



ISMM

INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Ingeniería Metalurgia y Materiales
Facultad: Metalurgia - Electromecánica

Trabajo de Diploma

*Estudio de procesamiento aluminotérmico de polvos de
acería*

Autor: Wendy Piedra Abreu

Tutor: Dr. Lorenzo Perdomo González

Curso 2016-2017

Moa, Holguín



PENSAMIENTO

“Nada tiene tanto poder para ampliar la mente como la capacidad de investigar de forma sistemática y real todo lo que es susceptible de observación en la vida”.

Marco Aurelio.

DEDICATORIA:

- ❖ *Dedico este trabajo de diploma a mis padres Silvia Abreu López Y Amado Piedra Menéndez, que siempre me han apoyado y brindado su amor incondicional, ya que sin ellos no hubiese podido alcanzar esta meta .A toda mi familia por su ejemplo y amor*

AGRADECIMIENTO:

En primer lugar a Dios por cada día guiarme y cuidarme a mí y a mi familia, y demostrarme que todo sucede por una razón específica que está predestinado por él.

- ❖ A mis padres que los amo y son la razón de mi vida, por su apoyo comprensión, fortaleza, paciencia, por haberme enseñado que con esfuerzo y dedicación puedo alcanzar todo lo que me proponga y darme una mano siempre que los he necesitado.*
- ❖ A todos aquellos que han hecho posible en la colaboración de esta tesis en especial a mi tutor Dr.C Lorenzo Perdomo por haberme enseñado y guiado a lo largo de la investigación.*
- ❖ A toda mi familia y amigos por su apoyo incondicional en especial a mi abuela Migdalia López Vila que no está físicamente pero la llevo siempre en mi corazón*
- ❖ A los profesores del Centro de Investigación de Soldadura, por dedicarme toda la atención en el trascurso de este trabajo.*
- ❖ A mis profesores del departamento de Metalurgia del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa de los que me dotaron de toda la formación profesional estos cinco años.*

A TODOS GRACIAS

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es recuperar los elementos metálicos contenidos en los polvos de acería procedentes del horno eléctrico de arco, de la empresa ACINOX Tunas, mediante aluminotermia. Para el estudio se utilizó un diseño de experimentos de tipo Mc Lean Anderson evaluándose 7 cargas, en las que se varió la cantidad de cascarilla de laminación, de polvos de acería y caliza, utilizando aluminio como reductor en proporción estequiométrica. La carga de mejores resultados fue utilizada para estudiar la recuperación de los elementos metálicos. Como resultado del procesamiento aluminotérmico se obtuvo un acero al carbono y de la corriente gaseosa generada se recolectaron polvos con contenidos de Zn entre 43 – 56 % y de Pb entre 2 – 11 %, concentrado que representa entre 0,26 – 0,34 % de la carga conformada.

Palabras claves: Polvo de acería, cascarilla de laminación, procesamiento aluminotérmico

ABSTRACT

The objective of this work is to recover the metallic elements contained in the powders from the ACINOX Tunas electric arc furnace, by aluminothermic. For the study, a design of Mc Lean Anderson type experiments was used to evaluate 7 loads, in which the amount of mill scale, steel dust and limestone was varied, using aluminum as a stoichiometric proportion reducer. The best results load was used to study the recovery of metallic elements. As a result of aluminothermic processing carbon steel was obtained and powders with Zn contents between 43- 56% and Pb between 2 - 11%, concentrated in the range of 0.26-0.34% of the shaped load.

Keywords: Steel dust, mill scale, aluminothermic processing

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.1. Acero	5
1.1.1. Aplicaciones del acero.....	5
1.1.2. Generalidades de la producción de acero en hornos de arco eléctrico (HAE)6	
1.1.3. Descripción de proceso de fabricación de acero.....	8
1.2. Residuos que se generan en los procesos de fabricación de acero.....	10
1.2.1. Principales residuos generados en los procesos siderúrgicos	11
1.3. Sistema de captación de polvos	15
1.3.1. Tratamiento de los polvos de acería	16
1.3.2. Métodos de recuperación de elementos metálicos en polvos de acería	18
1.4. Implicaciones ambientales	20
1.4.1. Proceso aluminotérmico	22
CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1. Materias primas.....	24
2.2. Equipamiento empleado.....	25
2.3. Diseño de experimentos.....	27
2.4. Preparación de los polvos	29
2.5. Procesamiento aluminotérmico	29
2.6. Caracterización de las aleaciones y los polvos colectados	30
2.6.1. Caracterización química de las aleaciones	30
2.6.2. Caracterización química de los polvos.....	31
CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	33
3.1. Balance de Masa	33
3.2. Calores de Reacción.....	35
3.3. Resultado del procesamiento pirometalúrgico	36
3.3.1. Resultados del diseño de experimentos.....	36
3.3.2. Evaluación de la carga seleccionada.....	38
3.3.3. Recolección de los polvos.....	41
CONCLUSIONES.....	44

RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	46
Anexo I	50
Anexo II	55

INTRODUCCIÓN

El reciclaje de metales es una actividad creciente y en franco desarrollo debido a que proporciona un notable ahorro de recursos, reduciendo la demanda de minerales naturales. Los metales son 100 % reciclables y el ahorro de energía al utilizar metales reciclados sobrepasa el 60 % y en el caso del zinc es del 70 % (De La Torre et al, 2013).

Durante las operaciones siderúrgicas de fusión y afino de acero que se realizan a temperaturas superiores a 1600 °C en hornos de arco eléctrico (HAE) se generan cenizas volantes y residuos sólidos, los cuales salen del horno arrastrados por las corrientes gaseosas y se acumulan en los filtros del sistema de tratamiento de gases, a estos residuos se le denominan polvos de acería, generándose mundialmente alrededor de 8 millones de toneladas por año, de los cuales 3,7 millones provienen de los hornos de arco eléctrico (Madias, 2009).

Los países desarrollados cuentan con una legislación ambiental estricta, además de diferentes procesos industriales para recuperar metales no ferrosos a partir de polvos de acería, a diferencia de los países del tercer mundo que en su mayoría no tienen un sistema integrado de tratamiento de desechos industriales, los polvos de acería son dispuestos en vertederos o escombreras, alguna de las veces en condiciones poco controladas, sin conocer el destino final de sus lixiviados. Estos residuos entran en contacto directo con el suelo y los seres vivos, causando un impacto ambiental negativo debido a la movilidad de los metales pesados en las aguas subterráneas (MCA, 2010).

La composición química y mineralógica de los polvos de acería es variable, dependiendo tanto de las condiciones operativas particulares de cada planta siderúrgica como de la composición química de la materia prima que se utiliza en el proceso (Moreno, 2012).

Los polvos de acería suelen estar constituidos principalmente por óxidos metálicos simples o complejos, óxidos de hierro y no ferrosos, como la zincita (ZnO) y franklinita ($ZnFe_2O_4$), con un tamaño de partícula por debajo de 40 micras. Si bien los componentes mayoritarios de los polvos acería son óxidos de hierro, estos se

caracterizan por presentar un contenido importante de metales pesados como plomo, zinc y cadmio, los cuales son catalogados como residuos peligrosos y contaminantes (Madias, 2009).

Los polvos de acería contienen de 20 – 55 % de Fe, entre 10 – 35 % de Zn, de 1 – 8 % de Pb y de 0,05 – 0,20 % de Cd; por lo que la recuperación resulta beneficiosa para el medio ambiente y rentable económicamente (DELVASTO, 2011).

De manera general y en correspondencia a lo señalado anteriormente se pueden resaltar los aspectos siguientes:

- La metalurgia del zinc necesita nuevas fuentes de aprovisionamiento de materia prima.
- Las industrias siderúrgicas generan residuos interesantes por su contenido en zinc y que a su vez son considerados como tóxicos y peligrosos.
- El reto existente es el de conseguir una obtención económicamente viable de los residuos de acerías o similares, con reducción parcial o total de los problemas medioambientales (De la Torre et al ,20013)

En Cuba la política económica y social, para el periodo 2016-2021, está regida por Lineamientos del Partido y la Revolución, resultando aprobada su actualización en el Séptimo Congreso del PCC en abril de 2016 y por la Asamblea Nacional del Poder Popular en julio de 2016 (Lineamientos, 2016). Dentro de este documento se destacan 4 lineamientos que tienen relación con el presente trabajo, los que se exponen a continuación:

- ARTÍCULO 185. Ejecutar con celeridad los proyectos en marcha para la exploración de pequeños yacimientos de minerales, en particular para la producción de oro, cobre, cromo, plomo y zinc.
- ARTÍCULO 187. Avanzar en los estudios que posibiliten un mayor empleo de las producciones mineras nacionales a partir de rocas y minerales industriales.

- ARTÍCULO 190. Desarrollar la metalurgia ferrosa, priorizando la ampliación de capacidades, la reducción de los consumos energéticos y la diversificación de la producción de laminados y de metales conformados, elevando su calidad.
- ARTÍCULO 191. Promover la intensificación del reciclaje y el aumento del valor agregado de los productos recuperados. Priorizar el aprovechamiento del potencial de los residuos sólidos urbanos.

Como resultado de esta política, una planta capaz de producir unas 95 mil toneladas de concentrado de zinc y 50 mil toneladas de plomo se incluye entre las inversiones que se acometen para el desarrollo minero en el norte de la provincia de Pinar del Río Cuba. Los trabajos se iniciaron en octubre de 2012 con un costo de inversión de alrededor de 180 millones de dólares. La instalación contará con una sección de trituración de mineral, molienda y flotación de zinc y plomo donde a partir de la venta de concentrados, una vez que se amortice la inversión, la iniciativa reportará anualmente al país significativos beneficios económicos. Por otro lado, los yacimientos ubicados, en el municipio de Minas de Matahambre, a 220 kilómetros de la capital cubana poseen reservas para más de 20 años de producción (Izquierdo et al, 2017).

Las empresas siderúrgicas cubanas, al igual que las del resto del mundo, generan continuamente residuos contaminantes para el medio ambiente. Dentro de estos residuos están los polvos de acería los que contienen elementos metálicos de alto valor industrial (Tápanes, et al, 2001)

Problema Científico: Desarrollar un procedimiento que permita recuperar los elementos metálicos contenidos en los polvos de acería disminuyendo así su poder contaminante.

Hipótesis: La adecuada preparación de una mezcla de polvos de acería con cascarilla de laminación y virutas de aluminio permite su procesamiento mediante aluminotermia, recuperándose los elementos metálicos presentes en estos residuos industriales, reduciéndose por tanto su poder contaminante.

Objetivo general: Recuperar elementos metálicos contenidos en los polvos de acería a partir de su procesamiento.

Objetivos específicos:

- Proponer una tecnología que permita procesar, mediante aluminotermia, una mezcla de cascarilla de laminación, polvos de acería y virutas de aluminio.
- Estudiar alternativas de recolección de los metales volatilizados durante el procesamiento aluminotérmico.
- Caracterizar los productos metálicos generados en el proceso.

Tareas:

- Revisión bibliográfica.
- Realizar un estudio, mediante un diseño de experimentos, de conformación de cargas para el procesamiento aluminotérmicos de los polvos de acería.
- Selección y reproducción de las mejores variantes de mezclas.
- Evaluar un sistema de recolección de metales volatilizados durante el proceso.
- Realizar la caracterización químicas de los polvos colectados y las aleaciones metálicas producidas.

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Acero

El acero es en la actualidad la más importante de las aleaciones metálicas conocidas, no habiendo existido en ninguna época otro material que tanto haya contribuido al progreso de la humanidad.

Se puede decir de una manera general que bajo la denominación de “acero” se agrupan todas las aleaciones de hierro forjables. La extraordinaria difusión del acero, se debe a sus notables propiedades, a la existencia de numerosos yacimientos de minerales de hierro y al desarrollo de procedimientos de fabricación relativamente simple. Ningún otro metal ni aleación posee sus notables propiedades, que lo hacen insustituible para muchas aplicaciones (Tápanes et al, 2001)

El acero es un metal que se recicla a gran escala, alrededor del 45 % de su consumo procede del reciclaje. Este es uno de los materiales que se puede reutilizar y además mantiene sus propiedades iniciales de fabricación, es decir, no pierde sus características. Su reutilización promueve la reducción de la explotación minera (90 %), el consumo de energía (74,0 %), las emisiones a la atmósfera (88 %), la contaminación del agua (75 %) y el consumo de agua en la producción (56 %). Por tal razón es el material que más se recicla a nivel mundial, así su recolección resulta mayor a la del aluminio, plástico y vidrio (Gutiérrez, 2012).

1.1.1. Aplicaciones del acero

El acero en sus distintas clases está presente de forma abrumadora en nuestra vida cotidiana en forma de herramientas, utensilios, equipos mecánicos y formando parte de electrodomésticos y maquinaria en general, así como en las estructuras de las viviendas que habitamos y en la gran mayoría de los edificios modernos.

Los fabricantes de medios de transporte de mercancías (camiones) y los de maquinaria agrícola son grandes consumidores de acero. También son grandes

consumidores de acero las actividades constructoras de índole ferroviario desde la construcción de infraestructuras varias así como la fabricación de todo tipo de materia rodante. Otro tanto cabe decir de la industria fabricante de armamento, especialmente la dedicada a construir armamento pesado, vehículos blindados y acorazados. También consumen mucho acero los grandes astilleros constructores de barcos especialmente petroleros u otros buques cisternas. Como consumidores destacados de acero cabe citar a los fabricantes de automóviles porque muchos de sus componentes significativos son de acero.

Cabe destacar que cuando el automóvil pasa a desguace por su antigüedad y deterioro se separan todas las piezas de acero, son convertidas en chatarra y son reciclados de nuevo en acero mediante hornos eléctricos y trenes de laminación o piezas de fundición de hierro (Wikipedia, 2015).

1.1.2. Generalidades de la producción de acero en hornos de arco eléctrico (HAE)

La técnica del horno de arco eléctrico (HAE) es conocida por su versatilidad. Se alcanzan temperaturas de hasta 1930°C y el proceso se controla eléctricamente con gran precisión. Al no utilizar combustibles fósiles en la producción, el acero que se obtiene es más limpio que en los otros procesos. El equipo tiene forma cilíndrica y una cubierta de refractario, poseen un sistema de enfriamiento con agua en las puertas, en el anillo del techo y en las pinzas de los electrodos (Gutiérrez, 2012)

La operación de estos hornos presenta varias ventajas. Por cada tonelada de acero reciclado se ahorra 1,3 t de mineral de hierro; 630,0 kg de carbón y 54,0 kg de caliza. El reciclaje requiere menos energía, disminuye la generación de residuos y la emisión de partículas contaminantes. Las emisiones de carbono son inferiores, así al producir 1,0 kg de acero se emiten 462,0 g de CO_2 , mientras que en el alto horno se emanan 2494,0 g. Por otro lado el consumo de energía es de 10,0 GJ cuando en el alto horno se consume 29,9 GJ (Gutiérrez, 2012).

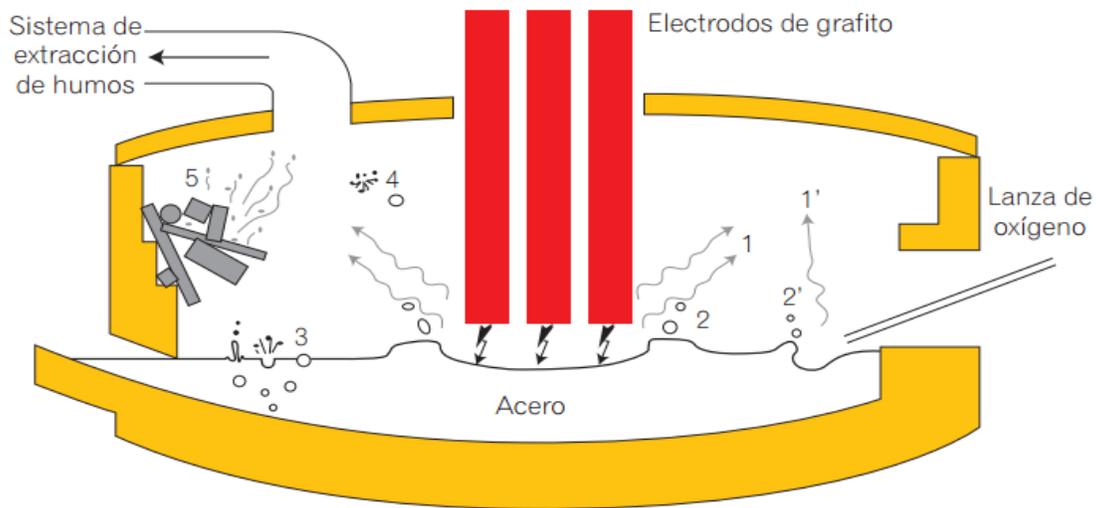
La principal materia prima es la chatarra (80,0 - 90,0 % de la carga) la que procede de desechos de la fabricación de industrias consumidoras (15,0 - 20,0 %), desechos de producción de plantas siderúrgicas (15 %) y chatarras que se recuperan al final de su vida útil las que contienen zinc. Además se alimentan pequeñas cantidades de mineral de hierro, prerreducidos (disuelven metales indeseables), ferroaleaciones, cal, espatofluor, coque y oxígeno (Mata, 1992).

La chatarra y el mineral de hierro, prerreducidos y ferroaleaciones se alimentan en la bóveda giratoria del horno, en la parte superior se encuentra tres electrodos de grafito de donde surgirá el arco eléctrico. En el interior, la diferencia de tensión entre los electrodos y la chatarra hace que los elementos se ionicen, lo que provoca la aparición de partículas cargadas que propagan una corriente eléctrica que forman el arco, para emitir energía y desprender calor, de esta manera las chatarras se derriten y se convierten en líquido fundido. Luego se alimentan, cal y el espatofluor para formar escoria y eliminar el fósforo presente, además, se inyecta oxígeno puro a través de un sistema de lanzas, con el objetivo de oxidar al hierro, silicio y manganeso. Las impurezas se extraen del horno y reciben el nombre de escoria negra, la misma que tiene un aspecto poroso que se utiliza en la industria cementera (Araújo, 2014).

De la operación se desprende monóxido de carbono que genera burbujeo en el líquido fundido. Los gases que se generan tienen apariencia de humo rojizo y contienen metales que se evaporan como: el plomo, cadmio, arsénico, cromo y zinc; siendo este último el de mayor interés ya que está presente en los gases en las concentraciones entre el 18,0 y el 40,0 %. El acero fundido se afina (colada) para reducir oxígeno y eliminar azufre, el metal se cubre con un agente reductor (escoria blanca) y se reducen los óxidos metálicos. Para la desulfuración se lleva el líquido a un horno de cuchara, se sopla gas inerte (argón) que homogeniza la temperatura y la composición del líquido fundido, de esta manera se evita la oxidación y se desplazan las impurezas hacia la escoria, finalmente, el acero es moldeado según la forma deseada. Debido a las altas temperaturas que se

manejan, los equipos cuentan con un sistema de enfriamiento con agua (Moffit, 1995).

La figura 1.1 se muestra el proceso de fabricación del acero en un horno de arco eléctrico (Madias, 2009).



Volatilización: 1) en el arco eléctrico; 1') en la zona de impacto del chorro de oxígeno; proyección de gotas: 2) en el arco eléctrico; 2') en la zona de impacto del chorro de oxígeno; 3) proyección de gotas en atmósfera oxidante, sufriendo una rápida descarburación; desprendimiento directo de partículas sólidas provenientes de adiciones en el horno (4) o de la chatarra (5).

Figura 1.1: Esquema de un horno de arco eléctrico

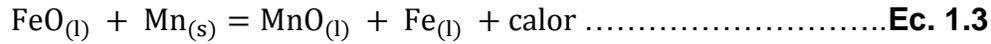
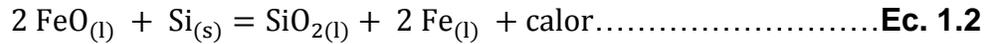
1.1.3. Descripción de proceso de fabricación de acero

Durante el proceso de fusión se obtiene el acero líquido y la escoria, que se presenta sobre la superficie del acero. El proceso de fusión contempla las fases de oxidación, defosforación y formación de la escoria (Gutiérrez, 2012).

Oxidación: En esta fase se produce la oxidación de parte del metal contenido en el líquido fundido. La alimentación de oxígeno al horno de arco eléctrico oxida al hierro según la siguiente reacción química (Mata, 1992).



Esta oxidación es la primera en producirse debido a la gran cantidad de hierro presente en la chatarra. A continuación el óxido de hierro (II) oxida al silicio y manganeso según las siguientes reacciones (Mata, 1992):



Las reacciones de oxidación de hierro, manganeso y silicio son fuertemente exotérmicas, por lo que producen un aumento brusco de la temperatura de fusión, con la consiguiente reducción del consumo energético.

Finalmente, cuando se ha oxidado prácticamente todo el silicio y gran parte del manganeso la temperatura del líquido ha aumentado considerablemente (1600 °C aproximadamente) y la escoria tiene suficiente porcentaje de FeO libre. La adición de carbón en polvo permite la reducción del FeO presente en la escoria según la siguiente reacción química (Araújo, 2014):

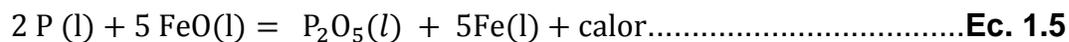


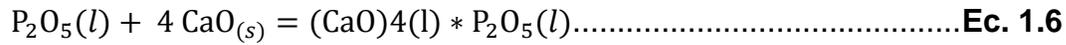
El gas monóxido de carbono (CO), generado al desprenderse del líquido fundido, produce lo que se conoce como hervido del baño. El hervido del baño es necesario para unificar la composición y la temperatura del baño y facilitar la eliminación de gases.

El paso del monóxido de carbono a través de la escoria produce lo que se conoce como escoria espumante y facilita la penetración en la misma de los electrodos, incrementándose la eficiencia energética del horno.

La reducción de la ebullición del líquido fundido es un indicador de que la mayor parte del carbono se ha oxidado.

Defosforación: La presencia de fósforo es perjudicial porque se presenta disuelto en el líquido fundido y se manifiesta por una gran fragilidad del acero en frío. La defosforación se realiza según las siguientes reacciones químicas (Araújo, 2014):





El fósforo oxidado desaparece del líquido para pasar a formar parte de la escoria

Formación de escoria espumosa: El mecanismo de escoria espumosa se basa en las siguientes reacciones químicas (Gutiérrez, 2012):



Como resultado se obtiene CO que se desprende en forma de gas. Las burbujas de CO que se forman pasan a través de la escoria espumándola.

La cantidad de escoria producida depende de una serie de factores como son el contenido de FeO en la escoria negra, la basicidad de la escoria, el volumen de alimentación de oxígeno, el tipo de carbón utilizado y la eficiencia del arco eléctrico (Gutiérrez, 2012)

1.2. Residuos que se generan en los procesos de fabricación de acero

Como resultado de las reacciones que tienen lugar en el proceso siderúrgico, se generan diversos residuos que en su mayoría son reutilizables, pero todos constituyen contaminantes del medio ambiente en mayor o menor grado. Estos elementos se pueden resumir en los dos grupos siguientes (PEREZ, 2012)

Gaseosos: Se generan en los procesos de fusión y afino. Normalmente, estos gases son depurados antes de ser emitidos a la atmósfera con medios secos en un proceso que retiene el material particulado (polvos de acería) para su posterior disposición.

Sólidos: En este grupo se encuentran las escorias, los refractarios y los electrodos.

1.2.1. Principales residuos generados en los procesos siderúrgicos

1.2.1.1. Polvos de acería

Los denominados “povos de acería” son las partículas sólidas recogidas en las instalaciones de filtración de los humos que se producen durante las operaciones de fusión de chatarra y soplado del caldo en el proceso de obtención de acero.

La composición del polvo de acerías es muy variable, ya que depende principalmente del tipo de chatarra utilizada y del proceso de fabricación seguido; en general se pueden distinguir dos tipos de polvo (Pérez, 2012):

- los generados en la fabricación de aceros especiales (PE), donde la chatarra sufre una clasificación previa y la adición de diferentes aleaciones en función del tipo de acero a fabricar,
- polvos procedentes de la fabricación de acero común (PC) de más alto contenido de carbono, que utiliza chatarra con más impurezas procedentes generalmente de galvanizados, de menor coste y mayor contenido en zinc y plomo.

Las propiedades físicas, como granulometría y la composición química de estos polvos, les confieren características que pueden hacer de ellos grandes agentes de contaminación ambiental.

En general, los polvos de acería están compuestos por tres grupos de partículas: partículas de metales volátiles como Zn, Pb y Cd; partículas producidas por separación mecánica de la escoria e inclusiones no metálicas generadas por la expulsión de gotas de metal líquido hacia la atmósfera del horno (Moreno, 2012)

Tabla 1.1 Composición típica de los polvos de acería (Alda et al, 1998)

%	Polvo de acería
Zn	22-38
Pb	3-5
Cd	0,03-0,1
C	1-2
Feo	25-35
CaO	5-7
SiO ₂	3-5

La producción anual de acero en Europa es aproximadamente de 150 Mt de las que el 30 % es decir, unos 50 Mt se producen en hornos de arco eléctrico. Como consecuencia de esta producción la Unión Europea produce anualmente 800.000 t de polvo de acería de horno de arco eléctrico de las que 120.000 t corresponden al Estado Español (Alda et al, 1998)

1.2.1.2. Cascarilla de laminación

Es un subproducto siderúrgico, procedente del proceso de laminación en caliente del acero, constituido fundamentalmente por hierro, óxido de hierro y con contenidos variables de grasas y aceites. En general la producción específica de cascarilla es de unos 35 kg/t de acero (Martín et al, 2004), señalándose que dependiendo del proceso y de la naturaleza del producto, la cantidad puede variar de 20 a 50 kg/t de producto laminado en caliente (Eugenia et al ,2009).

La gran mayoría de los procesos de laminación se realizan en caliente por lo que el oxígeno se combina con el hierro de la superficie, generando una delgada capa de óxido de hierro que se encuentra en diferentes fases como: magnetita (Fe₃O₄), hermatita (Fe₂O₃), Wustita (FeO), entre otros, por tanto este producto es el resultado del proceso de formación de capas de óxido de hierro sobre el acero a altas temperaturas (Araújo, 2014).

El contenido de hierro es normalmente de un 70,0 % y contiene trazas de metales no ferrosos y compuestos alcalinos (Irene Izquierdo et al, 2006)

1.2.1.3. Escoria

Es un residuo sólido del proceso siderúrgico que, en su estado líquido, es una espuma que captura todas las impurezas presentes en el acero. De acuerdo con la etapa del proceso en la que se generen, las escorias se clasifican como negras, resultantes del proceso de fusión o blancas (generada en el afino) (Pérez, 2012). La composición química de la escoria se ilustra en la tabla 1.2.

Tabla1.2 Caracterización de la escoria

Escoria negra (%)	Escoria blanca (%)
CaO: 27 – 37	Calcio: 34,5
SiO ₂ : 101 – 25	Silicio : 11,7
FeO: 3 -25	Hierro: 3,2
Fe ₂ O ₃ : 2 – 22	Magnesio: 8,1
MgO: 4 – 11	Aluminio: 2,7
Cr ₂ O ₃ : 0,6 – 4	

Las escorias tienen tres alternativas de aprovechamiento que han sido válidas desde el punto de vista económico, técnico y ambiental (Madias, 2015).

- Introducción en la industria cementera: Uso para el aporte de hierro en la fabricación del clínquer.
- Uso en capas de rodadura: En este aprovechamiento la escoria hace parte del ligamento bituminoso de las capas asfálticas de las carreteras
- Utilización como explanada, bases y sub-bases de carreteras. Este punto corresponde al relleno de terrenos y restauración de espacios degradados.

Para cualquiera de estos usos de la escoria es necesario hacer un análisis de su composición y en algunos casos, garantizar un tamaño de granos uniforme mediante procesos como cribado.

Actualmente, la escoria es almacenada en patios aledaños o internos dentro de la planta siderúrgica, en forma de cerro con el fin de optimizar las zonas de almacenamiento. Sin embargo, teniendo en cuenta su forma irregular y su

densidad, las condiciones de almacenamiento se vuelven complejas en los lapsos de evacuación de la misma de las plantas productivas. En la Figura 1.2 se pueden observar las condiciones mencionadas anteriormente (PEREZ, 2012)



Figura 1.2 Almacenamiento de escoria en la siderúrgica

Como se puede observar en la anterior imagen, las condiciones de almacenamiento que se requieren para la escoria son bastante exigentes en espacio debido a sus características voluminosas. Adicionalmente, teniendo en cuenta que se trata de un subproducto del proceso, no está contemplado en ninguna siderúrgica contar con un almacenamiento definido; por esta razón se debe contar con una estrategia o alternativa definitiva para su evacuación permanente y correspondiente aprovechamiento, con el objetivo de evitar su acumulación.

1.2.1.4. Barros

Estos se generan mediante el sistema de captación de humos de los convertidores al oxígeno, los contenidos en hierro metálico, óxido de hierro y cal en estos barros los hacen interesantes como aporte a los procesos de reducción o de aceración sin embargo su alto contenido de humedad, contenido de álcalis y la presencia de óxido de zinc proveniente del uso de la chatarra de acero galvanizado suponen

obstáculos importantes para su reutilización en la siderurgia (particularmente en el alto horno y por lo tanto en la planta de sinter). Por otro lado a diferencia de los polvos de hornos de arco eléctricos, el contenido de zinc no es suficientemente alto como para procesarlos en los hornos Waelz, utilizados para concentrar el óxido de zinc (Madias, 2014).

Tomando a título de ejemplo en el caso de Alemania se generan 162 000 t/año de barros o polvos gruesos de BOF, de los cuales se recicla el 96 % y se deposita el 4 % restante. En cambio de los 426 000 t/año de barros y polvos finos de BOF, se recicla el 48 % y se deposita el 52 %. Las razones para esta gran diferencia son el mayor contenido de Zn y de álcalis y el menor contenido de hierro total en los finos (Madias, 2015)

Está claro que es en el reciclado de los finos donde el desafío más importante para alcanzar un objetivo de desperdicio cero en la acería al oxígeno. En la siguiente tabla muestra la composición química de barros gruesos y finos (Madias, 2014).

Tabla 1.3 Composición química de los barros gruesos y finos (en % masa) (Madias, 2015)

Barros	Fe (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Zn (%)	Na ₂ O+K ₂ O (%)	Pb (%)
Gruesos	72	6.7	1.2	0.2	0.3	0.023	0.054	0.011
Finos	63	4.8	1.1	0.1	0.6	0.148	0.38	0.064

1.3. Sistema de captación de polvos

La empresa ACINOX cuenta con una planta auxiliar de purificación de humos que se encarga de la colección de los polvos que se generan en la nave de acería, los cuales se depositan en una tolva y luego de descargados son depositados en vertederos que asigna el CITMA. La instalación está compuesta por filtros mangas donde uno se encuentra en operación y el otro de reserva y por dos ventiladores

de tiro de 15 m^3 con uno en operación y otro de reserva. Los mismos se encargan de la succión de los gases (Barrera, 2016).

Los filtros mangas consisten en las siguientes partes fundamentales:

1. Cuerpo del filtro y tolva con caja receptora – distribuidora.
2. Mangas de filtración, catorce en cada sección.
3. Tapa de mecanismo de mando de dispositivo de sacudimiento, con unos reguladores para el aire y el gas.
4. Colectores de salida de gas y soplado.
5. Tornillo transportador para descargar el polvo.

El cuerpo y las tolvas son fabricados de acero de chapa de 3 mm de espesor, la cámara está dividida en secciones con una dimensión es $747 \times 1494 \times 203500$ mm. El gas purificado de la caja receptora – distribuidora entra en las mangas por las boquillas inferiores.

El diámetro de las mangas es de 220 mm de ancho y de la 3100 mm el área de filtración de las manga es de 2 m^2 y de una sección de $2 \times 14 = 28 \text{ m}^2$. Las mangas se fabrican de la tela de lana o sintética. Tiene 3-5 anillos de refuerzos de alambre de acero galvanizado, 5 mm de diámetro, que se refleja en la superficie externa (para evitar que las mangas se deformen durante el soplado inverso). Las mangas de cada sección están colgadas mediante casquetes en un marco separado unido con el mecanismo de sacudimiento (Barrera, 2016)

1.3.1. Tratamiento de los polvos de acería

En Cuba no se aplica una esquema de tratamiento de los polvos de acería, sólo algunas empresa los colectan y luego son depositados en lugares establecidos por el CITMA mientras otras empresa ni siquiera realizan esta operación (Barrera, 2016, Tápanes et al, 2011).

Estos polvos cuando se arrojan a la atmósfera a través de la chimenea, perjudican el ambiente laboral y geográfico, no obstante en muchos casos se recuperan en las casas de humos. Una vez recuperados surge el interrogante de qué hacer con

ellos. Inicialmente, los polvos se depositaron en terrenos propios o en depósitos de terceros. Luego surgió la posibilidad de reciclarlos externamente, a partir del aprovechamiento de su contenido de óxido de zinc (Madias, 2009).

El reciclado interno también ha sido motivo de desarrollo. Es más atractivo en las plantas que producen aceros inoxidable donde se recuperan cromo y níquel (De la Torre et al, 2013).

La forma de evacuación más natural, es decir el vertido de estos residuos, resulta cada vez más difícil debido a la protección del medio ambiente así como a los costos cada vez mayores y a las capacidades cada vez más reducidas de los depósitos para vertidos especiales (Araújo, 2014).

Además, en el vertido se pierden cantidades considerables de hierro, zinc y plomo inutilizadas. Existen métodos de solidificación e inertización de polvos de acerías en general, pero todos ellos están basados en el empleo masivo de cemento más un activador, los cuales son caros y aumentan grandemente el volumen del material producido, además de obtener productos de forma arcillosa y poco compacta, al llevarlo al lugar de su vertido encarece éste (De la Torre et al, 2013).

La primera solución probada fue la de recircular el polvo al mismo horno que lo produce. De esta manera, puede recuperarse hierro y pueden concentrarse gradualmente óxidos de metales no ferrosos en los humos, pero pronto se experimentaron mayores dificultades en las acerías, en la carga del horno y la recogida de humos, los consumos de energía resultaron ser superiores y disminuyó la producción de los hornos, así que se considera que el procedimiento no es deseable por motivos económicos y, sobre todo, medioambientales (Moreno, 2012)

Resumiendo, el polvo es inadecuado para ser reciclado debido al aumento del contenido no ferroso, que tiene un efecto perjudicial sobre el acero producido.

1.3.2. Métodos de recuperación de elementos metálicos en polvos de acería

Los procedimientos utilizados actualmente para la recuperación de los metales pesados presentes en los polvos de procedimiento de HAE se basan en procedimientos pirometalúrgicos (Waelz, Plasmadust, etc.), procedimientos hidrometalúrgicos (Zincex, Ezinex, etc.) y combinaciones de éstos (Madias, 2009).

Proceso de Waelz: Es el proceso más usado actualmente para el tratamiento de polvos de humos de acería que se han de someter al citado proceso hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos. Dicho proceso se centra en la concentración de óxido de zinc de los polvos hasta obtener un nuevo óxido de zinc que se denomina óxido de Waelz. El óxido de Waelz contiene 54-56 % de Zinc y, de hecho, es una mezcla consistente en óxido de zinc, óxido de plomo, otros óxidos de metales volátiles y, que, sobre todo, incluye la mayor parte del cloro y del flúor presente en los polvos, así como cualquier polvo de < 1 mm arrastrado por los gases de salida del horno (Moreno, 2012)

El proceso de Waelz se lleva a cabo en un horno rotativo inclinado en el que entra una mezcla de polvos y coque fino, con otros aditivos tales como óxido de calcio y arena para conseguir el movimiento rotativo. Mediante la adición de una contracorriente de aire se generan reacciones de combustión y oxidación - reducción a una temperatura de 1250 °C. El zinc se reduce y se vaporiza. El calor requerido se genera por la combustión entre el coque y el aire que ingresa por un extremo y por la oxidación del zinc en forma de vapor. El aire ingresa al horno a temperatura ambiente y el gas egresa por el otro extremo de 700 a 800 °C (Madias, 2009).

Principales reacciones en la carga que tiene lugar en el horno Waelz:





El zinc reducido vaporizado y vuelto a oxidar sale del horno con el gas de escape desde donde se recupera. La limpieza del gas comienza con la cámara de deposición de polvo. En esta cámara también se inyecta agua para el primer enfriamiento. El enfriamiento principal se obtiene por la adición de aire ambiente en un Venturi y por enfriamiento indirecto. El polvo de óxido Waelz en bruto se separa en los filtros (Kyburz, 2013).

Así se obtiene el llamado óxido de Waelz en bruto, con un contenido de Zn entre 54 – 60 %, al que luego se le realiza un lavado previo a contracorriente de dos etapas como mínimo. Para la precipitación del zinc disuelto se agrega carbonato de sodio, aunque algunas plantas lo venden directamente a los productores de zinc o plantas químicas (Madias ,2009).

El proceso de Waelz ha revelado las siguientes desventajas (Moreno, 2012):

1. Existe la posibilidad de aumentar la formación de dioxinas-furanos por la cantidad de cloro que contienen los polvos de acería de alimentación.
2. No elimina casi ninguna cantidad de cloro y flúor procedente de los polvos, lo que resulta en altos costes de mantenimiento, puesto que resulta necesario renovar los ladrillos refractarios dentro del horno rotativo debido a corrosiones graves producidas por el cloro y el flúor a temperaturas elevadas.
3. Se produce un gran impacto ambiental a la atmósfera producido por el elevado volumen de gases de combustión a la salida del horno rotativo, que resulta tan grave como el producido por el Horno Eléctrico de Arco.
4. Tienen que llevarse a cabo tratamientos subsiguientes para eliminar cloro y flúor. Para ello, una posibilidad conocida es que el óxido de Waelz sea lixiviado junto con la solución de carbonato de sodio (Moreno, 2012).

Lixiviación inorgánica con ácidos: El método hidrometalúrgicos es el más utilizado, el 85 % de la producción mundial de zinc es mediante esta vía. Se emplea la técnica de lixiviación para disolver el zinc contenido en la calcina, con lo que se obtiene un electrolito de zinc que se utiliza posteriormente en la técnica de electrolisis para obtener zinc metálico. El proceso se basa principalmente en la siguiente reacción ácido – base:



A pesar de que la calcina en su mayoría contiene zinc en forma de óxido, también lo contiene como: ferrita de zinc y sulfato residual, además de otras impurezas como: hierro, arsénico, antimonio, germanio, sílice, hidróxido de aluminio. El proceso de lixiviación se realiza simultáneamente con la oxidación y neutralización así precipitan las impurezas, de manera continua se trabaja en dos etapas que son la lixiviación primaria y secundaria. Las primeras etapas: lixiviación neutra y con ácido de lavado comprenden la lixiviación primaria, de las cuales se generan un residuo que contiene ferritas de zinc. La lixiviación ácida caliente y ácida fuerte, es la lixiviación secundaria, aquí es donde se elimina el hierro (Gutiérrez, 2012).

De todas formas, en los procesos implantados industrialmente en la actualidad, el óxido Waelz, u otro concentrado de zinc similar, únicamente representa una pequeña parte de la alimentación. Los procesos pirometalúrgicos en general suponen inversiones más caras que los hidrometalúrgicos y, por demás, presentan una mayor recuperación de los metales no ferrosos. El proceso más económico es el hidrometalúrgicos. En este sentido, la purificación por extracción con disolventes puede presentarse como una solución alternativa a la purificación por vía química y ser aplicable en procesos de esta naturaleza de forma técnicamente viable y económicamente rentable (Moreno, 2012.)

1.4. Implicaciones ambientales

Durante la producción del acero se generan: residuos sólidos, efluentes líquidos y emisiones, que resultan perjudiciales para el medio ambiente, de los cuales las más perjudiciales son las emisiones gaseosas del horno, los gases que se

generan en las operaciones de fusión y afino, se depuran con filtros mangas que retienen el material en forma de partículas, las partículas que se retienen son los llamados polvos de acería , que poseen una química y mineralogía variable según la materia prima utilizada en el proceso(MCA, 2010)

Muchas empresas metalúrgicas hacen uso de grandes extensiones de terrenos para intentar almacenar y disponer de estos desechos, pero la acción de agentes ambientales, climáticos y microbianos presentes en el área puede permitir una fácil incorporación de estos metales pesados en los suelos y en las aguas, afectando así tanto a la agricultura como a los acuíferos (Gutiérrez, 2012)

Los metales pesados pueden causar intoxicaciones, de hecho, las intoxicaciones por plomo son una de las enfermedades profesionales más registradas. La forma más común de exposición al plomo es la inhalación de polvos y por contacto con la piel. El plomo inhalado se deposita en las vías respiratorias y se absorbe por completo. Una vez en el organismo, el plomo inorgánico no se metaboliza. Por otro lado, la contaminación ambiental por zinc y sus efectos sobre la población, no son tan conocidos como en el caso de la producida por el plomo; sin embargo cada vez son más numerosos los estudios que ponen de manifiesto su elevada concentración en aguas subterráneas y de superficie y en las destinadas al consumo humano, siempre acompañado a concentraciones elevada de otros elementos, tales como: cadmio y mercurio (Alda et al, 1998)

Aluminio

El aluminio (Al) es un metal blanco brillante, ligero, dúctil, maleable y poco alterable por el aire. Su densidad es de 2,7 y funde a 660 °C. Aun siendo muy oxidable, no se altera en contacto con el aire o el agua, ya que su superficie queda protegida por una capa o lamina de alúmina (Al_2O_3).

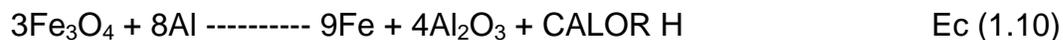
El alto potencial de reducción hace que se oxide superficialmente formando una capa muy delgada y compacta, lo que evita la posterior oxidación del metal autoprotigiéndose de forma natural. A veces se incrementa artificialmente el grosor de esta capa de óxido mediante el proceso electrolítico de anodizado,

haciéndose la protección más duradera. En este proceso se puede colorear, o posteriormente pintar o lacar. El metal se encuentra protegido de la oxidación del aire y el agua, pero ciertos ácidos o soluciones salinas producen corrosión al destruir la capa protectora que se transforma en sal hidratada. Para obtener 1 Tm de aluminio se precisan 2 Tm de alúmina y 4 de bauxita (Almeida, 2003).

La generación de virutas de aluminio en la industria cubana se concretó durante muchos años en la producción de cafeteras en la Empresa EIMPUD de Santa Clara, actualmente la Empresa ALCUBA centra el procesamiento y distribución de los laminados en el país y la empresa de recuperación de materias primas se encarga de la recolección de estos residuos.

1.4.1. Proceso aluminotérmico

La aluminotermia es una técnica para obtener un metal con elevada pureza mediante reducción de un óxido metálico, con empleo de aluminio finamente dividido y consiguiente aumento de temperatura. La acción reductora del aluminio sobre los óxidos de otros metales se debe a que el calor de formación del óxido de aluminio es mucho mayor que el de la mayoría de los demás óxidos metálicos, referidos a la misma cantidad de oxígeno. En este proceso basta con vencer la barrera energética de la energía de activación para que se desarrolle por sí sola; además, es aplicable para la obtención de numerosos metales a partir de sus óxidos. El agente reductor (aluminio), al formar su óxido debe tener una energía de formación más baja que la de los óxidos a reducir. La escoria (Al_2O_3), debe tener menos densidad que la del metal líquido, como en el caso del acero. Las reacciones de reducción aluminotérmica para cada uno de los óxidos del sistema FeO son las siguientes (Lacerda, 2003).



La reacción funciona mucho más eficazmente cuanto mayor es el volumen de mezcla. Vale aclarar que es posible agregar elementos de aleación al compuesto de termita en forma de ferroaleaciones compatibles con la química de la pieza a soldar. Se utilizan por ejemplo aleaciones para aumentar la fluidez y disminuir la temperatura de solidificación de la escoria. Todos ellos deben tener un calor de formación menor que el del óxido de aluminio. Se gran cantidad de calor que produce una elevación de la temperatura a cerca de 3000 °C, ya que ninguno de los productos de la reacción es gaseoso. A temperatura tan elevada no solo se funde el metal que se forma y que por su mayor densidad se reúne en el fondo, sino que también es capaz de fundir el óxido de aluminio formado y que se reúne en la superficie del metal, por su menor densidad, constituyendo una capa protectora(Almeida, 2003).

A la mezcla del óxido metálico con el aluminio se le da el nombre de termita.

Estas termitas solo reaccionan cuando un punto de la mezcla se calienta a una temperatura elevada mediante un cebo o fulminante. Una vez iniciada la reacción en un punto, el calor desprendido es suficiente para propagar la reacción a toda la masa de la termita. La propagación tiene lugar con una velocidad intermedia entre las reacciones explosivas y las reacciones ordinarias. Semejante tipo de reacciones recibe el nombre de reacciones de cebo.

Como cebo se puede utilizar la llama de la cinta de magnesio, que reacciona vivamente con el peróxido de bario. La ventaja de este procedimiento, a pesar de ser caro por el empleo del aluminio, estriba en que los metales resultantes quedan totalmente exentos de carbón, y es sabido que pequeñas cantidades de carbón en los metales o sus aleaciones les hacen perder sus mejores cualidades (Blay et al, 2004).

CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se realiza un estudio de conformación de las mezclas, para lo cual se usa un diseño de experimentos de tipo Mc Lean Anderson, determinándose las proporciones más adecuadas de cascarilla de laminación, polvo de acería de (HAE) y caliza, usando aluminio como reductor, para procesar estos residuos en función de obtener una aleación de posible uso industrial y recolectar concentrados de cinc y plomo. Los polvos colectados y las aleaciones fueron caracterizados químicamente.

2.1. Materias primas

Se emplearon como materia prima los residuos industriales siguientes:

- Polvo de acería, generado en el horno de arco eléctrico de la empresa ACINOX Tunas.
- Cascarilla de laminación, procedente también de ACINOX Tunas.
- Virutas de aluminio, generadas durante los procesos de corte y barrenado de laminados de aluminio en la empresa de Antenas de Santa Clara.
- Silicato de sodio, producido en la Empresa Cloro Sosa de Sagua La Grande de Villa Clara.
- Caliza, del yacimiento el Purio en Encrucijada, Villa Clara.

En la tabla 2.1 se muestra la composición química de las materias primas utilizadas.

Las materias primas para la conformación de las mezclas deben tener un tamaño de grano inferior a 3,00 mm, por lo que de trabajos anteriores ya se disponía de virutas de aluminio y cascarilla de laminación con ese requisito. En el caso de la caliza se utilizó con una granulometría por debajo de 0,5 mm, la cual también está disponible en el laboratorio.

En el caso de los polvos de acería, son de granulometría muy fina, por lo que primeramente son aglomerados utilizando un 10 % de silicato de sodio.

Tabla 2.1 Composición química de las materias primas utilizadas (en % masa).

Cascarilla		Polvo de acería		Virutas de aluminio	
Comp.	Contenido	Comp.	Contenido	Comp.	Contenido
Fe ₂ O ₃	20-30	SiO ₂	4.06 ²	Si	0,3-0,6
Fe ₃ O ₄	40-60	Fe ₂ O ₃	54,24 ¹	Fe	0,1-0,3
FeO	15-20	MnO	6.15 ²	Mn	0,1
Fe	2-5	Al ₂ O ₃	0.83 ²	Cu	0,1
Fe prom	68,83	CaO	6.54 ²	Mg	0,35-0,6
O ₂ prom	24,18	MgO	3.21 ²	Zn	0,15
Impureza	5,00	P ₂ O ₅	0.27 ²	Cr	0,05
Caliza		PbO	4,13 ¹	Ti	0,1
Comp.	Contenido	ZnO	18,28 ¹	Al	
SiO ₂	0,34	NiO	0,06 ¹		
Al ₂ O ₃	0,23	CdO	0,06 ¹		
FeO	0,15	Humedad	1,50 ¹		
CaO	55,20				
MgO	0,68				
PPI	43,4				

¹determinada mediante espectroscopia de absorción atómica en el laboratorio de absorción atómica de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UCLV.

² dato ofrecido por la empresa ACINOX Tunas, determinado mediante fluorescencia de R-X.

2.2. Equipamiento empleado

Pesaje: El pesaje de los componentes se realiza en una balanza técnica.

Mezclado: El mezclado se realizó en un mezclador rotatorio metálico tipo tambor con una velocidad de rotación de 120 r.p.m y un ángulo de inclinación de 30°.

Secado: Se realizó en una estufa a 250 °C.

Reactor aluminotérmico: Esta constituido de un crisol de grafito recubierto de una mezcla de material refractario y montado sobre una base de acero, todo acoplado de manera tal que la reacción ocurre debajo de una campana que conforma el sistema de recolección de gases, tal como se muestra en la figura 2.1. Las dimensiones del crisol se muestran en la tabla 2.2.



Fig. 2.1 Reactor aluminotérmico

Tabla 2.2 Dimensiones del crisol del reactor aluminotérmico.

Diámetro interior	20 cm
Altura	45 cm
Capacidad	6 kg

Sistema de recolección de gases: Para la recuperación de los gases generados durante el proceso aluminotérmico se preparó una instalación formada por una campana ubicada sobre el reactor, seguida de un extractor de gases.

En el interior de la campana se colocó una malla con aberturas de 1 mm, seguida de una tela fina de algodón, los que retienen los polvos arrastrados por la columna de gases. La malla está conectada a una fuente de corriente directa a la que se le aplica una diferencia de potencial de 30 V, para realizar la separación electrostática de las partículas cargadas, al concluir la operación se invierte la polaridad de la fuente y las partículas caen. En la figura 2.2 se muestra un esquema del sistema de recolección de gases.

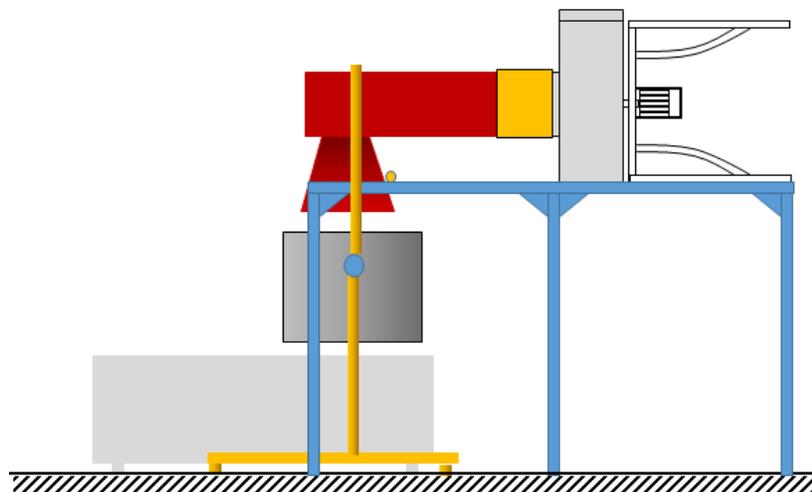


Figura 2.2: Extractor de gases

2.3. Diseño de experimentos

A partir de los resultados preliminares obtenidos por Barrera (2016), se realiza un estudio de conformación de las cargas utilizando residuales industriales (polvos de acería y cascarilla de laminación con virutas de aluminio como reductor).

Para el estudio de conformación se utiliza un diseño de experimentos de tipo Mc Lean Anderson. Las variables y rangos de experimentación se muestran a continuación:

<u>Variable</u>	<u>Nivel mínimo (%)</u>	<u>Nivel máximo (%)</u>
X ₁ (polvo de acería)	20	60
X ₂ (cascarilla)	40	80
X ₃ (caliza)	0	10

Se adiciona a cada mezcla la cantidad estequiométrica de aluminio.

El número de experimentos se determina como:

$$N=q^{q-1} \quad (2.1)$$

Donde

N: número de experimento

q: el número de variables independientes

Dando como resultado: $N=3 \times 2^2=12$ experimentos

De los cuales se eliminan los que están fuera de los rangos de composición establecidos, los que no cumplen la condición de normalidad ($\sum X_i=1$) y los que se repiten. Los datos de conformación de las cargas se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Matriz experimental y rangos de experimentación (% masa)

Polvo	Cascarilla	Caliza	Polvo	Cascarilla	Caliza	Observación
A	A	¿	60	80	-	No
A	B	¿	60	40	0	Si
B	A	¿	20	80	0	Si
B	B	¿	20	40	40	No
A	¿	A	60	30	10	No
A	¿	B	60	40	0	Se repite
B	¿	A	20	70	10	Si
B	¿	B	20	80	0	Se repite
¿	A	A	10	80	10	No
¿	A	B	20	80	0	Se repite
¿	B	A	50	40	10	Si
¿	B	B	60	40	0	Se repite

Las composiciones de los puntos seleccionados se muestran en la tabla 2.4, determinándose también un punto centro el que es replicado.

Tabla 2.4 Puntos de diseño de experimentos a realizar

Mezcla	Polvo	Cascarilla	Caliza
1	60	40	0
2	20	70	10
3	20	80	0
4	50	40	10
C	37,5	57,5	5

Los datos de conformación de las mezclas incluyendo el aluminio se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Datos de conformación de cada una de las mezclas (en % masa)

Componentes	1	2	3	4	C1	C2	C3
P.A	60	20	20	50	37,5	37,5	37,5
Cascarilla	40	70	80	40	57,5	57,5	57,5
Caliza	0	10	0	10	5	5	5
Aluminio	24,4	27,4	30,8	22,6	26,3	26,3	26,3
Total	124,4	127,4	130,8	122,6	126,3	126,3	126,3

2.4. Preparación de los polvos

Se preparó una mezcla de polvos de acería con un 10 % de silicato de sodio, la que fue secada al sol durante 5 horas y posteriormente en estufa durante 1 hora a 250 °C. Una vez fría la mezcla, esta se tritura y se hace pasar por un tamiz de 2 mm. En la figura 2.3 se muestra el polvo de acería tamizado.



Figura 2.3: Polvo de acería tamizado.

2.5. Procesamiento aluminotérmico

A partir de los datos expuestos en la tabla 2.5 se prepararon las 7 mezclas programadas a partir del diseño de experimento. Cada una de estas mezclas una vez homogenizadas, se introducen en la estufa a 250 °C por una hora. La mezcla caliente es alimentada al reactor de grafito, donde se activa la reacción mediante arco eléctrico, utilizando un electrodo de hierro, lo que proporciona el calor

suficiente para el inicio de la reacción. Una vez concluida la reacción la carga fundida se deja enfriar para la posterior separación del metal y la escoria (Ver figura 2.4)



Figura 2.4 Reactor de grafito durante una colada

El punto de mejores resultados obtenidos a partir del diseño de experimento fue replicado bajo las mismas condiciones de trabajo, recolectándose los polvos generados durante el procesamiento.

2.6. Caracterización de las aleaciones y los polvos colectados

2.6.1. Caracterización química de las aleaciones

Las probetas de análisis químico fueron desbastadas por la parte superior en un disco abrasivo en la Empresa Planta Mecánica, de tal modo que se obtuviera un área suficiente para la incidencia del arco en el análisis espectral de emisión atómica.

El análisis químico fue realizado en el Laboratorio de Análisis Químico de la Empresa Planta Mecánica, con el empleo de un equipo de Análisis Espectral por Emisión Atómica Spectrógrafo Belec Vario Lab (figura 2.5) el cual procesa los datos con el software Belec Win 21, propio del equipo.

Previo al análisis, el equipo fue calibrado con los requeridos. La determinación de la composición química se realizó por triplicado, reportándose el valor promedio.



Figura 2.5 Espectrógrafo Belec Vario Lab 2.7.2 Polvos colectados:

2.6.2. Caracterización química de los polvos

Los polvos colectados fueron caracterizados mediante espectroscopia de absorción atómica, en el laboratorio de absorción atómica de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UCLV (ver figura 2.6). Para las determinaciones, las muestras fueron disueltas en agua regia, preparándose curvas de calibración por separado para los diferentes elementos químicos. Las curvas de calibración fueron preparadas usando soluciones patrones y reactivos de calidad puros para análisis. Los elementos determinados fueron: Fe, Zn, Pb, Cd, Ni, determinándose además el contenido de humedad en cada una de las muestras.



Fig. 2.6 Espectrofotómetro de absorción atómica

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

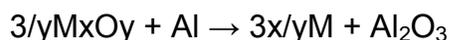
En este capítulo se presentan y analizan los principales resultados obtenidos a partir del diseño de experimento realizado. Además se analizan los resultados obtenidos en la cuantificación de los elementos de interés en los polvos recolectados generados durante el procesamiento aluminotérmico mediante una mezcla de cascarilla de laminación, polvo de acería, caliza y como elemento reductor virutas de aluminio, así como en la aleación obtenida.

3.1. Balance de Masa

El balance de masa o balance de materia se define como una determinación de las cantidades de los diferentes materiales que intervienen en el proceso, basándose en la ley de conservación de masa, de manera que se pueden contabilizar las cantidades de diversos materiales que entran y salen del sistema. De otra manera, es una forma de la contabilidad para un proceso que ya está operando. La ecuación básica en los balances materiales es la ley de conservación de materia (Castellanos, et al., 2001).

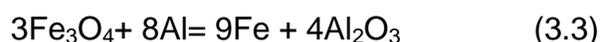
Masa acumulada = Masa que entra al sistema – Masa que sale del sistema (3.1)

La reacción química general que representa el proceso de reducción que tiene lugar entre los óxidos metálicos y el aluminio es la siguiente:



Donde M representa el metal que se obtiene y MxOy son los óxidos metálicos presentes en la carga metalúrgica.

A partir de las reacciones químicas fundamentales que ocurren y un grupo de criterios de la literatura se realiza el balance de masa. Las reacciones químicas tomadas como referencia son las siguientes:





Los anexos I muestran los resultados de los balances.

Las tablas 3.1, y 3.2 muestran la composición química teórica de las aleaciones y las escorias

Tabla 3.1 Cantidad y composición química teóricas de las aleaciones (en g y % masa).

Elemento	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3		Mezcla 4		Mezcla C	
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
Fe	49,72	90,77	54,73	93,37	61,46	93,27	45,92	91,56	52,96	94,189
Si	1,91	3,48	0,72	1,23	0,74	1,12	1,60	3,19	1,24	2,209
Cr	0,19	0,34	0,08	0,14	0,08	0,128	0,16	0,314	0,13	0,226
Cu	0,02	0,044	0,03	0,046	0,03	0,046	0,02	0,045	0,03	0,046
Mn	2,88	5,26	0,98	1,67	0,98	1,492	2,40	4,793	1,81	3,22
Ti	0,02	0,04	0,03	0,046	0,03	0,046	0,02	0,045	0,03	0,046
Al	0	0	2,04	3,47	2,55	3,87	0	0	0,01	0,024
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0,029	0,054	0,009	0,017	0,01	0,015	0,02	0,049	0,019	0,033
total	54,78	100	58,62	100	65,89	100	50,15	100	56,23	100

Como se puede observar en la tabla anterior las aleaciones deben contener entre 1- 5 % de Mn, silicio de 0,7 – 3,5 % y desde 0 – 3,5 % de Al, además otros elementos de aleación en contenidos por debajo de 0,3 %.

Tabla 3.2 Composición química teórica de las escorias (% masa)

Elemento	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3		Mezcla 4		Mezcla C	
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
CaO	3,92	6,87	6,91	12,55	1,31	2,38	8,87	15,64	5,25	9,39
MgO	1,99	3,481	0,71	1,290	0,72	1,31	1,66	2,92	1,27	2,27
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P ₂ O ₅	0,16	0,283	0,05	0,098	0,05	0,09	0,14	0,24	0,10	0,181
Al ₂ O ₃	50,99	89,35	47,36	86,05	52,72	96,20	46,06	81,19	49,27	88,15
Total	57,06	100	55,04	100	54,80	100	56,72	100	55,90	100

En la tabla 3.2 se observa que las escorias deben estar formadas por más de 81 % de Al₂O₃ además de contenidos variables de CaO y MgO.

3.2. Calores de Reacción

En el proceso aluminotérmico al combinarse los óxidos aportados por la cascarilla y el polvo de acería con el aluminio, desprenden gran cantidad de calor, por lo que se genera un alto poder calorífico. La relación entre la cantidad de calor generada por las reacciones químicas y la cantidad de carga procesada desempeña un papel fundamental en el comportamiento del proceso.

$$\Delta H_{r(298)} = \sum n \Delta H_{f \text{ prod}} - \sum n \Delta H_{f \text{ reacc}} \quad (3.13)$$

$$\Delta G_{r(298)} = \sum n \Delta G_{f \text{ prod}} - \sum n \Delta G_{f \text{ reacc}} \quad (3.14)$$

Tabla 3.3 Calores de formación de los óxidos que intervienen en el proceso (Perrys,1999).

Óxido	ΔH_f (kcal/mol)	$\Delta G_{298 K}$ (kcal/mol)
SiO ₂	-203,35	-190,4
Al ₂ O ₃	-399,09	-376,87
Fe ₂ O ₃	-198,5	-179,1
Fe ₃ O ₄	-266,9	-242,3
MnO	-92,04	-86,77
MgO	-143,84	-136,17
FeO	-64,62	--59,38
NiO	-158,4	-151,7
PbO	-50,86	-43,88
ZnO	-83,36	-76,19
Cr ₂ O ₃	-268,8	-249,3

Con los calores de reacción y los datos de conformación de cada una de las mezclas formuladas, se determina la cantidad de calor generada por cada una de las cargas. Los resultados se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Cantidad de calor generada por cada una de las cargas formuladas.

Carga	1	2	3	4	centro
Q(cal/g)	-868,49	-892,35	-813,58	-791,73	-806,51

Como se observa en la tabla los calores de reacción por la muestra aluminotérmica poseen valores por encima de 550 cal/g, puesto que cuando la cantidad de calor es por encima de 550 cal/g, el proceso aluminotérmico puede autopropagarse sin el suministro de energía externa adicional, por lo que todas las cargas deben procesarse sin dificultades (Díaz, 2013)

3.3. Resultado del procesamiento pirometalúrgico

3.3.1. Resultados del diseño de experimentos

Los resultados del procesamiento aluminotérmico de las mezclas evaluadas en el diseño de experimentos se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados obtenidos en el diseño de experimentos.

Muestras	Metal (g)	Rdto (%)	Escoria (g)	Rdto (%)	No reaccionó (g)
1	0	0,00	88	77,11	139
2	49	41,79	163	148,07	18
3	93	70,57	140	127,74	12
4	0	0,00	141	124,29	85
C1	64	56,91	199	178,00	20
C2	65	57,80	182	162,79	35
C3	64	56,91	197	176,21	19,1

Como puede observarse en la tabla 3.5 los rendimientos variaron desde 0 – 70 %, obteniéndose los mejores resultados para el punto centro y la mezcla 3. El mejor rendimiento obtenido fue de 70 %. En el caso de las escorias los rendimientos fueron desde el 70 % hasta 178 %, además en algunos puntos quedaron cantidades significativas de mezcla sin reaccionar, todo lo cual está en correspondencia con los bajos niveles de reducción alcanzados en algunas mezclas.

El procesamiento estadístico del diseño se realizó utilizando el Software STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14, donde las variables dependientes seleccionadas fueron: cantidad de metal (metal) y cantidad de escoria (escoria). El procesamiento estadístico se muestra en el Anexos II

Para la variable metal se tiene:

$$\text{Metal} = -1,81903 \cdot \text{caliza} + 1,41897 \cdot \text{cascarilla} - 0,657029 \cdot \text{polvo}; R^2_{\text{aj.}}: 90,0 \%$$

Se obtiene un modelo con R^2 ajustado del 90 %, resultando la variable cascarilla la única variable significativa para un 95 %. Observándose también en el modelo que las variables caliza y polvo de acería tienen una influencia negativa sobre el proceso.

Este efecto está relacionado con el hecho de que ambos componentes de la mezcla consumen energía durante el procesamiento metalúrgico disminuyendo la relación entre la cantidad de calor generada por la reacción y la masa de mezcla. Este efecto, para el caso de los polvos, puede deberse a que el hierro presente en

los polvos de acería no se encuentra en su totalidad en forma de óxidos de hierro, sino formando otros compuestos como por ejemplo espinelas de hierro, espinelas de hierro y cinc, etc., como ocurre en la realidad.

Para la variable escoria se tiene:

$$\text{Escoria} = 2,28787 \cdot \text{caliza} + 2,00387 \cdot \text{cascarilla} + 0,271871 \cdot \text{polvo}; R^2_{\text{aj.}}: 91,02 \%$$

En este caso se obtiene un R^2 ajustado del 91 %, resultando también en este caso la única variable significativa, para un 95 %, la cantidad de cascarilla de laminación presente en la mezcla. En este caso todas las variables tienen un efecto positivo, lo cual está en correspondencia con lo obtenido para la variable dependiente cantidad de metal.

De las 7 cargas evaluadas en el diseño se seleccionó la carga 3 como la de mejores resultados debido a que proporciona la mayor cantidad de metal y su comportamiento tecnológico durante el procesamiento fue superior, dado sobre todo por el buen encendido de la termita y la rápida reacción del proceso. La elección de esta mezcla está en total correspondencia con los modelos estadísticos obtenidos ya que en ella no está presente la caliza y la cantidad de polvo de acería es el valor mínimo evaluado.

3.3.2. Evaluación de la carga seleccionada

Para recolectar los polvos de la carga 3 (seleccionada como la de mejores resultados) se prepararon 3 mezclas, una de 1000 g y dos de 500 g. Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran fotos de los productos obtenidos en el procesamiento. Estas cargas fueron fundidas de forma tal que los polvos generados durante el proceso fueran colectados por el sistema instalado a tal efecto.

Carga 1 de 1000 g

La figura 3.1 muestra una foto del metal y la escoria obtenidos en la colada.



Figura 3.1 Escoria y metal obtenidos en el procesamiento aluminotérmico de la carga 1:1000 g

El encendido de esta carga fue bueno y la reacción fue rápida.

Carga 2 de 500 g

La figura 3.2 muestra una foto del metal y la escoria obtenidos en la colada.



Figura 3.2 Escoria y metal obtenidos en el procesamiento aluminotérmico de la carga 2:500 g

Esta carga se demoró un poco al encender, luego la reacción fue rápida

Carga 3 de 500 g



Figura 3.3 Escoria y metal obtenidos en el procesamiento aluminotérmico de la carga 3:500 g

Esta carga al igual que en la 2 no tuvo un rápido encendido, pero luego la reacción ocurrió de manera rápida.

Debe señalarse que la instalación montada para colectar los polvos no es suficiente para atrapar todos los polvos, ya que una vez que el paño de tela se llena, obstruye el flujo de gases dificultando su circulación, por lo que comienzan a salir de la misma, perdiéndose una apreciable cantidad de polvos, la cual es muy difícil de determinar.

La tabla 3.6 muestra la composición química de la aleación obtenida en la carga 1 de 1000 g, donde se puede observar que como resultado del procesamiento aluminotérmico se obtiene un acero al carbono, el cual puede ser utilizado para múltiples aplicaciones industriales. Debe destacarse que en la composición de este acero aparecen varios elementos de aleación de apreciable valor por las propiedades que le confieren tal es el caso del C, Mn, Cr, Mo, etc., sólo el azufre aparece en un valor relativamente alto.

Tabla 3.6 Composición química de la aleación

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr
0,48	1,57	1,508	0,03	0,28	2,46	0,31	0,14
Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Pb
0,18	0,05	0,02	0,03	0,01	0,04	0,06	0,66

Un aspecto que puede evidenciar la calidad de la aleación obtenida está relacionado con la poca porosidad de la misma, lo cual puede ser apreciado si observamos la muestra utilizada para el análisis químico en la cual no se observa la presencia de poros ni grietas en el metal preparado para esta determinación (ver figura 3.3).



Figura 3.4 Probeta utilizada para el análisis químico

3.3.3. Recolección de los polvos

El procesamiento pirometalúrgico de las 3 cargas permitió obtener los resultados que se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Polvos colectados durante el procesamiento de la carga 3 (en g)

Carga	Muestra No	Masa tela	Muestra No	Masa malla	Masa pared	Total	% de la carga
1:1000	1	2,267		0,066	1,029	3,362	0,34
2:500	2	1,054	4	0,24	0	1,294	0,26
3:500	3	0,998		No se realizó	0,353	1,351	0,27

En la muestra 1 el polvo analizado es de color amarillo claro fue el que se obtuvo en la tela, el mismo se obtuvo mediante la generación de la fundición de 1 kg de carga donde se le aplicó separación electrostática.

En las muestras 2 el polvo analizado fue el polvo generado por la fundición de 500 g de carga con separación electrostática, este polvo fue el adherido a la tela este presenta un color blanco.

La muestra 3 dio como resultado un polvo color gris oscuro un poco aglomerado como resultado de que en el proceso no se realizó la separación electrostática por lo que demuestra que el uso de la malla en la cual se le suministraba corriente en el interior del extractor extraía una gran parte de humedad en los polvos obtenidos.

La muestra 4 tiene como característica un polvo color blanco, este se obtuvo en la malla que se encuentra en el interior del extractor, el mismo es el que se generó en la fundición de 500 g de carga donde se realizó la separación electrostática.

Si se analizan los resultados de la tabla 3.6, en lo referido a la cantidad de polvos generados, independientemente a la cantidad que pueda haberse perdido por lo ineficiente del sistema de recolección, se puede señalar que los polvos colectados representan entre el 0,26 - 0,34 % de la carga.

Por tanto, asumiendo esa cantidad como la máxima posible a recuperar se puede señalar que si una tonelada de acero laminado genera como promedio 35 kg de cascarilla de laminación y 25 kg de polvos de acería, de acuerdo a la Tabla 2.5 se pueden preparar alrededor de 56 kg de carga, los que son capaces de generar unos 0,17 kg de concentrado. En resumen, independientemente de lo ineficiente que pueda ser la instalación utilizada, permite recuperar aproximadamente 0,17 kg de concentrado de plomo y cinc por cada tonelada de acero laminado.

Los resultados de la caracterización química, mediante espectroscopia de absorción atómica, se muestran en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Resultados del análisis cuantitativo de los polvos colectados

Muestras	Zn	Pb	Fe	Cd	Ni	Humedad
1	43,82	10,86	1,96	0,17	0,004	1,31
2	55,97	5,03	3,11	0,20	0,009	0,88
3	36,88	9,76	6,36	0,13	0,0016	3,89
4	53,56	2,17	5,23	0,11	0,0026	0

En la tabla 3.8 se puede apreciar que los polvos colectados, constituyen un concentrado de plomo y cinc con contenidos entre 36 – 54 % de Zn y de 2 – 11 % de Pb. Independientemente de la variabilidad en cuanto a composición de los polvos, estos resultados son comparables con los concentrados de plomo y cinc obtenidos por el método de Waelz, tal como se señala en el epígrafe 1.3.1 del capítulo 1.

De los resultados de la tabla 3.8 se puede observar que el menor contenido de Zn se obtuvo para la mezcla 3 en la cual no se aplicó separación electrostática, lo cual indica lo importante que puede resultar esta operación para aumentar la calidad del concentrado.

CONCLUSIONES

Los polvos de acería y la cascarilla de laminación son residuales industriales que se generan de manera inevitable en los procesos de obtención de acero y de laminación en caliente.

1. Mediante el uso de un diseño de experimentos de tipo Mc Lean Anderson se conformó una carga compuesta por cascarilla de laminación, polvos de acería y virutas de aluminio, que permite el procesamiento aluminotérmico de estos residuos industriales, con un rendimiento metálico del 70 %.
2. El procesamiento metalúrgico, mediante aluminotermia, de la mezcla de residuos industriales permitió obtener un acero con una composición química comparable con la de aceros tradicionalmente utilizados en la industria.
3. La instalación utilizada permitió recolectar polvos con contenidos de Zn entre 43 – 56 % y de Pb entre 2 – 11 %, concentrado que representa entre 0,26 – 0,34 % de la carga conformada.
4. La estrategia de combinar en una misma mezcla polvos de acería con cascarilla de laminación permite recuperar, mediante aluminotermia, los elementos metálicos contenidos en ellos ya sea en forma de aleación o de un concentrado en forma de polvo, constituyendo una alternativa de procesamiento de estos residuales con un efecto positivo para el medio ambiente.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de reproducibilidad del proceso con vistas a evaluar con mayor cantidad de datos la tecnología propuesta.
2. Evaluar la factibilidad técnico económico del procesamiento de los residuales industriales estudiados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones (2004). Escorias de acerías. IHOBE. Sociedad publica de gestión ambiental. 131pp.
2. Alda, J. V. et. al (1998). "Minimización de residuos. Un caso real: Polvo de acería de horno de arco eléctrico". DYNA N^o 9
3. Lacerda, J. M.et.al (2003). "Aluminotermia. Infosolda. Consultado 16/6/2017.
https://www.researchgate.net/publication/265165361_Reciclado_de_polvos_y_barros_de_alto_horno?enrichId=rgreq-bf67998c-5504-4486-80ad-14cf938c0cf6&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2NTE2NTM2MTtBUzoxMzU5OTkyNTQ0Mzc4ODhAMTQwOTQzNjE1NzgzNw%3D%3D&el=1_x_2
4. Araújo, J. A. D. (2014). "Reciclagem de pó de forno eléctrico a arco para a produção de aglomerado profundido (APF) para uso en processo siderúrgico". Tesis de doctorado. Universidad de San Carlos, Brasil.
5. Duart, J. M. D. et. al (2004). "Aceros aluminotermicos. Nuevas aplicaciones". Rev de Metalurgia. Madrid. 40 (2004) 56-64
6. Castellanos, J. (2001). Balances de masa y Energía métodos clásicos y técnicas no convencionales, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
7. De La Torre et. al (2013). Valorización de polvos de acería, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis. Revista Politécnica - Julio 2013, Vol. 32, No. 1, Páginas: 51–56.
8. DELVASTO, P. (2011). "Caracterización de polvos de acería eléctrica producidos en venezuela y evaluación preliminar de su lixivabilidad con ácidos orgánicos diluidos" .Dyna, Nro. 169, pp. 221-229. Medellín
9. Días, H., (2013). Obtención de un prototipo de termita para el relleno superficial de piezas Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara.

10. EUGENIA, R. J. M. et. al (2009). "PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE ESPONJAS METÁLICAS". Solicitud de patente de invención .Oficinas españolas de patentes y marcas .
11. ".Gutiérrez, C. F. E. (2012). Recuperación de zinc a partir de polvos de acería. Proyecto previo a la obtención del título de ing. Escuela Politecnica NACIONAL. Facultad de ingeniería Química y Agropecuaria . Quito Email:ferespi277@hotmail.com
12. Irene Izquierdo et. al (2006). "Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC)." 512.
13. Izquierdo, I. et. al (2017). "Millonaria inversión para el desarrollo minero en Pinar del Río." Consultado 30/5/2017.
<http://www.cubadebate.cu/noticias/2013/06/19/pinar-del-rio-nuevas-inversiones-en-la-mineria/#.WS7KY03FC8Y>.
14. Kyburz, N. Q. (2013). INCORPORACIÓN DE ESCORIA WAEZ AL SECTOR CERÁMICO: EJEMPLO PRÁCTICO DE ECOLOGÍA INDUSTRIAL. Tesis Doctoral .Departamento de Química y Química Inorgánica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA: 308.
15. LINEAMIENTOS (2016). Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución.
16. Madias, J. (2014). "Reciclado de polvos y barros de alto horno." Dossier tecnológico. Consultado 18/6/2017.
https://www.researchgate.net/publication/265165361_Reciclado_de_polvos_y_barros_de_alto_horno?enrichId=rgreq-bf67998c-5504-4486-80ad-14cf938c0cf6&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2NTE2NTM2MTtBUzoxMzU5OTkyNTQ0Mzc4ODhAMTQwOTQzNjE1NzgzNw%3D%3D&el=1_x_2

17. Madías, J. (2009). Tendencias tecnológicas: Reciclado de polvos de horno eléctrico. Gerente de empresa «Metalurgia» Argentina.
18. Madías, J. (2015). "Reciclado de escorias de acería." Dossier tecnológico
19. Martín, M. I et. al (2004). "Posibilidades sobre el uso de residuos de la industria del acero en la eliminación de metales de efluentes líquidos." Revista de Metalurgia. Madrid 40 (2004) 324-328
20. Mata, M. T. (1992). Crecimiento y desformacion del oxido durante la laminacion en caliente de acero de bajo al carbono. Trabajo de Tesis . Ingenieria Mecanica y electrica_ Autonoma de nuevo leon .San Nicolas de los garzas.120.pp
21. MCA (2010). "EL SECTOR DEREICLAJE DE METALES EN ESPAÑA": Fundacion del metal para la formación cualificación y el empleo 138.pp
22. Moffit, A. (1995). Hierro y acero industrias basadas en recursos . ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO 20.pp
23. Barrera, M. A (2016). Estudio de alternativa de procesamiento de polvos de acería. Trabajo de Tesis .Facultad Metalurgia –Electromecánica .60 pp
24. Moreno, A. R. (2012). "POLVOS DE ACERÍAS (Óxidos de Zinc)." Cartagena 26 pp
25. PÉREZ, A. M. S. (2012). Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico, Trabajo de grado .Universidad tecnológica de Pereira: 54 pp.
26. Perrys (1999). "Perrys." Perrys Chemical Engineers Handbook. SEVENTH EDITION. McGraw-Hill. 1999.
27. Tápanes.D., et. al (2001). "Utilización del polvo de acería de horno de arco eléctrico.". Ingeniería Mecánica, No. 1 (2001) pág. 11 -17.

28. Wikipedia (2015). Aplicaciones del acero. Wikipedia. La enciclopedia libre.

Anexo I

Tabla 1 Balance de masa de la mezcla 1.

Componentes	Entrada	Generación	Consumo	Salida
SiO ₂	2,44	0,00	2,44	0,00
Fe ₂ O ₃	42,55	0,00	42,55	0,00
Fe ₃ O ₄	20	0	20	0
FeO	7,000	0	7,000	0,000
CaO	3,92	0,00	0,00	3,92
MgO	1,93	0,06	0,00	1,99
Cr ₂ O ₃	0,24	0,00	0,24	0,00
MnO	3,69	0,00	3,69	0,00
Al ₂ O ₃	0,50	50,49	0,00	50,99
ZnO	10,97		10,97	0,00
PbO	2,48		2,48	0,00
CdO	0,03		0,03	0,00
P ₂ O ₅	0,16			0,16
Otros	4,07			4,07
Si	0,11	1,80	0,00	1,91
Pb	0,00	2,30		2,30
Cd	0,00	0,03		0,03
Fe	0,05	49,67	0,00	49,72
Mn	0,02	2,86	0,00	2,88
Cu	0,02	0,00	0,00	0,02
Mg	0,04	0,00	0,04	0,00
Zn	0,05	8,81		8,86
Cr	0,02	0,16		0,19
Ti	0,02			0,02
Al	24,06		26,72	-2,66
O ₂	0,02		0,02	0,00
NiO	0,03		0,04	0,00
Ni	0	0,02		0,02
Total	124,4			124,4

Tabla 2 Balance de masa de la carga 2.

Componentes	Entrada	Generación	Consumo	Salida
SiO ₂	0,81	0,00	0,81	0,00
Fe ₂ O ₃	28,35	0,00	28,35	0,00
Fe ₃ O ₄	35,00	0,00	35,00	0,00
FeO	12,25		12,25	0,00
CaCO ₃	10,00	0,00	10,00	0,00
CaO	1,31	5,60	0,00	6,91
MgO	0,64	0,07	0,00	0,71
Cr ₂ O ₃	0,08	0,00	0,08	0,00
MnO	1,23	0,00	1,23	0,00
Al ₂ O ₃	0,17	47,20	0,00	47,36
P ₂ O ₅	0,05			0,05
ZnO	3,66		3,66	0,00
PbO	0,83		0,83	0,00
CdO	0,01		0,01	0,00
Otros	5,61			5,61
Si	0,12	0,60	0,00	0,72
Fe	0,05	54,68	0,00	54,73
Mn	0,03	0,95	0,00	0,98
Cu	0,03	0,00	0,00	0,03
Mg	0,04	0,00	0,04	0,00
Zn	0,05	2,94		2,99
Cr	0,03	0,05		0,08
Ti	0,03			0,03
Al	27,01		24,98	2,04
O ₂	0,03		0,03	0,00
CO ₂	0,00	4,40		4,40
Pb	0,00	0,77		0,77
Cd	0,00	0,010		0,01
NiO	0,01		0,01	0
Ni	0			0,010
Total	127,4			127,4

Tabla 3 Balance de masa de la carga 3.

Componentes	Entrada	Generación	Consumo	Salida
SiO ₂	0,81	0,00	0,81	0,00
Fe ₂ O ₃	30,85	0,00	30,85	0,00
Fe ₃ O ₄	40	0	40	0,00
FeO	14,00		14,00	0,00
CaO	1,31	0,00	0,00	1,31
MgO	0,6	0,08	0,00	0,72
Cr ₂ O ₃	0,1	0,00	0,08	0,00
MnO	1,2	0,00	1,23	0,00
Al ₂ O ₃	0,2	52,56	0,00	52,72
P ₂ O ₅	0,05			0,05
ZnO	3,7			0,00
PbO	0,8			0,00
CdO	0,0			0,00
Otros	6,4			6,36
Si	0,1	0,60	0,00	0,74
Fe	0,1	0,00	0,00	61,46
Mn	0,0	0,00	0,00	0,98
Cu	0,0	0,00	0,00	0,03
Mg	0,0	0,00	0,05	0,00
Zn	0,1	2,94		3,00
Cr	0,0			0,08
Ti	0,0			0,03
Al	30,4		27,81	2,55
O ₂	0,0		0,03	0,00
Pb	0,0	0,766		0,77
Cd	0,0	0,010		0,01
Ni	0,0	0,010		0,01
Total	130,8			130,8

Tabla 4 Balance de masa de la carga 4.

Componentes	Entrada	Generación	Consumo	Salida
SiO ₂	2,03	0	2,0	0
Fe ₂ O ₃	37,1	0	37,1	0
Fe ₃ O ₄	20,0	0	20,0	0
FeO	7,0		7,0	0
CaO	3,3	0	5,6	8,9
MgO	1,6	0,0565	0,0	1,66
Cr ₂ O ₃	0,2	0	0,2	0
MnO	3,1	0	3,1	0
CaCO ₃	10			
Al ₂ O ₃	0,4	45,64	0,0	46,06
P ₂ O ₅	0,135			0,135
ZnO	9,1			0
PbO	2,1			0
CdO	0,03			0
Otros	3,9			3,9
Si	0,1	1,49832542	0,0	1,600
Fe	0,05	0	0,0	45,92
Mn	0,02	2,38174933	0,0	2,40
Cu	0,02	0	0,0	0,02
Mg	0,03	0,03	0,0	0,00
Zn	0,05	7,344		7,39
Cr	0,02	0,135		0,16
Ti	0,02			0,02
Al	22,3		24,2	-1,87
O ₂	0,02		0,02	0
CO ₂	0,0	4,400		4,400
Ni	0,0	0,025		0,02
Pb	0,0	1,915		1,92
Cd	0,0	0,025		0,03
NiO	0,03178			0
Total	122,6			122,6

Tabla 5 Balance de Masa de la carga 5.

Componentes	Entrada	Generación	Consumo	Salida
SiO ₂	1,523	0,000	1,523	0,000
Fe ₂ O ₃	34,716	0,000	34,716	0,000
Fe ₃ O ₄	28,750	0,000	28,750	0,000
FeO	10,063		10,063	0,000
CaO	2,453	2,800	0,000	5,253
MgO	1,204	0,066	0,000	1,270
Cr ₂ O ₃	0,148	0,000	0,148	0,000
MnO	2,306	0,000	2,306	0,000
Al ₂ O ₃	0,311	48,963	0,000	49,274
P ₂ O ₅	0,101			0,101
ZnO	6,855		6,855	0,000
PbO	1,547		1,547	0,000
CdO	0,021		0,021	0,000
NiO	0,024		0,024	0,000
Otros	4,957			4,957
Si	0,118	0,000	0,000	1,242
Fe	0,053	0,000	0,000	52,960
Mn	0,026	0,000	0,000	1,813
Cu	0,026	0,000	0,000	0,026
Mg	0,039	0,000	0,039	0,000
Zn	0,053	5,508		5,561
Cr	0,026		0,101	0,128
Ti	0,026			0,026
Al	25,929		25,916	0,013
O ₂	0,026		0,026	0,000
CO ₂	0,000		2,200	2,200
Pb	0,000			1,436
Cd	0,000			0,019
Ni	0,000			0,019
CaCO ₃	5,000		5,000	0,000
Total	126,3			126,3

Anexo II

Regresión Múltiple - metal

Variable dependiente: metal

Variabes independientes:

caliza

cascarilla

polvo

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
caliza	-1,81903	1,8806	-0,967258	0,3882
cascarilla	1,41897	0,255722	5,54889	0,0052
polvo	-0,657029	0,357686	-1,83689	0,1401

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	21903,4	3	7301,12	18,68	0,0081
Residuo	1563,64	4	390,909		

Total	23467,0	7			
-------	---------	---	--	--	--

R-cuadrada = 93,3369 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90,0053 por ciento

Error estándar del est. = 19,7714

Error absoluto medio = 14,1224

Estadístico Durbin-Watson = 0,396764

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,622175

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre metal y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{metal} = -1,81903 \cdot \text{caliza} + 1,41897 \cdot \text{cascarilla} - 0,657029 \cdot \text{polvo}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93,3369% de la variabilidad en metal. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 90,0053%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 19,7714. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 14,1224 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,3882, que corresponde a caliza. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar caliza del modelo.

Regresión Múltiple - escoria

Variable dependiente: escoria

VARIABLES INDEPENDIENTES:

caliza

cascarilla

polvo

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámet</i>	<i>Estimaci</i>	<i>Estánd</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
<i>ro</i>	<i>ón</i>	<i>ar</i>		
caliza	2,28787	4,4101	0,51878	0,6313
cascarilla	2,00387	0,599679	3,34157	0,0288
polvo	0,271871	0,83879	0,324123	0,7621

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	134991,	3	44997,1	20,93	0,0066
Residuo	8598,83	4	2149,71		
Total	143590,	7			

R-cuadrada = 94,0115 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91,0173 por ciento

Error estándar del est. = 46,3649

Error absoluto medio = 30,0816

Estadístico Durbin-Watson = 0,865205

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,3529

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre escoria y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{escoria} = 2,28787 * \text{caliza} + 2,00387 * \text{cascarilla} + 0,271871 * \text{polvo}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 94,0115% de la variabilidad en escoria. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 91,0173%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 46,3649. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 30,0816 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,7621, que corresponde a polvo. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar polvo del modelo.