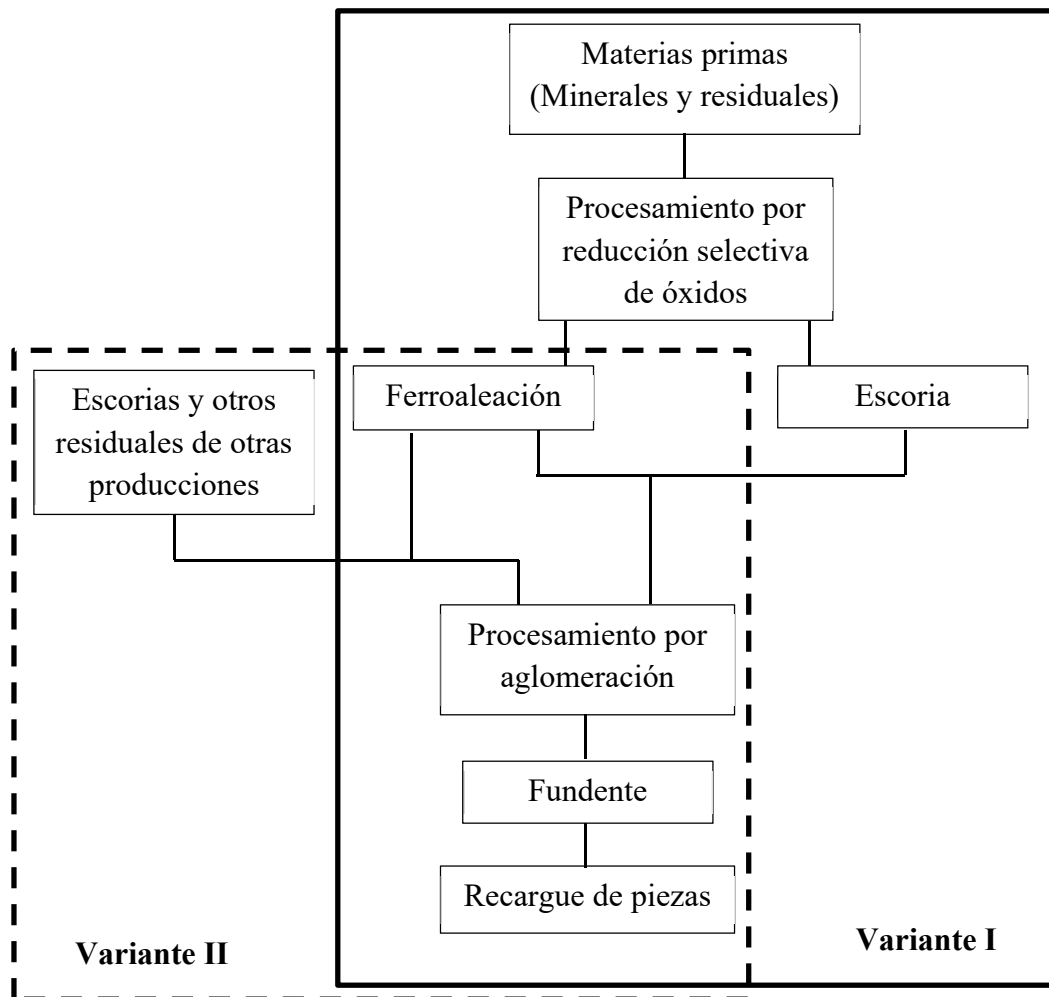
### ***2.1. Esquema conceptual de la obtención de fundentes para recargue con empleo de escorias***

En la Figura 1 se muestra el esquema conceptual, con enfoque de Economía Circular, en la obtención de fundentes para recargue de piezas descartadas por desgaste. Son

---

abordadas dos variantes:

- Concibe la obtención de fundente, a partir de la adecuación de las escorias del proceso de reducción de minerales en la elaboración de una ferroaleación, utilizando parte de esta última como carga de aleación del propio fundente. El fundente es utilizado en la rehabilitación y fabricación de piezas por recargue. Se enmarca en el cuadro de líneas continuas (Figura 1, Variante I).
- Concibe la obtención de fundente a base de escorias y residuales de otras producciones, utilizando como carga de aleación ferroaleación del proceso de reducción de minerales. El fundente es utilizado en la rehabilitación y fabricación de piezas por recargue. Se enmarca en el cuadro de líneas discontinuas (Figura 1, Variante II).



**Figura 1.** Esquema conceptual de la obtención de fundentes para recargue con empleo de escorias

## **2.2. Obtención de los fundentes**

En correspondencia con el esquema de la Figura 1 (Variante I), se valora la obtención de un fundente para recargue de piezas desgastadas por abrasión, concibiendo el aprovechamiento de la escoria de la reducción simultánea de cromita y pirolusita como matriz del fundente y utilizando la ferroaleación como carga de aleación (Cruz-Crespo y

col., 2019). El proceso de reducción se ejecuta en un horno de arco de corriente continua, realizando el vertido en agua. Los productos son separados por tamizado, luego de llevados a la granulometría correspondiente son mezclados en las proporciones correspondientes y aglomerados por peletización, con empleo de silicato de sodio como aglomerante. Con el fundente obtenido se obtienen y caracterizan depósitos, para evaluar el desempeño para el recargue de piezas sometidas a abrasión.

De manera similar, en correspondencia con el esquema de la Figura 1 (Variante II), es valorada la obtención de dos fundentes para recargue de piezas desgastadas por abrasión, empleando escorias y residuales de otras producciones, así como FeCrMn en calidad de carga de aleación (Cruz-Crespo y col., 2017; Najarro y col., 2018). La mezcla de componentes de la matriz y de carga de aleación es aglomerada por peletización con empleo de silicato de sodio. Con los fundentes obtenidos se obtienen y caracterizan depósitos, para evaluar el desempeño para el recargue de piezas sometidas a abrasión.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### ***3.1. Análisis, con enfoque de la Economía Circular, de la obtención de fundentes para recargue de piezas desgastadas con adecuación de escorias de reducción selectiva de óxidos***

En la Figura I (Variante I), como fue declarado en el epígrafe 2.1, se muestra el procesamiento por reducción de óxidos, que conduce a la obtención de ferroaleación y de una escoria, que se concibe para la matriz de un fundente; o sea, que el proceso está diseñado con cero residual. En ese proceso, la cantidad de aleación que se obtiene está en exceso con relación a la cantidad de escoria obtenida para usar en la matriz de un fundente (Cruz-Crespo y col., 2019). El fundente es destinado al recargue para la rehabilitación de piezas que salen de servicio por desgaste abrasivo, constituyendo el retorno de una chatarra al servicio. También, el fundente puede ser empleado para la fabricación por recargue sobre un sustrato de piezas nuevas de mayor durabilidad. El concebir, el empleo de residuales como materias primas de partida, la adecuación de la escoria para su empleo y el retorno al servicio de piezas descartadas, constituyen elementos que validan el carácter de Economía Circular de esta variante de procesamiento (Arroyo, 2018).

Al particularizar en el trabajo, referente a la obtención de fundente para recargue, a partir de la reducción simultánea de cromita y pirolusita (Cruz-Crespo y col., 2019) y desde la mirada de la Economía Circular, cabe destacar que podría ser sustituida la arena sílice, como aportadora de SiO<sub>2</sub> en los componentes de carga, por cenizas residuales de la combustión de la cascarilla del arroz, o de la combustión del bagazo en calderas de centrales azucareros, o, incluso, de la combustión del marabú en cocinas rústicas (Cruz, 2009; Cruz-Crespo y col., 2021a; Cruz-Crespo y col., 2021b). En igual sentido, la caliza (de alto contenido de CaCO<sub>3</sub>) podría ser sustituida por polvos de mármol, generados como residual durante el corte de piezas de este material (Jerez-Pereira y col., 2007). Por los relativamente pequeños volúmenes requeridos para satisfacer una demanda de carácter productivo de fundente (Cruz-Crespo y col., 2019), las instalaciones experimentales a nivel de banco podrían ser suficientes. En este caso, el reductor a utilizar (coque), se enmarca en un tamaño de grano que constituye un rechazo de las fundiciones de hierro en hornos de cubilote. Los volúmenes de rechazo de coque en las fundiciones superan

---

con creces lo requerido para la elaboración de fundentes por esta vía. Como alternativa, y para enfatizar en el enfoque de Economía Circular, dicho coque podría ser sustituido por finos, descartados de la producción de carbón vegetal, ya que este último es un material renovable. La idea de sustituir materias primas a base de recursos minerales, por materias primas residuales, refuerza el carácter de Economía Circular de la obtención de fundente por esta variante de procesamiento.

En el referido trabajo (Cruz-Crespo y col., 2019), se obtuvo que del total de los productos de reducción (escoria + ferrocromo-manganeso) 67,62 % corresponde a la escoria y 32,38 % a la ferroaleación, al tiempo que, en la conformación del fundente, la matriz representa el 84 % y el 16 % lo representa el sistema de aleación. Lo anterior indica que en el entorno del 50 % del ferrocromo-manganeso obtenido queda en exceso y puede ser utilizado como carga de aleación de fundentes obtenidos a base de otra matriz. El hecho que se conciba integrar el exceso de aleación, obtenida por la Variante I (Figura 1) a la producción de otro fundente, también de recargue, por la Variante II, denota que existe una simbiosis de procesos y producciones.

El metal que se deposita con el fundente obtenido se considera apropiado para enfrentar el desgaste abrasivo, ya que se caracteriza por significativos 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 (Cruz-Crespo y col., 2019).

### ***3.2. Análisis, con enfoque de la Economía Circular, de la obtención de fundente a base de escorias y residuales de otras producciones, utilizando como carga de aleación ferroaleación del proceso de reducción de minerales***

En la Figura I (Variante II), se muestra la obtención de fundente a base de escorias y residuales de otras producciones, utilizando como carga de aleación ferroaleación del proceso de reducción de minerales. El fundente es concebido para el recargue de rehabilitación de piezas que salen de servicio por desgaste abrasivo, alargando el ciclo de generación de chatarra; o para la fabricación de piezas nuevas de mayor resistencia al desgaste. El empleo de residuales como materias primas de partida y el retorno de piezas descartadas al servicio, validan el carácter de Economía Circular de esta variante de procesamiento.

En la obtención de un fundente, empleando escorias de la soldadura por arco sumergido de uniones de aceros al carbono (Cruz-Crespo y col., 2017), al enfatizar en el enfoque de la Economía Circular, podría ser considerada la sustitución de la caliza (de alto contenido de  $\text{CaCO}_3$ ) por polvos de mármol, generados como residual durante el corte de piezas de este mineral (Jerez-Pereira y col., 2007). En el trabajo referencia para este caso (Cruz-Crespo y col., 2017), el aporte de cromo y manganeso se realiza con ferroaleaciones independientes, al tiempo que se advierte para ambos elementos tendencias de comportamientos similares, en función de la composición de los fundentes. Esto indica que ambas ferroaleaciones podrían ser sustituidas por ferrocromo-manganeso, resultante en exceso, según lo abordado en el epígrafe 3.1.

El metal depositado con el fundente reportado por Cruz-Crespo y col., (2017), presenta una microestructura con predominio de martensita, con cierta presencia de austenita residual, en correspondencia con los significativos contenidos de carbono, cromo y

---

manganeso, que evidencian que es viable para el trabajo en condiciones de desgaste abrasivo.

En el trabajo relacionado a la obtención de un fundente para recargue, empleando escorias de afino del acero (Najarro y col., 2018), se puede advertir la presencia de elementos que caracterizan la Economía Circular: En primera instancia se emplean escorias residuales de la producción de acero, que son depositadas en vertederos; por otra parte, se utilizan cenizas de la combustión de cascarilla del arroz, que constituye un residual agroindustrial; por último, se destina el fundente al recargue de piezas desgastadas por abrasión para devolverles su vida útil, o sea, se retorna al servicio elementos metálicos que podrían ser clasificados como chatarra. También, el fundente puede ser empleado en la fabricación por recargue de piezas nuevas de mayor durabilidad. En este caso, el aporte de cromo y manganeso se realiza con ferrocromo-manganeso, resultante en exceso, según lo abordado en el epígrafe 3.1.

El fundente obtenido en este caso posibilita la obtención de un metal depositado, que se considera adecuado para el trabajo al desgaste abrasivo, ya que se caracteriza por significativos contenidos de carbono, cromo y manganeso y por una microestructura con agujas de martensita y con presencia de austenita residual (Najarro y col., 2018).

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Se valida un esquema conceptual, con enfoque de Economía Circular, de la obtención de fundentes para recargue con empleo de escorias y que propicia la rehabilitación de piezas desgastadas o la fabricación de piezas de mayor durabilidad.
2. El esquema integra dos variantes de procesamiento, estableciendo simbiosis entre ellas. La Variante I concibe un proceso reductivo para la obtención de dos productos para fabricar un fundente, una aleación para la carga de aleación y una escoria para la matriz. La Variante II concibe la obtención de fundentes a base de escorias de otras producciones y empleando la ferroaleación obtenida por la Variante I.
3. Los tres casos de estudio valorados confirman el carácter de Economía Circular de la obtención de fundente para recargue a partir de escorias, al tiempo que se encuentran otras potencialidades de sustitución de minerales por residuales para enfatizar aún más dicho carácter de Economía Circular.

#### **REFERENCIAS**

Arroyo, F.R., La Economía Circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo., *INNOVA Research Journal*, Vol. 3, No. 12, 2018, pp. 78-98.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6828555>

Branca, T.A., Colla, V., Algermissen. D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A., Pietruck, R., & Rosendahl, S., Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe., *Metals*, Vol. 345, No. 10, 2020, pp. 2-18.

<https://doi.org/10.3390/met10030345>

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, Cuba, 2009.
- Cruz-Crespo, A., Perdomo, L., Fernández, R., y Scotti, A., Composición química y microestructura del metal depositado con fundentes obtenidos con empleo de escorias del sistema MnO-SiO<sub>2</sub>-CaO., *Centro Azúcar*, Vol. 44, No. 3, 2017, pp. 43-52. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612017000300005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612017000300005)
- Cruz-Crespo, A., Perdomo-González, L., Quintana-Puchol, R., y 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*, Vol. 24, 2019, e2424, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.24>
- Cruz-Crespo, A., Acevedo, M., Acevedo, M., Rodríguez, M., Duffus, A., y Rodríguez, E., Concepción de un electrodo SMAW para el recargue de elementos de máquinas agrícolas con empleo de recortes de alambre de traviesas y de cenizas de la combustión del bagazo., III Convención Científica Internacional (Simposio Internacional de Industria), Santa Clara, Cuba, 2021a, pp. 1-13. <https://convencion.uclv.cu/es/event/simposio-internacional-de-industria-109/track/concepcion-de-un-electrodo-smaw-para-el-recargue-de-elementos-de-maquinas-agricolas-con-empleo-de-recortes-de-alambre-de-traviesas-y-de-cenizas-de-la-combustion-del-bagazo-3567>
- Cruz-Crespo, A., Cruz, M., Ortiz, T., Acevedo, M., Rodríguez, M., y Duffus, A., Potencialidades de las cenizas de la combustión del marabú y de los finos de la producción de carbón como componentes de un revestimiento periférico para la conversión de electrodos de soldadura a electrodos de recargue., III Convención Científica Internacional (Simposio Internacional de Industria), Santa Clara, Cuba, 2021b, pp. 1-12. <https://convencion.uclv.cu/es/event/simposio-internacional-de-industria-109/track/potencialidades-de-las-cenizas-de-la-combustion-del-marabu-y-de-los-finos-de-la-produccion-de-carbon-como-componentes-de-un-revestimiento-periferico-para-la-conversion-de-electrodos-de-soldadura-a-electrodos-de-recargue-3628>
- Guadagnino, P., Cantone, L., Conte, P., Pocina, G., Matarazzo, A., & Bertino, A., Techniques of reuse for slags and flakes from the steel industry: a circular economy perspective., *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 93-99. [http://www.procedia-esem.eu/pdf/issues/2018/no2/11\\_Guadagnino\\_18.pdf](http://www.procedia-esem.eu/pdf/issues/2018/no2/11_Guadagnino_18.pdf)
- Jerez-Pereira, R., Cruz-Crespo, A., Quintana, R., y 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. [http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/555](http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/555)
- Najarro, R., Cruz-Crespo, A., Perdomo, L., Ramírez Torrez, J., y López, R.J., Potencialidades de las escorias de afino del acero en la obtención de un fundente para recargue por soldadura., *Centro Azúcar*, Vol. 45, No. 4, 2018, pp. 32-40.
-



[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612018000400004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612018000400004)

Quintana-Puchol, R., Gómez-Pérez, C.R., Cruz-Crespo, A., y Perdomo-González, L., Evaluación de Matrices Vítreas del Sistema SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO para Fundentes Aglomerados a través la Basicidad Óptica y Criterios estructuro-químicos., Soldag. insp., Vol. 16, No. 2, 2011, pp. 137-145.

<https://www.scielo.br/j/si/a/KcpttTsRS7ch5njXNwGx4WN/?lang=es&format=pdf>

Sithole, N.T., Tsetetsi, N.T., Mashifana, T., & Sillanpaa, M., Alternative cleaner production of sustainable concrete from waste foundry sand and slag., Journal of Cleaner Production, Vol. 336, 2022, 130399, pp. 1-11.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130399>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc Katty Pilar Jadán Solís. Conceptualización, redacción - primera redacción, metodología.
  - Dr.C. Amado Cruz Crespo. Conceptualización, redacción - revisión y edición, supervisión.
  - M.Sc. Rodolfo Najarro Quintero. Análisis formal, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Análisis formal, redacción - revisión y edición.
-