



*Ministerio de Educación Superior
Instituto Minero-Metalúrgico
"Doctor A. Núñez Jiménez"*

*Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia*

Trabajo de Diploma

Título: Estudio de la recuperación de las inclusiones metálicas contenidas en las escorias de la acería José Martí.

Diplomante: Dariem Lawrence Sambert.

Tutor: Ing. Manuel De La Fuente Fernández.

*Moa 2009
"Año 50 del triunfo de la Revolución"*

DEDICATORIA.

AGRADECIMIENTOS.

INTRODUCCIÓN.

1.0 CAPITULO I. MARCO CONCEPTUAL TEÓRICO.

1.1. Introducción.....	1
1.2. Descripción del proceso de obtención de acero en (HAE).	6
1.3. Descripción de las fases del proceso de fusión.....	8
1.3.1. Proceso de oxidación.....	8
1.3.2. Proceso de reducción.....	9
1.3.3. Proceso de formación de escoria negra.....	10
1.3.4. Trabajos precedentes sobre las escoria.....	11
2.0 CAPITULO II. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS NEGRAS DE LA ACERÍA JOSÉ MARTÍ.....	12
2.1. Introducción.....	12
2.2. Principales propiedades físico-químicas de las escorias negras.....	12
2.3. Caracterización química de la escoria negra objeto de estudio.....	19
3.0. CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1. Introducción.....	20
3.2. Selección y toma de la muestra.....	20
3.3. Materiales y equipos.....	21
3.4. Preparación mecánica.....	22
3.5. Metodología.....	23
4.0 CAPITULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	26
4.1. Introducción.....	26
4.2. Caracterización de la muestra inicial.....	26
4.3. Estudio de trituración y caracterización por fracciones.....	29
5.0 CAPITULO V. VALORACIÓN ECONÓMICA Y ECOLÓGICA.....	35
5.1. Introducción.....	35
5.2. Valoración ambiental.....	36
5.3. Valoración económica.....	37
Conclusiones.....	38
Recomendaciones.....	39
Bibliografía.....	39

Anexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, y en especial a mi madre y a mis tías ya que siempre me apoyaron en todo lo que me hizo falta, también dedico este triunfo a mi tutor que sin su esfuerzo y empeño no se hecho realidad la realización de este trabajo.

“A todos ellos muchas gracias ”

Pensamiento

"En la vida no existe nada inalcanzable o imposibles, solamente con perseverancia y dedicación encontraras el camino hacia el triunfo."

Dariem Lawrence Sambert
(20/06/2009)

Agradecimientos

Les estoy eternamente agradecido a mi madre Aracelis Sambert Torres, a mis tías que de una forma o de otra siempre estuvieron presentes para brindarme su apoyo, para que continuara adelante, y en especial a mi tutor Manuel De La Fuente Fernández al igual que al compañero Emilio Leyva, que con su ayuda se hizo posible la realización de este trabajo.

“A todos ellos muchas gracias”.

Resumen:

El presente trabajo se realizó en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas ubicado en Nicaro municipio Mayarí, provincia de Holguín, en el mismo se muestran los resultados alcanzados en el estudio para la recuperación de las inclusiones metálicas contenidas en las escorias negras de la acería José Martí. En el desarrollo de la investigación se utilizó el laboratorio tecnológico de dicho centro, donde fue posible con la utilización del equipamiento necesario para el estudio propuesto alcanzar los objetivos planteados, quedando demostrado que por medio del proceso combinado trituración – separación magnética es posible lograr la separación de las inclusiones metálicas contenidas en las escorias generadas en la producción de acero, así como, la determinación de la malla de liberación óptima para la clasificación y separación del metal. Se recomienda además, posibles usos para el producto no magnético lo cual podría convertir un desecho industrial no degradable en un producto totalmente aprovechable en diferentes sectores industriales.

Palabras clave: Escoria, inclusiones metálicas, separación magnética, acería.

Summary:

The present work was carried out in the Center of Steel Investigations located in Nicaro municipality Mayarí county of Holguín; in the same one the results are shown reached in the study for the recovery of the metallic inclusions contained in the black slag of the steel José Martí. In the development of the investigation the technological laboratory of this center was used, where it was possible with the use of the necessary equipment for the proposed study to reach the outlined objectives, being demonstrated that by means of the process combined trituration - magnetic separation is possible to achieve the separation of the metallic inclusions contained in the black scums generated in the steel production, as well as, the determination of the mesh of good liberation for the classification and separation of the metal. It is also recommended, possible uses for the non magnetic product that which could not convert an industrial waste degradable in a completely profitable product in different industrial sectors.

Key words: slag, metallic inclusions, magnetic separation, steel.

Introducción

El desarrollo de un país se evalúa, entre otros indicadores, por las toneladas de acero per cápita que este produzca. En los últimos años la producción de acero no ha disminuido - independientemente de los nuevos materiales que han surgido, cuyas características son similares y en muchos casos mejores que las del acero - sino que por el contrario, se han incrementado los volúmenes de producción, se eliminan los procesos obsoletos y se abren paso nuevas tecnologías y procesos que a la vez que aumentan la productividad, inciden considerablemente en la disminución de los costos. Para poder hablar de las escorias de acerías, primeramente debemos conocer algo de la historia del surgimiento del acero: " Acero es el nombre que se da al hierro que contiene una cantidad determinada de carbono (hasta 3,5%) que le otorga mayor resistencia y dureza. Hacia el 1.000 A.C. se fabricaba acero en el Próximo y Medio Oriente. Los artesanos de la India dominaban ya un método mejor para producir acero. Colocaban trozos de hierro carbonado o con "piel" de acero en un recipiente de arcilla cerrado, o crisol, y lo calentaban intensamente en un horno. El carbono se distribuía gradualmente a través del hierro y producía una forma de acero mucho más uniforme. "1740: redescubrimiento del acero al crisol". En 1740, el inglés Benjamín Huntsman redescubrió el procedimiento indio por casualidad, al calentar una mezcla de hierro y una cantidad cuidadosamente medida de carbón vegetal en un crisol. Pese a la invención de otros procedimientos, siguió prefiriéndose el método del crisol para obtener acero de alta calidad, hasta que en 1902 se inventó el horno eléctrico. "1856: convertidor Bessemer". En 1856, el inventor inglés Henry Bessemer patentó un método más barato para fabricar acero en gran escala. Un chorro de aire atravesaba el hierro fundido y quemaba todo el carbono necesario para obtener el acero. Bessemer construyó un recipiente cónico de acero forrado de ladrillos refractarios que se llamó convertidor y que se podía inclinar para vaciarlo. Fue el metalúrgico francés Paúl Héroult (coinventor del método moderno para fundir aluminio) quien inició en 1902 la producción comercial del acero en horno eléctrico. Para la fusión se introduce en el horno chatarra de acero de composición conocida y se hace saltar un arco eléctrico entre la chatarra y grandes electrodos de carbono situados en el techo del horno.

El calor desarrollado por el arco funde la chatarra y produce un acero más puro que el que ha estado en contacto con los gases de combustión. Se puede añadir mineral de acero para alterar la composición del acero, y cal o espato flúor para absorber cualquier impureza. Al consultar la literatura notamos que la producción de acero en los HEA tiene cada vez mayor peso sobre la producción total de acero, llegando en estos momentos a alcanzar valores del orden del 42 %, del total de la producción mundial de acero.

La industria siderúrgica cubana, con un historial de más de 40 años en la producción de aceros al carbono y en la fundición de piezas de aceros aleados e inoxidables. Se propuso en la década del ochenta dar un nuevo impulso a la industria metalúrgica, para los finales de esta década se realiza la modernización de los talleres de Antillana de Acero en La Habana sustituyendo los hornos Martín por dos hornos de arco eléctrico con sesenta toneladas de capacidad cada uno, lo que unido a otros hornos eléctricos (de menor capacidad), existentes en otros talleres de fundición, aumenta considerablemente la producción nacional de acero.

La principal materia prima empleada para la fabricación de acero en horno eléctrico es la chatarra de hierro dulce o acero. Como elementos de adición auxiliares se cargan también en los hornos eléctricos pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro y de ferroaleaciones.

Para la formación de escoria se añade caliza, cal, arena, espato de flúor y coke, y al final del proceso se añade ferrosilicio, ferromanganeso, aluminio, carburo de calcio y silicio-calcio, como elementos desoxidantes y auxiliares del proceso. Atendiendo a su composición se pueden dividir los aceros en dos clases fundamentales: Aceros al carbono y aceros aleados:

Se denominan aceros ordinarios o al carbono (comunes) aquellos que están formados fundamentalmente por hierro y carbono. El grupo de los aceros al carbono, de construcción, está formado por aceros cuyas composiciones oscilan entre los siguientes límites:

C: 0,1-0,8% Si: 0,15-0,3%

Mn: 0,3-0,7% P y S: <0,04%

Estos aceros están fabricados en general en horno eléctrico, garantizando su composición entre límites muy estrechos y contenidos de azufre y fósforo en

general menores que 0,03%, muy inferior es a los de los aceros obtenidos en hornos Martín- Siemens y los convertidores Bessemer y Thomas.

Aceros aleados (especiales), son los que contienen, además del carbono e impurezas, elementos de aleación voluntaria como cromo, níquel, molibdeno, vanadio, wolframio, etc. Estos elementos influyen de muy diversas maneras en las propiedades de los aceros, aumentando o disminuyendo la templabilidad, la dureza, la maquinabilidad, etc.

Dentro de este grupo entran los aceros inoxidables, que son aceros resistentes a la corrosión atmosférica, a los ácidos y álcalis y también a la oxidación a temperaturas no muy elevadas. En la composición de los aceros inoxidables el porcentaje de cromo puede llegar hasta el 24%.

Los procesos de fundición ferrosos y no ferrosos producen distintas escorias. La escoria de las acerías, en las que se produce una fundición ferrosa, se diseña para minimizar la pérdida de hierro y por tanto contiene principalmente calcio, magnesio y aluminio. Las escorias son un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales. Se pueden considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, pueden contener sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento. Aunque la escoria suele utilizarse como un mecanismo de eliminación de residuos en la fundición del metal, también pueden servir para otros propósitos, como ayudar en el control de la temperatura durante la fundición y minimizar la reoxidación del metal líquido final antes de pasar al molde.

La escoria tiene muchos usos comerciales y en el mundo moderno raramente se desecha. A menudo se vuelve a procesar para separar algún otro metal que contenga. Los restos de esta recuperación se pueden utilizar como balasto para el ferrocarril y como fertilizante. Se ha utilizado como material para pavimentación y como una forma barata y duradera de fortalecer las paredes inclinadas de los rompeolas para frenar el movimiento de las olas.

La utilización de residuos puede ayudar a conservar los recursos naturales al reducir la demanda de materias primas naturales. Al mismo tiempo ayuda a preservar el medio ambiente, ya que permite reducir el vertido de residuos, que, en general causan la degradación de grandes áreas.

La utilización de residuos en la industria de la construcción posibilita la conservación de un gran volumen de recursos naturales al mismo tiempo que

permite ahorros considerables de energía. La necesidad de eliminar residuos genera gastos de transportación, almacenaje y disposición final.

Las escorias más utilizadas en el campo de la construcción son las de la fabricación del hierro y el acero. La utilización de los residuos provenientes de los procesos metalúrgicos posibilita la conservación de un gran volumen de recursos naturales al mismo tiempo que permite ahorros considerables de energía que serían necesarias para su extracción. Además ayuda a preservar el medio ambiente, ya que permite reducir el vertido de residuos, que, en general causan la degradación de grandes áreas.

Por todo lo anteriormente señalado el uso de residuos en la (industria metalúrgica) ofrece una alternativa económica de consideraciones importantes. Por lo antes expuesto y teniendo en cuenta que en nuestro sector siderúrgico se genera una serie de residuos procedentes del proceso se expone la siguiente situación problemática: **La producción de acero en nuestro país genera grandes cantidades de escorias las cuales se acumulan en depósitos habilitados al efecto alcanzando en la actualidad acumulaciones de miles de toneladas de un desecho industrial no degradable el cual deteriora el medio ambiente, no siendo aprovechado el hierro contenido en las mismas, tanto en forma metálica como en forma de óxido, el cual constituye una importante reserva de un material que puede ser utilizado como sustituto parcial de la chatarra de acero a la vez que se reduce su influencia negativa en el entorno.**

Desarrollar nuevas tecnologías que permitan dar un uso racional a las escorias constituyentes de residuos industriales se impone como una necesidad para el sector siderúrgico cubano por lo que el problema científico a resolver con este trabajo es: **La determinación de la malla de liberación para la recuperación de las inclusiones metálicas contenida en las escorias de acería.**

El objeto de estudio del presente trabajo lo constituyen: **En beneficio de las escorias negras de la acería José Martí.**

Para el desarrollo del presente trabajo se plantea la siguiente hipótesis: **Si se logra determinar la malla de liberación para la recuperación de las inclusiones metálicas contenidas en las escorias negras de la acería José Martí, sería posible implantar una tecnología para la utilización de este material en sustitución de la chatarra de acero.**

Para dar solución al problema planteado se propone el siguiente objetivo:
Recuperar las inclusiones metálicas contenidas en las escorias negras de la acería José Martí.

Del objetivo propuesto para el desarrollo del trabajo se derivan los siguientes objetivos específicos: **Separar las inclusiones metálicas contenidas en las escoria negras. Definir la malla de liberación del metal contenido en las escorias negras. Precisar los parámetros tecnológicos de los equipos para el beneficio de las escorias.** Por lo antes expuesto y para dar cumplimiento al objetivo propuesto se obtiene el campo de acción de nuestro estudio: **Dado por los procesos de preparación mecánica y separación magnética de las escorias negras generadas en la producción de acero de la acería José Martí.**

Para dar solución a los objetivos trazados en nuestra investigación nos proponemos las siguientes tareas a desarrollar:

1. Búsqueda bibliográfica.
2. Caracterización química y granulométrica de la muestra para los ensayos.
3. Estudio de trituración.
4. Estudio fraccional magnético.
5. Determinación del posible uso para el producto obtenido.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo revisten especial importancia para el sector siderúrgico nacional, teniendo en cuenta que la recuperación de las inclusiones metálicas contenidas en las escorias de la producción de acero pueden ser reutilizadas como sustituto de la chatarra en la obtención de acero, lo cual reviste especial importancia para el sector siderúrgico desde el punto de vista económico y ecológico.

Nuestro trabajo estuvo compuesto de cinco capítulos orientados de la siguiente forma: Capítulo I. Marco conceptual teórico, se da una referencia sobre el tema basado en los argumentos encontrados en la búsqueda bibliográfica realizada. Capítulo II. Caracterización de las escorias negras de la acería José Martí. En este capítulo se muestran las principales características de las escorias negras generadas en la obtención del acero en la acería Antillana de Acero. Capítulo III. Materiales y métodos. Se muestran los principales materiales utilizados para la realización del trabajo, así como, la metodología utilizada en cada uno de los ensayos realizados. Capítulo IV.

Análisis de los resultados. Se analizan y discuten los trabajos y resultados obtenidos en cada caso. Capítulo V. Valoración económica y ecológica. Se muestra la incidencia de los resultados obtenidos en el sector siderúrgico desde el punto de vista económico y su repercusión en la preservación del medio ambiente. Finalmente se hace referencia a las conclusiones que arribamos a partir del resultado de los ensayos realizados y se recomiendan nuevas líneas de trabajo a desarrollar para dar continuidad a la investigación realizada. Finalmente se hace referencia a las fuentes bibliográficas consultadas.

1.0. Capítulo I. Marco conceptual teórico.

1.1. Introducción:

En el siguiente capítulo se realizó una pequeña descripción sobre el proceso de fusión en los hornos de arco eléctrico, detallando el proceso de oxidación y reducción que se realiza en el mismo para la obtención del acero, se muestra además el proceso de formación de la escoria negra, haciendo referencia además a diferentes trabajos precedentes sobre las escorias de acería.

1.2. Descripción del proceso de obtención de acero en el horno de arco eléctrico.

El horno de arco eléctrico, normalmente, es cilíndrico y está recubierto de refractario básico, dispone de una bóveda por donde se alimentan las diferentes materias primas, con la ayuda una cesta, una puerta utilizada para operar durante la fusión y para desescoriar, y una piqueta situada en el fondo o en un costado del horno que se utiliza para colar el acero. La materia prima principal utilizada en la fabricación del acero en horno de arco eléctrico es la chatarra junto con pequeñas cantidades de mineral de hierro, prerreducidos, ferro aleaciones, cal, espato-flúor, coke y oxígeno. El prerreducido es carga virgen que se utiliza para diluir los metales indeseables que pueda contener la chatarra utilizada para la fabricación del acero.

La chatarra junto al resto de materias primas se alimentan por la bóveda del horno .A continuación se cierra el horno y se procede a hacer saltar el arco eléctrico, que fundirá la chatarra mediante la alimentación de energía eléctrica

en corriente alterna trifásica y tres electrodos de grafito entre los que se hace saltar el arco eléctrico. La alimentación de energía también puede realizarse utilizando corriente continua. En este caso, se utilizan dos electrodos: uno de grafito y el otro metálico. Como consecuencia, se consigue mejorar el efecto distorsionador que el arco eléctrico puede generar en la red eléctrica.

Cuando los electrodos entran en contacto con la chatarra y se hace saltar el arco eléctrico, se producen saltos entre los electrodos y la chatarra como consecuencia de los espacios vacíos que se crean al fundirse la chatarra. La aparición del líquido fundido hace que el trabajo entre los electrodos sea más regular.

En cuanto se observa la existencia de líquido fundido debajo de los electrodos, debe procederse a la alimentación de cal, para cubrirlo superficialmente generar la escoria, y de oxígeno puro, mediante un sistema de lanzas que lo inyectan, que hará que el líquido fundido se oxide. Esta fase se conoce como fase oxidante. La adición de oxígeno provoca la oxidación del hierro presente en la chatarra, a continuación el óxido de hierro oxida el silicio y el manganeso, y por último se alimenta el carbono en polvo para la formación de la escoria espumosa. El CO al desprenderse del líquido fundido genera un burbujeo en el mismo y se dice que el líquido hierve. La presencia de cal en la escoria asegura la eliminación del fósforo del líquido, lo que se denomina desfosforación.

Cuando las fases de oxidación y desfosforación se procede por una de las puertas del horno a la extracción de la escoria, conocida como escoria negra, que es de colores muy oscuros, teniendo aspecto poroso, morfología regular, cúbica y fractura puntiaguda. A continuación comienza la fase de afino, con objeto de obtener un metal de bajo contenido en oxígeno y eliminar la mayor parte del azufre. El líquido fundido se alimenta al horno de afino y se cubre inmediatamente con una escoria reductora, que se denomina escoria blanca, que permita la reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño, esta fase se conoce como desoxidación. Para obtener aceros según las especificaciones requeridas, junto con el líquido fundido se procede a la alimentación de ferroaleaciones que se añaden directamente sobre el líquido fundido con objeto de ajustar la composición del mismo. Para aceros especiales se añaden, además, ferroaleaciones más complejas. Paralelamente

a la fase de desoxidación se inicia la desulfuración del líquido fundido, que finalizará en el horno-cuchara. Antes de colar el líquido fundido se vuelve a desescoriar, eliminando la escoria blanca. El líquido fundido se cuela por la piquera, volcando el horno hacia la piquera situada enfrente de la puerta de desescoriado, para evitar que el líquido fundido arrastre algo de escoria. Una vez vaciado, el horno se vuelve a su posición horizontal y comienzan las operaciones de arreglo del mismo para la siguiente operación de fusión.

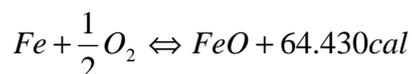
1.3. Descripción de las fases del proceso de fusión

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

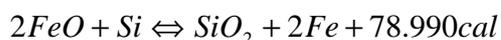
La marcha de la colada se inicia con la carga sólida de mineral, caliza o cal, según se disponga, chatarra y lingote de afino. La proporción de estos materiales dependerá del acero que se quiera fabricar y del análisis que convenga que tenga la carga fundida a la temperatura necesaria.

1.3.1. Proceso de 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 el hierro contenido en la chatarra según la siguiente reacción química:



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

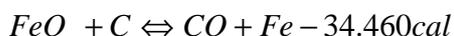


Las reacciones de hierro, manganeso y silicio son fuertemente exotérmicas, por lo que producen un aumento brusco de la temperatura de fusión, con la consiguiente reducción del consumo energético.

Los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar parte de la escoria que cubre el líquido fundido.

Finalmente, cuando se ha oxidado prácticamente todo el silicio y gran parte del manganeso, la temperatura del líquido fundido ha aumentado

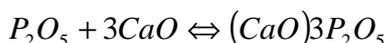
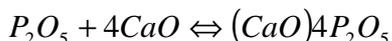
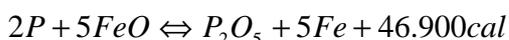
considerablemente (1600 °C aproximadamente) y la escoria tiene suficiente porcentaje de FeO libre. La adición de carbón en polvo permite la reducción del FeO presente en la escoria según la siguiente reacción química:



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

El paso de monóxido de carbono (CO) a través de la escoria produce lo que se conoce como escoria espumeante y que 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 disuelta en el líquido fundido y se manifiesta por una gran fragilidad del acero en frío la desfosforación se realiza según las siguientes reacciones:



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

1.3.2. Proceso de reducción:

Los procesos de reducción en la metalurgia de los metales se usan ampliamente. Como objetos de la reducción sirven los óxidos y sus soluciones sólidas o líquidas, halógenos y sulfuros. En calidad de reductores se emplean: hidrogeno, monóxido carbónico, metano, productos de la combustión del gas natural o del carbón, carbono sólido, carburo de calcio, distintos metales con mayor valor de la electronegatividad que el de los metales reducidos y corriente eléctrica.

La reacción mas simple de reducción es la disociación del óxido por el esquema de $2MeO \leftrightarrow 2Me + O_2$. Este proceso simple desde el punto de vista termodinámico, resulta ser mas complejo en la ejecución técnica. Solo para algunos óxidos y halógenos con alta tensión de disociación se puede realizar la

desintegración mediante la creación en el sistema del vacío necesario, subiendo al mismo tiempo la temperatura.

Con el actual nivel de desarrollo de la técnica resultaron ser los más eficientes los métodos de reducción química. En el caso de los óxidos la asociación del oxígeno se lleva a cabo por sustancias reductoras que poseen una afinidad con el oxígeno más alta que la del metal que se reduce.

1.3.3. Proceso de formación de escoria negra:

Estos procesos transcurren en el tiempo. Con determinada velocidad se produce la oxidación de las impurezas de la carga (del silicio, manganeso, fósforo, etc.) y la formación de sus respectivos óxidos; son prolongados los procesos de calentamiento y de fusión de los pedazos de mineral de hierro y de cal cargados en la instalación; a los procesos de fusión les preceden los de la descomposición de los carbonatos e hidratos, los cuales constituyen con frecuencia los materiales escorificantes, etc. El consumo de estos materiales se calcula tomando en consideración la composición de los materiales de carga, la de las propias adiciones escorificantes y de aquella escoria que se quiere obtener durante el proceso de la formación de la escoria. Si la atmósfera en la instalación es oxidante la fundición del acero va acompañada de los procesos de oxidación del hierro y de sus impurezas. Con objeto de realizar diversas operaciones tecnológicas en las instalaciones para fundir el acero se introducen diferentes adiciones (fundentes). Los compuestos formados con ello son más ligeros que el acero, suben a la superficie y forman por encima del baño metálico una capa de escoria.

La composición mineralógica depende del tipo de enfriamiento. Cuando se la somete a enfriamiento rápido es mayoritariamente vítrea pero si la escoria se enfría lentamente se obtiene una mezcla sólida estable compuesta por silicoaluminatos cálcicos y magnésicos. Las principales fases cristalinas gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), aquermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) y silicato bicálcico (Ca_2SiO_4).

Durante la fundición y la colada el metal líquido se encuentra en contacto continuo con la escoria e interacciona con ella. La composición de la escoria, su temperatura, la fluidez y otros parámetros ejercen una influencia decisiva en el proceso de la fundición y en la calidad del metal, la tarea principal del

fundidor del acero consiste en eliminar del metal las impurezas nocivas (por lo común, son el azufre y el fósforo). Este problema se resuelve haciendo pasar estas impurezas indeseables a la escoria y creando las condiciones que impiden su paso inverso de la escoria al metal. Cambiando la composición de al escoria, sus propiedades y la temperatura también se puede aumentar o disminuir el contenido de Mn, Cr, Si y otras impurezas en el metal. Por eso, con objeto de fabricar el acero de calidad, el fundidor, ante todo tiene que obtener la escoria de composición necesaria y de consistencia requerida.

1.3.4. Trabajos precedentes sobre las escorias:

En diferentes trabajos realizados sobre el uso de las escorias de las acerías los autores hacen referencia a diversos usos tales como, material de construcción:

En este sector las escorias han alcanzado determinadas aplicaciones; particularmente en Europa, donde se comercializan cementos compuestos de Cemento Pórtland y escorias. Se ha realizado el estudio de factibilidad técnica y económica, que incluye la evaluación técnica de las escorias a través de los resultados de los análisis físicos, químicos, mineralógicos y mecánico – resistentes de los cementos estudiados y de los hormigones y morteros elaborados con éstos; además se ha demostrado que la inversión es viable económicamente según muestran los indicadores de factibilidad calculados, tales como, VAN, TIRf, Rentabilidad sobre los costos, Rentabilidad sobre los fondos y Período de recuperación.

En la construcción de carreta: Las mismas se someten aun análisis profundo de su composición química. Se determina para cada elemento de interés el aporte al suelo en un periodo de 100 años, de los contaminantes presentes en la escoria, y se compara con el aporte que produciría un cambio en la composición en el primer metro del suelo de referencia igual 1%. Si los resultados de dicha comparación muestran que no se alcanza el valor límite que es un cambio de 1% en 100 años, entonces se considera un riesgo aceptable para el medio ambiente. No obstante, la utilización de estos materiales en aplicaciones en contacto con el suelo implica la retirada y posterior gestión una vez que finalice al uso que han sido destinados.

Como fertilizante: Las escorias se usan como corrector de suelos agrícolas (PH) mejorando las condiciones de cultivo en áreas con cierta acidez. Al mismo tiempo ayuda a preservar el medio ambiente, ya que permite reducir el vertido de residuos, que en general causan la degradación de grandes áreas.

Utilización en Hormigones: Para este empleo la escoria a la salida del crisol es enfriada bruscamente se congelan los compuestos principales formados a esa temperatura, la microestructura se vitrifica y se generan características que permiten su aprovechamiento en la elaboración del hormigón. Resulta interesante la utilización de la escoria enfriada bruscamente desde un concepto integral. Ya que puede ser utilizada en la resolución de problemas tecnológicos en el hormigón principalmente por la incorporación como polvo fino que actúa como dispersante y mejora la hidratación, modifica la retención de agua, colabora con la resistencia mecánica, disminuye el calor de hidratación, mejora la durabilidad (porosidad y difusión), atenúa las reacciones deletéreas como ataque de sulfatos, agua de mar, ingreso de cloro, RAS, etc.

2.0. Capítulo II. Características de las escorias negras.

2.1. Introducción

En el presente capítulo se realizó una caracterización de las escorias negras, haciendo énfasis tanto en sus propiedades físicas como químicas, a su vez se muestra la influencia que pueden tener cada uno de estas propiedades tanto químicas como físicas sobre los procesos de fundición del acero.

2.2. Principales propiedades químicas y físicas de las escorias negras.

Entre las principales propiedades químicas de las escorias sobresalen la basicidad y el poder oxidante.

La basicidad de la escoria es la relación que existe entre la cantidad de óxidos básicos y ácidos que forman la escoria. Se determina por la relación entre las concentraciones de los óxidos ácidos y básicos y caracteriza la capacidad de la escoria de absorber y de retener, solidamente, las impurezas de metal (fósforo, azufre y otros).

Existen varias formas para expresar la basicidad, la de mayor utilización es la expresión que relaciona la concentración del óxido básico (CaO) y la del óxido ácido más fuerte (SiO₂).

$$B = \frac{(CaO)}{(SiO_2)}.$$

Si la escoria contiene una cantidad considerable de pentóxido de difósforo (P₂O₅), la basicidad se expresa por la relación:

$$B = \frac{(CaO)}{(SiO_2) + (P_2O_5)}.$$

Poder oxidante de la escoria: Se determina por el contenido de óxido de hierro. Este caracteriza las concentraciones límites de las impurezas que pueden ser eliminadas mediante la oxidación, a través de la escoria, por ejemplo, la concentración de carbono, fósforo y manganeso.

Existen varias formas para expresar el poder oxidante de la escoria. Con frecuencia se expresa por el contenido de óxido (FeO) o por el contenido total de hierro ($\sum Fe$).

Cuando se utiliza la concentración de óxidos de hierro, se toma el hierro bivalente (FeO), no el hierro trivalente (Fe₂O₃), ya que este último, en la práctica, no se utiliza debido a que en las etapas inferiores de la escoria (límite escoria metal), la mayor concentración es de FeO,

La concentración de óxido de hierro (FeO), es considerablemente inferior en la capa de escoria en contacto con la atmósfera del horno, que en el interior de la masa. En el límite metal escoria, el óxido de hierro se reduce bruscamente consecuencia de la transmisión de iones O²⁻ y Fe²⁺ a la masa metálica. El contenido de FeO determinado mediante el análisis químico, nos da una idea correcta sobre su poder oxidante. Este se calcula para las escorias básicas por el contenido total de hierro en la escoria, incluyendo todos los óxidos de hierro, según:

$$\sum FeO = FeO + 0,9Fe_2O_3.$$

Cuando esto ocurre, no se tiene en cuenta la influencia de la basicidad de la escoria sobre la propiedad oxidante. En la escoria fuertemente básica, cierta cantidad de óxido de hierro está mezclada con el óxido de calcio en forma de

ferrita de calcio, lo que reduce la cantidad de óxidos de hierro activos ($\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$) en la escoria, y su poder oxidante.

Las propiedades físicas más importantes de la escoria que influyen sobre los procesos de fusión del acero son:

1. El grado de oscuridad: que caracteriza la capacidad de la escoria de absorber el calor,
2. Conductividad del calor,
3. Viscosidad, que determina la velocidad en que se produce el proceso,
4. Tensión superficial, que determina la magnitud de la humectación, la adhesión, cohesión y emulgación de la escoria,
5. Velocidad de difusión de los componentes.

El grado de oscuridad y conductividad térmica de la escoria no se han estudiado por completo. El valor promedio del coeficiente de conductividad térmica a través de la escoria se puede asumir igual a $3 - 4,5 \times 10^7 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{grados})$. Este valor para la escoria es menor que para el metal. El coeficiente de conductividad térmica del metal oscila entre: $27 - 30 \times 10^7 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{grados})$.

De aquí que la resistencia térmica (h_m / λ_m) de la capa de metal, de un espesor de 1 metro, es igual a la resistencia térmica de la capa de escoria (h_e / λ_e), cuyo espesor es únicamente de 0,1 – 0,15 m:

$$\frac{h_m}{\lambda_m} = \frac{h_e}{\lambda_e} = 0,075(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{grados}) / \text{J},$$

Donde:

h_m y h_e – Espesor de las capas de metal y de escoria, respectivamente, en m ;

λ_m y λ_e – Coeficientes de conductividad térmica del metal y de la escoria, en $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{grados})$.

El mezclado de la escoria por medio de la ebullición, del baño en los hornos de arco eléctrico, aumenta el valor del coeficiente de conductividad térmica de dicha escoria. Basándose en los cálculos se puede considerar que, para la escoria oxidada espumosa, el coeficiente de conductividad térmica representa

entre 6 y 9×10^7 J/(m.s.grados); mientras que para la escoria que ebulle intensamente aumenta hasta un valor entre $150 - 300 \times 10^7$ J/(m.s.grados).

La resistencia térmica será: $0,3 - 0,45 \times 10^{-6}$ m².s.grados/J, para la escoria oxidada espumosa y $1,8 - 7 \times 10^{-4}$ m².s.grados/J, para la escoria que ebulle intensamente

Viscosidad de la escoria: Es la propiedad física más importante de la escoria, ya que los procesos de difusión con aumento de la viscosidad, se reducen bruscamente. En la tabla No1. Se muestran los datos de la viscosidad de las escorias, del acero y de las fundiciones.

Tabla No1. Viscosidad de la escoria, del acero y de las fundiciones.

Material	Temperatura, (°C)	Viscosidad
Escoria líquida	1595	0,025
Escoria semilíquida	1595	0,020
Escoria pastosa	1595	0,020 o más
Acero	1595	0,025
Fundición gris	1425	0,015
Agua	25	0,0089

La viscosidad depende de la fuerza de fricción interna y de la energía de interacción entre las partículas de escoria. Estas características se determinan por la composición y la temperatura del metal líquido.

Al comenzar el enfriamiento de la escoria aumenta su viscosidad, hasta llegar a un punto de la curva (t crítica) donde, al aparecer los primeros cristales sólidos, se pierde bruscamente la homogeneidad. Al ir reduciéndose la temperatura, esto provoca un aumento considerable de la viscosidad al pasar la temperatura crítica.

Los componentes que reducen la viscosidad de las escorias básicas son: Al_2O_3 , CaF_2 , Na_2O . Otros componentes de la escoria, poco fusibles (CaO y Cr_2O_3), aumentan considerablemente la viscosidad de esta.

Tensión superficial de la escoria: La principal característica de las propiedades tecnológicas de la escoria, es la tensión superficial ($\sigma, (N/m)$), es decir, la energía superficial específica favorece la realización de los procesos siguientes:

1. Espumeo de la escoria.
2. Penetración de la escoria en los materiales refractarios.
3. Penetración de las inclusiones no metálicas absorbidas por la escoria.
4. Asimilación de las partículas sólidas por la escoria, entre otros.

La magnitud de la tensión superficial es mayor mientras más fuerte es la interacción entre las partículas. Los componentes de la escoria que dan iones con un campo magnético débil (iones de gran tamaño, radio grande, y portadores de pequeña carga), son superficialmente activos, pasan fácilmente de la masa a la capa superficial y reducen la tensión superficial de la escoria.

Velocidad de difusión de los componentes: Al fundirse la escoria, la mayoría de sus propiedades la determina su viscosidad. La viscosidad del líquido y el coeficiente de difusión en la escoria, para cualquier componente, es una magnitud cuya relación se caracteriza por la ecuación:

$$\eta \cdot D = cte.$$

Donde:

η – Viscosidad dinámica de la escoria,

D – Coeficiente de velocidad de difusión en la escoria de cualquier componente, en m^2/s .

A pesar de no tenerse un criterio definitorio sobre la velocidad de difusión de los componentes en la escoria, se conoce que la velocidad de difusión es menor que en el metal líquido. Además la velocidad de difusión de los componentes en la escoria sobre un mismo volumen, es menor que la velocidad de difusión en los metales líquidos a las mismas temperaturas.

Lo más importante en el aumento de la velocidad de difusión de los componentes en la escoria, es que esta se mezcla con el metal en el proceso de ebullición.

Humectación: Al colocar una pequeña cantidad de líquido sobre una superficie cualquiera, bien se forman gotas, o el líquido se esparce. La formación de gotas se explica por el equilibrio de las tensiones superficiales

Cuando se establecen los equilibrios:

$$\sigma_{Bg} = \sigma_{AB} + \sigma_{Ag} \cdot \cos \theta,$$

Donde:

σ_{AB} – Tensión superficial sobre el límite de las fases B (líquido formado por la gota) y A (superficie sobre el cual se coloca el líquido que forma la gota);

σ_{Bg} – Tensión superficial sobre el límite de las fases B y g (fase gaseosa que rodea la gota);

σ_{Ag} – Tensión superficial en el límite de las fases A y g;

θ – Ángulo interfacial o de humectación, que caracteriza como se esparce el líquido sobre la superficie. Su valor se determina, despejando la expresión

anterior, o sea:
$$\cos \theta = \frac{\sigma_{Bg} - \sigma_{AB}}{\sigma_{Ag}}.$$

ó lo que es igual:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{s-g} - \sigma_{l-s}}{\sigma_{l-g}}.$$

El ángulo de humectación (θ) puede tomar valores entre 0° y 180° , según:

1. Cuando $\theta = 0^{\circ}$, hay humectación completa;
2. Cuando $\theta = 180^{\circ}$, no hay humectación;
3. Cuando $0^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$, existe humectación parcial.

Este ángulo ($\cos \theta$) caracteriza la humectación, o sea, el valor de humectación de los elementos que intervienen en el proceso de elaboración de

acero y da una idea sobre el mecanismo de estos y sus escorias. En la tabla No.2. Se relacionan diferentes valores de estos ángulos.

Tabla No.2. Angulo de humectación de los diferentes elementos que intervienen en el proceso de elaboración de acero.

Líquido	Superficie sobre la cual se coloca el líquido	Temperatura (°C)	Ángulo de humectación (θ)
Hierro puro	Cuarzo	1530 – 1600	108 – 115
	Arcilla	1530 – 1600	139
	Magnesita	1530 – 1600	126
	Escoria (oxidada)	1530 - 1600	100 - 107
Hierro con carbono (0,007 % de C)	Arcilla	1560	141
	Magnesita fundida	1560	139
Hierro Técnico (0,09 % de C, 0,09 % de Mn)	Magnesita fundida	1560	121
Escoria oxidante	Magnesita	1600	0
	Hierro sólido	1450 – 1520	55
	Hierro líquido	1570 - 1560	90

Adhesión y Cohesión:

Adhesión: es la unión de las fases que hacen contacto en su límite de separación, el cual está condicionado por el efecto de las fuerzas intermoleculares de atracción. Para separar las fases en contacto se requiere una energía cuyo valor se determina por los valores de tensión superficial en el límite de las fases, y en el límite con la fase que la rodea después de la separación.

Por ejemplo, la cantidad de energía que es necesario invertir para separar la escoria del metal, es igual a la diferencia entre la suma de las tensiones superficiales del metal y de la escoria con la fase gaseosa, después de

separado este, y la tensión superficial en la interfase metal escoria, antes de la separación, es decir:

$$W_a = \sigma_{eg} + \sigma_{mg} - \sigma_{me}; \text{ N/m.}$$

Cohesión: Es la unión de las áreas de 2 líquidos, condicionada por el efecto de las fuerzas intermoleculares de atracción. Para separar las capas de líquido debe eliminarse la cohesión, por consiguiente, se debe invertir una energía adicional, llamada **trabajo de cohesión**.

Por ejemplo, la columna de líquido A con un área de 1 m^2 , es necesario dividirla en 2 partes, formándose dos superficies de 1 m^2 . Para formar cada una de estas superficies, se debe invertir una cantidad de energía igual a σ_{Ag} ; por consiguiente, el trabajo de cohesión, en el caso dado, es igual a $2 \sigma_{Ag}$.

El trabajo de adhesión y cohesión, es necesario calcularlo al romper las fases que se forman o superponen. Cuando una parte de la escoria se separa de sí misma o de la superficie del metal, el trabajo de cohesión es igual a:

$$W_c = 2\sigma_{eg}.$$

Emulgación: Es el proceso de separación de la fase de la escoria en partículas independientes, una mezcla de gotas de escoria y metal.

El trabajo (energía) que se invierte en la emulgación de la escoria y del metal, se determina por la ecuación:

$$W_{em} = W_e - W_m = \sigma_{mg} - \sigma_{eg} - \sigma_{me}.$$

Este proceso aparece al soplar el metal con oxígeno, o durante el soplado de materiales en polvo para formar la escoria sintética.

2.3. Caracterización química de la escoria negra objeto de estudio.

El análisis químico a la escoria negra para nuestro estudio lo dividimos en tres partes, teniendo en cuenta que dentro de la misma se presentaban dos tipos de escoria una del período de oxidación y una del período de reducción, en la tabla No. 4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla No.3. Composición química de la muestra inicial.

Elemento	Fe total (%)	FeO (%)
Muestra inicial	23,49	30,06
Escoria Blanda	24,32	30,64
Escoria Dura	31,71	39,95

Como se puede observar en la tabla el contenido de FeO en la escoria dura, o sea la generada en el período de afino es más alto, lo cual está dado en que parte del hierro oxidado en el período de oxidación no se redujo completamente pasando a la escoria en forma de óxido, mientras que en el caso de la muestra inicial el contenido de FeO es menor influenciado por la unión de las dos escorias lo que provoca un descenso en la ley del Fe de la muestra inicial.

3.0. Capítulo III. Materiales y métodos.

3.1. Introducción

El siguiente capítulo está relacionado con los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de la presente investigación, haciendo referencia a la escoria negra de acería como material utilizado en el trabajo, así como los equipos utilizados, específicamente el separador magnético KAPDH de campo magnético permanente y de velocidades variables desde (28-100 rpm), y la trituradora de mandíbula con suspensión superior de la mandíbula y biela vertical, utilizando como métodos para la investigación la trituración, el cribado y el análisis granulométrico.

3.2. Selección y toma de la muestra.

Muestreo: El muestreo en su sentido más estricto puede ser definido como la operación de remover una pequeña fracción o parte, que se denomina muestra. Desde un conjunto de material de mucho mayor volumen, de tal manera que las características del conjunto pueden estimarse estudiando las características de la muestra.

Para el desarrollo de nuestro trabajo la muestra objeto de estudio fue tomada en el depósito habilitado al efecto en la acería José Martí, la toma de la muestra se realizó de forma aleatoria formando un compuesto de 0,5 t la cual

fue trasladada hasta el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro para su posterior estudio.

En la toma de la muestra se pudo apreciar visualmente que las dimensiones de los trozos oscilaban desde 5 a más de 100 mm, encontrándose la escoria en dos formas una esponjosa con abundantes incrustaciones metálicas y otra más oscura de textura sólida y más pesada, en este caso resulta muy interesante resaltar que no se observan incrustaciones de metal.

3.3. Materiales y equipos.

Separador magnético: Los separadores magnéticos tienen los siguientes conjuntos principales:

Sistema magnético de imanes permanentes o de núcleos de acero con devanado, alimentado con corriente eléctrica continua y con menos frecuencia con corriente alterna. En nuestro caso se utilizó el separador magnético KAPDH- de tambor con arco magnético extendido, del cual la parte última es ajustable, el sufijo E, por ejemplo KAPDHE denota un separador completo, o sea, un tambor instalado en una caja de lámina de acero, con una tolva de alimentación, motor de impulsión y chapas divisoras. El separador consiste en una unidad de imán permanente estacionaria, que esta montada en una caja dentro de una estructura cilíndrica giratoria no magnética. Está proyectado para quitar hierro y acero de una variedad de productos industriales, y sus polos alternos muy cercanos producen fracciones magnéticas bien definidas.

En nuestro caso con la utilización del separador magnético descrito anteriormente, llevamos a cabo la separación magnética de la muestra, destacando que se trabajo bajo un régimen de intensidad de campo magnético permanente de 64 kA/m, Las muestras a separar se hicieron llegar al interior del separador de forma suave y uniforme, trabajando con velocidades de 28, 43 y 80 rpm respectivamente, el objetivo de las bajas velocidades está dado en lograr una mayor superficie de contacto entre el material y el tambor del separador aumentando el tiempo de contacto entre los mismos.

Trituradora de Mandíbula: En la trituradora de mandíbula el material se aplasta entre dos mandíbulas, una de las dos es inmóvil y la otra oscilatoria. Durante la aproximación de las mandíbulas los pedazos del material que se tritura y que se encuentra entre estas se aplasta. El material inicial se ingresa desde arriba

al espacio entre las mandíbulas. El producto triturado se descarga por debajo cuando se aleja la mandíbula móvil, el grosor de los pedazos máximos se determinan por el ancho de la hendidura de salida entre las mandíbulas. El ancho de las hendiduras de salida se regula por el cambio de las planchas tirantes, también mediante juntas y cuñas que se aprietan con pernos. Las trituradoras de mandíbulas se ponen en movimiento con ayuda del motor eléctrico a través de la transmisión por correa trapezoidal sobre todo a uno de los volantes. Lo masivo de las partes móviles (mandíbula móvil y volante) dificulta el arranque de las trituradoras, por lo que se emplea el embrague en tres etapas. En la primera etapa se pone en marcha el volante que juega el papel de pulea motriz, la segunda etapa es de transmisión de rotación de la trituradora, y la tercera etapa es la puesta en movimiento del segundo volante que se acopla al embrague de fricción.

En nuestro estudio utilizamos la trituradora de mandíbula con suspensión superior de la mandíbula y biela vertical. En la misma se trituró la muestra a diferentes granulometrías y abertura de las mandíbulas de 16 y 10 mm, con el objetivo de lograr la malla de liberación para las inclusiones metálicas existentes en la muestra.

3.4. Preparación mecánica.

Las velocidades de los procesos químicos y de difusión, que transcurren con la participación de las fases sólidas se elevan al aumentar la superficie de esta. Las operaciones de reducción de tamaño condicionalmente se subdividen en trituración (gruesa, media y fina) y pulverización (fina y súper fina). La reducción de tamaño de los materiales se efectúa mediante el aplastamiento, la cascadura, la abrasión y la percusión. En la mayoría de los casos estas formas de acción sobre el material se emplean combinación, según el tipo de material a tratar se elige una u otra forma de acción, así la trituración de los materiales sólidos y frágiles se ejecuta por aplastamiento, cascadura y percusión que es nuestro caso, los sólidos y viscosos por aplastamiento y abrasión.

En nuestro caso primeramente se clasificó la muestra de forma manual antes de comenzar a reducirla de tamaño, teniendo en cuenta que existían trozos de material superiores a 100 mm, la muestra se redujo mediante la acción del

aplastamiento, a las granulometrías siguientes (25, 16, 13, 10, 6, 3, 1 y -1 mm) ya que la misma era un material sólido.

3.5. Metodología.

Diseño Experimental:

Para la realización de los ensayos se realizó un diseño de experimento, la metodología que se siguió para realizar los experimentos fue la de factorial completo por lo que el número de pruebas a realizar se determinaron según la fórmula:

$$N = n^{\theta}$$

Donde:

N- es el número de experimentos.

n- es el número de niveles.

θ - es el número de factores.

Para nuestro caso tomamos tres niveles y el número de factores se determina de acuerdo a las variables las cuales se van a estudiar su comportamiento; ellas son la velocidad de rotación (rpm) y la granulometría del material luego de la trituración primaria (para 16 y 10mm de abertura de la trituradora), por lo que son $3^2=9$ el número de pruebas a realizar.

Primeramente decidimos trabajar con las 3 granulometrías más gruesas obtenidas mediante la trituración con 16 mm de abertura de la trituradora (+6,+13,+25mm), tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla No.4. Niveles mínimos, medios y máximos a analizar en el experimento para las fracciones granulométricas superiores (trituración a 16 mm de abertura):

Variable	Nivel Mínimo	Nivel medio	Nivel máximo
X ₁ (velocidad de rotación, (rpm))	28	43	80
X ₂ (Granulometría)	+6	+13	+25

Por lo que la matriz experimental quedaría de la siguiente manera:

No de Experimento	Velocidad del tambor (rpm/min)	Clase Granulométrica (mm)
1	28	-13+6
2	28	+25
3	80	+25
4	43	+25
5	43	-13+6
6	80	-13+6
7	28	-25+13
8	80	-25+13
9	43	-25+13

De igual forma se diseñó la experimentación para las granulometrías inferiores (+0,+1+3 mm) para el material obtenido a partir de la trituración con una abertura de la mandíbula de 16 mm.

Tabla No.5. Niveles mínimos, medios y máximos a analizar en el experimento para las fracciones granulométricas superiores (trituración a 16 mm de abertura):

Variable	Nivel Mínimo	Nivel medio	Nivel máximo
X ₁ (velocidad de rotación, (rpm))	28	43	80
X ₂ (Granulometría)	+3-6	+1-3	-1+0

Por lo que la matriz experimental queda de la siguiente manera:

No de Experimento	Velocidad del tambor (rpm/min)	Clase Granulométrica (mm)
1	28	-1+0
2	28	-6+3
3	80	-6+3
4	43	-6+3
5	43	-1+0
6	80	-1+0
7	28	-3+1
8	80	-3+1
9	43	-3+1

Métodos de muestreo: La preparación de las muestras corresponde a una etapa muy importante para el control metalúrgico como para los estudios a escala de laboratorio o piloto. De los métodos y precauciones que aquí se tomen dependerá la confiabilidad y exactitud de los datos obtenidos. En la preparación de muestras se emplean comúnmente dos métodos roleo y cuarteo, el roleo consiste en la homogenización de la muestra y el cuarteo es una operación que consiste en llegar a obtener una porción de muestra pequeña, representativa del total de la muestra inicial.

Método de Cribado: El cribado es un procedimiento de separación de los minerales áridos por clases de grosor mediante el tamizado de los mismos en una o varias cribas, o tamices. Las partes fundamentales de los aparatos para el cribado (cribas) es la superficie de trabajo fabricada en forma de una red de alambre (tela metálica) de hojas perforadas de acero. La clasificación por grosor en las cribas transcurre durante el movimiento relativo del material y de la superficie de trabajo de aquellas. Como resultado se obtienen dos productos, los que pasaron a través de la criba (material obtenido) y los que se quedaron encima de la criba (material retenido).

Durante el cribado se generan diferentes tipos de granos:

- Granos fáciles: son aquellos cuyos diámetros son menores que tres cuartos del diámetro de los agujeros del tamiz, pasan fácilmente entre los granos gruesos del material sobre el tamiz.
- Granos difíciles: son aquellos que son más gruesos de tres cuartos del de los agujeros del tamiz, pasan con trabajo entre los espacios entre los granos gruesos del material sobre el tamiz, esta dificultad de paso crece progresivamente a medida que se aproxima el diámetro de los agujeros del tamiz.
- Granos entorpecedores: son aquellos próximos a la magnitud de los agujeros del tamiz, pero más grandes, que se atascan fácilmente en los agujeros y ciegan el tamiz.

En nuestro caso el cribado básico se realizó sobre la base del esquema presentado en el anexo 13.

4.0. CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

4.1. Introducción.

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en la ejecución del estudio, así como las reflexiones de los mismos. Se muestran las diapositivas de la muestra en cada una de las etapas del proceso, los datos estadísticos recogidos en el transcurso de la investigación y una valoración de los resultados de recuperación metálica en forma global.

4.2. Caracterización de la muestra inicial.

La muestra de escoria objeto de estudio se muestra en la diapositiva No. 1. Como se puede apreciar este material está compuesto por dos tipos de escoria, una perteneciente al período de oxidación, de textura esponjosa y de bajo peso específico donde predominan abundantes incrustaciones metálicas como se muestra en la diapositiva No. 2, y otra correspondiente al período de afino, como se puede observar en la diapositiva No. 3, de textura compacta, de mayor peso específico, sin incrustaciones metálicas pero de una gran susceptibilidad magnética.

Diapositiva No. 1. Muestra de escoria inicial.



Diapositiva No. 2. Escoria con presencia de incrustaciones metálicas.



Diapositiva No. 3. Escoria compacta.



Las incrustaciones metálicas en la escoria del período de oxidación están dadas por la forma de extracción de la escoria del horno ya que la misma es extraída del baño metálico por medio del arrastre de la escoria a través de la ventana de trabajo, mientras que la escoria del período de afino es formada en el horno cuchara el cual descarga por el fondo, o sea, que por la diferencia de peso específico no es posible que se encuentre metal en la escoria, por otro lado la alta susceptibilidad magnética de esta escoria es debido a la reducción del hierro oxidado en el período de oxidación pero que en el proceso de afino no se redujo totalmente pasando a formar parte de la escoria en forma de oxido.

A la muestra extraída para nuestro estudio se le realizo un análisis de tamices para determinar su distribución granular. En la tabla No. 6 se muestra la composición granulométrica de la escoria negra de la acería José Martí. Como se puede observar el 80,04 % de las fracciones se encuentran por encima de 100 mm mientras que el 99,93 % se encuentra por encima de 2,0 mm.

Tabla No. 6. Composición granulométrica de la muestra Inicial.

Malla (mm)	Peso (Kg)	% en Peso	% acumulado
100,00	384,50	80,04	80,04
35,00	82,28	17,13	97,16
13,00	6,21	1,29	98,46
6,70	2,00	0,42	98,87
5,00	0,35	0,07	98,95
3,36	1,05	0,22	99,17
2,00	3,67	0,76	99,93
0,80	0,33	0,07	100,00
0,40	0,00	0,00	100,00
0,20	0,00	0,00	100,00
0,10	0,00	0,00	100,00
0,01	0,00	0,00	100,00
total	480,40	100	

A la muestra objeto de estudio inicialmente se le realizó una trituración a 16 mm, la muestra fue cuarteada tomando un cuarto para análisis químico y granulométrico y el resto para dar continuidad al estudio. Los resultados del análisis granulométrico al producto triturado se muestran en gráfico No.1. Anexo No. 1. Estos resultados se extrapolaron al gráfico de características tipo

de grosor de los productos quebrantados en trituradoras de mandíbulas dados por Razumov, A. K, 1982, los mismos están reflejados en la gráfico No.2, anexo No.2 donde la curva correspondiente a la muestra estudiada está por encima de la curva de dureza.

Como se puede observar en la figura la escoria negra de la acería José Martí se comporta como un material de alta dureza, esto indica que la resistencia a la rotura de las escorias es elevada, además el producto fragmentado poseerá un diámetro superior a la abertura de la boca de salida de la trituradora, en este caso el $d=16$ mm. Como resultado de la alta dureza de la escoria podemos observar que por el tamiz de + 25 mm se encuentra un retenido de 39,81 % del producto triturado.

4.3. Estudio de trituración y caracterización por fracciones.

Con el objetivo de recuperar las inclusiones metálicas presentes en la escoria, las diferentes granulometrías obtenidas en la trituración inicial a 16 mm fueron sometidas a un proceso de separación magnética en un separador vía seca con una intensidad de campo de 64 kA/m y velocidades de 80, 43 y 28 rpm respectivamente, en todos los casos se trabajó bajo las mismas condiciones. En el gráfico No. 3 anexo No.3 se muestran los resultados de la separación magnética de la fracción + 25 mm.

A 80 rpm se pudo observar en la fracción magnética una liberación de metal de granulometría mayor de 25 mm y muy pocas incrustaciones metálicas en la fracción no magnética, a 43 rpm no se observa liberación metálica en la fracción magnética sin embargo se aprecia abundantes incrustaciones metálicas en la misma, de igual modo se manifestó la separación a 28 rpm, o sea que en estos casos las partículas de metal se encontraban dentro de la escoria. El volumen total de muestra a ensayar con esta granulometría fue de 150 kg con una recuperación metálica total de 6,84 kg lo que representa un % en peso de 4,60. En la diapositiva No. 4 se muestra la liberación de metal + 25 mm.

Diapositiva No. 4. Liberación metálica fracción + 25 mm.



En el gráfico No. 4 anexo No.4 muestran los resultados de la separación magnética de la fracción + 13 mm.

En el caso de la fracción + 13 mm se observa a 80 rpm liberación metálica con existencia de abundantes incrustaciones metálicas en la fracción magnética, compuesta además por hierro en forma de óxido predominando la escarpa, a 43 rpm no se observa liberación metálica, en menor medida se puede apreciar incrustaciones metálicas y gran predominio de fracción magnética, o sea el hierro en forma de óxido, a 28 rpm no existe liberación metálica, escasas incrustaciones metálicas y hierro en forma de óxido. El volumen total de muestra a ensayar con esta granulometría fue de 161 kg con una recuperación metálica total de 5,99 kg lo que representa un % en peso de 3,76. En la diapositiva No. 5 se muestra la fracción magnética correspondiente a la fracción + 13 mm.

Diapositiva No. 5. Fracción magnética, fracción + 13 mm.



En el gráfico No. 5 anexo No.5 se muestran los resultados de la separación magnética de la fracción + 6 mm.

En el caso de la fracción + 6 mm se observa a 80 rpm liberación metálica con predominio de incrustaciones metálicas en la fracción magnética, compuesta además por hierro en forma de óxido, a 43 rpm se observa en menor medida liberación metálica apreciándose incrustaciones metálicas y gran influencia de fracción magnética, o sea el hierro en forma de óxido, a 28 rpm no existe liberación metálica, el hierro se encuentra en forma de óxido. El volumen total de muestra a ensayar con esta granulometría fue de 54 kg con una recuperación metálica total de 5,54 kg lo que representa un % en peso de 10,57. En la diapositiva No.6. Se muestra la porción magnética correspondiente a la fracción + 6 mm.

Diapositiva No. 6. Fracción magnética, fracción + 6 mm.



En el gráfico No. 6 anexo No.6 se muestran los resultados de la separación magnética de la fracción + 3 mm.

En la fracción + 3 mm se observa a 80 rpm abundante liberación metálica en forma de pequeñas lupias de forma irregular acompañado de fracción magnética, a 43 y 28 rpm se observa liberación metálica acompañada de fracción magnética aparentemente compuesta por hierro en forma de óxido. El volumen total de muestra a ensayar con esta granulometría fue de 21,50 kg con una recuperación metálica total de 3,63 kg lo que representa un % en peso de 17,64. En la diapositiva No. 7. Se muestra la fracción magnética correspondiente a la fracción + 3 mm.

Como característica negativa de este material debemos señalar que se presentan en gran medida granos entorpecedores los cuales se encuentran próximos a la magnitud de los agujeros del tamiz, pero más grandes, y se atascan fácilmente en los agujeros cegando el tamiz, esta particularidad sería perjudicial en un proceso industrial ya que disminuiría la eficiencia de las cribas.

Teniendo en cuenta que en la trituración básica posterior a la separación magnética se podían apreciar incrustaciones metálicas en las fracciones gruesas se procedió a realizar una segunda trituración a 10 mm de abertura de la trituradora de mandíbula, en este caso las fracciones + 25, + 13, + 6 mm. La fracción + 25 mm fue triturada y posteriormente se le realizó un análisis granulométrico el cual se muestra en el gráfico No. 7. Anexo No.7

Diapositiva No. 7. Fracción magnética, fracción + 3 mm.



En la fracción + 1 mm se observa, a 80 rpm liberación metálica en forma puntual como pequeñas lupias de forma irregular acompañado de fracción magnética, a 43 y 28 rpm no se observa liberación metálica solo fracción magnética aparentemente compuesta por hierro en forma de óxido. El volumen total de muestra a ensayar con esta granulometría fue de 21,85 kg con una recuperación metálica total de 3,47 kg lo que representa un % en peso de 18,35.

En el gráfico No. 8 anexo No.8 se muestran los resultados de la separación magnética de la fracción - 1 mm.

En esta fracción - 1 mm a 80, 43 y 28 rpm se observan resultados similares, o sea que no se aprecia liberación metálica solo fracción magnética compuesta por hierro en forma de óxido con una alta susceptibilidad magnética. El

volumen total de muestra a ensayar con esta granulometría fue de 11,21 kg con una recuperación metálica total de 3,16 kg lo que representa un % en peso de 39,79.

En el gráfico No.9 anexo No.9 se muestran los resultados globales de la recuperación en peso de la trituración a 16 mm de abertura de la trituradora, como se puede observar los mayores valores de recuperación se encuentran en las fracciones entre -1 y +1 mm pero en este caso el hierro se encuentra en forma de óxido con una alta susceptibilidad magnética por lo que estas fracciones pueden ser cargadas al horno teniendo en cuenta, que la misma puede ser considerada como un mineral de alta ley en Fe y que en la actualidad en la acería José Martí se carga la escarpa como componente de la carga en sustitución parcial de la chatarra.

Debemos señalar que para la trituración básica la maya de liberación de las inclusiones metálicas se encuentra entre 3 y 6 mm donde se alcanzan valores de 17,64 y 10,57 % respectivamente.

Teniendo en cuenta que posterior a la separación magnética, en las fracciones gruesas + 13, + 6 mm se podía apreciar abundantes incrustaciones metálicas, se realizó una trituración a 10 mm de abertura de la trituradora a estas fracciones. Posterior a la trituración se realizó un análisis granulométrico cuyos resultados se muestran en el gráfico No. 10, anexo No.10

Como se puede apreciar en el gráfico en la fracción + 13 mm se encuentra un retenido de 9,47 % lo cual está dado por la dureza del material como fue explicado anteriormente, mientras que el mayor retenido se encuentra en las fracciones +3 y +6 mm con valores de 9,20 y 72,80 % respectivamente.

En el estudio de separación magnética realizado a la trituración inicial quedó demostrado que la velocidad óptima para la recuperación metálica se encontraba a 28 rpm, se tomó esta velocidad para los demás ensayos manteniendo los demás parámetros de velocidad e intensidad de campo magnético.

En el gráfico No. 11 anexo No.11 se muestran los resultados de la separación magnética de la fracción + 13 mm, en el mismo se muestran los valores obtenidos en la separación magnética de las diferentes fracciones producto de la trituración.

Como se puede observar en el gráfico se mantienen los mayores valores de recuperación en las fracciones finas con valores de 10,75 y 17,83 % respectivamente mientras que en la fracción + 3 mm se mantienen los mayores contenidos de recuperación metálica los cuales se encuentran en 7,35 %. Como se puede apreciar los valores de recuperación van decreciendo lo que es evidente ya que a la muestra se le realizó una separación básica, siendo significativo destacar que aun en la separación de limpieza los valores se mantienen representativos representados en la fracción + 3 mm por 7,35 %.

En el gráfico No. 12 anexo No.12 se muestran los resultados de la separación magnética de la fracción + 6 mm, al igual que el caso anterior se muestran los valores obtenidos en la separación magnética de las diferentes fracciones producto de la trituración.

En el gráfico se aprecia que los mayores valores de recuperación se encuentran en las fracciones finas con valores de 11,83 y 21,52 % respectivamente, en este caso el hierro se sigue manifestando en forma de óxido, mientras que en la fracción + 3 mm se mantienen los mayores contenidos de recuperación metálica los cuales se encuentran en 2,18 %. Como se puede estimar los valores de recuperación en la fracción + 3 mm decrece con respecto al fracción + 13 mm y aumenta para las fracciones finas +1 y - 1 mm, lo que está dado por la generación de finos en las diferentes trituraciones lo cual ha ido incrementando el contenido de este con la consiguiente liberación del hierro en forma de óxido.

Teniendo en cuenta que posterior a la trituración básica, la cual se realizó a 16 mm de abertura de la mandíbula de la trituradora se obtuvo inclusiones metálicas mayores de 25 mm, podemos definir que para escorias de acería el esquema de beneficio inicial debe ser el mostrado en el anexo No.13. Quedando definido como esquema general para la extracción de las inclusiones metálicas de estas escorias el mostrado en el anexo No.14.

5.0. Capítulo (V) valoración ecológica y económica.

5.1. Introducción.

Este capítulo está referido a la parte medioambiental, ecológica y económica, donde se realizó una valoración sobre el impacto que tienen las escorias con

respecto al medio ambiente y al hombre, destacando la afección a los suelos, se hace alusión de las medidas a tomar para disminuir los efectos negativos que estas pueden causar. También se refleja desde el punto de vista económico, las ventajas y el ahorro que significaría la recuperación de las inclusiones metálicas contenida en las escorias y su reincorporación al proceso de obtención de acero como sustituto de la chatarra, teniendo en cuenta que en los momentos actuales solamente en la acería José Martí la escoria depositada en los diques habilitados al efecto superan las 572716,68 toneladas.

5.2. Valoración ambiental.

Afección a los suelos: Las posibles afecciones medio ambientales que se pueden generar sobre los suelos, se centran en el almacenamiento de residuos y materias primas. La tendencia del sector es la de proceder al almacenamiento de la chatarra bajo cubierta. El almacén de materias primas y el de residuos son dos puntos donde se pueden producir fugas o escapes accidentales de materiales. Las líneas de trabajo se centran en el correcto diseño de los almacenes y la instalación de cubetas de contención que evitan los posibles incidentes medios ambientales.

Dentro de los usos permitidos de las escorias se encuentran la construcción de carreteras pero las mismas se someten a un análisis profundo de su composición química. Se determina para cada elemento de interés el aporte al suelo en un periodo de 100 años, de los contaminantes presentes en la escoria, y se compara con el aporte que produciría un cambio en la composición en el primer metro del suelo de referencia igual 1%. Si los resultados de dicha comparación muestran que no se alcanza el valor límite que es un cambio de 1% en 100 años, entonces se considera un riesgo aceptable para el medio ambiente. No obstante, la utilización de estos materiales en aplicaciones en contacto con el suelo implica la retirada y posterior gestión una vez que finalice al uso que han sido destinados.

En cementeras de escorias negras la fabricación de cemento supone la transformación térmica del residuo a temperaturas superiores a los 1400 °C, lo cual implica la sublimación y emisión en chimenea de ciertos óxidos metálicos presentes en las escorias (plomo, zinc, cadmio, níquel). Por ese motivo, el control de la calidad medioambiental de las escorias en esta aplicación, se

realiza mediante la determinación de metales en las partículas en suspensión emitidas por la chimenea y el clinker elaborado.

Producción limpia: La tendencia mundial ante el deterioro del medio ambiente esta en la implantación de tecnologías de producción limpia, en el caso del acero en el proceso de fusión se generan escorias negras como residuos, mientras en el proceso de afino se generan las escorias blancas, estas escorias tienen distintas composiciones químicas, en función del tipo de chatarra que sea utilizada, la generación de la escoria no se puede evitar, llegando a ser beneficiosa en el proceso de fusión, puesto que incrementa la eficiencia energética. Por lo que las estrategias tomadas para una producción limpia pretenden un análisis de cada proceso productivo con el fin de detectar la potencialidad de la reducción de la generación de residuos y el máximo aprovechamiento de las materias primas.

En el caso del sector siderúrgico nuestro, es significativo el daño ecológico que en estos momentos se producen por el vertimiento de desechos sólidos producto de la producción de acero en áreas aledañas a la industria y la población, estos desechos alcanzan valores superiores las 572716,68 toneladas. La contaminación producida al medio ambiente se manifiesta fundamentalmente en el aire y suelo, poniéndose de manifiesto en las aguas subterráneas producto a los lixiviados formados por las condiciones climatológicas ya que los depósitos se encuentran a cielo abierto. A partir de los resultados obtenidos en nuestro trabajo se sientan las bases para implantar una tecnología que permita recuperar la fracción magnética contenida en las escorias y el empleo de la fracción no magnética en otros sectores de la industria como la construcción, la agricultura, etc. De esta forma lo que en la actualidad constituye un desecho no degradable podría pasar a ser una materia prima de un amplio espectrun de aplicación convirtiendo la producción de acero en un proceso sin residuales.

5.3. Valoración económica.

En la valoración económica de nuestro trabajo debemos tener en cuenta los precios actuales de la chatarra de acero el cual se encuentra en 250 USD la t, si tenemos en cuenta la generación de escoria de la acería José Martí la cual alcanza valores de 15 000 t anuales, podemos estimar que en los depósitos de

la misma se encuentran acumuladas al rededor de 750 000 t de escoria correspondiente a sus 50 años de trabajo.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en nuestro trabajo, donde se demostró que por t de escoria el 11,4 % es metal recuperable y que en los depósitos de la acería José Martí se encuentran acumuladas 85500 t de materia prima aprovechable podemos afirmar, partiendo del costo de la chatarra de acero equivalente a 250 USD/t, que en los depósitos de dicha empresa se encuentra acumulada materia prima por valor de 21375000 USD.

Conclusiones.

1. Se demostró que es posible mediante un proceso combinado trituración - separación magnética separar las inclusiones metálicas contenidas en las escorias negras generadas en la producción de acero.
2. La malla de liberación óptima para la separación del metal de las escorias negras se encuentra entre -6 y + 3 mm.
3. La abertura óptima de la trituradora para la trituración primaria es de 16 mm, mientras que para la trituración secundaria es de 10 mm, trabajando con intensidad de campo en el separador magnético de 64 kA/m y velocidad del tambor de 28 rpm.
4. Las escorias negras almacenadas en los depósitos de la acería José Martí, constituyen un desecho industrial reutilizable como sustituto de la chatarra de acero y materia prima para la construcción de carreteras, cementeras, hormigones, etc.
5. En los depósitos de la acería José Martí se encuentran acumuladas 85500 t de materia prima aprovechable por lo que podemos alegar, partiendo del costo de la chatarra de acero equivalente a 250 USD/t, que en los depósitos de dicha empresa se encuentra depositada materia prima férrea por valor de 21375000 USD.

Recomendaciones.

1. Realizar estudios para la recuperación metálica de las escorias negras a intensidades de campo inferiores a 64 kA/m.
2. Realizar estos estudios con la acería ACINOX Tunas.
3. Realizar estudios desde el punto de vista medio ambiental para la utilización de las escorias de la acería José Martí para la construcción de carreteras.
4. Realizar un estudio de factibilidad técnico económica para llevar a cabo inversiones que permitan llevar nuestros resultados a un proceso industrial.

Bibliografía

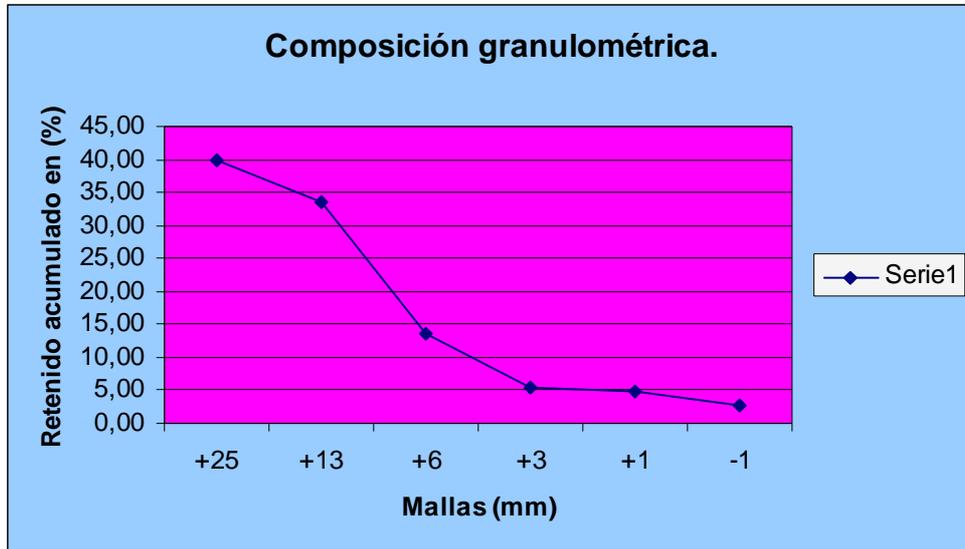
1. Belay,G.E. Guía Tecnológica de fundición. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara, 1970.
2. Colectivo de Autores. "Libro Blanco Minimización de Residuos y Emisiones de Acerías".Sociedad Pública de Gestión Ambiental IHOBE, S.A, 1995.
3. Andreiev S, E y Otros. " Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales". Editorial MIR 1980.
4. Andreiev S, E y Otros. " Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales Útiles". Nedra 1966.
5. Andreiev S, E , Tovarov y Otros. "Leyes de la Trituración y Cálculo de la Composición Granulométrica". Metalurgizdat 1959.
6. Coello V, A. "Sostenibilidad Energética en los Procesos de Preparación Mecánica de Minerales".ISMM Moa 2002.
7. Garcés I, León H y Muñoz H "Aplicación del Modelo Matricial en una Operación de Trituración". Metalurgia Vol 26 No 4. Madrid 1990.
8. Gilvarry, JJ., Fracture of brittle solids, I.Distribution function for fragment size in single fracture(Fractura de sólidos frágiles, I. Función de distribución para el tamaño de fragmentos con fractura única). J. Appl. Phys.,32: 391-399.1961

9. Lynch A, J "Circuitos de Trituración y Molienda de minerales Optimización, Diseño y Control". Editorial Rocas y Minerales. Madrid 1980.
10. Taggart A, F. "Handbook of Mineral Dressing". Edición Revolucionaria. La Habana 1972.
11. www.otec.com.es/typo3cms/magnetische_separierung
12. La presencia de la concepción de producción más limpia en la legislación ambiental cubana. [en línea] www.cubaindustria.cu [Consulta: 19 de junio de 2009].
13. DERCACH G. Métodos especiales de enriquecimiento de minerales. Ed. Vnestorgizdat. Moscú. 1981.
14. Manual separador magnético VOG1.15S. Boxmag Rapid. Londres. 1985.

Anexos

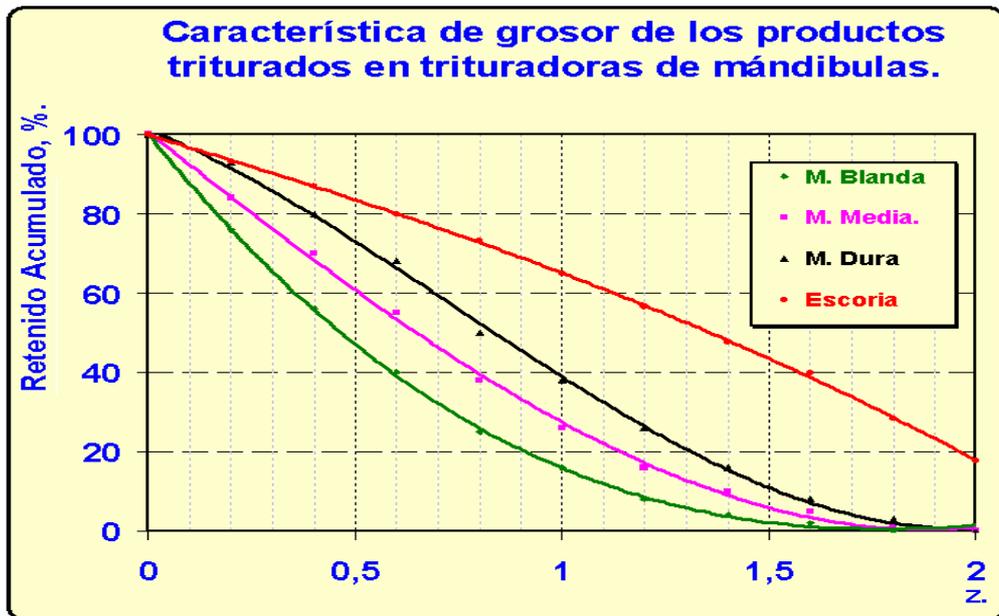
Anexo No.1

Gráfico No.1. Composición granulométrica muestra inicial triturada a 16 mm.



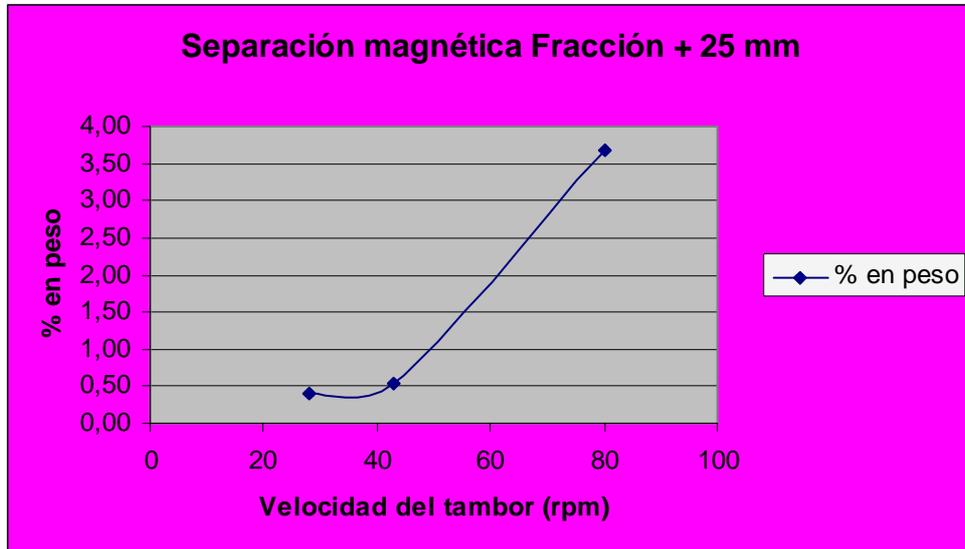
Anexo No.2

Gráfico No.2. Característica de grosor de los productos triturados.



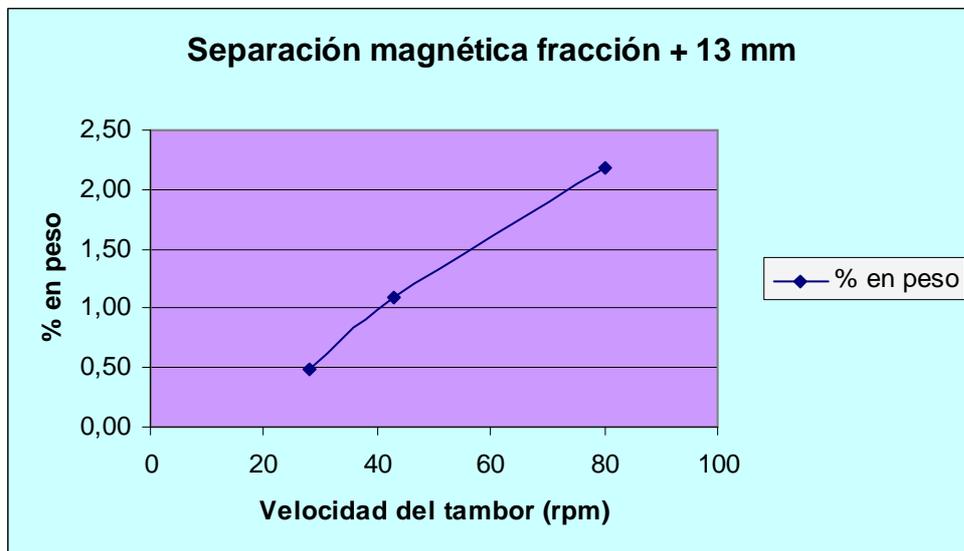
Anexo No.3

Gráfico No. 3. Separación Magnética Fracción +25 mm.



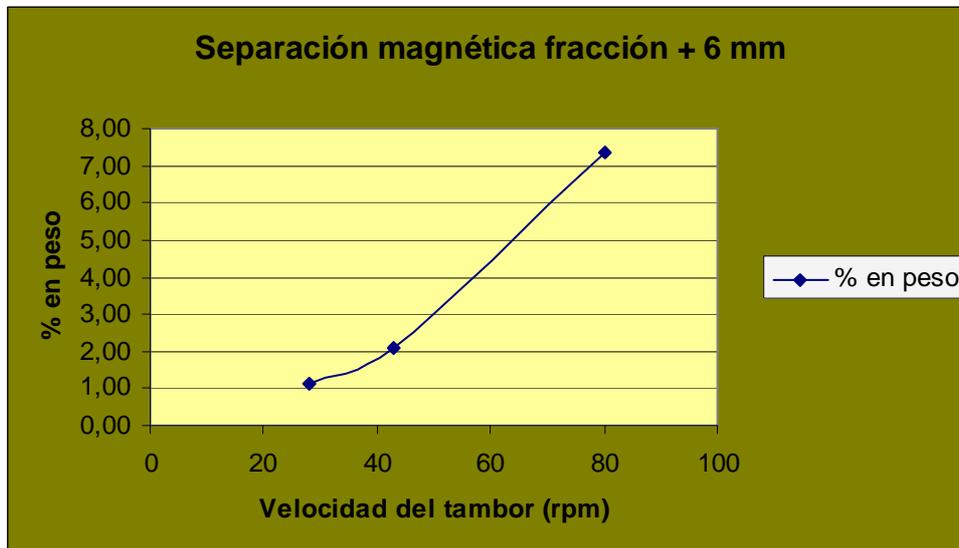
Anexo No.4

Gráfico No. 4. Separación Magnética Fracción +13 mm.



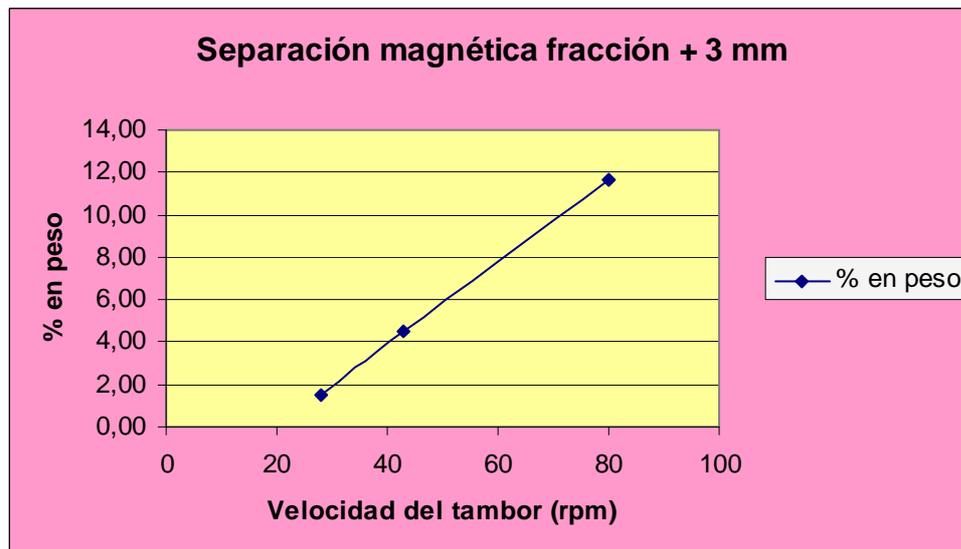
Anexo No.5

Gráfico No. 5. Separación Magnética Fracción + 6 mm.



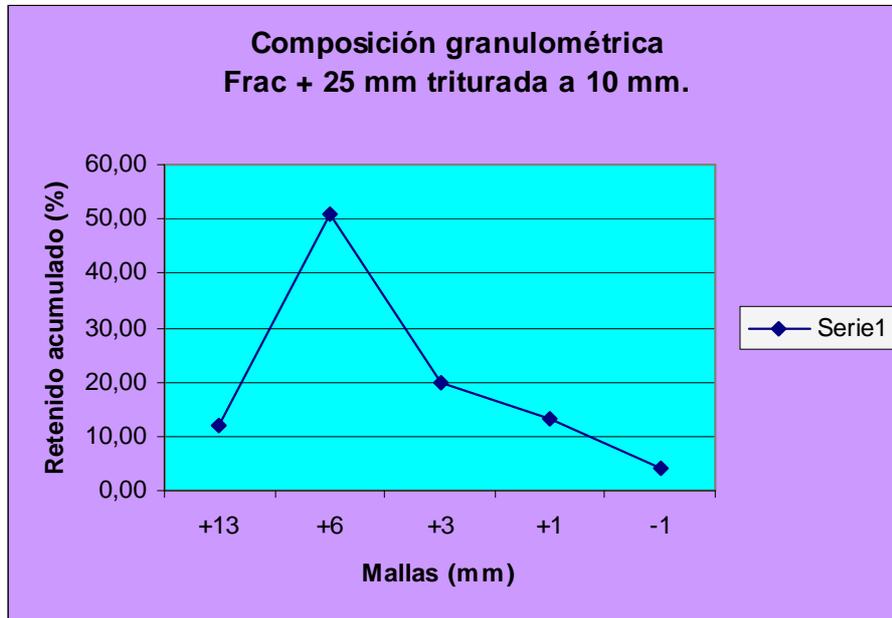
Anexo No.6

Gráfico No. 6. Separación Magnética Fracción + 3 mm.



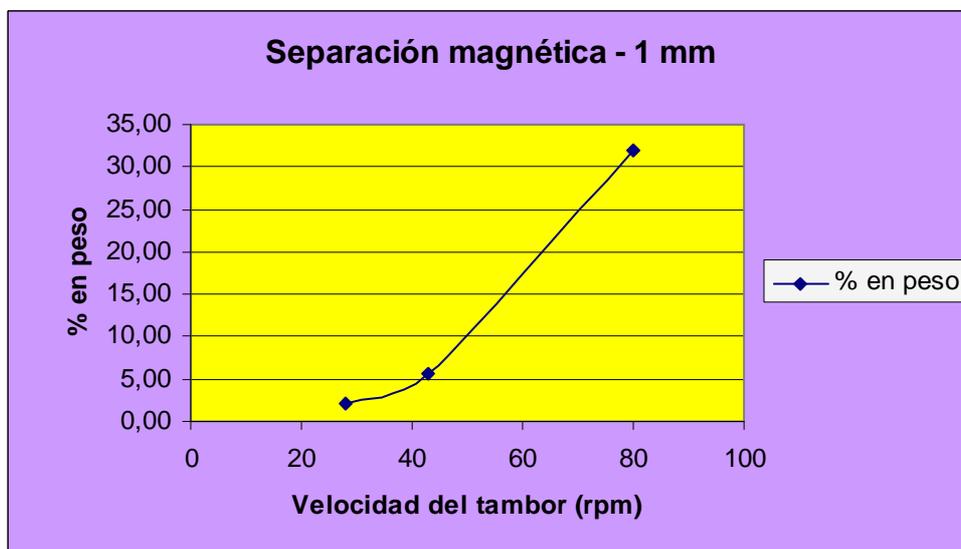
Anexo No.7

Gráfico No.7. Composición granulométrica fracción +25 mm triturada a 10 mm



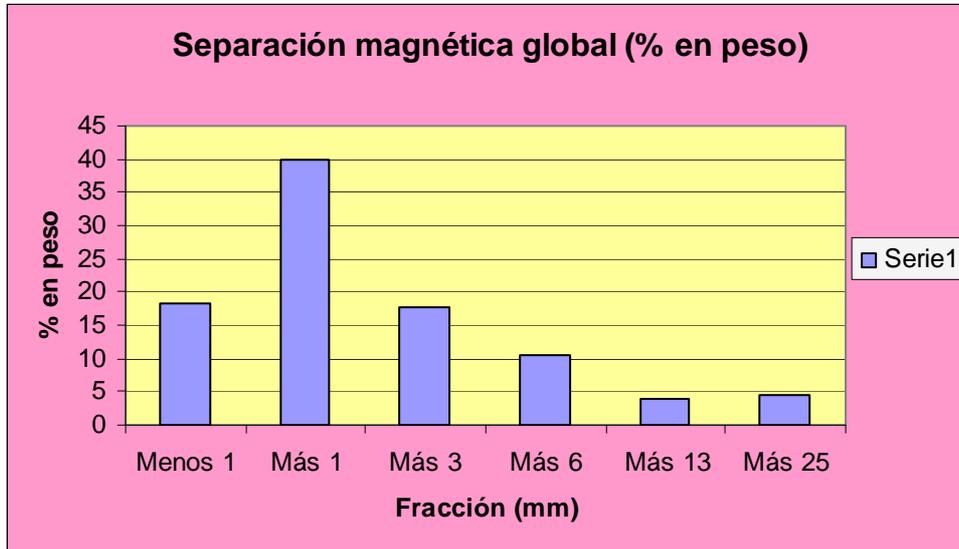
Anexo No. 8

Gráfico No. 8 Separación magnética de la fracción -1 mm.



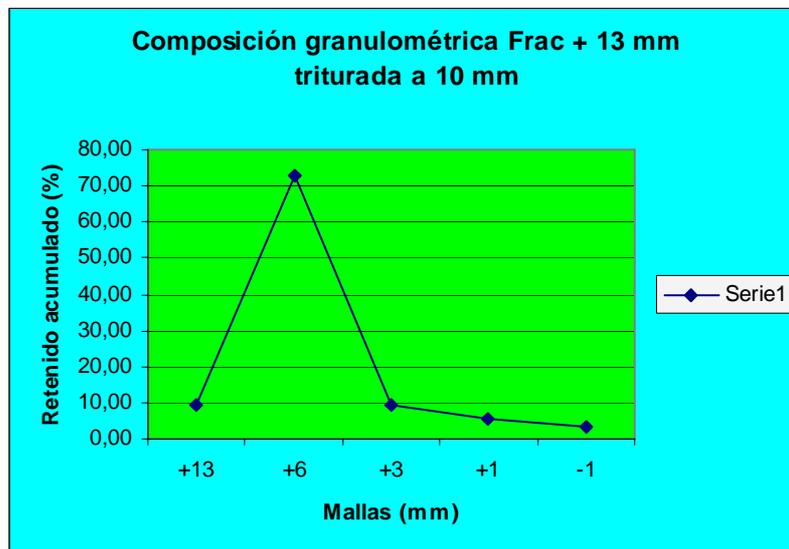
Anexo No.9

Gráfico No. 9 Recuperación global de la trituración a 16 mm.



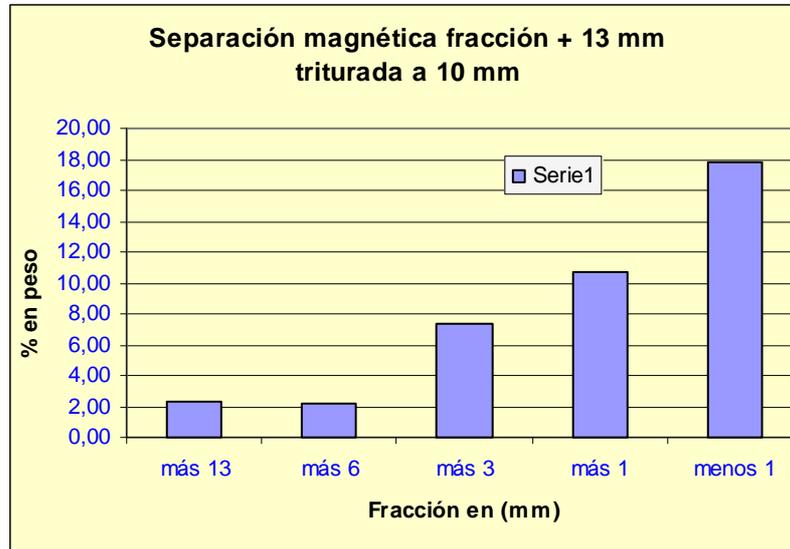
Anexo No.10

Gráfico No. 10 Análisis granulométrico fracción + 13 mm triturada a 10 mm.



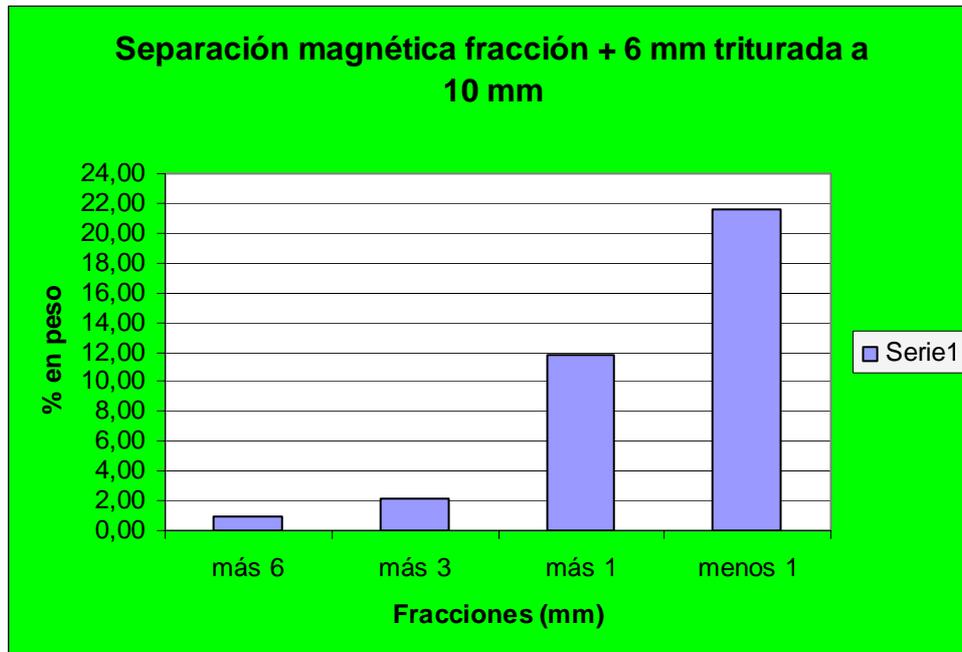
Anexo No.11

Gráfico No. 11 Separación magnética fracción + 13 mm triturada a 10 mm.



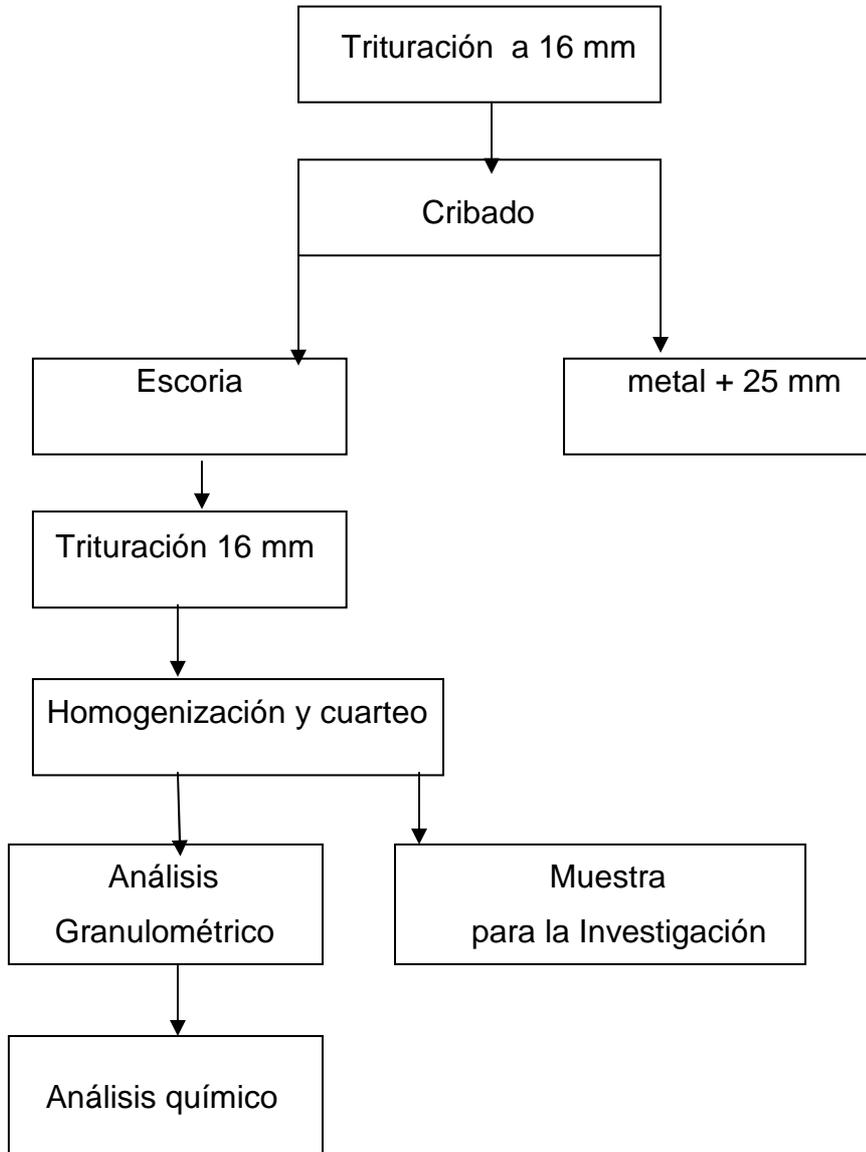
Anexo No.12

Gráfico No. 12 Separación magnética fracción + 6 mm triturada a 10 mm.



Anexo 13.

Esquema de trituración Básico.



Anexo 14.

Esquema de trituración y cribado.

