

ALTERNATIVA DE RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS METÁLICOS EN RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

RECOVERY METALLIC ELEMENTS FROM SOLID INDUSTRIAL RESIDUES ALTERNATIVE

István Gómez Ríos^{1}, Lorenzo Perdomo González¹, Amado Cruz Crespo¹
y Rafael Quintana Puchol²*

¹ 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.

² Departamento de Licenciatura en Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

Recibido: Febrero 27, 2018; Revisado: Junio 21, 2018; Aceptado: Septiembre 28, 2018

RESUMEN

La creciente producción de elementos metálicos trae como consecuencia la generación de subproductos, los que en muchos casos son considerados como residuales industriales. En el trabajo se propone una alternativa de disminución de estos residuales mediante procesamiento aluminotérmico. La mezcla estudiada está formada por cascarilla, proveniente de los procesos de laminación en caliente del acero, por virutas de aluminio proveniente de los procesos del maquinado y corte de perfiles y por ceniza de la combustión del petróleo. Como resultado del proceso se obtuvo una aleación de hierro con contenidos de carbono de 3,62 %, de silicio de 0,47 %, de manganeso de 0,25 % y de aluminio de 11,16 %, además se recuperan un grupo de otros elementos de aleación de apreciable valor, tales como: Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb, y Co. La evaluación del proceso se realiza a partir de una comparación de los resultados obtenidos con los previstos en el balance de masa. La aleación obtenida tiene perspectivas de uso en la industria.

Palabras clave: aluminotermia; cenizas de combustión; cascarillas.

ABSTRACT

The increasing production of metallic elements results in the generation of large number of by-products which in many cases are considered as industrial residuals. In this paper

Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: István Gómez, Email: istvan@uclv.cu

an alternative to reduce these residuals by an aluminothermy process is proposed. The mixture studied consists in particles from steel hot rolling processes, aluminum chips from the profiles machining and cutting processes and ash from petroleum combustion of. As a result of this process an iron alloy with carbon contents of 3.62%, silicon of 0.47%, manganese of 0.25% and aluminum of 11.16% was obtained. In addition groups of other alloy elements with appreciable value, such as: Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb, and Co appears. The process evaluation is made from a comparison of the results obtained with those predicted in mass balance. The alloy obtained has prospects for industrial use.

Key words: aluminothermy, bottom ash, mill scale.

1. INTRODUCCIÓN

La disminución del impacto medioambiental provocado por la contaminación de los residuales sólidos industriales y lograr determinado valor agregado mediante su recuperación es premisa de muchos países. Ejemplo de ello, lo constituye la recuperación de la cascarilla generada en los procesos de laminación en caliente del acero (barras corrugadas y lisas, alambIÓN), (Eissa et al., 2015) , proceso que genera entre 30 - 45 kg/t de acero laminado, Hernández (2003). En Cuba se produjo, entre los años 2010 y 2014, un promedio por año de 360 000 toneladas de barras corrugadas y aceros al carbono, generándose por tanto unas 13 700 toneladas de cascarilla anualmente (ONEI, 2015).

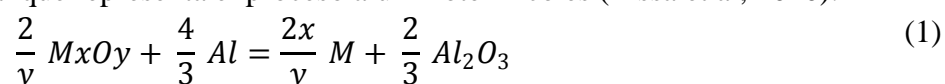
Existen procesos que permiten el aprovechamiento de este producto, Hernández (2003). En el caso de Cuba, la cascarilla es utilizada en algunas fundiciones, como fuente de oxígeno durante los procesos de desoxidación del acero, aunque la mayor parte de este residuo no se utiliza, a pesar de que se estudian diferentes variantes de empleo (Gómez, 2015), (Fernández, 2016).

Otro residual a valorar son las cenizas de fondo, provenientes de las calderas de combustión del petróleo de las empresas refinadoras de hidrocarburos y de la generación de energía eléctrica, depositándose entre 200 - 250 t/año de este desecho, el cual contiene elementos metálicos de gran significado (Gómez, 2015), (Hernández, 2003), (Gómez, 2015). Existen varios países con tecnologías para la recuperación de estos metales, fundamentalmente los presentes en las cenizas volantes (fly ash), no siendo así para las cenizas de fondo (bottom ash) (Menéndez et al., 2013).

Por otro lado, los procesos de corte de los laminados de aluminio generan importantes cantidades de virutas. En la Empresa Antenas de Villa Clara la generación de virutas oscila entre 10 y 15 kg/t de la producción de dicha institución. Esta empresa procesa un promedio anual de 2 000 toneladas de aluminio, fundamentalmente laminados de las clases AA 6061 y AA 6063, generándose aproximadamente entre 20 y 30 toneladas de virutas, Gómez (2015). Estos laminados tienen un precio FOB entre 2 002,25 - 2 022,25 USD/t (Shenzhen Sheng Jie Supply Chain Service Co., Ltd., 2018), por lo que la viruta representa una pérdida entre 20 - 30 USD/t, de aquí la importancia de valorizar al máximo este residuo, el cual se comercializa a precios entre 0,63 - 0,72 USD/lb (1 386 - 1 584 USD/t), (Argus Metal Prices, 2018). Los residuos de las producciones de

aluminio de la referida entidad se comercializan a través de la Empresa de Recuperación de Materias Primas de Villa Clara.

El aluminio tiene una gran afinidad por el oxígeno, visto esto a través del relativo alto calor de formación de su óxido (-399,09 kcal/mol), según datos reportados por Perry y Green (1999), lo que permite que en una gran cantidad de casos puedan desarrollarse reacciones químicas (redox) en relaciones estequiométricas, sin la necesidad de suministrar energía adicional una vez que la misma es iniciada. Las reacciones en este proceso pirometalúrgico, denominado como aluminotermia, son fuertemente exotérmicas, presentando una relativa alta velocidad, lo cual debe ser evaluado para evitar que llegue a ser explosiva. Como resultado del proceso se obtiene un metal y una escoria, esta última constituida fundamentalmente por óxido de aluminio. La ecuación química general que representa el proceso aluminotérmico es (Eissa et al, 2010):



Donde: M representa el metal del óxido a reducir MxOy

Por su importancia práctica, esta reacción exotérmica ($\Delta G^\circ < 0$) ha sido utilizada como un criterio estratégico en la obtención de metales y aleaciones metálicas, en la síntesis de materiales, como fuente de calor y de metal de aporte en soldadura, entre otros: de aquí que el objetivo del presente trabajo sea estudiar una alternativa que permita recuperar los elementos metálicos presentes en la cascarilla de laminación y las cenizas de fondo de la combustión del petróleo en calderas de potencia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materias primas

Como materias primas se empleó cascarilla de laminación de ACINOX Las Tunas, Cenizas de fondo de la combustión del petróleo en las calderas de la refinera "Camilo Cienfuegos" y virutas de aluminio, procedentes de la Empresa Antenas de Santa Clara. La composición química de las materias primas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química de las materias primas

| <i>Componente</i> | <i>Cascarilla (% masa)</i> | <i>Ceniza (% masa)</i> | <i>Componente</i> | <i>Aluminio (% masa)</i> |
|--------------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|
| Fe ₂ O ₃ | 20-30 | 40,72 | Si | 0,3-0,6 |
| Fe ₃ O ₄ | 40-60 | - | Mn | 0,1 |
| FeO | 15-20 | - | Fe | 0,1-0,3 |
| Fe | 2-5 | - | Mg | 0,35-0,6 |
| Fe Promedio | 70,83 | - | Ti | 0,1 |
| O ₂ Promedio | 24,18 | - | Al | Balance |
| SiO ₂ | - | 0,38 | - | - |
| CaO | - | 4,05 | - | - |
| MgO | - | 3,31 | - | - |
| Na ₂ O | - | 2,31 | - | - |
| MnO | - | 0,01 | - | - |

| | | | | |
|--------------------------------|------|----------------|---|------|
| Al ₂ O ₃ | - | 0,08 | - | - |
| S | - | 4,93 | - | - |
| C | - | 3,02 | - | - |
| PPI | - | 39,43 | - | - |
| - | - | Ceniza (mg/kg) | - | - |
| Cu | - | 280 | - | 0,1 |
| Cr | - | 195 | - | 0,05 |
| Ni | - | 549 | - | - |
| Pb | - | 87 | - | - |
| Cd | - | 1,8 | - | - |
| V | - | 1939 | - | - |
| Zn | - | 22,4 | - | 0,15 |
| Impureza | 5,00 | - | - | 0,1 |

2.2 Preparación de las materias primas

Para facilitar la realización de los cálculos de carga se asumió que todo el hierro presente en la cascarilla se encontraba en forma de óxido de hierro (III), aunque como se observa en la tabla 1 el hierro está presente con diferentes grados de oxidación, incluso en forma metálica. Ello coincide con lo reportado por un alto número de autores, entre los cuales (El-Hussiny et al., 2011) que reportan la presencia de wustita (FeO), hematita (Fe₂O₃) y magnetita (Fe₃O₄). Asumir que todo el hierro está en forma de hematita en un cálculo de esta naturaleza es válido, dado que se hacen también otras consideraciones, como por ejemplo se asumen las eficiencias de las reacciones, que evidentemente dependen de múltiples factores, dentro de los cuales los efectos sinérgicos de los elementos y compuestos en la interfase metal-escoria.

La cascarilla fue sometida a un proceso de lavado, secado y separación magnética. La fracción magnética fue clasificada por tamizado. La combinación del lavado con el proceso de secado debe favorecer la oxidación de parte del hierro metálico y del hierro II a hierro III, con el posible incremento del contenido de oxígeno en el residual. En la separación magnética se eliminan los componentes no magnéticos, garantizando un aumento de pureza de las cascarillas.

Las virutas de aluminio estaban contaminadas con aceite refrigerante del proceso de corte, por lo que fueron sometidas a un proceso de desengrase con agua caliente y vapor durante 10 minutos, luego fueron secadas al aire y sol durante 3 horas. Finalmente fueron tamizadas con un tamiz de 3,00 mm.

Las cenizas de fondo de la combustión del petróleo en calderas son de granulometría fina, no obstante fueron pasadas por un tamiz de 1,00 mm, con el único propósito de eliminar materiales contaminantes que se incorporan durante la extracción y almacenamiento (óxidos de hierro, madera, restos de nylon).

2.3 Balance de masa y calor de reacción

El balance de masa (Tabla 2) se realizó a partir de la aplicación del principio de conservación de la masa (Castellanos y col., 2001), (Perdomo-González y col., 2015), según muestra la ecuación general:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (2)$$

La evaluación se realiza para una mezcla compuesta por:

- 45 g de aluminio (28,66 %),
- 12 g de cenizas (7,64 %),
- 100 g de cascarilla (63,70 %)

Como fue planteado arriba, se asumió que todo el hierro presente en la cascarilla de laminación está en forma de Fe_2O_3 . Se asumió también que el 100 % de este óxido se reduce durante el procesamiento.

El calor de reacción ($\Delta H_{\text{reacción}}$) se determina a partir de las ecuaciones 3 y 4, utilizando los datos de la tabla 3. Los resultados de los cálculos se muestran en la ecuación 5.

$$\Delta Hr = \sum n_p - \sum n_{\Delta f r} \quad (3)$$

$$\Delta Gr = \sum n_{\Delta f p} - \sum n_{\Delta f} \quad (4)$$

Tabla 2. Balance de masa para la carga estudiada (en g)

| <i>Elemento</i> | <i>Entrada</i> | <i>Generación</i> | <i>Consumo</i> | <i>Salida</i> |
|--------------------------------|----------------|-------------------|----------------|---------------|
| SiO ₂ | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,05 |
| Fe ₂ O ₃ | 104,89 | 0,00 | 104,89 | 0,00 |
| CaO | 0,49 | 0,00 | 0,00 | 0,49 |
| MgO | 0,40 | 0,11 | 0,00 | 0,51 |
| Na ₂ O | 0,28 | 0,00 | 0,00 | 0,28 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,01 | 66,77 | 0,00 | 66,78 |
| S | 0,59 | 0,00 | 0,00 | 0,59 |
| C | 0,36 | 0,00 | 0,00 | 0,36 |
| Fe | 0,09 | 73,42 | 0,00 | 73,51 |
| Al | 44,42 | 0,00 | 35,35 | 9,07 |
| Si | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,20 |
| Mn | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,05 |
| Cu | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,04 |
| Mg | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 |
| Zn | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,07 |
| Cr | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| Ti | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,05 |
| PPI | 3,94 | - | - | 3,94 |
| otros | 0,18 | - | 0,00 | 0,18 |
| Total | 156,17 | - | - | 156,17 |

Tabla 3. Calores de formación y energía libre de los óxidos que intervienen en el proceso (Perry y Green, 1999)

| Óxido | ΔH_f (kcal.mol ⁻¹) | ΔG (kcal.mol ⁻¹) |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| Al ₂ O ₃ | -399,09 | -376,87 |
| Fe ₂ O ₃ | -198,5 | -179,1 |
| Fe ₃ O ₄ | -266,9 | -242,3 |
| FeO | -64,62 | -59,38 |

Tabla 4. Reacciones químicas de los óxidos de hierro con el aluminio

| Reacción | ΔH_r (kcal.mol ⁻¹) | ΔG_r (kcal.mol ⁻¹) | Reacción No. |
|---|--|--|--------------|
| Fe ₂ O ₃ + 2Al → 2Fe + Al ₂ O ₃ | -200,59 | -197,70 | 1 |
| 3Fe ₃ O ₄ + 8Al → 9Fe + 4Al ₂ O ₃ | -795,66 | -780,58 | 2 |
| 3FeO + 2Al → 3Fe + Al ₂ O ₃ | -205,23 | -198,73 | 3 |

Al afectar la cantidad de calor total generada por la reacción química (reacción 1), por la cantidad de mezcla total a procesar se obtiene la cantidad de calor generada por unidad de masa (cal/g), determinándose que la mezcla es capaz de producir 798,53 cal/g.

2.4 Obtención de la aleación y la escoria

Los componentes de la carga, una vez pesados fueron mezclados durante 30 minutos en un mezclador cilíndrico de 200 mm de diámetro y 300 mm de longitud. Previo a su procesamiento, la carga fue precalentada en una estufa a una temperatura de 280 °C.

Para el procesamiento, la mezcla (caliente) fue colocada en un reactor de grafito de 2,2 L de capacidad, con fondo cónico y con un orificio para facilitar la extracción de los productos. La reacción fue iniciada con un arco eléctrico momentáneo, producido al cerrar el circuito con un electrodo de grafito conectado al positivo de una fuente de corriente de soldadura, cuyo negativo estaba conectado al crisol.

Para la extracción de los productos de reacción (escoria y aleación), estos fueron mantenidos dentro del crisol hasta su enfriamiento. Dada la diferencia de densidades, la escoria se localizó en la parte superior y el metal en la parte inferior. Después de la extracción y separación, el metal y la escoria fueron pesados por separado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de potencialidades en base al balance de masa y energía

En la tabla 4 se observa que todos los ΔH_r y ΔG_r son negativos, por lo que las reacciones evaluadas tienen carácter exotérmico. Además, los valores negativos de energía libre garantizan que estas reacciones son termodinámicamente factibles.

La cantidad de calor total generado por la mezcla (798,53 cal/g), permite predecir la factibilidad de autosostenimiento de la reacción aluminotérmica. En este sentido Riss (1975), señala que cuando la cantidad de calor involucrada en el proceso es mayor a 550 cal/g de mezcla, el proceso aluminotérmico puede autopropagarse sin el suministro de energía externa adicional.

El balance de masa realizado a la carga experimentada (tabla 2), permite valorar previamente resultados del proceso, tales como: cantidad y composición de metal y la escoria. En la tabla 5 se muestran las cantidades teóricas de metal y escoria a obtener así como la composición química de las mismas.

Como se observa en la tabla 5, la mezcla evaluada es potencialmente capaz de producir 83,35 g de aleación de hierro con un 10,88 % de Al en su contenido y 68,2 g de escoria, formada fundamentalmente por óxido de aluminio.

Tabla 5. Resultados potenciales de la carga en cuanto a metal y escoria

| <i>Metal</i> | | | <i>Escoria</i> | | |
|-----------------|---------------|-------------------|--------------------------------|---------------|-------------------|
| <i>Elemento</i> | <i>gramos</i> | <i>Por ciento</i> | <i>Componente</i> | <i>gramos</i> | <i>Por ciento</i> |
| Fe | 73,51 | 88,19 | SiO ₂ | 0,05 | 0,07 |
| C | 0,36 | 0,44 | CaO | 0,41 | 0,60 |
| Al | 9,07 | 10,88 | MgO | 0,43 | 0,64 |
| Si | 0,20 | 0,24 | Na ₂ O | 0,23 | 0,34 |
| Mn | 0,05 | 0,05 | MnO | 0,00 | 0,00 |
| Cu | 0,04 | 0,05 | Al ₂ O ₃ | 66,27 | 98,15 |
| Cr | 0,02 | 0,03 | S | 0,18 | 0,26 |
| Ti | 0,05 | 0,05 | Total | 68,28 | 100,00 |
| S | 0,06 | 0,07 | - | - | - |
| Total | 83,35 | 100,00 | - | - | - |

3.2 Resultados del procesamiento metalúrgico

Referente al procesamiento pirometalúrgico de la carga, la reacción se inició de forma rápida, fundiendo de manera autosostenida y estable, observándose en la figura 1 la adecuada separación de la escoria y el metal.



Figura 1. Metal y escoria producidos (fuente propia)

En la tabla 6, se ofrecen los resultados del procesamiento metalúrgico de la carga evaluada, en la que se pueden observar las cantidades de metal y escoria generadas durante el proceso, lo que permite realizar un análisis comparativo entre las cantidades reales y teóricas de aleación y escoria.

Para lograr mayor confiabilidad en la experimentación, fue procesado el doble de la carga calculada, tal como se observa en la tabla 6, en la que se obtuvieron 151 g de metal, para una recuperación del 90,58 %. La carga generó 140 g de escoria para un

rendimiento de 102,5 %, lo cual es debido a que los óxidos que no se reducen y pasan a la escoria, incrementando su cantidad.

Tabla 6. Resultados del procesamiento metalúrgico de la carga

| <i>Carga</i> | <i>Ctm (g)</i> | <i>Cm (g)</i> | <i>Rm (%)</i> | <i>Cte (g)</i> | <i>Ce (g)</i> | <i>Re (%)</i> |
|--------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| | 166,7 | 151,00 | 90,58 | 136,6 | 140,00 | 102,5 |

Nota: Ctm es la cantidad teórica del metal, Cm es la cantidad del metal, Rm es el rendimiento metálico, Cte es la cantidad teórica de la escoria, Ce es la cantidad de escoria y Re es el rendimiento de la escoria.

En la tabla 7 se muestran los resultados del análisis químico realizado a la aleación obtenida. Se observa que su composición se enmarca dentro de las fundiciones de hierro, con alto contenido de aluminio (11 %). Tal composición es resultado de la adición un 33 % de aluminio por encima del valor estequiométrico, propiciando que el carbono presente en la ceniza (negro de humo altamente reactivo) interaccione con el aluminio, formando carburo de aluminio (Al_4C_3).

Tabla 7. Análisis químico de la aleación (%)

| <i>C</i> | <i>Si</i> | <i>Mn</i> | <i>P</i> | <i>S</i> | <i>Cu</i> | <i>Al</i> | <i>Cr</i> |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3,62 | 0,47 | 0,25 | 0,02 | 0,110 | 0,22 | 11,16 | 0,063 |
| <i>Ni</i> | <i>V</i> | <i>Ti</i> | <i>Nb</i> | <i>Co</i> | <i>Mo</i> | <i>Fe</i> | - |
| 0,09 | 0,04 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,14 | 83,69 | - |

El alto contenido de carbono (3,62 %) proviene fundamentalmente de la ceniza, favorecido también por el contacto del metal en el estado líquido con el crisol de grafito. Si se suman los principales elementos de aleación presentes en el metal (Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb y Co), sin y con el carbono, excluyendo también el aluminio, se obtienen los datos que se muestran en la tabla 8. Se observa que cuando se incluye en la suma al carbono se obtiene un metal con 4,325 % de elementos de aleación, siendo factible su uso para la fabricación de piezas, en las cuales los elementos Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb y Co desempeñan un rol fundamental en sus propiedades.

Tabla 8. Sumatoria de los elementos C, Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb y Co en la aleación obtenida (%)

| <i>Mezcla</i> | Σ sin incluir C | $\Sigma + C$ | Σ sin incluir C, Mn, Cr |
|---------------|------------------------|--------------|--------------------------------|
| | 0,705 | 4,325 | 0,394 |

A la aleación le fue determinada la dureza, obteniéndose un valor promedio de 48,3 HRc, valor de dureza directamente relacionada con los elementos de aleación presentes en la misma. Este valor de dureza, junto a la presencia de los elementos de aleación son criterios esenciales para valorar las posibles aplicaciones de la misma, una de las cuales podría ser la obtención de granallas metálicas para las operaciones de limpieza de superficies en la industria (sand blasting).

4. CONCLUSIONES

1. La composición química de las materias primas y las reacciones químicas fundamentales que ocurren, permitieron conformar una carga, cuya cantidad de calor generada es de 798,53 (cal/g), garantizando el auto-sostenimiento del proceso y la separación adecuada del metal y la escoria.
2. El procesamiento aluminotérmico de la carga, compuesta por cascarilla de laminación, cenizas de fondo de las caldera de la combustión del petróleo y virutas de aluminio, permitió obtener una aleación de hierro con contenidos de 0,47 % de silicio, 11,16 % de aluminio y 3,62 % de carbono, así como con la presencia de otros elementos de aleación (Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb y Co). La composición de la aleación y su valor de dureza de 48,3 HRc permiten predecir su factible utilización en la fabricación de granallas para la limpieza de superficies.
3. El procesamiento aluminotérmico de residuales sólidos industriales (*cascarilla de laminación, viruta de aluminio y cenizas de fondo de la combustión del petróleo*), permite la recuperación de sus componentes metálicos, utilizando para ello materiales existentes en nuestro país sin la necesidad de consumo de energía inicializando el proceso con un chispazo de corriente.

REFERENCIAS

- Argus Metal Prices. 2018. An Argus Media service., Disponible en: <https://www.argusmedia.com/en/metals/argus-metal-prices?page=1>
- Castellanos, J.E., Pedraza, J., Zamora, A., Pérez, A., Rodríguez, J.A., Balance de masa y energía. Métodos clásicos y no convencionales. Editorial Feijóo, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2001, pp.11-12.
- Eissa, M., Ahmed, A., El-Fawkhry, M., Conversion of Mill Scale Waste., Journal of Metallurgy, Vol. 2015, No. 4, Septiembre, 2015, pp. 1-9.
- Eissa, M., El-Fawakhry, K., Mishreky, M., El-Faramaway, H., The aluminothermic production of extra low carbón ferrochromium from low grade chromite ore., The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future, Helsinki, Finland, June 6–9, 2010, pp. 1-2.
- El-Hussiny, N., Mohamed. F. M., Shalabi. M.E.H., Recycling of Mill Scale in Sintering Process., Science of Sintering. Central Metallurgical Research and Development Institute (CMRDI), Vol. 43, No. 1, 2011, pp. 21-31.
- Fernández, L., Reciclaje y reutilización de desechos en la industria cubana., II Convención Internacional de las Industrias, CUBAINDUSTRIAS 2016, Palacio de las Convenciones de La Habana, Noviembre 2016, pp. 15-18.
- Shenzhen Sheng Jie Supply Chain Service Co., Ltd., 2018. Precio del aluminio., 6000 catálogo de perfiles de aluminio., Disponible en: <https://sj-radiator.en.made-in-china.com/product/gytQoCaVHhkr/China-Chinese-Manufacturers-Best-Price-of-Aluminum-Alloy-Ingots-99-7.html>
- Gómez, R.I., Aprovechamiento de residuales industriales para la obtención de aleaciones de hierro y escorias, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster en Ciencias, Centro de Investigaciones de Soldadura, Especialidad Ingeniería Mecánica en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2015.

- Hernández, M.I., Aplicación tecnológica de un residuo de la industria del acero en la eliminación de metales contaminantes, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas., Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica Facultad de Ciencias Químicas, 2003, pp. 7-10.
- Menéndez, E., Álvaro, A. M., Argis, C., Parra, J.L., Moragues, A., Characterization of bottom ashes from coal pulverized power plants to determine their potential use feasibility., Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol. 52, No. 6, Nov-Dic., 2013, pp. 296-304.
- ONEI, 2015., Industria Manufacturera., Anuario Estadístico de Cuba 2014, 2014, pp. 26-29. Disponible en: <http://www.onei.cu/aec2014/11%20Industria%20Manufacturera.pdf>
- Perdomo-González, L., Quintana-Puchol, R., Gómez-Pérez, C., Cruz-Crespo, A., Obtención simultánea de ferromanganeso y materiales abrasivos por reducción aluminotérmica usando pirolusita sin tostación previa y residuos sólidos industriales. Minería y Geología, Vol. 31, No. 2, abr-jun., 2015, pp. 95-112.
- Perry, R.H., Green, D.W., Perry's Chemical Engineers Handbook. Seventh edition., McGraw Hill, USA, 1999, pp. 2-187 a 2-195.
- Riss, A., Production of ferroalloys., Ed. Foreign languages publishing house, Moscow, 1975, pp. 125-141.