

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Departamento
Centro de Investigación de la Soldadura

TRABAJO DE DIPLOMA

**Caracterización de aleaciones obtenidas a partir de la reducción
de cenizas de la combustión del petróleo.**

Autor: Edgar Felipe Pacheco Chaviano

Tutor: MSc. Ing. István Gómez Ríos

Santa Clara, junio 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

“La ciencia es un magnífico mobiliario para el piso superior de un hombre, siempre y cuando su sentido común esté en la planta baja. “

Oliver W. Holmes

Dedicatoria:

A mis padres por ayudarme a encontrar seguridad en mí mismo y enseñarme, que si se es esforzado y constante, se pueden alcanzar los sueños.

A mi hermano por ser mi inspiración y estar siempre a mi lado.

A mi hermana que a pesar de estar lejos siempre me ha apoyado.

A mi novia y mis suegros.

A mi familia en general y especialmente a mi tío Humberto por ser un ejemplo a seguir y ser mi segundo padre.

A mi tutor István por nunca dejarme solo en esta difícil tarea.

A todos mis amigos en especial a Jeison, Arlen, Carlos Cendan Cristian, Xavier, Jorge Daniel, Carlos Rafael, Fidel y Frank por escucharme y regalarme un poco de su tiempo, que nunca dijeron, no.

A Lorenzo, Amado, Alejandro Duffus por abrirme las puertas de su conocimiento.

Al personal del laboratorio del C.I.S de la Facultad de Mecánica de la U.C.L.V, a Enrique, Alexis Delgado y Misael a ellos mis más sinceros agradecimientos, porque sin su ayuda no hubiese sido posible la realización de gran parte de este trabajo.

A todo el que cuando lo necesité se acercó y me brindó su mano.

Resumen

En el trabajo se realiza la caracterización de aleaciones de hierro obtenidas del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales. Para el estudio se obtienen dos cargas, la primera conformada por cascarillas de laminación, virutas de aluminio y residuos de la combustión del petróleo en las calderas (cenizas de fondo) y la segunda con los mismos componentes y grafito. Para cada una de las mezclas fue evaluado el comportamiento del proceso en cuanto a: encendido, auto-sostenimiento del proceso de fusión reducción y la separación del metal y la escoria.

Como resultado del trabajo se obtuvieron aleaciones de hierro con contenidos de carbono 1.18 %, de silicio entre 0.10-0.96 %, de manganeso entre 0.526-1.499 % y de aluminio entre 1.396-1.402 %, recuperándose además un grupo de elementos de aleación de gran valor. Además, se evaluó la dureza y la estructura del metal obtenido con la idea de pensar en un futuro utilizarlo para la obtención de una granalla de acero. La factibilidad técnica de procesar mediante aluminotermia estos residuales industriales permite la recuperación de sus componentes metálicos, obteniéndose una aleación y una escoria de su uso en la industria, además se reducen los niveles de contaminación ambiental.

Abstract

In the work, the characterization of iron alloys obtained from the aluminothermy processing of industrial waste is carried out. For the study, two loads are obtained, the first consisting of lamination chips, aluminum shavings and residues from the combustion of oil in the boilers (bottom ash) and the second with the same components and graphite. For each of the mixtures, the behavior of the process was evaluated in terms of: ignition, self-sustaining of the melting process, reduction and separation of the metal and slag.

As a result of the work iron alloys with carbon contents 1.18%, silicon between 0.10-0.96%, manganese between 0.526-1.499% and aluminum between 1.396-1.402% were obtained, recovering in addition a group of elements of large alloy value. In addition, the hardness and structure of the metal obtained was evaluated with the idea of thinking about a future use it to obtain a steel shot. The technical feasibility of processing these industrial residuals through aluminothermy allows the recovery of their metallic components, obtaining an alloy and slag from their use in the industry, in addition reducing the levels of environmental contamination.

Índice

Introducción	1
Capítulo I: Estado del Arte	3
1.1 El acero	3
1.2 Efectos de los elementos de aleación en los aceros:	5
1.3 Materiales usados en la investigación	7
1.4 Aluminotermia y termita	13
1.5 Consideraciones termodinámicas	14
1.6 Caracterización de los materiales.....	17
1.7 Métodos empleados en la caracterización de los materiales (Los aceros)..	18
2.1 Materiales y métodos empleados en el estudio	20
2.2 Preparación de las materias primas	22
2.3 Número de muestras a replicar.....	24
2.4 Obtención de las aleaciones	25
2.5 Caracterización química.....	26
2.6 Caracterización metalográfica	26
2.7 Determinación de dureza.....	27
Conclusiones parciales	28
Capitulo III Análisis de Resultado.....	29
3.1 Determinación de errores en medidas directas	29
3.2 Balance de masa.....	29
3.3 Resultados del procesamiento metalúrgico.....	31
3.4 Análisis Químico.....	34
3.5 Análisis Metalográfico.....	35
3.6 Medición de la dureza de las aleaciones	39
Conclusiones parciales	40
Conclusiones generales	41
Recomendaciones.....	42
Revisión bibliográfica.....	43
Anexos	45

Introducción

La política nacional de manejo de residuos sólidos instituida en nuestro país se realizó desde horas tempranas luego del triunfo revolucionario la cual está encaminada a la no generación de residuos, a la reutilización de los mismos, el reciclaje y por ende en los casos de residuos generados la disposición final de los mismos estas decisiones enmarcadas en la preservación del medio ambiente y al cuidado de los recursos naturales los que se ponen de manifiesto y se reafirman en los Lineamientos aprobados por el Partido Comunista de Cuba (Wikipedia., 2012) .

Los procesos de fabricación de varios productos siderúrgicos generan una cantidad importante de residuos sólidos para los que en muchos casos no se ha encontrado tecnologías adecuadas para su reutilización o reciclaje siendo necesario deponerlos o verterlos en almacenes controlados hasta encontrar una solución para los mismos.

Un ejemplo palpable del manejo de estos residuos lo podemos ver en la cascarilla de laminación de los aceros las que en muchos casos son depuestas en vertederos para su posterior uso, del mismo modo se encuentran las cenizas de fondo de las calderas de potencias provenientes de la combustión del petróleo las que se exportan a otros países por no contar el nuestro con una tecnología capaz de obtener o rescatar los elementos metálicos contenidos en las mismas. Estas cenizas se generan en un orden de 35-40 kg/t, las que pudieran ser utilizadas en nuestros procesos de enriquecimiento de aceros (ASTM, 1985).

Por otro lado, las virutas de aluminio generadas en los procesos de corte y rectificado de perfiles en la Empresa Antenas de Villa Clara presentan un potencial altamente valorado en el reciclaje ya que se refunde el material para obtener nuevos perfiles mecánicos, este material desechado se utilizará como elemento reductor, se pudieran obtener resultados aún mayores que los que tiene hasta el momento.

Así mismo la Empresa “Fabric Aguilar Noriega” (Planta Mecánica) de Santa Clara en sus procesos de fundición de aceros en los hornos por arco eléctrico desecha muchas veces los trozos de torchos de electrodos de grafito los que en muchos casos se utilizan como carburantes de las propias fundiciones. Estos pedazos de electrodos

partidos se pueden utilizar en la confección de crisoles u hornos pequeños a nivel de mini plantas de fundición cuando se piense en reciclar las cascarillas de laminación en caliente del acero junto al aluminio como reductor en un proceso conocido como aluminotermia y de este modo buscar una vía de utilización y disminución del impacto medio ambiental generado por la industria metal mecánica.

Problema a resolver

Reducir los niveles de contaminación ambiental a partir del aprovechamiento de los residuales sólidos industriales, y crear producciones de materiales para la ingeniería capaces de minimizar la importación de materias primas.

Hipótesis

Las aleaciones de hierro, obtenidas mediante el procesamiento aluminotérmico de residuales sólidos industriales son factibles de utilizar para la fabricación de un acero de baja aleación de aplicación industrial.

Objetivo general:

- Caracterizar muestras de aleaciones obtenidas a partir de la reducción de cenizas de la combustión del petróleo.

Objetivos específicos

- Obtener aleaciones de hierro, de uso industrial, mediante procesamiento aluminotérmico de residuales.
- Caracterizar las aleaciones obtenidas.

Tareas a desarrollar:

- Revisión bibliográfica sobre residuales sólidos, la contaminación ambiental asociada a la producción de metales y sus aleaciones en la conformación de materiales utilizado en la ingeniería mecánica, y los fundamentos de la aluminotermia.
- Preparación de las materias primas
- Procesamiento de las cargas para la obtención de las aleaciones y escorias.
- Caracterización química y metalográfica de las aleaciones obtenidas.
- Procesamiento y análisis de los resultados

Capítulo I: Estado del Arte

1.1 El acero

La historia del acero está estrechamente ligada con el desarrollo de la cultura y la civilización del hombre.

Los metales inician su historia cuando el hombre se siente atraído por su brillo y se da cuenta de que golpeándolos puede darles forma y fabricar así utensilios tan necesarios para su supervivencia.

Los aceros y las fundiciones de hierro constituyen con gran diferencia el grupo de materiales metálicos industrialmente más utilizados porque se pueden fabricar en grandes cantidades y con costes relativamente bajos. Además, sus propiedades en general, y las mecánicas en particular abarcan un intervalo muy amplio, que van desde productos con resistencias moderadas (200-300 MPa) y ductilidades altas hasta aquellos otros caracterizados por una de las resistencias mecánicas mayores en la gama de las aleaciones metálicas (2000 MPa) (2008).

Los aceros y las fundiciones de hierro son materiales basados en las aleaciones de hierro - carbono, a las que también se adicionan otros elementos de aleación, con el propósito, muchas veces, de endurecerlos, ya que el metal hierro policristalino con una alta pureza (60 ppm de impurezas) es un material muy blando: su límite elástico ronda los 150 MPa (Ríos, 2015).

Definición de acero:

Según el libro: Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales de W. Callister. Jr: El acero puede definirse como: "Material en el que el hierro es predominante y cuyo contenido en carbono es, generalmente, inferior al 2%, conteniendo además otros elementos en diversas proporciones. Aunque un limitado número de aceros puede tener contenidos en carbono superiores al 2% este es el límite habitual que separa el acero de la fundición" (2008).

El papel del carbono en el acero:

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido de carbono en el acero es relativamente bajo. La mayoría de los aceros tienen menos de 9

tomos de carbono por cada 100 de hierro. Como el carbono es más ligero que el hierro, el porcentaje de masa de carbono en el acero es casi siempre menos del 2%. La forma convencional de expresar el contenido de los elementos en las aleaciones es mediante el porcentaje con que cada uno contribuye a la masa total. El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0,5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0,1%. Además, como puede apreciarse en la figura 18, si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0,1%.

La Revolución Industrial

Antes de la Revolución Industrial, el acero era un material caro que se producía a escala reducida para fabricar armas, principalmente. Los componentes estructurales de máquinas, puentes y edificios eran de hierro forjado o fundiciones. Las fundiciones son aleaciones de hierro con carbono entre 2,5% y 5%. La aleación que contiene el 4,3% se conoce como "eutéctica" y es aquella donde el punto de fusión es mínimo, 1130° C. Esta temperatura es mucho más accesible que la del punto de fusión del hierro puro, 1537° C (los chinos ya en el siglo VI de nuestra era, conocían y aprovechaban la composición eutéctica para producir fundiciones en hornos de leña. Estos eran, mayores que los europeos y por su mayor escala podían alcanzar temperaturas superiores a los 1150° C). El producto de los mismos era una aleación líquida llamada arrabio que contenía abundantes impurezas. Por su baja temperatura de fusión, el arrabio servía como punto de partida para la fabricación de hierro fundido, al cual solamente se le debían eliminar las impurezas manteniendo un alto contenido de carbono.

El arrabio, ya en estado sólido, servía también para producir hierro forjado. Usualmente se introducía, en lingotes, en hornos de carbón de leña dotados de sopladores de aire. El oxígeno del aire reaccionaba con el carbono y otras impurezas del arrabio formándose así escoria líquida y una esponja de hierro. El hierro esponja, casi puro, se mantenía sólido y la escoria líquida se removía a martillazos. La maquinaria básica para el conformado de piezas estructurales se desarrolló mucho antes que la aparición en escala masiva del acero. En Massachusetts, desde 1648, operaban molinos de laminación para producir alambro y barras de hierro forjado. La laminación consiste en

hacer pasar un trozo de metal maleable a través de un sistema de dos rodillos, como se indica en la figura 1. Al girar, los rodillos aplican presión y aplanan el metal. A veces los rodillos tienen acanalados que sirven para conformar barras, o arreglos más caprichosos para producir perfiles en forma de T o I, o alguna otra configuración.



Figura 1.1 Proceso de laminación: una placa o una barra de acero, generalmente al rojo vivo, se pasa por unos rodillos donde se produce un cambio en la sección transversal con la geometría deseada.

1.2 Efectos de los elementos de aleación en los aceros:

Los aceros al carbono son aleaciones binarias hierro-carbono que presentan unas excelentes propiedades mecánicas y bajo coste. Sin embargo, es posible mejorar estas propiedades y especialmente adaptar estos productos a trabajos en condiciones más severas (p.e., ambientes corrosivos, altas temperaturas) mediante el uso de elementos de aleación. El coste de los aceros de media y alta aleación también será mayor.

Distribución de los elementos aleantes.

Podemos dividir los elementos de aleación de los aceros en varias categorías atendiendo a las fases en las que aparecen:

- Elementos que aparecen disueltos en la ferrita.
- Elementos que aparecen disueltos y también forman carburos estables.
- Elementos que aparecen formando carburos.
- Elementos que aparecen en forma de inclusiones no metálicas.
- Elementos presentes en estado libre.

Dentro de la primera categoría se sitúan elementos tales como el níquel, cobre, fósforo, silicio, aluminio y cobalto, que normalmente aparecen disueltos en la ferrita (formando

soluciones sólidas de sustitución), dado que su solubilidad en la cementita o su tendencia a formar carburos es muy baja. Recuérdese que solamente los elementos con radio atómico más pequeño, como el carbono y el nitrógeno, forman soluciones sólidas de inserción. El efecto principal que origina la entrada en solución sólida de otros elementos en la ferrita es la distorsión de su red cristalina (diferente tamaño atómico), que a su vez produce el endurecimiento de esta. El endurecimiento es notablemente mayor en las soluciones sólidas de inserción que en las de sustitución. Este carácter endurecedor, de mayor a menor, resulta ser: C, N, P, Sn, Si, Cu, Mn, Mo. El níquel, cromo y aluminio apenas afectan a la dureza de la ferrita.

Muchos de los elementos de aleación empleados en la fabricación de aceros corresponden a la segunda categoría, siendo entonces formadores de carburos (generalmente más estables que la cementita), aunque si están presentes en bajas concentraciones, entran en solución tanto en la cementita como en la ferrita.

Ejemplos típicos son el manganeso, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, wolframio, etc. El manganeso no forma carburos, sino que suele aparecer disuelto en la cementita. Un mismo elemento químico puede formar varios carburos distintos en función de las proporciones relativas de carbono y del citado elemento presentes en el acero. La figura 1.1 presenta el diagrama de equilibrio de un acero con 0.2% de carbono y diferentes proporciones de cromo y vanadio a 700°C. Nótese que en este supuesto carburo del tipo de la cementita (M_3C) solo son estables cuando el contenido de cromo es menor del 1.2% Y el de vanadio inferior al 0.6%. Cuando cualquiera de estos elementos formadores de carburos está presente en mayor proporción de la necesaria para formar carburos, que a su vez viene determinada por el contenido en carbono del acero, el resto aparece disuelto en la red de ferrita. Por otro lado, los elementos formadores de carburos (silicio, aluminio, níquel y cobre, en orden decreciente) tienen carácter grafitizante, es decir dificultan la formación de cementita y en su lugar promueven la aparición del carbono en su forma más estable, es decir, grafito .

El fósforo favorece químicamente la formación de carbono, pero además influye físicamente porque la esteadita formada que tiene un punto de fusión inferior a la austenita y al carburo hace que la solidificación se produzca en una zona mayor de

temperaturas y así aumenta el tiempo crítico disponible para que el silicio favorezca la grafitación.

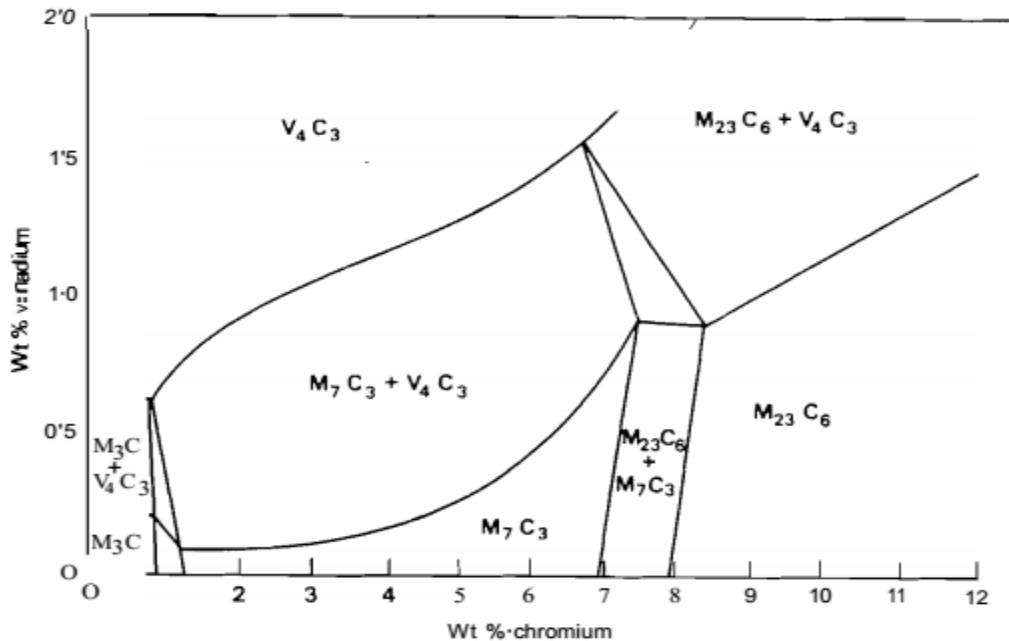


Figura 1.2 Diagrama de equilibrio de un acero con 0.2% de carbono y diferentes proporciones de cromo y vanadio a 700°C

1.3 Materiales usados en la investigación

Cenizas de la combustión de hidrocarburos

Las cenizas producidas por la combustión del petróleo, (las fly ash, FA) y las de fondo que quedan en las calderas (botton ash, BA) se generan en gran cantidad en todo el mundo. Las actuales tecnologías de la combustión permiten quemar combustibles con un alto contenido en azufre, como el coque de petróleo y el propio petróleo. La emanación de las cenizas (BA, FA) puede tener consecuencias graves para el medio ambiente como una posible contaminación de las aguas subterráneas por la lixiviación de metales pesados y las emisiones de materia particulada, lo que hace necesario tratarlas o reutilizarlas.

Una de las cenizas que contienen altos grado de metales son las que se generan en la planta termoeléctrica de Maracaibo, Estado Zulia, la cual produce energía eléctrica mediante turbinas de vapor, que es generado por calderas que utilizan fuel oíl residual como combustible. La producción eléctrica alcanza los 450 kW/h, con una producción

de cenizas (FA) de aproximadamente 200 m³ al año por caldera, las que son removidas por precipitadores electrostáticos y almacenadas en la misma planta. No se dan referencias relacionadas con la generación y uso de las BA.

El fuel oil residual N°6 (tipo Bunker C) proviene de crudos venezolanos y es el mismo combustible que se utiliza actualmente en las termoeléctricas y refinerías de Cuba. Estudios previos han determinado que estos crudos son ricos en metales, tales como vanadio y níquel. Las características de este combustible atienden a las exigencias de la norma COVENIN N° 787 sobre productos derivados del petróleo para la utilización en calderas, encontrándose valores extremos de 2,70-3,00 %p de S, 450ppm de V, 60 ppm de Na, cenizas sulfatadas de 0,1 a 0,25 % y viscosidad de 424 cp. Tanto estas características del derivado del petróleo, como su alta viscosidad dan lugar a una elevada producción de cenizas durante la combustión (ASTM, 1985).

En el mundo actualmente, no solo se recupera el valor metálico de estas cenizas, también pueden hacerse inactivas mediante la fabricación de ladrillos para ser utilizados en la industria de la construcción u otros usos. Estas cenizas tienen un porcentaje considerable de contenido de carbono, el cual podría ser utilizado para el mejoramiento de las aleaciones de hierro, lo que traería aparejado el incremento de las propiedades del acero haciéndolo más resistente al desgaste.

En conversación sostenida el 15 de abril del 2015 con el especialista de la Sección de Ensayo del laboratorio de estudios ambientales de la Ciudad de Cienfuegos, las empresas que usan petróleo en Cuba, y por ende la combustión del petróleo, provoca que se generen entre 1500 a 2500 toneladas por año de cenizas, de las cuales una parte son cenizas volantes (fly ash) y otra quedan en el hogar de la caldera donde se realizó la combustión (cenizas de fondo o bottom ash). Las cenizas volantes han sido muy estudiadas y se reportan múltiples aplicaciones en la obtención de materiales cerámicos y como fuentes de vanadio.

En el caso de las cenizas de fondo (bottom ash), prácticamente no se encuentran reportes de su aplicación, aunque sin lugar a dudas constituyen un residual que se produce continuamente en las plantas de generación de energía.

La generación de energía en Cuba se realiza por diferentes vías, pero sin lugar a dudas, la generación a partir del empleo del petróleo como combustible sigue resultando la vía principal para esta actividad, por tanto, la recuperación de los metales y principalmente de V, Ni y Cr a partir de este residuo brindaría utilidad a un desecho industrial con posible rentabilidad y disminuiría la contaminación que podría originar su acumulación.

Grafito

El grafito es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono junto al diamante, los fulerenos, los nanotubos y el grafeno. A presión atmosférica y temperatura ambiente es más estable el grafito que el diamante, sin embargo, la descomposición del diamante es tan extremadamente lenta que sólo es apreciable a escala geológica. Fue nombrado por Abraham Gottlob Werner en el año 1789 y el término grafito deriva del griego γραφειν (graphein) que significa escribir. También se denomina plumbagina y plomo negro

El grafito se encuentra en yacimientos naturales y se puede extraer, pero también se produce artificialmente. El principal productor mundial de grafito es China, seguido de India y Brasil (ASTM, 1985, Lorenzo Perdomo-González, 2015).

El grafito como portador de alto contenido de carbono puede ser un elemento aleante en la fabricación de, aceros, mejorando las características del mismo en cuanto a dureza y resistencia al desgaste.

Cascarillas de laminación

El acero fundido, afinado y colado no tiene la forma física ni las características tecnológicas necesarias para satisfacer las especificaciones correspondientes a cada tipo de acero, aunque el acero fundido puede ser el producto final en la fundición de piezas (Perdomo, Mayo-Junio 2009 , UNESID, 2002).

Con objeto de obtener las formas, dimensiones y propiedades que necesita, el acero se somete a procesos de conformación y/o acabado

Estos procesos se realizan a partir del producto sólido bruto y se pueden clasificar en los siguientes:

- Procesos de conformación: laminación y forja.

- Procesos de acabado: deformación en frío (laminación, trefilado, etc.), recubrimientos y soldadura.
- Procesos modificadores de las propiedades del acero: tratamientos térmicos y tratamientos termo mecánicos.

El proceso de conformación más importante, en cuanto a la cantidad y variedad de productos de acero que comporta, es el proceso de laminación, ya sea en caliente o en frío

La **laminación** consiste en hacer pasar el material entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentido contrario, y reducir la sección transversal del producto de acero, mediante la presión ejercida por éstos. La laminación permite obtener productos de sección constante, como son los perfiles estructurales, las barras y el alambón y también productos planos (chapas, etc.) (ONEI, Abril 2015).

La resistencia a la deformación del acero disminuye a medida que aumenta la temperatura de conformación. Consecuentemente, la deformación del acero a alta temperatura es posible, con un gasto energético mínimo. Además, la deformación plástica a alta temperatura conlleva una recristalización de la estructura, sin aumento de deformación. Este proceso de recristalización, durante la laminación, y el endurecimiento que experimenta el acero laminado a bajas temperaturas, sirve para clasificar los métodos de conformación del acero

- Deformación en caliente por encima de la temperatura de recristalización, aproximadamente alrededor de 800 a 1200 °C.
- Deformación en frío por debajo de la temperatura de recristalización.

La cascarilla es un subproducto siderúrgico que procede del proceso de laminación en caliente del acero. Es el resultado de un proceso de formación de capas de óxido de hierro sobre el acero a alta temperatura.

La cascarilla es el componente mayoritario del material residual ferroso, suponiendo un 30 - 40 % del residuo total producido en el proceso del acero. La cantidad de cascarilla generada por tonelada de acero depende del área superficial del producto y es menor para secciones grandes que para productos largos. Dependiendo del proceso y de la

naturaleza del producto, el peso de cascarilla puede variar de 20 a 50 kg/t de producto laminado en caliente. Una media típica de la producción específica de este residuo es de 35 - 40 kg/t (18 de Abril de 2011, ASTM, 1985).

En la actualidad gran parte de la producción de aceros se lamina directamente a su forma final desde el producto colado en continuo. Solamente algunos aceros especiales se laminan en dos etapas

La cascarilla está formada por partículas de naturaleza escamosa, con un tamaño de partícula generalmente menor de 5,0 mm. La distribución de tamaño depende del punto del proceso en el que se genere. Las partículas más pequeñas de la cascarilla (tamaño de partícula $<0,1$ mm), denominadas *lodo de cascarilla*, se recogen generalmente en las unidades de tratamiento del agua de proceso, localizadas cerca de los laminadores.(Hernández, 2004, Rios, 2015)

En la cascarilla están presentes, además de hierro en forma elemental, tres tipos de óxidos:

- wustita (FeO)
- hematita (Fe_2O_3)
- magnetita (Fe_3O_4)

El contenido de hierro es normalmente de un 70,0 % y contiene trazos de metales no férricos y compuestos alcalinos. La cascarilla está contaminada con restos de lubricantes, otros aceites y grasas procedentes de derrames de los equipos asociados a las operaciones de laminación. El contenido en aceites suele variar entre un 0,1 y un 2,0 %, pudiendo llegar hasta un 10,0 %

La producción de acero en Cuba está altamente ligada a la industria de la construcción debido al suministro de las barras corrugadas, perfiles, etc., por lo que el nivel de crecimiento de las construcciones va a depender en cierta medida del desarrollo y crecimiento de la industria siderúrgica.

Caracterización del Aluminio

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre; sólo los elementos no metálicos oxígeno y silicio son más abundantes. Se encuentra

normalmente en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre. Los silicatos no son menos útiles, porque es extremadamente difícil, y por tanto muy caro extraer el aluminio de ellas. La bauxita, un óxido de aluminio hidratado impuro, es la fuente comercial de aluminio y de sus compuestos.

La producción mundial de aluminio ha experimentado un rápido crecimiento, aunque se estabilizó a partir de 1980. En 1900 esta producción era de 7 300 toneladas, en 1938 de 598.000 toneladas y en 1998 la producción de aluminio primario fue de unos 22.700 millones de toneladas. Los principales países productores son Estados Unidos, Rusia, Canadá, China y Australia (ASTM, 1985).

El alto precio del aluminio en el mercado internacional hace que el producto sea totalmente reciclable, ya sea en forma de laminados, recipientes y hasta las virutas procedentes de las operaciones de maquinado son reaprovechadas.

La generación de virutas de aluminio en la industria cubana se concentró durante muchos años en la producción de cafeteras en la Empresa EINPUT de Santa Clara. Por otro lado, en los últimos años se ha desarrollado vertiginosamente la carpintería de aluminio. 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.

En los procesos aluminotérmicos se requiere el uso de estos productos en forma de polvo o granulometrías bajas (<3 mm), por lo que las virutas de aluminio pueden constituir una materia prima muy preciada. Los procesos de cortes utilizados en las carpinterías de aluminio de la fábrica de antenas se realizan mediante sierras radiales las cuales utilizan como elemento de corte hojas de sierras circulares con diámetros variables desde 2" hasta 6" y con un paso de diente entre 15 y 18 dientes por pulgadas, lo que influye en el tamaño de las virutas, generadas, lo que hace que las virutas producidas tengan una granulometría inferior a 2 mm.

El aluminio tiene multitud de aplicaciones: su bajo peso específico lo hace útil para la fabricación de aleaciones ligeras, extensamente empleadas en construcciones aeronáuticas. En general, cada vez más en los vehículos de transporte (automotores,

automóviles, etc). Su elevada conductividad eléctrica lo hace útil para la fabricación de conductores eléctricos de aluminio técnicamente puro o en forma de cables armados con acero galvanizado.

Su maleabilidad lo hace útil para la fabricación de papel de aluminio, en lo que se emplea actualmente un 10% de su producción total.

Su resistencia a la corrosión lo hace útil para fabricación de depósitos para ácido acético, cerveza, etc. También se emplea en forma de chapas para cubiertas de edificios. Y reducido a polvo para la fabricación de purpurinas y pinturas resistentes a la corrosión atmosférica.

Sus propiedades reductoras lo hacen útil para la desoxidación del hierro y de otros metales y para las soldaduras aluminotérmicas

1.4 Aluminotermia y termita

La acción reductora del aluminio sobre los óxidos de otros metales, cuando la reacción se inicia en un punto, se desarrolla por sí sola, debido 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. A este proceso se le denomina aluminotermia y es aplicable a la obtención de numerosos metales a partir de sus óxidos. Todos ellos deben tener un calor de formación menor que el del óxido de aluminio en la reacción (Hernandez, 2005).

Al (aluminio) + $3O_2$ (oxígeno) \rightarrow $2Al_2O_3$ (óxido de aluminio)

Se desprenden 393.6 Kcal. Esta gran cantidad de calor desprendida produce una elevación de la temperatura a cerca de $3000^{\circ}C$, ya que ninguno de los productos de la reacción es gaseoso (Hernandez, 2005).

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 (UNESID, 2002).

A la mezcla del óxido metálico con el aluminio se le da el nombre de termita(UNESID, 2002).

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(UNESID, 2002).

Ventajas del procesamiento aluminotérmico

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 aunque en los aceros no siempre es perjudicial el empleo de carbono.

1.5 Consideraciones termodinámicas

Como se ha indicado anteriormente, las reacciones de termitas son procesos de oxidación - reducción. Hay varios factores involucrados en la selección de un agente reductor del óxido en particular. La tendencia de un metal a reducir un óxido depende de la energía libre Gibbs de formación de su óxido. La figura 1.3 muestra la energía libre de formación de óxidos como una función de la temperatura para una serie de metales (Al, Mg, Ca, Zr, Zn y Ti) y varios otros agentes reductores comunes (Si, C y H₂), según JANAF, KUBACCHEWSKI y ALCOCK (Anh Thu Phan, 2014).

Otro factor a tener en consideración es el carácter exotérmico de las reacciones de la termita. La liberación de calor de la reacción provoca que el producto incremente su temperatura hasta temperaturas adiabáticas, la cual se puede calcular mediante la ecuación de la entalpía, las que aumentan a medida que crecen las condiciones adiabáticas del sistema. Un número grande de óxidos puede reducirse por el aluminio a temperaturas relativamente altas (2500 K), lo cual puede apreciarse en el Diagrama de Ellingham mostrado en la Figura 1.3(Anh Thu Phan, 2014).

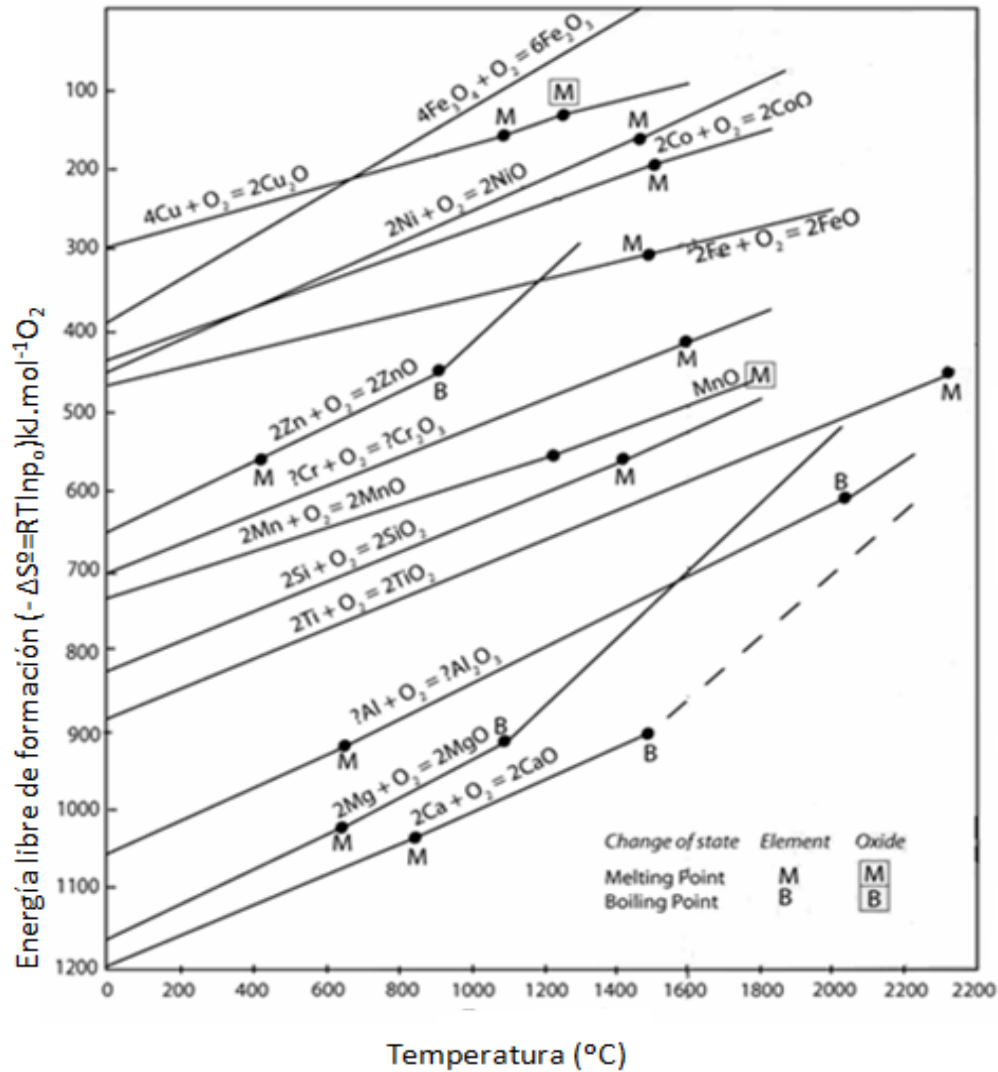


Figura 1.3 Diagrama de Ellingham

Usando el análisis termodinámico, las temperaturas adiabáticas, por sus siglas en inglés (Tad), para estas reacciones de termita, fueron calculadas y se presentan en la tabla1. En muchos casos, la temperatura adiabática excede ambos puntos de la fusión de las fases del producto(Hiroshi OHTANI, 2004)

Tabla 1.1 Temperaturas de la combustión adiabática y puntos de fusión de los productos metálicos en K

Reacción		T _{ad} (K) ²	T _{eq} del metal (K) ⁶
I.	Formación estructural de los metales más comunes		
	Al +1/2 Fe₂O₃ → Fe+1/2Al₂O₃	3622	1809
	Al +3/2 NiO → 3/2Ni+1/2Al₂O₃	3524	1726
	Al +3/4 TiO₂ → 3/4Ti+1/2Al₂O₃	1799	1943
	Al +3/8 Co₃ O₄ → 9/8Co+1/2Al₂O₃	4181	1495
II.	Formación de metales refractarios		
	Al+1/2Cr₂O₃ → Cr+1/2Al₂O₃	2381	2130
	Al+3/10V₂O₅ → 6/10V+1/2Al₂O₃	3785	2175
	Al+3/10Ta₂O₅ → 6/10Ta+1/2Al₂O₃	2470	3287
	Al+1/2MoO₃ → 1/2Mo+1/2Al₂O₃	4281	2890
	Al+1/2WO₃ → 1/2W+ 1/2Al₂O₃	4280	3680
	Al+3/10Nb₂O₅ → 6/10Nb+1/2Al₂O₃	2756	2740
III.	Formación de otros metálicos y no metálicos		
	Al+1/2B₂O₃ → B+1/2Al₂O₃	2315	2360
	Al+3/4PbO₂ → 3/4Pb+1/2Al₂O₃	4000	600
	Al+3/4MnO₂ → 3/4Mn+1/2Al₂O₃	4178	1517
	Al+3/4SiO₂ → 3/4Si+1/2Al₂O₃	1760	1685
IV.	Formación de núcleos metálicos		
	Al+3/16U₃O₅ → 9/1U+1/2Al₂O₃	2135	1405
	Al+3/4 PuO₂ → 3/4Pu+1/2Al₂O₃	796	913

Por consiguiente, es conveniente usar cálculos termodinámicos basados en la minimización de la energía libre de Gibbs del sistema para obtener distribución de equilibrio de fases del producto y las temperaturas de la reacción correspondientes, bajo las condiciones adiabáticas. Este análisis es especialmente aplicable en la predicción de posibles fases de producto a la hora de iniciar las mezclas en las que los óxidos y/o múltiples metales reductores están presentes.

1.6 Caracterización de los materiales

La química divide a los elementos en grupos de acuerdo a sus características. En función de esto existen dos categorías opuestas: la de los metales y la de los no metales. Con **propiedades físicas y químicas** intermedias se define un tercer grupo: el de los metaloides (Características, 2017).

¿Cuál es la diferencia entre metales y no metales? A grandes rasgos, se puede decir que los metales tienden a perder electrones y los no metales tienden a ganar electrones o a compartirlos; esto es debido al número de electrones de la capa más externa, que en el primer caso es siempre menor de 4 (en general, 1, 2 o 3) y en el segundo es de más de 4 (5, 6 o 7). Esto obedece a la teoría del octeto de Lewis (Características, 2017).

Características de los metales

1. Son sólidos a temperatura ambiente (excepto el mercurio, que es líquido).
2. Reflejan la luz de una forma característica (eso les otorga brillo).
3. Se corroen y oxidan con facilidad en contacto con el agua.
4. Maleables: tienen la capacidad de ser transformados en láminas.
5. Dúctiles: tienen la propiedad de ser moldeados para producir alambres o hilos.
6. Tenaces: presentan resistencia frente a fuerzas de tracción, por eso se emplean en maquinaria.
7. Conductores: son buenos conductores de la electricidad y del calor.
8. Tienen alta densidad.
9. Tienen baja electronegatividad.
10. Sus sales forman iones electropositivos (cationes) en solución acuosa.
11. Algunos presentan magnetismo.
12. En su mayoría provienen de los minerales que integran la corteza terrestre o del agua de mar.

Al mirar la tabla periódica, los vemos agrupados a nuestra izquierda. La primera columna corresponde a los metales alcalinos y la segunda a los metales alcalino-térreos. Hacia el centro se ubican una gran cantidad de metales llamados de transición, y a la derecha de estos encontramos primero los metales del bloque p y luego los metaloides.

1.7 Métodos empleados en la caracterización de los materiales (Los aceros)

La caracterización de materiales se refiere a la identificación de un material a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales, etc (cabreras, 2011). Existen para ello distintas técnicas de caracterización, de acuerdo al interés que despierte dicho material. Una vez conocidas las características del material puede establecerse la naturaleza del mismo, así como sus posibles aplicaciones.

Las principales técnicas que se utilizan para la caracterización química y física de los materiales son:

1. Difracción de rayos X.
2. Análisis metalográfico.
3. Espectrometría
4. Dureza

Conclusiones Parciales:

Después de realizar la revisión bibliográfica podemos concluir que:

- La caracterización de los metales obtenido a partir de un acero generado y fundido con residuales sólidos industriales en una termita se realizará a partir de la obtención de la misma.
- Se puede obtener metales a partir de residuales solidos industriales mediante procesos pirometalúrgicos en una termita.
- Con la aplicación de reducción de residuos sólidos industriales mediante el procesamiento de reducción de la termita se logra disminuir la carga contaminante de residuales logrando con ello:
 - Menor contaminación ambiental.
 - Menor generación de residuos y polvos.
 - Mejor visibilidad de los operarios.
 - Menor riesgo para la salud de los operarios.
 - Menor inversión en sistemas colectores de polvo.

Capítulo II. Materiales y métodos

2.1 Materiales y métodos empleados en el estudio

En el presente capítulo se presentan los métodos de obtención así como las materias primas requeridas para la utilización de residuales industriales en la obtención de aleaciones de acero de uso en la ingeniería mecánica, mediante procesamiento aluminotérmico, también las vías para su caracterización química y física.

Materias primas. Características

Como materias primas se emplearon los residuales utilizados en trabajos anteriores así como métodos de obtención de un metal mediante el uso de la aluminotermia.

Los materiales usados en el proceso aluminotérmico serán los siguientes:

- Cascarilla de laminación que constituye un desecho industrial de las plantas siderúrgicas, Antillana de Acero y ACINOX Tunas.
- Virutas de aluminio, procedentes de la Empresa Antenas de Santa Clara. Estas virutas constituyen un subproducto del proceso de corte y maquinado. En sus producciones la entidad utiliza laminados, fundamentalmente aluminio para conformado de las clases AA 6061 y AA 6063
- Grafito, obtenido de la trituración de los trozos de torchos partidos en la fundición de Planta Mecánica.
- Cenizas de fondo procedentes de la combustión del petróleo en las calderas de la refinería Camilo Cienfuegos de la Ciudad de Cienfuegos.

La composición química de estos componentes es aportada por los fabricantes las cuales se muestra en las tablas 2.1 y 2.2

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

Materia prima	Componente	Contenido (%)
Cascarilla de laminación	Fe ₂ O ₃	20-30
	Fe ₃ O ₄	40-60
	FeO	15-20
	Fe	2-5
	Fe Prom	70,83
	O ₂ Prom	24,18
	Impureza	5,00
Viruta de Aluminio	Si	0,3-0,6
	Fe	0,1-0,3
	Mn	0,1
	Cu	0,1
	Mg	0,35-0,6
	Zn	0,15
	Cr	0,05
	Ti	0,1
	otros	0,11
	Al	balance
Grafito	C	100

Las cascarillas utilizadas fueron sometidas a un proceso de beneficio, mediante un lavado y separación magnética y finalmente la fracción magnética fue clasificada granulométricamente, según se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Resultados del proceso de tamizado de la cascarilla de laminación

Clase granulométrica (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida (%)
5.0/2.5	57	3,63
2.5/2.0	14	0,74
2.0/1.0	395	20,81
1.0/0.7	392	20,65
0.7/0.5	240	12,65
0.5/0.25	750	39,52
0.25/0.16	36	1,90
Total	1884	100

La composición de la ceniza (tabla 2.3) fue determinada en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Investigaciones del Petróleo, cito en WASHINGTON 169, Municipio Cerro de la Ciudad de La Habana (anexo 1), la cual realiza control y monitoreo de la emanación de metales pesados a la empresa refinadora de petróleo de Cienfuegos.

Los componentes de las cenizas fueron asumidos a partir de los reportes en la literatura especializada de la composición de cenizas de este tipo.

Tabla 2.3 Composición química de las cenizas

Unidad	Elementos									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	MnO	Al ₂ O ₃	S	C	PPI
% masa	0,38	40,72	4,05	3,31	2,31	0,01	0,08	4,93	3,02	39,43
mg/Kg	Ni	Pb	Cd	V	Cr	Zn	Cu			
	549	87	1.8	1939	195	22.4	280			

2.2 Preparación de las materias primas

La **cascarilla de laminación** es un residual que se produce en los laminadores de acero, del cual se producen apreciables cantidades, entre 35 – 40 kg por toneladas de acero producido. Se conoce que éste no es un residual altamente contaminante, aunque estas generalmente se encuentran muy contaminadas con aceites y grasas, lo cual tiende a aumentar su nivel de agresividad. Las cascarillas son productos de

relativa alta pureza, ya que están formadas, en su inmensa mayoría, por los diferentes óxidos de hierro y el hierro metálico, para la realización de los cálculos de carga se asumió que todo el hierro presente se encontraba en forma de óxido de hierro (III).

Las cascarillas, para su empleo, fueron sometidas a un proceso de beneficio, lavado, separación magnética y finalmente la fracción magnética fue clasificada granulométricamente ver tabla 2.2, lo cual permitió trabajar con un producto de mayor calidad, ya que mediante el lavado se elimina una gran cantidad de impurezas. La combinación del lavado con el proceso de secado debe favorecer la oxidación de parte del hierro metálico y del hierro II a hierro III, con el posible incremento del contenido oxígeno en el residual y en la separación magnética se eliminan los componentes no magnéticos presentes, estas operaciones combinadas garantizan un aumento de pureza en las cascarillas. Al producto final obtenido se le realizó una clasificación granulométrica.

Las **virutas de aluminio** utilizadas como reductor proceden de las operaciones de maquinado en la Fábrica de Antenas de Santa Clara, lo que significa que están contaminadas con aceite refrigerante fueron lavadas y tamizadas. Esta operación se efectuó sometiéndolas a operaciones de lavado con agua caliente y vapor durante 10 minutos. Posteriormente fueron secadas al aire y sol durante 3 horas para su posterior empleo. Finalmente fueron tamizadas con un tamiz de 3.00 mm para buscar una mejor homogenización.

El **Grafito**, proveniente de los electrodos partidos del horno eléctrico de arco de la Empresa “Fabric Aguilar Noriega” (Planta Mecánica) es triturado hasta lograr una granulometría por debajo de 0.2 mm, con lo cual se logra aumentar la reactividad del mismo.

Las cenizas provienen de la combustión del petróleo en las calderas de la refinería “Camilo Cienfuegos” de la ciudad de Cienfuegos. Estas cenizas se extraen con una granulometría fina, por lo que la operación de tamizado por una malla de 0,2 mm se realizó con el objetivo de eliminar materiales contaminantes que pasan a ellas durante la extracción y almacenamiento, como por ejemplo: óxidos de hierro, virutas de madera, restos de nylon, etc.

Formulación de las cargas

Fueron replicadas 2 mezclas, a partir de los mejores puntos de un estudio realizado con anterioridad y conformadas por cascarilla, aluminio, grafito y cenizas los componentes de esta carga se expresan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Composición de las cargas (g)

Carga	Al	C	G	C. de Fe
1	33	20	4	100
2	45	12	0	100

Con los datos, de la Tabla 2.4, se preparó cada una de las mezclas multiplicando por cinco su masa para obtener una mayor cantidad de metal y escoria para realizar con posterioridad su análisis, las que se mezclaron durante 30 minutos en un mezclador cilíndrico de 20 cm de diámetro y 30 cm de longitud. Previo a su procesamiento, cada una de ellas, fue precalentada en una estufa a una temperatura de 280 °C

2.3 Número de muestras a replicar

A la hora de abordar el planteamiento de la toma de muestras, los métodos estadísticos nos ayudan a determinar el número de muestras individuales que es necesario tomar para minimizar la variabilidad de los resultados finales, teniendo en cuenta la homogeneidad o heterogeneidad de la población objeto de la toma de muestras y el error máximo admisible, lo que nos ayudará a que la operación se realice dentro de un óptimo económico.

Como ya se ha explicado, cuando se realice la medida de cualquier magnitud hay que indicar el error asociado a la misma. Dado que no conocemos el valor verdadero de la magnitud que deseamos medir, se siguen ciertos procedimientos para hacer una estimación del mismo y de su cota de error.

Con el fin de alcanzar cierta validez estadística en los resultados de las medidas es muy conveniente repetir varias veces su determinación; por convenio, se ha establecido en 3 este número mínimo. No obstante, es posible que en alguna ocasión no tenga sentido llevar a cabo estas repeticiones, en cuyo caso se considera que el error absoluto coincide con el valor de la sensibilidad del aparato utilizado para realizar la medida. En el caso habitual, cuando son 3 las medidas tomadas pueden presentarse

poco o muy dispersas y en función de esta dispersión ser conveniente aumentar o no el número de determinaciones del valor de la magnitud. Para decidir el número de determinaciones del valor de una magnitud física que se desea medir se sigue el siguiente procedimiento: se realizan las 3 mediciones x_i de la magnitud en cuestión y se calcula su valor medio \bar{x}_3 : (Hernández)

A continuación, se determina su dispersión D, esto es, la diferencia entre los valores extremos de las medidas y finalmente se obtiene el tanto por ciento de dispersión, T.

Con estos parámetros se pasa a la tabla 3.1, que se referencia en el Capítulo III el que establece la casuística que puede darse; S representa la sensibilidad del aparato de medida, D_6 es la dispersión para seis medidas y N el número de medidas necesarias en cada caso.

2.4 Obtención de las aleaciones

Para la obtención de las aleaciones se colocó cada mezcla caliente en un reactor de grafito de 2,2 L de capacidad, de fondo cónico, con un orificio en el fondo para facilitar la extracción de los productos y se inició la reacción, mediante un chispazo con arco eléctrico.



Figura 2.1 Reactor de grafito durante el procesamiento aluminotérmico

Para realizar la extracción de los productos, luego del procesamiento, se dejó enfriar la mezcla, posteriormente fueron separadas la aleación y la escoria. Dadas sus densidades, la escoria se localizó en la parte superior y el metal en la parte inferior,

rodeado este de una pequeña capa de escoria. Después de separar el metal de la escoria fueron pesados por separado.

Caracterización de las aleaciones

Las muestras fueron trozadas en una tronzadora de probetas tipo MLW de fabricación alemana también se realizó una granulación del material vertiendo en agua para analizar la dureza y realizar una comparación posterior con las normas establecidas de dureza de las granallas

2.5 Caracterización química

Para la caracterización de la muestra se utilizó el método de espectrometría de emisión atómica a través de un equipo llamado STATIONARY Spectrometer Belec Vario Lab incl de fabricación alemana, perteneciente a la empresa Planta Mecánica de Santa Clara.



Figura 2.2 Equipo de espectrometría óptica –electrónica marca BELEC

Para la preparación de la muestra y su caracterización, como primer paso, se realizó un desbaste abrasivo mediante una lijadora manual de alta velocidad MLW perteneciente al laboratorio de Tribología de la UCLV, posteriormente se colocó en una rectificadora para dejar una cara plana, finalmente se dio el lijado final. La muestra fue lavada con alcohol para eliminar las suciedades previas al análisis.

2.6 Caracterización metalográfica

La metalografía se realizó en un microscopio óptico (Neophot 132) en el Laboratorio de Metalografía del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS) de la UCLV. La preparación de muestra fue realizada por el procedimiento especificado en la norma

ASTM E3-01. La muestra posteriormente fue atacada con Nital al 2 % en etanol durante un minuto Las imágenes fueron adquiridas con una cámara digital acoplada al microscopio.

2.7 Determinación de dureza

Se realizan dos ensayos de dureza para realizar una comparación a partir de la obtención del metal en la termita con un enfriamiento a temperatura ambiente.

El ensayo se realizó en un durómetro (mecánico) TK-14250 Durómetro Universal Fabricado en la antigua URSS, perteneciente al Laboratorio de Medios de la Empresa “Fabric Aguilar” (Planta Mecánica), de Santa Clara con una carga aplicada de 150 Kg. La medición de la dureza se realizó en Hrc (Rowell) según especificaciones de la Norma ASTM E-18-03



Figura 2.3 Máquina de ensayo de dureza (Durómetro Universal fabricado USSR)

Conclusiones parciales

- La composición química de los componentes de carga brinda criterios para la acertada planificación experimental y la interpretación de los resultados del procesamiento. El beneficio previo de la cascarilla permite garantizar la eficiencia del proceso. El estudio de calentamiento de las cenizas brinda información acerca del comportamiento térmico de este material, lo cual da criterios para la adecuada conformación de las cargas.
- Las cargas se realizaron, teniendo en cuenta los requerimientos de la técnica aluminotérmica, permiten realizar el procesamiento en un crisol de grafito, a partir de un calentamiento previo. Los productos de los procesos son de fácil extracción y separación.
- El uso de las técnicas de análisis químico, análisis metalográfico y ensayo de dureza permiten evaluar las potencialidades de empleo de las aleaciones de hierro obtenidas, ya que brindan información sobre el posible comportamiento de las aleaciones ante la generación de una granalla de acero.

Capítulo III Análisis de Resultado

En este capítulo se aportarán los resultados del procesamiento aluminotérmico de los residuales estudiados.

3.1 Determinación de errores en medidas directas

Se calculó con el procedimiento estadístico que se muestra a continuación la cantidad de muestras a replicar para minimizar los errores y tener un mejor valor.

$$\bar{x}_3 = \frac{\sum_{i=1}^3 x_i}{3} = \frac{3,62+2,41+0,846}{3} ; \bar{x}_3 = 2,292 \quad \text{Ec. 3.1}$$

A continuación, se determina su dispersión D, esto es, la diferencia entre los valores extremos de las medidas:

$$D = x_{\text{máx}} - x_{\text{mínimo}} ; D = 3,62 - 0,844 ; D = 2,774 \quad \text{Ec.3.2}$$

Finalmente se obtiene el tanto por ciento de dispersión, (T), que viene dado por:

$$T = 100 * \frac{D}{\bar{x}_3} ; T = 100 * \frac{2,774}{2,292} ; T = 1,210 \quad \text{Ec.3.3}$$

Con el valor calculado de T: se busca en la tabla que se muestra a continuación y se procede a encontrar el número N de muestras necesarias a replicar.

Tabla 3.1 Valores de dispersión y valores de muestras o ensayos a replicar

D	T	N	X_0	Δx
D < S		3	$\bar{x}_N = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$	S
D < S	T ≤ 2%	3		S
	2% ≤ T ≤ 8%	6		Máx (D ₆ /4, S)
	8% ≤ T ≤ 15%	15		$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2}{N * (N - 1)}$
D < S	15% ≤ T	>50		

Basado en el cálculo realizado el valor de la dispersión T es menor que 2; por lo tanto se deben realizar 3 réplicas N = 3

3.2 Balance de masa

En base a los datos de conformación de cada una de las cargas se realiza un balance de masa, el cual permite determinar los resultados potenciales de cada una de las

cargas. Dicho balance se realiza a partir de la aplicación del principio de Conservación de la Masa (autores, 2007), según muestra la ecuación general:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (3.5)$$

A partir de los datos de los balances de masa se determina la cantidad de metal y escoria posible a obtener en cada una de las cargas, así como su composición química, evaluando por tanto la eficiencia del procesamiento. El balance masa se realiza para cada una de las cargas conformadas a partir del diseño de experimentos.

Composición química teórica del metal y la escoria

En las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se referencian los valores teóricos de metal y escorias obtenidos según balance de masa, así como la composición química teórica de estos productos.

Tabla 3.2 Balance teórico de masa de las aleaciones (g)

Elemento	Carga 1	Carga 2
Fe	70,00	70,00
C	4,10	0,36
S	0,99	0,59
Al	0,00	11,25
Total	75,09	82,20

Tabla 3.3 Composición química teórica de las aleaciones

Elemento	Carga 1	Carga 2
Fe	93.22	85.15
C	5.46	0.44
S	1.32	0.72
Al	0.00	13.69
Total	100	100

Las aleaciones están formadas en su gran mayoría por un alto contenido de hierro que varía desde 75.6 hasta 93.5 %, observándose también que estas aleaciones presentan un contenido de carbono entre 0.8 y 17.95 %

Tabla 3.4 Balance teórico de masa de las escorias (g)

Elemento	Carga 1	Carga 2
SiO ₂	0,076	0,05
Fe ₂ O ₃	8,14	4,89
CaO	0,81	0,49
MgO	0,66	0,40
Na ₂ O	0,46	0,28
MnO	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	62,35	63,76
Total	72,50	69,85

Tabla 3.5 Composición química teórica de las escorias

Elemento	Carga 1	Carga 2
SiO ₂	0,11	0,06
Fe ₂ O ₃	11,22	6,99
CaO	1,12	0,69
MgO	0,91	0,56
Na ₂ O	0,63	0,39
MnO	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	86,00	91,27
total	100	100

En las tablas 3.4 y 3.5 se observa que las escorias van a estar formadas fundamentalmente por óxido de aluminio, el que teóricamente se encuentra entre el 86 y 94 %, además presentan determinadas proporciones de óxido de hierro, el que debe variar desde 4.81 hasta el 11.22 %.

3.3 Resultados del procesamiento metalúrgico

Cargas

Es importante señalar que en la conformación de las cargas se preparó el doble de las proporciones mostradas en la Tabla 2.4 para buscar una cantidad mayor de producto metálico y de escoria. A continuación, se muestran imágenes del metal y la escoria obtenida (Tabla 3.6) y una pequeña valoración del proceso.

Tabla 3.6: Resultados del procesamiento metalúrgico

Carga	Metal	Escoria	Observaciones
1			Fundió bien, de manera estable, la separación escoria – metal fue muy bueno. Se obtuvieron 304 g de escoria y 316 g de metal quedando sin reaccionar 69 g.
2			Fundió de manera estable como se muestra, la separación escoria metal fue buena, se encontraron partes del metal dentro de la escoria, la cantidad de mezcla sin reaccionar fue de 19 g.

Rendimiento de las cargas obtenidas

En la tabla 3.7 se muestra un análisis comparativo entre las cantidades reales y teóricas de las aleaciones y las escorias los cuales se muestran en la Tabla 3.4.

Donde:

Mtt= mezcla total teórica

Ctm= cantidad teórica del metal

Cm= cantidad del metal

Rm= rendimiento metálico

Cte= cantidad teórica de la escoria

Ce= cantidad de escoria

Re= rendimiento escoria

Tabla 3.7 Cantidades teóricas y reales de las aleaciones y las escorias.

Muestras	Total Muestra	Ctm	Metal	Cte	Escoria	No Reac	Rend Metal	Rend Escoria
M1	785.0	375.5	281.0	362.5	270.0	109.0	74.8	74.5
M2	785.0	411.0	304.0	349.3	304.0	69.0	74.0	87.0

En la tabla 3.7 se puede observar que los mejores resultados, en cuanto a cantidad y rendimiento metálico, se obtuvo para la muestra 1, con una recuperación del 74.8 % de metal. Estas formulaciones coinciden con la mezcla de menor contenido de ceniza y de grafito.

En el caso de las escorias, la muestra 2 generó los mayores contenidos 87%, lo cual está en correspondencia con el grado de reducción metálica, ya que es la muestra de menor contenido de cenizas, observándose en la tabla 3.7 que los mayores contenidos de escoria le corresponden a la mezcla 2 la que tuvo menor rendimiento metálico.

En general, se puede señalar que los experimentos realizados con la mezcla que contienen mayor cantidad de cenizas tuvo un desempeño superior con respecto a la otra muestra donde los niveles de cenizas eran inferiores.

Es importante señalar que la muestra 1 contiene grafito a diferencia de la 2, lo que pudo también disminuir el rendimiento metálico siendo esto motivado porque la reacción del carbono con el Fe_2O_3 es endotérmica, afectando el desarrollo del procesamiento aluminotérmico, el cual es dependiente de la energía que se genera en el proceso.

3.4 Análisis Químico

A continuación se muestran los resultados del análisis químico en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Análisis químico de las aleaciones

Muestra	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo
Muestra 1	1.18	0.96	1.499	0.029	0.154	2.57	1.402	0.28	0.401
Muestra 2	1,18	0,10	0,526	0,019	0,001	2,427	1,396	0,053	0,09
Muestra	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Pb	Mg	Fe
Muestra 1	0.073	0.037	0.027	0.014	0.032	0.081	0.084	0.004	91.33
Muestra 2	0,081	0,019	0,018	0,002	<0,001	0,011	<0,001	0,006	94,08

Los contenidos de aluminio de las aleaciones 1y 2 son relativamente bajos entre 1,396 – 1,0402, aunque en la aleación 1 es ligeramente superior, a pesar de que en la carga 2 se adicionó mayor cantidad de aluminio, pero se incorporó un 4 % de grafito, el contenido de cenizas vario con una mayor cantidad en la 1 que en la 2. Por tanto, parte del grafito presente en la mezcla puede reaccionar con el oxígeno, protegiendo el carbono de la ceniza y parte del aluminio, provocando un ligero incremento en los contenidos de C y Al en la aleación obtenida de la mezcla 1.

En cuanto al resto de los elementos de aleación (manganeso, cromo, molibdeno, níquel, vanadio, titanio, neobio y wolframio), se puede observar en la Tabla 3.9 que los mayores contenidos de estos elementos se obtienen en la aleación 1 coincidiendo con las mayores cantidades de ceniza presente en las mezclas. Por otro lado, los contenidos de carbono de ambas aleaciones son similares, aunque la aleación 2 no contiene grafito y el valor de cenizas es menor esto puede estar, asociado a la complejidad de los procesos químico físicos que tienen lugar bajo el efecto sinérgico de los elementos presentes.

El contenido de fósforo está en valores adecuados para las aleaciones obtenidas, en tanto, el de azufre resultó ligeramente alto en la aleación 1, lo cual debe ser valorado al seleccionar las posibles aplicaciones de las aleaciones obtenidas.

Sumando los principales elementos de aleación presentes en las muestras, sin y con el carbono, excluyendo también el aluminio, se obtienen los datos que se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Sumatoria de los elementos **C, Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb, Co y W** en las muestras obtenidas

Mezcla	Σ sin incluir C	$\Sigma + C$	Σ sin incluir C, Mn, Cr
1	2.292	3.472	0.665
2	0.8	1.98	0.221

En la Tabla 3.9 se observa que cuando en los datos no se incluye el carbono, los mayores contenidos de aleación se obtienen en la aleación 1 (2,292 %), seguida de la 2 (0,8 %). Cuando se incluye en la suma al carbono se observa que el mayor valor se obtiene para la aleación 1.

Destaque especial merece la columna 4 de la Tabla 3.9, ya que en ella se incluyen los elementos: **Mo, Ni, V, Ti, Nb, Co y W**, todos muy preciados como elementos de aleación, debido a las propiedades mecánicas que les confieren a las aleaciones en las cuales ellos están presentes, aún en contenidos relativamente bajos, lo cual hace que sus precios en el mercado sean altos.

Es importante señalar que la muestra 1 es la que más contenido de cenizas tiene 20 g corroborando el hecho que al mayor porcentaje de cenizas contenido aporta mejores cantidades de elementos de aleación.

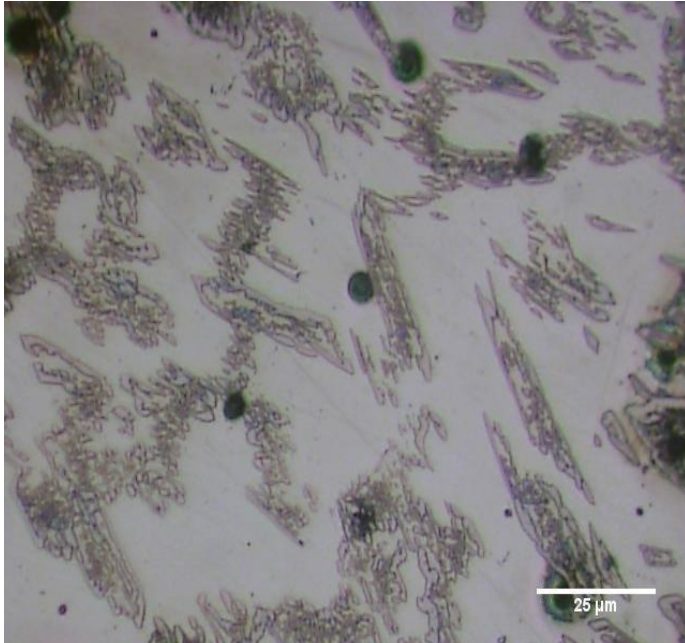
En la tabla 3.9 se observa que en las dos aleaciones obtenidas la suma total de estos elementos es representativa para elementos de aleación en los aceros, lo cual permite afirmar que fue posible su recuperación desde las cenizas de combustión de petróleo.

Estos resultados evidencian que la presencia de ceniza en las mezclas aluminotérmicas favorece de manera considerable la recuperación de importantes elementos de aleación, proviniendo parte de ellos de las propias cenizas.

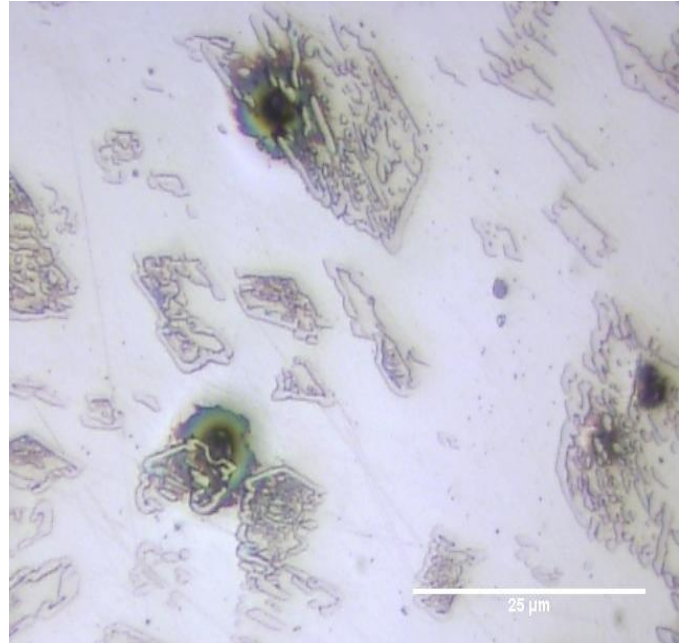
3.5 Análisis Metalográfico

En la figura 3.1 y 3.2 se muestran las imágenes metalográficas, obtenidas por microscopía óptica de las muestras de las aleaciones correspondientes a las cargas 1 y

2, respectivamente. En la primera observación, se evidencian diferencias significativas entre las microestructuras de ambas aleaciones, que obviamente se asocian a las diferencias de composición mostradas en la tabla 3.8 ya que las condiciones de enfriamiento dentro del reactor fueron similares para ambas aleaciones, lentas en los dos casos.

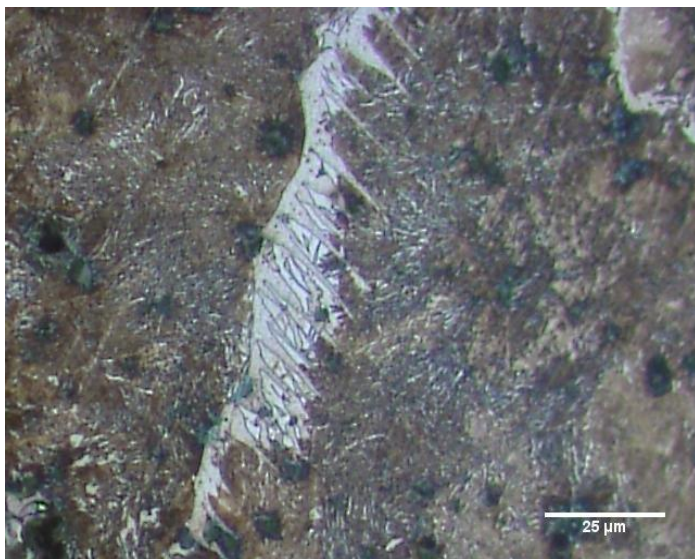


a) Carga 1. X200

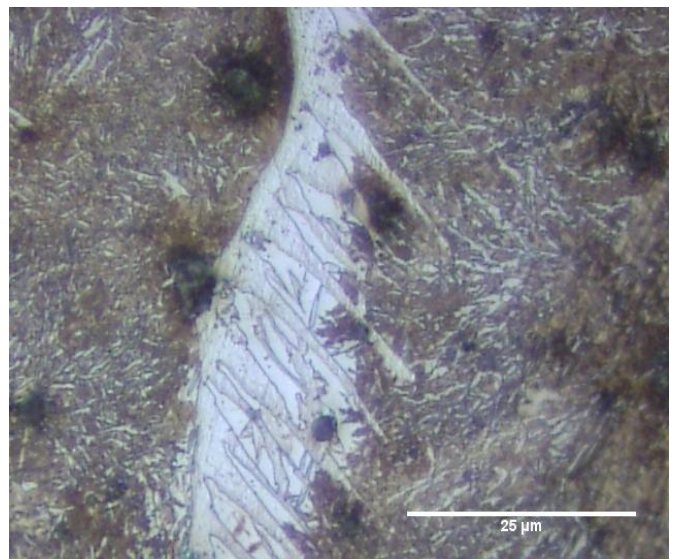


b) Carga 1. X 400

Figura 3.1 Microestructura de la aleación M1 a) carga 1 x 200; b) carga 1 x 400



a) Carga 2 x 200

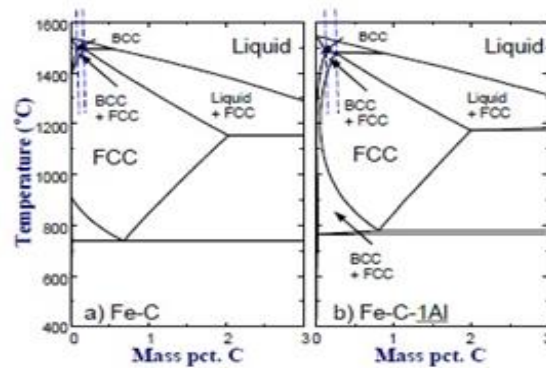


b) Carga 2 x 400

Figura 3.2 Microestructura de la aleación M2 a) carga 2x 200; b) carga 2 x 400

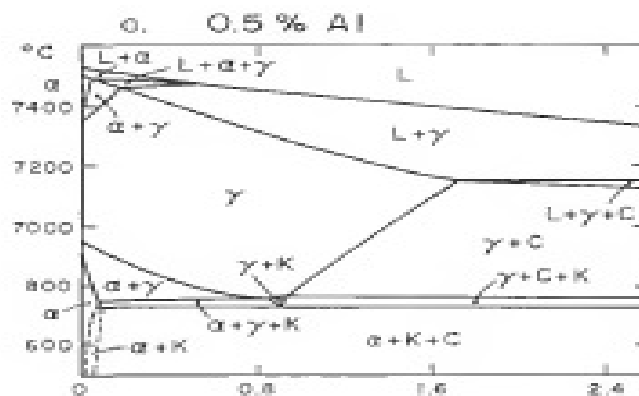
Ambas aleaciones presentan similares contenidos de carbono, silicio, cobre y aluminio. En correspondencia con el contenido de carbono y de hierro únicamente, ambas aleaciones en condiciones de equilibrio (enfriamiento relativamente lento) estarían caracterizadas por la presencia de granos de perlita y cementita en la frontera de grano.

La presencia de Al en ambas aleaciones provoca un corrimiento de los puntos del diagrama binario Fe-C (Figura 3.3 y Figura 3.4), alterando las transformaciones de fases que ocurren en las aleaciones de Fe y C. Es evidente que la presencia de otros elementos de aleación (Tabla 3.4) provocan también corrimiento de los puntos del diagrama (Figura 3.4).



a)

b)



c)

Figura 3.3 Secciones del diagrama de fases de las aleaciones Fe-C-Al a) y b) sin Al y con 1 % de Al, respectivamente (Thu et al., 2014) y c) 0,5 % de Al (HDEVLETIAN, 1980)

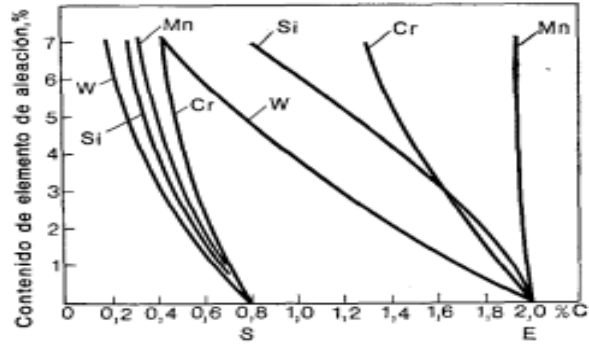


Figura 3.4 Influencia de los elementos de aleación en los puntos S y E del diagrama Fe-C. (Guliaev, 1983)

La presencia de elementos de aleación (Tabla 3.8) también influye sobre la cinética de la descomposición de la austenita. Los elementos que no son formadores de carburo, excepto el cobalto, retardan la transformación isotérmica. En el caso de los formadores de carburos (Cr, Mo y Mn, en estas aleaciones concretas), retardan la transformación perlítica a 700 – 500 °C y a 500-400 °C la retardan mucho más (aumentando la estabilidad de la austenita), mientras que aceleran la formación de bainita a 400-300 °C. O sea, que en la medida que aumentan los elementos de aleación, sobre todo los formadores de carburos, aumenta la posibilidad de obtención de martensita en la microestructura.

El efecto de los elementos de aleación sobre la transformación a martensita y la presencia de austenita residual se refleja en la figura (3.5). En dicha figura se observa que el Al, el Co y el Si suben la temperatura de inicio de la transformación, aumentando con ello la posibilidad de formación de martensita. El Cu, el Ni el Cr, el Mo y el Mn disminuyen la temperatura de la transformación, propiciando la aparición de mayor cantidad de austenita residual.

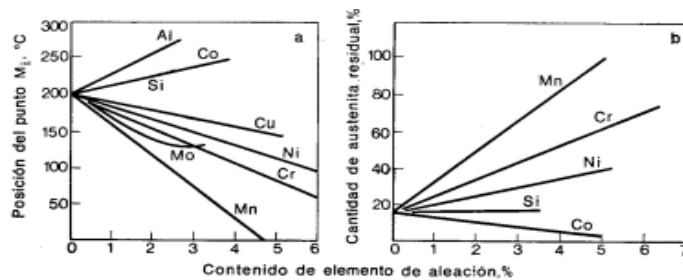


Figura 3.5 Influencia de los elementos de aleación en la temperatura de transformación a martensita y en la cantidad de austenita residual (Guliaev, 1983)

En el caso de la aleación 1 (Figura 3.1), se observa una microestructura con presencia de cementita aleada con una distribución relativamente regular en forma de colonias, rodeada de una significativa presencia de austenita residual. Esta aleación se destaca, en comparación con la 2, por mayores contenidos de manganeso, de silicio, de cromo, de cobalto y de otros formadores de carburos como V, Ti, Nb, Co y W.

La aleación 2 (Figura 3.2) presenta una microestructura con la presencia de cementita aleada con aspecto de contorno de grano, desde la cual ha crecido la cementita con aspecto de segunda fase alineada. En el interior de los granos se observa la presencia de cementita aleada intergranular. Hay presencia de una microestructura presumiblemente bainita, con cierta presencia de austenita residual.

3.6 Medición de la dureza de las aleaciones

En la tabla 3.10 se muestran los resultados de la medición de la dureza, para las aleaciones 1 y 2. Se observa que el mayor valor de dureza se obtiene para la aleación 1, coincidiendo con el mayor contenido de carbono, seguida de la aleación 2 a pesar de tener similar cantidad de carbono, los elementos de aleación en la mezcla 1 son mayores que la aleación 2. Lo anterior podría estar relacionado a las diferencias de las aleaciones en cuanto a la microestructura, lo cual será abordado más adelante. Debe destacarse que las dos aleaciones tienen durezas muy parecidas, debido a que en ambos casos los elementos de aleación presentes en ellas superan el 1.5 %, reafirmando la importancia de la presencia de la ceniza en la recuperación de elementos aleante.

Tabla 3.10 Dureza de las aleaciones.

Mezcla	1	2
Dureza (H _{RC})	43	42

Conclusiones parciales

1. La conformación de las cargas integradas por: aluminio (de 33 y 45 %), cenizas de fondo (de 12 y 20 %), grafito (de 0 y 4 %) y cascarillas de laminación (proporción fija 100 gramos), las que fueron procesadas mediante aluminotermia recuperándose entre el 74 - 75 % de los metales presente en los residuales.
2. El procesamiento aluminotérmico permitió recuperar entre 1,98 y 3,472 % de elementos de aleación (Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb, Co y W) los cuales desempeñan un papel fundamental en el mejoramiento de las propiedades de los aceros utilizados industrialmente.
3. La obtención de aleaciones de hierro por el procesamiento aluminotérmico de cascarilla, con adiciones de ceniza y grafito, se realiza sin la necesidad de importar ninguno de los componentes de la mezcla, no se requieren equipamientos de alta complejidad ni altos costos, haciendo que sea viable en el sentido económico, en cuanto a los insumos.
4. Ambas aleaciones han experimentado un enfriamiento relativamente lento que, junto al efecto de los elementos de aleación, ha conducido a una microestructura de cementita aleada en forma de colonias con presencia de austenita residual en la aleación 1 y de cementita aleada en forma de contorno de grano, de segunda fase alineada e intergranular y con presencia de bainita y austenita residual en la aleación 2.

Conclusiones generales

1. La conformación de las cargas integradas por: aluminio (de 33 y 45 %), cenizas de fondo (de 12 y 20 %), grafito (de 0 y 4 %) y cascarillas de laminación (proporción fija 100 gramos), las que fueron procesadas mediante aluminotermia recuperándose entre el 74 - 75 % de los metales presente en los residuales.
2. El procesamiento aluminotérmico de las cargas compuestas por cascarilla de laminación, cenizas de fondo de las calderas de la combustión del petróleo, grafito y virutas de aluminio permitió obtener aleaciones de hierro con contenidos de silicio (0,10 – 0,96 %), aluminio (1.39 – 1.40 %) y C (1.18 %), y que contienen entre 0,8 y 2.29 % de elementos de aleación (Mn, Cr, Mo, Ni, V, Ti, Nb, Co y W) factibles de utilizarse en la industria para la elaboración de piezas.
3. El procesamiento aluminotérmico de residuales industriales permite la recuperación de sus componentes metálicos, sin la necesidad de importar ninguno de los componentes de la mezcla, ni del uso de equipamientos de alta complejidad, con un bajo consumo de energía, hace factible desde el punto de vista técnico económico el uso de esta tecnología con una considerable reducción de los niveles de contaminación ambiental.

Recomendaciones

1. Evaluar el comportamiento de las aleaciones obtenidas en el desarrollo de piezas específicas de la industria.
2. Realizar un estudio del efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura de la aleación.
3. Caracterizar las escorias para evaluar sus posibles aplicaciones.

Revisión bibliográfica

Ley No. 81 del Medio Ambiente Gaceta oficial de la Republica de Cuba Edicion extraordinari,.

18 de Abril de 2011. Lineamientos de la política Economica y Social del Partido y la Revolución. VI Congreso del Partido Comunista e Cuba Lineamiento # 133.

2008. Termitas, aluminotermia y las reacciones de cebo. Termitas y aluminotermia, en el fórum de un bombero. . [Accessed Consultado el día 5/6/014].

ANH THU PHAN, M.-K. P., AND YOUN-BAE KANG 2014. Phase equilibria and thermodynamics of the Fe-Al-C system: Critical evaluation, experiment and thermodynamic optimization. Acta Materialia 79 1-15.

ASTM 1985. Aluminotermic Reducction Reaction mixture. Pittsburgh,Pa.

AUTORES, C. D. 2007. Quimica General, La Habana Felix Varela

CABRERAS, R. 2011. Ingenieria de Materiales II.

CARACTERÍSTICAS, E. D. 2017. Metales y No Metales.

GULIAEV, A. P. 1983. Metalografía, Moscú, MIR.

HDEVLETIAN, J. 1980. Aluminum's Graphitizing Effect in Gray Iron Welds. WELDING JOURNAL.

HERNÁNDEZ, M. I. M. 2003. Aplicacion tecnologica de un residuo de la industria del acero en la eliminacion de meales conaminantes Doctor, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.

HERNÁNDEZ, M. I. M. 2004. APLICACIÓN TECNOLÓGICA DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA DEL ACERO EN LA ELIMINACIÓN DE METALES CONTAMINANTES. Doctor, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.

HERNANDEZ, T. 2005. Obtención, a partir de materias primas cubanas y por reducción aluminotérmica de FeMn bajo carbono. Trabajo de Diploma Tesis Para obtencion del Título de doctor en Ciencias UCLV.

HIROSHI OHTANI, M. Y. A. M. H. 2004. Thermodynamic Analysis of the Fe-Al-C Ternary System by Incorporating ab initio Energetic Calculations into the CALPHAD Approach. ISIJ International, Vol. 44, No. 10.

LORENZO PERDOMO-GONZÁLEZ, R. Q.-P., CARLOS R. GÓMEZ-PÉREZ, AMADO CRUZ-CRESPO 2015. Obtención simultánea de ferromanganeso y materiales abrasivos por reducción aluminotérmica usando pirolusita sin tostación previa y residuos sólidos industriales. Minería y Geología, 31.

ONEI Abril 2015. Materiales para la construcción. Foresight Cuba

PERDOMO, L. Mayo-Junio 2009 541, . Afinidad LXVI,.

RIOS, I. G. 2015. Aprovechamiento de residuales industriales para la obtención de aleaciones de hierro y escorias. Master, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

RÍOS, I. G. 2015. Aprovechamiento de residuales industriales para la obtención de aleaciones de hierro y escorias. In: SOLDADURA, C. D. I. D. L. (ed.). Universidad Central Marta Abreu de las Villas: Ministerio de Energía y Minas.

THU, P. A., M.-K.P & YOUN-BAE, K. 2014. Phase equilibria and thermodynamics of the Fe-Al-C system: Critical evaluation, experiment and thermodynamic optimization. Acta Materialia 79.

UNESID 2002. La Industria Siderúrgica Española 2001. UNESID. Madrid, España

WIKIPEDIA., L. E. L. 2012. Metales. [Accessed consultado el 13/5/2015].

Anexos

Anexo 1



Proceso de Renovación de la Acreditación

Centro de Investigaciones del Petróleo.

por la NC-ISO/IEC 17025

Laboratorio Química Ambiental

WASHINGTON 169. CERRO.

HABANA 1200. CUBA.

1 de 02

05/07/14

INFORME DE ENSAYO

SCT

En fecha 23/11/14 se recibió en el Laboratorio de Química Ambiental una muestra de cenizas de calderas del Sector Energético de la Refinería de Cienfuegos.

Se les solicitó a los Laboratorios correspondientes que se les hicieran los siguientes análisis a las cenizas:

1. Metales Pesados (Ni, Zn, Pb, Cd, Cr, V y Cu).

2. % de Azufre.

Estos análisis fueron subcontratados al Laboratorio de Química Analítica y al Laboratorio Físico Químico del Centro de Investigaciones del Petróleo.

Para la determinación de los metales, la muestra fue sometida a un proceso de secado en estufa a una temperatura de 100 °C y a continuación se pesaron aproximadamente 0.5 g de muestra, se adicionaron 20 ml de HCL 1:1 y posteriormente 20 ml de HNO₃

1:1, se calentó a ebullición y se filtró. La muestra no se disolvió de forma total, quedando residuo en el papel de filtro.

La determinación de azufre se realizó según método de análisis de azufre (IP-242) y cuyo principio es el siguiente: la muestra absorbida sobre una cápsula de celulosa envuelta en un pedazo de papel de filtro es quemada completamente en un frasco cerrado llenado con oxígeno a presión atmosférica. Los productos de la combustión son absorbidos en una solución de peróxido de hidrógeno y la cantidad de ácido sulfúrico formado es 2 de 02 determinadas por valoración con solución estándar de perclorato de bario, usando torín como indicador.

Los resultados obtenidos se encuentran en la siguiente tabla.

Muestra	Ni (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	V (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	S (%)
Residuo	549	87	<1.8	1939	195	22.4	280	4.93

Bibliografía.

1. IP Standards for Petroleum and its Products. Methods for Analysis and Testing. Part I. section 2, method IP-242, pp 1057-1063. Thirty-second ed. Institute of Petroleum, Great Britain, 1973.

Observaciones: El Laboratorio de Química Ambiental del CEINPET se encuentra en el proceso de revisión de la Acreditación por la Oficina Nacional de Acreditación de Cuba (ONARC).

Dr. Miguel Díaz

J' Laboratorio Química Ambiental

Este informe no será reproducido sin la aprobación escrita del Laboratorio de Química Ambiental

Anexo 2

Tamizado de la cascarilla de laminación, relación entre tamaño de partículas y peso acumulado

Tamaño de partículas (mm)	Peso acumulado (%)
0,1	0,3
0,5	0,7
1,0	1,5
1,5	2,5
2,0	3,7
3,0	7,0
5,0	84,6