**X Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica**

**“COMEC 2019”**

**Procesamiento aluminotérmico de cascarillas de laminación para la obtención de aleaciones de hierro y escorias**

***Aluminothermic processing of mill scale for the production of iron alloys and slag***

**Lorenzo Perdomo González1, Rafael Quintana Puchol2, István Gómez Ríos3, Amado Cruz Crespo4, Carlos R. Gómez Pérez5**

1-Lorenzo Perdomo González, CIS-UCLV, Cuba. [lperdomo@uclv.edu.cu](mailto:lperdomo@uclv.edu.cu)

2-Rafael Quintana Puchol, CIS-UCLV, Cuba. [rquin@uclv.edu.cu](mailto:rquin@uclv.edu.cu)

3-István Gómez Ríos, CIS-UCLV, Cuba. [istvan@uclv.cu](mailto:istvan@uclv.cu)

4-Amado Cruz Crespo, CIS-UCLV, Cuba. [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)

5-Carlos R. Gómez Pérez, CIS-UCLV, Cuba. [crene@uclv.edu.cu](mailto:crene@uclv.edu.cu)

**Resumen:** La cascarilla de laminación es un residuo industrial que se genera continuamente durante el proceso de laminación de acero en caliente, constituyendo aproximadamente el 2 % del acero producido, el cual es muy poco utilizado en Cuba. En el presente trabajo se estudia la obtención de aleaciones de hierro y escorias mediante procesamiento aluminotérmico. Para la conformación de las mezclas se realiza un diseño de experimentos de tipo Mc Lean Anderson, donde las variables dependientes son cascarilla de laminación, virutas de aluminio y caliza. Se conformaron 7 cargas, las que se procesaron en un reactor de grafito. Las aleaciones obtenidas están integradas fundamentalmente por: carbono de 0.3 – 1.26 %, silicio de 0.3 - 1.61 %, manganeso de 0.1 – 0.96 % y aluminio de 0.25 – 1.88 %, con una recuperación del metal entre 73 – 91 % y de escoria entre 93 – 110 %. La factibilidad técnica del procesamiento aluminotérmico de estos residuos industriales permite recuperar sus componentes metálicos, lo que garantiza el uso de estas aleaciones en la industria, a la vez que se reducen los niveles de contaminación ambiental.

**Abstract:** The mill scale is an industrial waste continuously generated during the hot rolling steel process, constituting approximately 2 % the steel produced, which is underutilized in Cuba. In the present work, the obtention of iron and slag alloys by aluminothermic processing is studied. For the conformation of the mixtures are used Mc Lean Anderson experimental design, where the dependent variables are mill scale, aluminum chips and limestone. Seven charges were prepared, which were processed in a graphite reactor. The alloys obtained are composed of: carbon of 0.3 - 1.26 %, silicon of 0.3 - 1.61 %, manganese of 0.1 - 0.96 % and aluminum of 0.25 - 1.88 %. The metal recovery are between 73 – 91 % and slag between 93 – 110 % The technical feasibility of the aluminothermic processing of this industrial waste allows recovering its metallic components, which guarantees the use of these alloys in the industry, while reducing the levels of environmental contamination.

**Palabras Clave:** Cascarilla Laminación; Aluminotermia; Residuales Industriales; Aleaciones; Escorias.

***Keywords:*** Mill Scale; Aluminothermic; Industrial Waste; Alloys; Slag.

# 1. Introducción

La industria metalúrgica produce grandes cantidades de residuos metálicos. El reciclaje adecuado de estos residuos permitiría el aprovechamiento de los valiosos elementos metálicos contenidos en los mismos y reduciría la cantidad de materiales peligrosos vertidos al medio ambiente. La cascarilla es un subproducto siderúrgico procedente del proceso de laminación en caliente del acero [1].

La cascarilla de laminación es una mezcla de óxidos de hierro II y III, con pequeñas cantidades de hierro metálico y otras impurezas que se producen durante el proceso de laminación en caliente del acero, generándose alrededor del 2 % del acero producido [2, 3]. La composición química de la cascarilla varía en función del tipo de acero a producir y del proceso empleado. El contenido de hierro es normalmente de un 70,0 % y contiene trazas de metales no férreos y compuestos alcalinos [1].

La producción de metales y aleaciones, mediante aluminotermia ha sido ampliamente estudiada, utilizándose fundamentalmente para la obtención de aleaciones de muy bajo contenido de carbono, tal es el caso de la producción de ferrocromo extra bajo en carbono [4, 5].

La elección de esta tecnología se fundamenta, sobre todo, en la simplicidad de la técnica y el bajo costo de inversión requerido. La reacción de los óxidos con el aluminio, puede ser representada por la ecuación general siguiente [4]:

**2/y MxOy + 4/3 Al = 2x/y M + 2/3 Al2O3**, donde MxOy representa el óxido, libre o combinado, reducible en el mineral o concentrado.

Una limitante para el uso de la reacción aluminotérmica, en la obtención de metales a partir de minerales, está relacionada con la ley del mineral, siendo necesario en muchos casos el uso de óxidos de alto grado de pureza o la adición de sales ricas en oxígeno para garantizar el desarrollo de las reacciones de oxidación-reducción de manera autosostenida [6, 7].

Debe señalarse que en los procesos aluminotérmicos también pueden ser utilizados residuos industriales. Arriaga [8], reporta la utilización de cascarillas de laminación en la conformación de termitas para soldar carriles, siendo también usada para obtener ferromanganeso y materiales abrasivos [9].

El elevado contenido de óxido de hierro presente en la cascarilla de laminación garantiza su uso en el desarrollo de mezclas aluminotérmicas, de aquí que el objetivo del presente trabajo es obtener aleaciones de hierro y escorias abrasivas y refractarias a partir del procesamiento aluminotérmico de cascarilla de laminación.

# 2. Materiales y métodos

## 2.1 Materias Primas

Las materias primas utilizadas fueron: virutas de aluminio de la Empresa Antenas de Santa Clara, cascarilla de laminación de ACINOX Tunas en Las tunas y caliza del yacimiento El Purio en Villa Clara. La composición química de las materias primas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición química (% masa) de las materias primas

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Cascarilla de laminación | | Viruta de aluminio | | Caliza | |
| Componente | Contenido | Componente | Contenido | Componente | Contenido |
| Fe2O3 | 20-30 | Si | 0,3-0,6 | SÍO2 | 0,34 |
| Fe2O4 | 40-60 | Fe | 0,1-0,3 | AI2O3 | 0,23 |
| FeO | 15-20 | Mn | 0,1 | Fe2O3 | 0,17 |
| Fe | 2-5 | Cu | 0,1 | CaO | 55,20 |
| Fe (Prom) | 70.82 | Mg | 0,35-0,6 | MgO | 0,68 |
| O2 (Prom) | 24.18 | Zn | 0,15 | PPI | 44,37 |
| Impurezas | 5.00 | Cr | 0,05 |  |  |
|  |  | Ti | 0,1 |  |  |
|  |  | Otros | 0,11 |  |  |
|  |  | Al | balance |  |  |

## 2.2 Formulación de las cargas

Para estudiar la formulación de las aleaciones se empleó un diseño de experimento del tipo Mc Lean Anderson, donde las variables dependientes y los rangos de variación fueron:

* X1: Cascarilla 65 - 75 %
* X2: Aluminio 20 - 30 %
* X3: Caliza 0 - 15 %

Los niveles de variación del aluminio fueron desde el valor estequiométrico hasta un 35 % en exceso con relación a la cascarilla. La cantidad de caliza se varió desde 0 hasta un 15 %, de manera que fuera superior a los valores que tradicionalmente se adicionan en la elaboración de termitas para soldar (alrededor del 10 %).

Como variables independientes se selecciona:

Y1: cantidad de metal

Y2: cantidad de escoria

Y3: carga que no reaccionó

El número de experimentos a realizar se determina a partir de la siguiente expresión:

N= q2q‐1, donde N es el número de experimentos y q el número de variables, dando como resultado12 experimentos.

Una vez sustituidos, en la matriz experimental, los valores correspondientes a cada uno de los puntos se aplica la condición de normalidad ( ) y se eliminan los puntos que no la cumplen, además son eliminadas las mezclas que se repiten y las que están fuera de los rangos experimentales previstos. De estos puntos, se toman las mezclas que deben realizarse, en las que se duplican las cantidades a utilizar y se determina el punto centro, el cual es replicado. Estos datos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Plan experimental

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Mezcla | Cascarilla (g) | Aluminio (g) | Caliza (g) |
| 1 | 130 | 40 | 30 |
| 2 | 130 | 60 | 10 |
| 3 | 150 | 40 | 10 |
| 7 | 150 | 50 | 0 |
| 11 | 140 | 60 | 0 |
| 0A | 140 | 50,4 | 9,6 |
| 0B | 140 | 50,4 | 9,6 |

## 2.3 Obtención de las aleaciones

Cada una de las materias primas es triturada y tamizada hasta la granulometría requerida, posteriormente estos materiales son mezclados durante aproximadamente 30 min., en un mezclador rotario tipo tambor. La mezcla es llevada a una estufa durante 40 min aproximadamente a una temperatura entre 230 ºC y 250 ºC, siendo finalmente procesada mediante aluminotermia en un reactor de grafito. La reacción es iniciada mediante arco eléctrico.

El proceso de obtención de las termitas se muestra en las Figura 1 y 2.

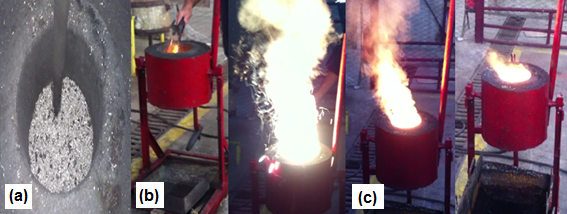


Figura 1: Obtención de las termitas. Carga en el reactor (a), Ignición de la reacción por arco eléctrico (b), Reactor fundiendo (c)Una vez concluido el proceso de fusión la mezcla se deja enfriar y se extraen el metal y la escoria, quedando el metal en la parte inferior y la escoria en la superior



Figura 2: Proceso de obtención de las termitas

## 2.4 Caracterización de las aleaciones

Una vez obtenidas las aleaciones, estas fueron preparadas para el análisis químico mediante espectrometría de emisión atómica. En la Figura 3 se muestra una foto de una de las probetas preparadas, con las huellas del análisis químico realizado.



Figura 3: Probetas desbastadas y analizadas

# 3. Discusión de resultados

## 3.1 Resultados del procesamiento metalúrgico

En la Figura 4 se muestran fotos de los productos obtenidos en cada una de las coladas realizadas, en la que se puede observar que la separación entre el metal y la escoria fue adecuada, no quedando escoria adherida al metal. En todos los casos el encendido y autosostenimiento de la reacción se desarrolló sin dificultades. Los resultados del procesamiento de cada una de las mezclas en cuanto a cantidad de metal, escoria y masa que no reaccionó se resumen en la Tabla 3.

En la Figura 3, probeta utilizada para la realización del análisis químico, se puede observar en la sección rectificada el nivel de porosidad del metal es bajo lo cual es representativo de la sanidad del metal obtenido a pesar de la pequeña masa de carga procesada.

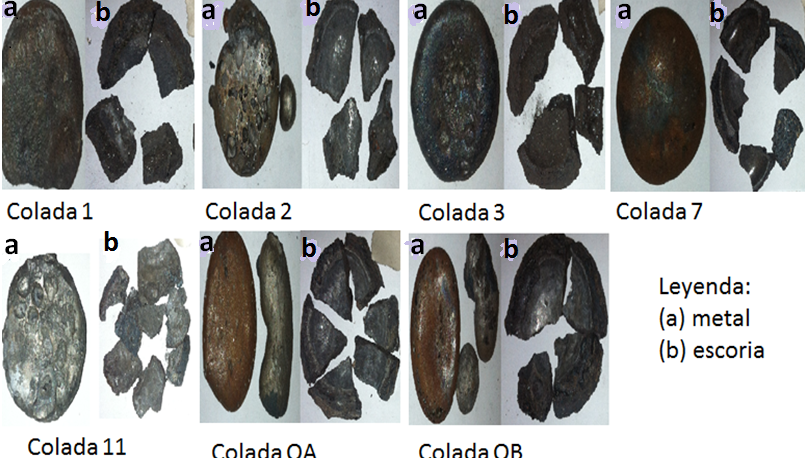


Figura 4: Metal y escorias obtenidos en cada una de las coladas

Tabla 3: Resultados del procesamiento aluminotérmico

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezcla | Metal (g) | % | Escoria (g) | % | Sin reaccionar (g) | % | Total (g) | % |
| 1 | 67 | 36,12 | 105,5 | 56,87 | 13 | 7,01 | 185,5 | 92,75 |
| 2 | 98 | 50,33 | 90,7 | 46,58 | 6 | 3,09 | 194,7 | 97,35 |
| 3 | 82 | 41,41 | 110 | 55,56 | 6 | 3,03 | 198 | 99 |
| 7 | 96,5 | 50,66 | 89 | 46,72 | 5 | 2,62 | 190,5 | 95,25 |
| 11 | 101 | 51,11 | 92,6 | 46,9 | 4 | 2,02 | 197,6 | 98,8 |
| OA | 90 | 47,12 | 94 | 49,21 | 7 | 3,66 | 191 | 95,5 |
| OB | 86 | 45,03 | 97 | 50,79 | 7,5 | 3,93 | 191 | 95,5 |

Los resultados mostrados en la Tabla 3 muestran que la cantidad de metal obtenida varió entre 67 y 101 g, representando entre un 36 y 51 % del total de productos sólidos generados en la colada. La cantidad de escoria osciló entre 89 y 110 g constituyendo entre el 46 y 55 % del total. Por otro lado, la parte que no reaccionó en la mayoría de los puntos fue inferior al 4 %, exceptuando el punto 1 en la que dejó de reaccionar el 7 %.

En la propia Tabla 3 se puede observar que como resultados del procesamiento pirometalúrgico se obtiene, como productos sólidos utilizables, más del 95 % del total de carga procesada, exceptuando el punto 1 donde se obtuvo un 92,75 %.

La Tabla 4 muestra el rendimiento en cuanto a metal y escoria para cada una de las coladas.

Tabla 4: Rendimiento por colada

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mezcla | Metal real (g) | Metal teórico (g) | Rendimiento  (%) | Escoria real (g) | Escoria teórica (%) | Rendimiento (%) |
| 1 | 67 | 91,5 | 73,3 | 105,5 | 98,7 | 106,9 |
| 2 | 98 | 107,0 | 91,6 | 90,7 | 88,5 | 102,4 |
| 3 | 82 | 105,4 | 77,8 | 110 | 100,2 | 109,8 |
| 7 | 96,5 | 105,5 | 91,5 | 89 | 95,6 | 93,1 |
| 11 | 101 | 110,6 | 91,3 | 92,6 | 89,3 | 103,7 |
| OA | 90 | 99,6 | 90,4 | 94 | 94,4 | 99,6 |
| OB | 86 | 99,6 | 86,3 | 97 | 94,4 | 102,8 |
| Centro promedio | 88 | 99,6 | 88,4 | 95,5 | 94,4 | 101,2 |

Como se puede observar en la Tabla 4, las cargas 2, 7 y 11 superan el 91 % de rendimiento de metal, aunque debe destacarse que para todos los puntos este índice supera el 73 %. En el caso de las escorias el rendimiento, con relación al valor teórico a obtener, supera en la mayor parte de los puntos el 100 %, a excepción de las mezclas 7 y OA donde el valor es de 93 y 99 % respectivamente. Estos altos rendimientos de escoria pueden deberse a que el nivel de reducción de los óxidos metálicos fue inferior al tomado como referencia para realizar los cálculos, lo cual se puede apreciar en la Figura 5, donde se observa que los puntos de mayor rendimiento de escoria son los de menor rendimiento de metal.

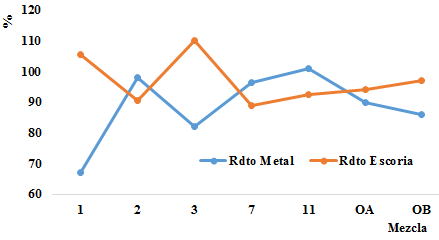


Figura 5: Rendimiento de metal y escoria para cada una de las coladas (en % masa)

## 3.2 Procesamiento estadístico de los resultados

El procesamiento estadístico del diseño se realizó mediante el programa STATGRAPHICS, Centurion.XV.v15.2.14, obteniéndose los siguientes resultados.

* **Para la variable Y1 (cantidad de metal)**

Metal = 0,29496\*cascarilla + 1,02328\*aluminio - 0,397813\*caliza, R2= 99,96 % y R2aj= 99,95 %

Como se puede observar se obtiene un modelo lineal con un alto nivel de ajuste, tanto para R cuadrado como R cuadrado ajustado. Del análisis de regresión se obtuvo que todas las variables son significativas para una probabilidad superior al 95 %, donde como es lógico las variables de mayor significación son la cascarilla y el aluminio. El marcado efecto positivo del aluminio y la cascarilla se deben a que uno es el elemento reductor y el otro contiene los óxidos metálicos a reducir, por tanto los dos son responsables de la formación del metal. La alta significación del aluminio puede estar relacionada por el hecho de que el metal que no se reduce pasa a formar parte de la aleación, incrementando por tanto la cantidad de metal.

En el modelo también se aprecia que la caliza influyó de forma negativa en la generación de metal, lo cual puede ser consecuencia de que al formar parte de la carga consume una determinada cantidad de calor, disminuyendo por tanto la cantidad de calor generada por unidad de masa, lo que pudiera afectar la recuperación de metal.

* **Para la variable Y2 (cantidad de escoria)**

Escoria = 0,653798\*cascarilla - 0,048171\*aluminio + 0,794454\*caliza, R2= 99,84 % y R2aj= 99,76 %

El ajuste del modelo resultó también alto, tanto para R cuadrado como para R cuadrado ajustado. Del análisis de regresión se obtuvo que la variable cascarilla fue la más significativa debido a que es la portadora del oxígeno el que formará los óxidos que integran la escoria (alúmina fundamentalmente), seguida de la cantidad de caliza debido a que es un componente inerte que forma óxido de calcio debido a su descomposición por la temperatura pasando en su totalidad a la escoria. En ambos casos la probabilidad es superior al 95 %.

La cantidad de aluminio no resultó significativa para una probabilidad del 95 %, lo que puede estar relacionado con un exceso de aluminio adicionado en la carga, el que pasará al metal, no influyendo por tanto sobre la escoria. Se decide mantener la variable en el modelo ya que al realizar el análisis eliminando la variable el ajuste del modelo aumenta muy poco con relación al obtenido manteniendo todas las variables.

* **Para la variable Y3 (carga que no reaccionó)**

Carga que no reaccionó = 0,0259921\*cascarilla + 0,00664011\*aluminio + 0,299109\*caliza, R2:= 99,19 % y R2aj= 98,79 %

Se obtiene también un modelo lineal con un nivel de ajuste adecuado. En este caso sólo la variable caliza resultó significativa para un 95 % de probabilidad, lo cual confirma lo señalado anteriormente. La caliza es un componente inerte de la carga que consume energía durante el procesamiento disminuyendo por tanto la eficiencia del proceso, convirtiendo por tanto en un componente regulador de la velocidad de reacción.

Si se elimina del modelo la variable de menor significación (aluminio) puede obtenerse un nuevo modelo para la variable Y3:

Carga que no reaccionó= 0,0284813\*cascarilla + 0,297292\*caliza, R2= 99,19 % y R2aj= 99,03 %

Para este nuevo modelo el ajuste obtenido es ligeramente superior al anterior, pero ambas variables resultaron significativas para una probabilidad superior al 95 %, por lo que resulta más conveniente su uso.

## 3.3 Caracterización del metal

Los resultados obtenidos del análisis químico realizado a las distintas aleaciones obtenidas se muestran en la Tabla 5. La aleación 2 no pudo ser analizada debido a que estaba fraccionada, porosa y contaminada con escoria.

Tabla 5: Composición química de cada carga.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Componentes** | **Mezcla 1** | **Mezcla 3** | **Mezcla 7** | **Mezcla 11** | **Mezcla Centro** |
| C | 0,67 | 0,12 | 1,26 | 0,54 | 0,30 |
| Si | 1,61 | 0,23 | 0,30 | 1,24 | 1,53 |
| Mn | 0,331 | 0,140 | 0,513 | 0,964 | 0,77 |
| P | 0,049 | 0,052 | 0,152 | 0,057 | 0,05 |
| S | 0,079 | 0,119 | 0,001 | 0,075 | 0,07 |
| Cu | 0,213 | 0,254 | 0,262 | 0,218 | 0,22 |
| Al | 1,309 | 0,290 | 1,878 | 1,727 | 0,25 |
| Cr | 0,082 | 0,054 | 0,101 | 0,121 | 0,11 |
| Mo | 0,037 | 0,021 | 0,031 | 0,296 | 0,14 |
| Ni | 0,086 | 0,100 | 0,075 | 0,071 | 0,08 |
| V | 0,010 | 0,007 | 0,013 | 0,026 | 0,02 |
| Ti | 0,033 | 0,011 | 0,161 | 0,267 | 0,27 |
| Nb | 0,003 | 0,003 | 0,070 | 0,019 | 0,01 |
| Co | 0,014 | 0,018 | 0,029 | 0,035 | 0,02 |
| W | 0,018 | 0,046 | 0,051 | 0,019 | 0,06 |

Como se puede apreciar en la Tabla 5, todas las aleaciones se obtuvieron con determinados contenidos de carbono, destacándose las aleaciones 1, 7 y 11 como las de mayores contenidos. Debe señalarse que a ninguna de las mezclas se le adicionó grafito, por tanto el grafito procede del carbono del crisol utilizado como reactor.

Las aleaciones 7, 11 y centro, son las de mayores contenidos de manganeso, mientras que las de mayores contenidos de silicio son la 1, 11 y centro. Por otro lado, debe destacarse que el contenido de fósforo está alrededor de 0.05 % para todas las aleaciones, excepto en la mezcla 7 que tiene 0,15 % y los contenidos de azufre están por debajo de 0,079 para todas las aleaciones excepto la 3 que tiene 0,119 %.

En cuanto al contenido del aluminio en las aleaciones no se estableció ninguna relación directa entre la cantidad de aluminio adicionada a las cargas y el contendido de aluminio presente en el metal.

Todas las aleaciones obtenidas pueden ser utilizadas como materia prima para la fabricación de acero, donde el aluminio presente puede actuar como desoxidante durante el proceso de elaboración del acero.

Por otro lado, muchas de estas aleaciones se acercan, en cuanto a composición química, a las aleaciones recomendadas para la fabricación de granallas de acero esféricas y angulares, según el catálogo de abrasivos, MPA. Tecnología para limpieza, tratamiento y acabado de superficies [10]. En principio cualquiera de estas aleaciones puede ser utilizada para fabricar las granallas anteriormente señaladas, ya que en cualquiera de los casos es factible la adición de componentes complementarios para ajustar la composición de la aleación.

## 3.4 Comportamiento de las escorias

En la Tabla 6 se muestra la composición química teórica de las escorias, determinada a partir de un balance de masa, observándose que ellas van a estar formadas fundamentalmente por Al2O3, en los casos donde se adiciona caliza deben contener determinados contenidos de CaO y muy poca cantidad de MgO.

Tabla 6: Composición química teórica de las escoria (% masa) y temperatura de fusión (ºC)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Componente | Mezcla 1 | Mezcla 2 | Mezcla 3 | Mezcla 7 | Mezcla 11 | Mezcla Centro |
| Al2O3 | 83,95 | 93,48 | 95,40 | 99,87 | 99,83 | 91,77 |
| CaO | 15,66 | 6,23 | 4,41 | 0 | 0 | 7,95 |
| MgO | 0,30 | 0,25 | 0,16 | 0,13 | 0,17 | 0,23 |
| SiO2 | 0,10 | 0,04 | 0,03 | 0 | 0 | 0,05 |
| temperatura fusión | 1873,4 | 1916,8 | 1978 | 1997,3 | 1969,2 | 1947,5 |

A partir de los datos teóricos de composición, se determina la temperatura de fusión de estas escorias utilizando la expresión siguiente [11]:

Donde, Al2O3, es el por ciento de alúmina de la escoria y RO, el por ciento en peso de los óxidos alcalinos, los de calcio y los de magnesio presentes.

Aunque esta fórmula resulta bastante exacta, debe tomarse sólo como referencia de un resultado [11], sobre todo en este caso donde los datos de composición químicas son determinados a partir del balance de masa.

Como puede apreciarse en la Tabla 6, las escorias obtenidas deben tener temperaturas de fusión superior a 1860 ºC, lo cual le confiere valiosas propiedades como materia prima para elaborar materiales refractarios y abrasivos.

De acuerdo a la calidad de materias primas utilizadas, los únicos óxidos que pueden aparecer en cantidades apreciables, además de los señalados en la Tabla 7 son los óxidos de hierro, lo cual dependerá de la eficiencia de la reducción.

# 4. Conclusiones

* La composición química de las materias primas y las reacciones químicas fundamentales a ocurrir durante el procesamiento metalúrgico permitieron estudiar, mediante un diseño de experimentos de tipo Mc Lean Anderson, cargas, integradas por: cascarillas de laminación entre 65 - 75 %, aluminio desde 20 - 30 y caliza entre 0 – 15 %, garantizándose la autosostenibilidad del proceso y la adecuada separación del metal y la escoria.
* El procesamiento aluminotérmico de las cargas conformadas permitió obtener aleaciones de hierro integradas fundamentalmente por: carbono de 0.3 – 1.26 %, de silicio de 0.3 - 1.61 %, de manganeso de 0.1 – 0.96 %, de aluminio de 0.25 – 1.88 %, con una recuperación del metal entre 73 – 91 % y de escoria entre 93 – 110 %.
* La conformación de mezclas a partir de residuos industriales y minerales cubanos permitió la recuperación de sus componentes metálicos, sin la necesidad de importar ninguno de los componentes de la mezcla, ni el uso de equipamientos de alta complejidad con un bajo consumo de energía y una reducción de los niveles de contaminación ambiental.

**5. Bibliografía**

1. Torralba Castelló, J. M., et al. Solicitud de Patente ES 2 342 815 A1. Procedimiento de obtención de esponjas metálicas. OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS. España, 13.01.2009.
2. Deves, B.**,** et al. Study on reducing and melting behavior of mill scale/petroleum coke blend. Tecnol. Metal. Mater. Miner. 2013, v. 10, n. 4, 365-374.
3. Gaballah, N.M. et al. Production of iron from mill scale industrial waste via hydrogen. Open Journal of Inorganic Non-Metallic Materials. 2013, 3, 23-28.
4. Eissa, M.M., et al. The aluminothermic production of extra low carbon ferrochromium from low grade chromite ore. The Twelfth International Ferroalloys Congress. Sustainable Future. Helsinki, Finland, 2010, p 431-438.
5. Wenzel, B. M., et. Al. Aluminothermic reduction of Cr2O3 contained in the ash of thermally treated leather waste. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2013, Vol. 30, No. 01, 141 – 154.
6. Arangurent, F., Mallol, A. Siderurgia. Madrid, Ed. Dorssat S.A., 1963, 612 p.
7. Riss, A. Khodorovsky, Y. Production of ferroalloys. Moscow, Ed. Foreign languages publishing house. 1975, 278 p.
8. Arriaga, H. Proceso de soldadura aluminotérmica. Conferencia internacional de Ingeniería mecánica (COMEC), UCLV, Santa Clara, Cuba, 2002.
9. Perdomo-González, L., Quintana Puchol, R., Gómez-Pérez, C.R., 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. 2015, Vol. 31, No 2, 95-112.
10. MPA. Tecnología para limpieza, tratamiento y acabado de superficies. Catálogo de Abrasivos. 2016 España.
11. Torres, A. Tecnología de los refractarios. Edición de Elena Aguilar. Ediciones de Ciencia Técnica. Instituto Cubano del Libro, 1971, La Habana, Cuba.