



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

Recuperación de hierro y cinc de los polvos de acería de ACINOX Las Tunas

**Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y
Materiales**

Daniel Aguilar Fong

Moa
2014



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

Recuperación de hierro y cinc de los polvos de acería de ACINOX Las Tunas

**Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y
Materiales**

Autor: Daniel Aguilar Fong

Tutores:

Ms. C. Emilio Leyva Ramírez

Ing. Nadielza Góngora Fonseca

Moa
2014

Dedicatoria.

A mi madre, mi padre, mis hermanos y a "niña".

Agradecimientos.

A mi madre Yamilé Fong Reyes y a mi padrastro Abel Rodríguez Rojas, por siempre alentarme a continuar mis estudios.

A mi padre L. Daniel Aguilar Arévalo, sé que su mayor deseo era que terminara mis estudios universitarios.

A mis hermanos Yetzabel y Abel Rodríguez Fong, los mejores hermanos que se pueda tener.

A mi bisabuela Serafina “niña” Castillo por creer en mí y darme el mayor de los apoyos.

A mis tutores Msc. Emilio Leyva y Nadielza Góngora, sin su ayuda este trabajo no habría sido posible.

A mis profesores, por hacer de mí lo que soy.

A mis compañeros de estudio, por aguantarme estos cinco años.

A Gustavo Presilla Llanos, por su apoyo para realizar este trabajo.

Y a todas las personas que de una forma u otra hicieron posible con su ayuda que hoy haya llegado hasta aquí.

A todos ustedes muchas gracias!!!!

RESUMEN

La empresa ACINOX Las Tunas, vierte cada año más de 2000 toneladas de polvos de acería con contenidos de elementos metálicos valiosos que pueden ser recuperados. Razón por la cual el presente trabajo tiene como propósito proponer una alternativa tecnológica que permita recuperar metales como el Fe y el Zn presentes en los polvos. Con este fin el estudio analizará las viabilidades que ofrece la separación magnética húmeda a baja intensidad, procesando la muestra de polvo íntegra, y realizando una separación magnética a los productos del tratamiento de la muestra en un hidrociclón. La composición química se determinó a través de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Se obtuvo que el hierro se concentra mejor a menor intensidad del campo magnético (63,69 kA/m), y los mejores concentrados de cinc se obtienen en las espumas que se forman en el proceso de separación magnética. Es posible concentrar el Fe en el producto magnético de las arenas del hidrociclón en un 53,10 %, mientras se obtiene un contenido de cinc de 11,59 % en el reboso del hidrociclón a través del esquema de beneficio propuesto.

Palabras Claves:

Separación magnética, polvo de acería, hidrociclón.

SUMMARY

The ACINOX Enterprise Las Tunas, produces more than 2000 tons of Steel dust with valuable metallic elements contained within that can be recovered. This is the reason why the present diploma has the purpose of suggesting a technological alternative that allow the recuperation of metals such as Fe and the Zn which are present in the dust. With this, the study will analyze the viabilities that offer the process of humid magnetic separation at a low intensity, processing a sample of integrated dust, and carrying out a magnetic separation to the sample products which are treated in the hydrocyclone. The chemical composition is determined through the atomic absorption spectrophotometry method. It was obtained that the iron is concentrated better at a lower magnetic field intensity (63.68 kA/m), and the best concentrates of zinc are obtained in the foam formed in the magnetic separation. It's possible to obtain a concentrate of 53.1 % of Fe in the magnetic product of the dust recovered by the hydrocyclone, at the same time 11.59 % in the overflow of the hydrocyclone through the proposed beneficial flowchart.

Key Words:

Magnetic Separation, steel dust or powder, hydrocyclone.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Características de los polvos de acería.....	6
1.3 Trabajos precedentes	9
1.3.1 Tecnologías existentes para el procesamiento de polvos de acería	9
1.3.2 Trabajos realizados con los polvos de acería	12
1.3.3 Trabajos realizados con la separación magnética	13
1.4 Fundamentos teóricos sobre los separadores magnéticos.....	14
1.4.1 Características de los separadores magnéticos	15
1.4.2 Principios básicos del funcionamiento de los separadores magnéticos ..	15
1.5 Fundamentos teóricos sobre el hidrociclón	17
1.5.1 Características del hidrociclón.....	18
1.5.2 Principios básicos del funcionamiento de los hidrociclones	19
1.5.3 Eficiencia del hidrociclón.....	22
Conclusiones parciales del capítulo.....	23
2 MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Metodología.....	25
2.2 Principales materiales y equipos utilizados en la investigación	26
2.2.1 Características técnicas de los principales equipos	27
2.3 Toma y preparación de la muestra.....	29
2.4 Caracterización de la materia prima utilizada.....	30
2.4.1 Análisis granulométrico de la materia prima	31

2.4.2	Determinación química cuantitativa por espectrofotometría de absorción atómica (E.A.A)	31
2.4.3	Medición de susceptibilidad magnética en muestras de polvos de acería	32
2.4.4	Determinación del peso específico volumétrico (densidad)	33
2.5	Corrida experimental en el separador magnético de tambor	34
2.5.1	Ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad (SMHBI)	34
2.5.2	Metodología de preparación de la pulpa para los ensayos de separación magnética	36
2.6	Corrida experimental en el hidrociclón	38
2.6.1	Ensayos de clasificación en el hidrociclón	38
2.6.2	Metodología experimental de los ensayos del hidrociclón	39
2.7	Corrida experimental con la canaleta magnética F. A. Magnachute	40
	Conclusiones parciales del capítulo	41
3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	42
3.1	Características de los polvos de acería	42
3.1.1	Análisis granulométrico	42
3.1.2	Análisis químico	42
3.2.3	Medición de la susceptibilidad magnética en muestras de polvos de acería	44
3.2.4	Determinación de la densidad de la muestra	44
3.3	Resultados de las corridas experimentales	44
3.3.1.	Ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad	44
3.3.2.	Resultados del ensayo en el hidrociclón	49
3.3.2.	Resultados de los ensayos en la canal magnética	51

3.4	Propuesta del esquema para el tratamiento de los polvos de acería	53
3.5	Evaluación económica orientativa	54
	Conclusiones parciales del capítulo	55
	CONCLUSIONES	56
	RECOMENDACIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	58
	ANEXOS.....	61

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN.

La industria siderúrgica desempeña un importante papel en el desarrollo de cualquier país, debido a que el acero es el metal más utilizado en el mundo. La tecnología de fabricación del acero ha cambiado mucho en las últimas décadas bajo la presión de una mayor demanda, nuevas especificaciones, y la necesidad de reducir el consumo de energía y material. En Cuba existen dos empresas siderúrgicas: ACINOX Las Tunas y Antillana de Acero, La Habana.

La empresa ACINOX Las Tunas tiene como objetivo producir aceros al carbono (alto, medio y bajo carbono), aceros inoxidables, aleados y especiales. Está diseñada para producir 150 000 toneladas (t) de acero al año, destinadas a la exportación y al consumo nacional. Su producción básica es de palanquillas y planchones, así como barras de diferentes perfiles.

La empresa contiene tres eslabones productivos fundamentales:

- El sector de aseguramiento de la producción, encargado de la recepción de todos los materiales y materias primas, así como el suministro al resto de las áreas productivas.
- El sector de elaboración de acero que incluye el horno de arco eléctrico, donde ocurre la fusión de carga metálica.
- El horno cuchara, donde se realiza el proceso de ajuste y afino del acero; el sector de vaciado o instalación de vaciado continuo, en este sector se realiza la transformación del acero líquido a sólido.

La empresa cuenta con las plantas auxiliares como: planta de fraccionamiento de aire, planta de tratamiento de agua y planta de cal, todas brindan servicio a la Acería.

Los hornos de arco eléctricos generan gases, los que arrastran partículas finas de polvo denominadas polvos de acería. Estas partículas están compuestas por elementos provenientes del acero, de la escoria y de la carga, incluyendo hierro, cinc y metales pesados como el plomo y el cadmio, que se volatilizan durante el proceso. Según D. Tápanes R., T. Álvarez P. y T. A. Charles, 2001 esta industria, en nuestro país, produce aproximadamente de 15 a 20 kg de polvos de acería por tonelada de acero fabricado.

Las propiedades físicas y químicas, como granulometría y composición química de los polvos de acería, les confieren características que pueden hacer de ellos graves agentes de contaminación ambiental si son vertidos directamente al medio ambiente, debido a que el 80 % de las partículas de estos es menor de 50 μm , que es donde se encuentran los metales pesados anteriormente citados y que en contacto con el H_2O generan lixiviados que contienen productos alcalinos, cloruros, fosfatos, etc., altamente tóxicos y nocivos. Esto trajo como consecuencia que varios países, por la alarmante situación, desarrollaran un sistema de control para su almacenamiento en vertederos especiales o su envío a plantas de tratamiento.

Por estas razones las legislaciones ambientales exigen que en caso de ser vertidos tengan que inertizarse y depositarse en lugares especiales. Esta agravante, unida a que cada vez se hace más difícil el control de zonas adecuadas de vertido, hace que los costos de los vertederos para estos materiales residuales sean cada día más significativos. Esto justifica que las actividades de recuperación de los metales contenidos en los polvos de acería alcancen progresivamente mayor interés económico.

Se sabe que la industria siderúrgica y la del cinc están muy unidas, debido a que casi la mitad de la producción de cinc está destinada a la galvanización y recubrimiento del acero. Esto trae como consecuencia que gran parte de la chatarra destinada a la producción de acero, posea un por ciento considerable de cinc, el cual se volatiliza en el horno de arco eléctrico y pasa a formar parte de los polvos de acería.

El tratamiento de estos polvos depende de la concentración de hierro y cinc, fundamentalmente de este último. En polvos de alto contenido de estos elementos,

resulta recomendable su recuperación, mediante procesos de reciclaje, con el fin de enriquecer los contenidos en cinc o hierro y obtener estos metales en forma comercial. Esto hace que se investiguen nuevos procesos que eviten la acumulación en vertederos de estos residuos.

Existen diversas tecnologías capaces de recuperar el cinc presente en este tipo de polvos; como son: proceso con horno de plasma, de convertidor, Waelz y otros, sin embargo su implementación se dificulta en países como el nuestro, por el alto costo que representan. A partir de este trabajo se busca una vía más económica para este procesamiento, que a su vez, atenúe los daños ambientales y realce su valor comercial.

Debido al alto contenido de hierro que poseen estos polvos, se recomienda el uso de separadores magnéticos para su beneficio. Los separadores magnéticos de baja intensidad han sido diseñados para la recuperación de material magnético de materia no magnética. El sistema magnético utiliza material magnético permanente para producir la máxima fuerza de atracción magnética con la mayor eficiencia. Estos separadores tienen como ventajas: una excelente selectividad de separación, fácil operación y costos de mantenimiento reducidos.

En caso de que el contenido de hierro no llegue a un valor aceptable, se realizará una experimentación con hidrociclones. Los hidrociclones son equipos de gran efectividad y capacidad, que a su vez se caracterizan por ser muy económicos en el mercado. En este caso tienen como objetivo obtener un pre-concentrado de cinc en el reboso, y otro de hierro en la descarga. Este pre-concentrado (reboso y descarga del hidrociclón) será beneficiado nuevamente con un proceso de separación magnética para aumentar el contenido de hierro (partículas magnéticas) en la descarga del hidrociclón, y aumentar el contenido de cinc en el reboso, así como disminuir el porcentaje de hierro en este.

El hidrociclón es uno de los dispositivos de clasificación más importantes en la industria de minerales, su uso principal en el procesamiento de minerales ha demostrado ser sumamente eficaz en la separación de tamaños finos, por encima de otros clasificadores mecánicos.

Por lo que en el presente trabajo se declara como **situación problemática**, la necesidad de buscar alternativas económicas que permitan procesar los polvos de acería de la Empresa ACINOX Las Tunas.

El estudio realizado prevé separar el Fe y el Zn, con la finalidad de obtener un producto con contenido de hierro hasta un valor que lo haga factible de ser reciclado al proceso, y otro producto con contenido de cinc que lo haga atractivo para su comercialización como concentrado o pre-concentrado de Zn.

Sobre la base expuesta anteriormente se propone el siguiente diseño metodológico:

Se define como **problema científico** el insuficiente conocimiento para recuperar el Fe y el Zn presentes en los polvos de la acería de ACINOX Las Tunas, con bajo contenido de estos metales.

El **objeto de investigación** está centrado en la recuperación del Fe y el Zn presentes en los polvos de acería de la producción de acero al carbono en hornos de arco eléctrico.

El **campo de acción** consiste en el comportamiento del Fe y el Zn, de los polvos de la acería ACINOX Las Tunas, al tratarlo por separación magnética húmeda a baja intensidad, y/o clasificación previa en hidrociclones.

Se enuncia como **hipótesis**:

Si se determina el comportamiento del Fe y el Zn, de los polvos de la acería ACINOX Las Tunas, al tratarlo por separación magnética húmeda a baja intensidad y/o clasificación previa en hidrociclones, se podrá proponer un esquema tecnológico para recuperar dichos metales.

Por lo que el **objetivo general** del trabajo es proponer un esquema tecnológico que permita recuperar el Fe y el Zn presentes en los polvos de la acería ACINOX Las Tunas.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar la composición química y granulométrica, así como el peso específico volumétrico y la susceptibilidad magnética a la muestra estudiada de los polvos de la acería ACINOX Las Tunas.
2. Aplicar el proceso de separación magnética húmeda a baja intensidad a los polvos de la acería ACINOX Las Tunas, sin clasificación previa.
3. Aplicar el proceso de separación magnética húmeda a baja intensidad a los polvos de la acería ACINOX Las Tunas, con clasificación previa en hidrociclones.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las siguientes tareas de investigación:

1. Revisión bibliográfica y conformación del marco conceptual teórico.
2. Determinación de la composición química y granulométrica de los polvos de la acería ACINOX Las Tunas.
3. Determinación del peso específico volumétrico a la muestra inicial, así como la susceptibilidad magnética a los polvos iniciales y a las clases granulométricas.
4. Realización de ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad a los polvos de la acería ACINOX Las Tunas.
5. Caracterización de los productos de la separación magnética húmeda a baja intensidad.
6. Clasificación en hidrociclón.
7. Análisis magnético húmedo a baja intensidad a los productos de la clasificación en el hidrociclón.
8. Análisis de los resultados y propuesta de un esquema tecnológico.

ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

1.1 Introducción

En este capítulo se describen los procesos que se han estudiado para el reciclaje de los polvos de acería. Se puntualizan aspectos necesarios para la selección de un separador magnético y de un hidrociclón como equipos ideales en el proceso que se investiga, así como sus ventajas frente a otros equipos. El estudio bibliográfico ha permitido conocer y analizar los resultados de trabajos precederos que sirven de base para el desarrollo del nuestro.

1.2 Características de los polvos de acería

Los polvos de acería son residuos sólidos y están compuestos por las partículas sólidas recogidas en las instalaciones de limpieza de gases que se generan durante las operaciones de fusión y afino de acero en hornos de arco eléctrico.

La composición de los polvos de acería es muy variable, ya que depende principalmente del tipo de materia prima utilizada y del proceso de fabricación a que esta es sometida.

En general se pueden distinguir dos tipos de polvos: los generados en la fabricación de aceros especiales, donde la chatarra sufre una clasificación previa y la adición de diferentes aleaciones en función del tipo de acero a fabricar; y polvos procedentes de la fabricación de acero común de más alto contenido de carbono, que utiliza chatarra con más impurezas procedentes generalmente de galvanizados, de menor costo y mayor contenido en cinc y plomo (Ros, A., 2012).

Están compuestos por óxidos de metales simples o complejos, mayoritariamente por óxidos de hierro. En general, los polvos de acería están compuestos por tres grupos de partículas: Partículas de metales pesados como Zn, Pb y Cd que pueden rondar

un 25,0 % en peso; partículas producidas por separación mecánica de la escoria; e inclusiones no metálicas generadas por la expulsión de gotas de metal líquido hacia la atmósfera del horno. Los tamaños de partícula oscilan entre 1,0 y 100,0 μm .

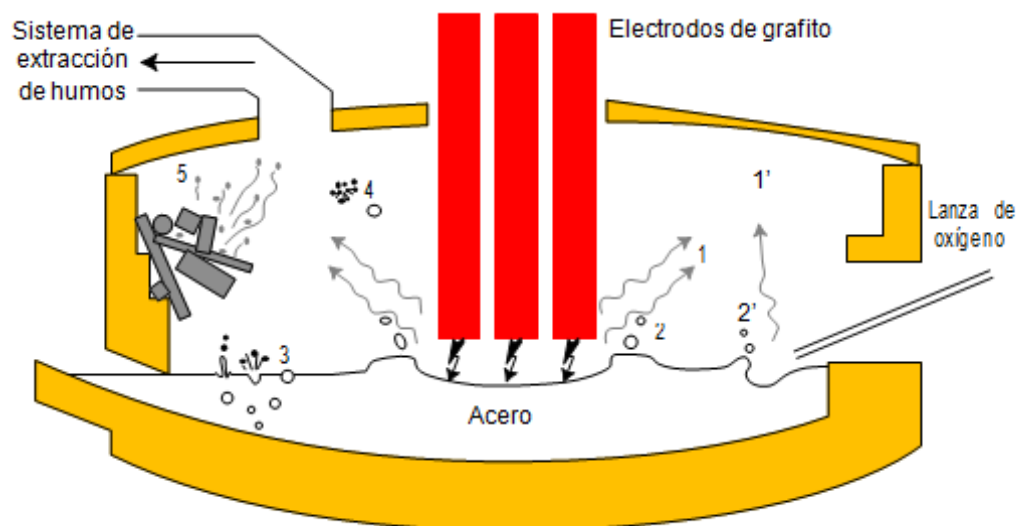
En la Tabla 1 se observa la composición química cuantitativa estándar de estos polvos, esta varía de acuerdo a la industria donde se obtienen y a la composición de la materia prima que se alimenta al horno de arco eléctrico. Se puede apreciar el porcentaje elevado de Zn y el Fe. Con bajo porcentaje (0,1 – 1,0 %) encontramos algunos elementos como el Al y el Cu, y algunas trazas de otros metales como el Co.

Tabla 1: Composición estándar polvos de acerías.

Mayorit.	>1%	Interm.	0,1-1%	Minorit.	<0,1%	Trazas	Ppm
Fe	15-35	K	0,80-1,0	Sn	0,05-0,10	V	<50
Zn	14-35	Al	0,30-0,6	P	0,05-0,10	Co	<50
Ca	2-7	S	0,30-0,5	Ti	0,03-0,10	Mo	<50
Cl	2-5	F	0,15-0,5	Cd	0,02-0,10	Zr	<50
Pb	1,5-8	Cu	0,15-0,4	Ba	0,02-0,03	As	<50
Mn	1,5-2	Cr	0,10-0,2	Ni	0,01-0,02	Hg	1-5
Mg	1-4						
C	1-3						
Na	1-2						
Si	1-2						

De acuerdo a estudios morfológicos realizados a polvos de acería, se demuestra que el proceso de formación del mismo tiene lugar en dos etapas: en primer lugar, la emisión de vapores, gotas de metal y partículas sólidas dentro del horno; en segundo lugar, la conversión de estos en el polvo por aglomeración y transformaciones físico-químicas (Figura 1).

Durante el transporte dentro del horno y luego en los sistemas de extracción y recolección, ocurren transformaciones físicas como condensación, solidificación rápida de las gotas de metal, aglomeración y coalescencia de las partículas, y químicas como oxidación, que dan origen a la formación del polvo de acería.



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

Figura 1: Mecanismos de formación de los precursores de polvos.

Finalmente, las ferritas de Zn y Mn que son típicas en la composición de los polvos de acería, se generan por la oxidación de ambos elementos en el acero líquido y a altas temperaturas y en la presencia de Fe_2O_3 o Fe_3O_4 , forman soluciones sólidas de los tipos $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{MnFe}_2\text{O}_4$, $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{Fe}_2\text{O}_4$ y $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{O}$. Además, la superficie de la escoria sobre el baño metálico tiene compuestos de los tipos $(\text{Mn}, \text{Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$, $(\text{Mn}, \text{Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4\text{-Fe}_3\text{O}_4$, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-(Mn, Fe)O}$ y $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{O}$, los cuales son expulsados hacia la atmósfera del horno cuando las burbujas de CO salen del baño, formando un polvo muy fino de espinelas de composición $(\text{Mn}, \text{Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ o $(\text{Mn}, \text{Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4\text{-Fe}_3\text{O}_4$ (Ros, A., 2012).

De La Torre E., Guevara A., Espinoza C., 2013, caracterizaron los polvos de acería provenientes de los sistemas de limpieza de las corrientes gaseosas que se generan durante las operaciones de fusión y afino del acero en hornos de arco eléctrico de una industria ecuatoriana de acero reciclado y encontraron la siguiente composición mineralógica (Tabla 2). En la misma se puede observar que las fases predominantes son la zincinita fase portadora de Zn y la magnetita fase portadora de Fe.

Tabla 2. Composición mineralógica de polvos de acería en Ecuador.

Mineral	Fórmula	Composición (%)
Zincita	ZnO	39,0
Magnetita	Fe ₃ O ₄	33,5
Maghemita	Fe ₂ O ₃	11,0
Halita	NaCl	8,5
Franklinita	ZnFe ₂ O ₄	5,5
Grupo plagioclasa (albita, andesita, anortita)	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	2,0
Hematita	Fe ₂ O ₃	1,0

1.3 Trabajos precedentes

1.3.1 Tecnologías existentes para el procesamiento de polvos de acería

Las nuevas tendencias tecnológicas para reciclar los polvos de acería deben incrementar las recuperaciones, abaratar los costos y disminuir los problemas medioambientales relacionados con este sector industrial.

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

Proceso Waelz.

La tecnología Waelz fue desarrollada en Alemania por Krupp. Se introdujo originalmente para el enriquecimiento del mineral de cinc de baja ley. La primera planta arrancó en 1925. En la década del 40 se la adoptó para el reprocesamiento de residuos de lixiviado neutro de los hornos de obtención de cinc. Finalmente, en la década del 70 comenzó a aplicarse para el tratamiento de los polvos de horno eléctrico de arco (Madias, J., 2009).

El óxido Waelz contiene de 54 a 56 % de cinc y, de hecho, es una mezcla consistente en óxido de cinc, óxido de plomo, otros óxidos de metales volátiles y, que, sobre todo, incluye la mayor parte del cloro y del flúor presente en los polvos, así como cualquier polvo con una granulometría menor de 1 mm arrastrado por los gases de salida del horno. El proceso Waelz se lleva a cabo en un horno rotativo inclinado en el que entra una mezcla de polvos y coque fino así como, si es necesario, aditivos tales como óxido de calcio y arena para conseguir el movimiento rotativo. Mediante la adición de aire a contracorriente se generan reacciones de combustión - reducción - oxidación a una temperatura de 1250 °C.

Para este proceso, el polvo de acería debe contener más del 15 % de cinc. Las desventajas que se presentan son: la dificultad en la regulación de la temperatura, la composición de la carga y las pérdidas irrecuperables de hierro: el contenido de óxidos de hierro alcanza el 50 % de la masa de la escoria (Madias, J., 2009).

Proceso Mitsui Furnace (MF).

Se trata de un horno de cuba, diseñado inicialmente para tratar un residuo rico en cinc obtenido en hornos de retorta vertical. En 1985 se comenzó a procesar polvos de horno eléctrico de las siderúrgicas cercanas en uno de los cuatro MF existentes.

El proceso consiste en la fabricación de briquetas autorreductoras, a partir de una mezcla típica de polvos de acería, se adiciona también carbón como agente reductor y arena; se utiliza un licor de sulfuros como aglomerante. Se muelen estos materiales para obtener un tamaño de partícula uniforme y luego se hacen las briquetas.

Como se puede deducir, este proceso encarece la recuperación debido a la molienda de las materias primas para la conformación de briquetas.

Proceso basados en la tecnología de arco de plasma.

Los procesos basados en la tecnología de arco de plasma son procesos de tratamiento de diversos tipos de residuos industriales que se descomponen por la acción del plasma generado. Algunas de las principales compañías que aplican esta tecnología para el tratamiento de residuos, tanto industriales como urbanos, son:

Plasco Energy Group (Ottawa, Canadá), Jacoby Group (Atlanta, EEUU) y Startech Environmental Corporation (Bristol, Reino Unido).

Proceso en convertidor.

La tecnología basada en la utilización de un convertidor se aplica en todo el Mundo para recuperar cobre, plomo, estaño, cinc y níquel, y para tratar residuos metálicos y urbanos. La gran variedad de usos se debe a la capacidad de la tecnología para operar en rangos de temperatura que oscilan entre los 1050 °C (temperatura de evaporación del plomo) y los 1500 °C (temperatura de evaporación del hierro). El proceso enfocado a la recuperación de cinc habitualmente consiste en una etapa de fusión en la que además se produce una reducción, aunque dependiendo de las características de la alimentación es posible utilizar una etapa de reducción adicional. Las principales compañías que utilizan este tipo de procesos son Korea Zinc, Young Pong Corp. y Mitsui Mining & Smelting.

Proceso de reactor de llama.

Este horno fue desarrollado por Horsehead Resource Development. La carga debe tener un máximo del 5 % de humedad y una granulometría por debajo de 74 µm. El reactor, enfriado por agua, procesa el polvo con gases reductores a más de 2000 °C. Estos gases se producen por combustión de hidrocarburos sólidos o gaseosos en aire o con oxígeno. Los materiales reaccionan rápidamente. Se produce la reducción y evaporación del cinc y otros metales pesados. Los metales volátiles se evaporan y van a la casa de humos, donde son capturados por los filtros.

Los polvos de acería también se tratan mediante procesos de lixiviación que permiten la recuperación directa del cinc electrolítico. Se debe realizar una disolución del cinc de la zincita (ZnO) y franklinita (ZnFe_2O_4) por lixiviación sulfúrica, clorhídrica, amoniacal o cáustica. Además se pueden realizar lixiviación con ácidos orgánicos como el acético, tartárico y cítrico (Altadill, R., *et. al.*, 2009, y Del Vasto, P., *et. al.*, 2011).

Todos los procesos que se utilizan en la actualidad tienen como características comunes las siguientes:

- Altos costos de inversión.
- Los precios de los metales sufren deducciones considerables.
- Los gastos de fusión son apreciables.

La conjunción de estas circunstancias hace que el valor final a recibir por el productor de óxidos, sea lo suficientemente pequeño, como para que los polvos de acería únicamente sean tratados al recibirlos gratuitamente e incluso siendo beneficiados previamente.

1.3.2 Trabajos realizados con los polvos de acería

Diferentes autores han realizado trabajos relacionados con los polvos de acería, varios de estos fueron revisados, y a su vez, valorados sus criterios.

Del Vasto P., Ibañez B., Sandoval D., 2011, caracterizaron los polvos de acería producidos en Venezuela, revelando un contenido (en peso) de: 27,0 % de Fe; 7,1 % de Mg; 4,9 % de Zn; 4,0 % de Ca y 0,5 % de Pb, además de espinelas, Fe_3O_4 , CaCO_3 , SiO_2 , ZnO y PbO . Además realizaron la lixiviación de los mismos en columnas de percolación, empleando agua y disoluciones de ácidos orgánicos como agentes lixiviantes. El objetivo fue evaluar el comportamiento del residuo bajo condiciones similares a las que generan los microorganismos naturales del suelo. Se encontró que la lixiviación de Zn y Pb varió entre 80 y 16 mg mensuales por kilogramo de polvo de acería.

Ruetten J.; Crittendon R., 2012, describen cada uno de los procesos que se están utilizando actualmente para el reciclado de polvos de acería. Luego hacen una serie de comparaciones entre los procesos, desde el punto de vista de los materiales que pueden procesar, los productos que se obtienen y el costo de inversión y operativo. Estos procesos representan un alto costo económico, no recomendables para su implementación en nuestro país.

De La Torre E., Guevara A., Espinoza C., 2013, también utilizan un método hidrometalúrgico basado en lixiviación con diferentes ácidos: sulfúrico, clorhídrico, nítrico, acético, tartárico, además con: cianuro de sodio, sosa caústica, carbonato de

sodio y amoníaco. Operando con 150 g/L de H_2SO_4 al 30 % de sólidos se logra recuperar 63,0 % del Zn; 15,0 % del Fe y 1,0 % de Cd.

En Cuba, Tápanes D., Álvarez T., Charles T. A. 2001; valoraron los polvos de acería del horno de arco eléctrico de la Empresa Metalúrgica Antillana de Acero “José Martí” y las colas de Nicaro, en cuanto a sus propiedades químicas y físico – mecánicas. De acuerdo a la composición obtenida del polvo propusieron utilizarlo para enriquecer su contenido de hierro por separación magnética y posteriormente crear pellets. También propusieron la posibilidad de su uso en la fabricación de hormigones asfálticos a los que realizaron varios ensayos mecánicos.

1.3.3 Trabajos realizados con la separación magnética

Para la separación magnética de minerales finos la literatura propone la separación magnética húmeda, y para minerales de alta susceptibilidad magnética en la práctica se utiliza la separación a baja intensidad, Dercach V. G., 1981, Mitrofanov S. I., 1982, Wills B. A., 1987.

En nuestro país muchos han sido los trabajos realizados con separadores magnéticos, dedicados a la concentración de uno o más elementos, a partir de minerales finos. A continuación se exponen algunas investigaciones realizadas con estos equipos, principalmente a los minerales que contienen hierro.

Ferreiro Y., Leyva O., 2007, estudiaron los escombros lateríticos del yacimiento Pinares de Mayarí en el que se valora la posibilidad de obtener un concentrado de hierro a partir de una muestra con contenido de hierro de 52,4 %. Para ello se le aplicó un proceso de tostación magnetizante y separación magnética húmeda a baja intensidad del campo magnético (63,69 kilo Ampere/metro (kA/m)). Como resultado se obtuvo un concentrado con contenido de hierro de 60,0 %.

Lo más próximo a la separación magnética de polvos de chimeneas es el realizado por Fuentes Y., 2009, que estudió la separación magnética con el objetivo de mejorar las características del empleo de parte del polvillo que se recupera en el sistema depurificación de gases de la planta de sinterización de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Jungah K., Gjergj D., 2010, estudiaron la recuperación del níquel a partir de minerales lateríticos con bajos contenidos del metal. Como procedimiento se utilizó la calcinación y luego la separación magnética por vía húmeda.

En ninguna de las bibliografías consultadas se hace referencia a como beneficiar los polvos de acería con un contenido de hierro y cinc menor al establecido para su explotación. Muchos de los trabajos realizados aplicando separación magnética incluyen procesos pirometalúrgicos, lo que eleva los costos de producción. Debido a esto se hace necesario presentar un modo económico que permita procesar los polvos, en este caso se propone el uso de separadores magnéticos e hidrociclones, para concentrar y clasificar las partículas magnéticas (concentrado de hierro) y las no magnéticas donde se encuentra el cinc. De esta manera se podrá aliviar la carga y aportar soluciones sustentables con beneficio para las empresas y la comunidad.

1.4 Fundamentos teóricos sobre los separadores magnéticos

La separación magnética es un proceso que sirve para separar dos sólidos, uno de los cuales debe ser ferroso o tener propiedades magnéticas.

Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia de las propiedades magnéticas entre los minerales componentes de la mena, se usan para separar minerales valiosos de la ganga no magnética, o los contaminantes magnéticos u otros minerales valiosos de los valores no magnéticos (Wills, B., 2006).

Los materiales se clasifican en dos grupos:

- Magnéticos: son atraídos por los campos magnéticos a los puntos de mayor intensidad del campo, por lo que se concentran magnéticamente.
- Amagnéticos: repelan las fuerzas magnéticas hacia los puntos de menos intensidad del campo, y no se pueden concentrar magnéticamente.

Cuando el mineral o material pasa a través del campo magnético del separador, bajo la influencia de la atracción magnética, las partículas con distintas propiedades magnéticas se desplazan por diferentes trayectorias. Esto permite separar las magnéticas en un producto, y las no magnéticas en otro.

Los separadores magnéticos se clasifican por la intensidad (kA/m) de su campo magnético (Dercach, V., 1981): Menores de 120,0 kA/m son de campo débil, de 120 a 800 kA/m campo de intensidad media, y de 800,0 hasta 1600,0 kA/m campo fuerte.

1.4.1 Características de los separadores magnéticos

Los separadores magnéticos tienen los siguientes conjuntos principales:

1. Sistema magnético de imanes permanentes o de núcleos de acero con devanado, alimentado con corriente eléctrica.
2. Alimentador para el suministro del material a la zona de trabajo del separador.
3. Dispositivo para el desplazamiento de las partículas magnéticas dentro del separador y su expulsión de la zona de trabajo.
4. Caja o baño para la recolección de los productos no magnéticos de la separación.

1.4.2 Principios básicos del funcionamiento de los separadores magnéticos

Para la separación de las partículas magnéticas y amagnéticas en el campo magnético del separador, la fuerza magnética de atracción f_{mag} (Figura 2), que actúa sobre las partículas magnéticas debe superar a la resultante de todas las fuerzas mecánicas $\sum f_{mec}$ (incluyendo también las fuerzas de cohesión y resistencia del medio); y la fuerza magnética f'_{mag} que actúa sobre las partículas menos magnéticas o amagnéticas, debe ser menor que las fuerzas mecánicas $\sum f'_{mec}$ que obran sobre ellas, es decir, en el campo magnético del separador se deben mantener las condiciones siguientes:

$$f_{mag} > \sum f_{mec}$$

$$f'_{mag} < \sum f'_{mec}$$

Algunas de las fuerzas mecánicas presentes son: el peso de las partículas, la fuerza higroscópica del agua (en caso de que se realice el proceso por vía húmeda), el tamaño, etc. La desigualdad de dichas fuerzas y la magnética es la que permite la separación de las partículas.

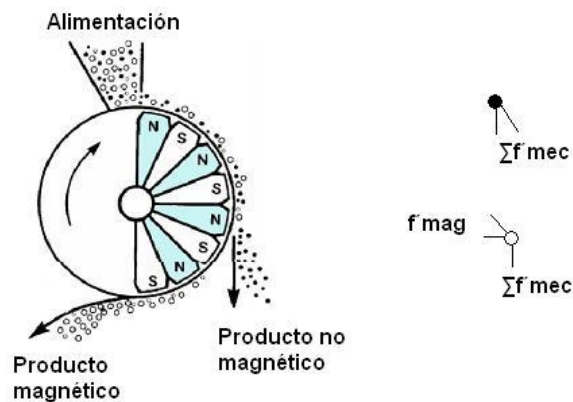


Figura 2: Esquema de separación magnética.

Los separadores magnéticos se clasifican en máquinas de alta intensidad y baja intensidad.

La separación en seco de alta intensidad se limita en gran parte a mena que contiene algún material más fino que $75,0\ \mu\text{m}$. La efectividad de la separación sobre tales materiales finos se ve severamente reducida por los efectos de las corrientes de aire, la adhesión partícula – partícula, y la adhesión partícula rotor.

La separación magnética de alta intensidad en húmedo tiene su mayor uso en la concentración de menas de hierro de bajo grado que contienen hematina, donde frecuentemente sustituyen los métodos de flotación, aunque la tendencia hacia la separación magnética ha sido lenta en Norteamérica, principalmente debido a los costos de inversión.

Los separadores de baja intensidad se usan para tratar materiales ferromagnéticos y algunos minerales altamente magnéticos. La separación magnética en seco de baja intensidad se limita principalmente a la concentración de arenas gruesas, que son fuertemente magnéticas. Si las partículas son menores que $5,0\ \text{mm}$ la separación en seco se sustituye por los métodos húmedos, con los que hay menos pérdidas de polvo y generalmente un producto más limpio.

Entre los separadores de baja intensidad encontramos los de tipo tambor. Estos son los más usados en el enriquecimiento en seco de materiales relativamente de gran tamaño y de material menudo muy fino (Dercach, V., 1981).

Estos separadores (Figura 3) consisten fundamentalmente en un tambor rotatorio no magnético que contiene de tres a seis magnetos estacionarios de polaridad alternada. Los magnetos levantan las partículas magnéticas y las fijan al tambor, las transportan fuera del campo dejando la ganga en el compartimiento de las colas. Para proporcionar una corriente que mantenga la pulpa en suspensión se le introduce agua a la máquina.



Figura 3: Separador de tambor.

Cuando la presencia de partículas finas entorpece la efectividad del trabajo de los separadores magnéticos es práctica la eliminación de lamas como en el caso de los estudios de Loyola O., 2012, o la clasificación en clases gruesas y finas, en este caso la pulpa puede ser clasificada en un hidrociclón como es el caso Williams Y, 1991.

1.5 Fundamentos teóricos sobre el hidrociclón

El hidrociclón es un aparato de clasificación continua que utiliza la fuerza centrífuga para acelerar la velocidad de asentamiento de las partículas. Su principal uso es como clasificador en el procesamiento de minerales, donde ha demostrado ser extremadamente eficiente en la separación de finos (Wills, B., 2006).

El principal objetivo de un hidrociclón es separar un determinado caudal de pulpa en dos fracciones; una llamada descarga que debería llevar en suspensión los sólidos

más gruesos que un determinado tamaño de corte y otra llamada reboso que debería llevar en suspensión los sólidos más finos que el citado tamaño.

La primera patente conocida del hidrociclón es de 1891, pero su utilización industrial se inició después de la segunda guerra mundial en la industria metalúrgica. Desde entonces, vienen siendo usados industrialmente, de manera diversificada en las industrias química, metalúrgica, petroquímica, textil, y otras.

1.5.1 Características del hidrociclón

El hidrociclón no posee movimiento ni partes dinámicas, pero necesita una conexión con una bomba que suministre el material a clasificar. El rango práctico del hidrociclón para la clasificación está entre 40 y 400 μm , aunque existen excepciones (5-1000 μm). Se fabrican en una amplia variedad de diámetros desde los 13 mm hasta los 900 mm. Su funcionamiento se basa en la clasificación que se produce aprovechando la aparición de grandes fuerzas centrifugas.

Un hidrociclón estándar (Figura 4) está constituido por las siguientes partes:

1. Sección cilíndrica de alimentación: es donde se encuentra la entrada tangencial de la alimentación y la localización del vortex. La pulpa es inyectada a alta presión formando una envolvente.
2. Sección cilíndrica intermedia: esta cámara es del mismo diámetro que la sección cilíndrica de alimentación. Su función es la de alargar el equipo e incrementar el tiempo de retención del material en su interior. Su longitud suele ser del 100 % del diámetro del hidrociclón.
3. Sección cónica: esta sección presenta un ángulo entre 10 y 20 grados y su función es la misma que la sección cilíndrica intermedia.
4. Apex: Es la terminación de la sección cónica y debe ser de tamaño adecuado, para que los gruesos sean expulsados sin taponamientos.
5. Vórtex Finder: es la boquilla a través de la cual se expulsan los finos o reboso y la mayor parte del agua. Debe extenderse por debajo de la entrada de la alimentación para que no se produzca cortocircuito. Su diámetro suele ser de un 35 % del diámetro del hidrociclón.

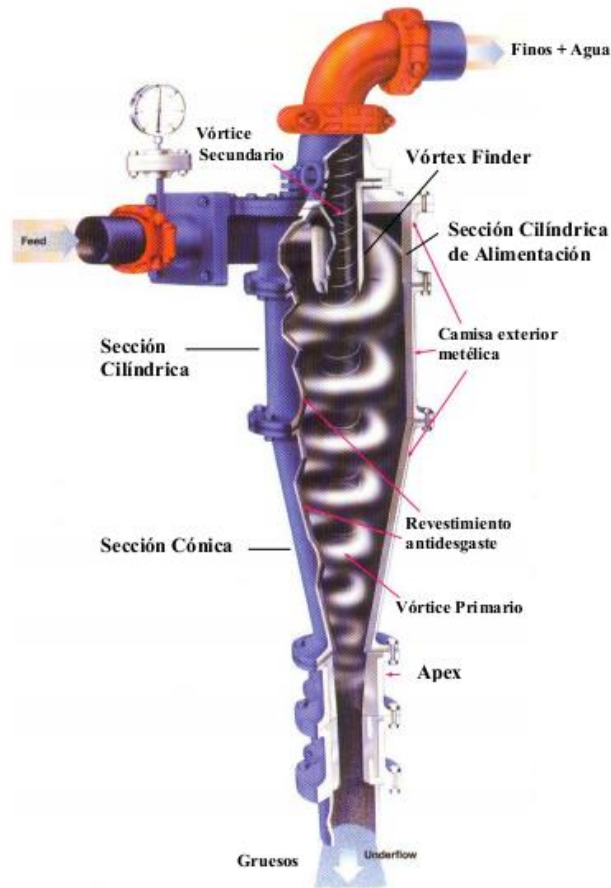


Figura 4: Partes del hidrociclón.

1.5.2 Principios básicos del funcionamiento de los hidrociclones

El principio de funcionamiento de un hidrociclón es muy simple: Cuando la pulpa entra a la cámara de alimentación a altas presiones, ésta es obligada a seguir una trayectoria circular. Las partículas se van a ver sometidas a dos fuerzas principalmente, una centrífuga que las obliga a dirigirse hacia la pared y otra de arrastre debida a la viscosidad que las obliga a ir hacia el centro del hidrociclón.

El movimiento turbulento que se produce en el interior del hidrociclón va a generar dos vórtices, uno primario que transporta las partículas más gruesas o pesadas por la acción centrífuga, y otro secundario de menor presión y situado en la zona central, que elevará a las partículas más finas o ligeras que no han sido centrifugadas.

Las ventajas de los hidrociclones son las siguientes:

- Bajos costos de capital.

- Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.
- Reducción de los costos energéticos.
- Incremento de la eficiencia.
- Aumento de la productividad.
- Reducción de los espacios industriales.
- Mejoría en las posibilidades de automatización.

Tipos de hidrociclones.

Los hidrociclones han evolucionado hasta nuestros días de acuerdo a las necesidades de operación donde se ha hecho necesario su uso. Esto ha obligado a los investigadores a desarrollar diferentes modelos en forma y tamaño, que en ocasiones no se parecen a un hidrociclón convencional (Bouso, J., 1990).

De acuerdo a su geometría se clasifican en dos grandes grupos: cónicos y cilíndricos.

Dentro del primer grupo se incluyen los cónicos de cono pronunciado y los de cono tendido. El segundo grupo recoge los cilíndricos de fondo plano y descarga central.

Hidrociclones cónicos

Como anteriormente se mencionó los hidrociclones cónicos, o convencionales, podrían clasificarse de acuerdo al ángulo de su parte cónica.

Cono pronunciado (convencionales).

Este grupo recogería los hidrociclones con ángulo menor de 20°, caracterizados por un cuerpo relativamente largo debido a su conicidad. Este tipo de diseño se acompaña con partes cilíndricas de gran longitud (mayor que una vez el diámetro), y toberas de alimentación y reboso de pequeñas dimensiones, para aumentar el tiempo de residencia (Bouso, J., 1990).

Esto, debido a la gran altura libre de vórtice, (distancia entre el borde inferior de la tobera de reboso y el vértice de la parte cónica), y su influencia inversamente

proporcional al tamaño de corte, los hace los más adecuados para clasificaciones finas, como se requiere en operaciones de clarificación y espesado.

Cono tendido.

Los hidrociclones de cono tendido o ancho, mayor de 20°, son usados principalmente para clasificar partículas tanto por tamaño como por densidad (clasificación selectiva). El ángulo de su parte cónica varía entre 20° y 45°, aunque excepcionalmente pueden encontrarse hidrociclones de hasta 60°.

Como es lógico al disminuir el tiempo de residencia de la pulpa en el interior del hidrociclón, por su menor longitud, aumenta el tamaño de separación. Ello trae como consecuencia que estos hidrociclones no alcancen una elevada recuperación de sólidos, (referida a la descarga), pero si presentan una mejor selectividad.

Hidrociclones cilíndricos (Fondo plano).

Podrían incluirse dentro de la clasificación anterior, como hidrociclones de cono tendido, pero debido a que exteriormente no se aprecia nada más que su cuerpo cilíndrico por su ángulo de 180°, es decir fondo perpendicular a la pared lateral, y también porque su campo de aplicación difiere notablemente de aquellos, merecen un tratamiento diferenciado.

Difiere este diseño del anterior en que la descarga se realiza de modo convencional, es decir, a través de un orificio central (Figura 5).



Figura 5: Hidrociclón cilíndrico AKW (Ø200 mm).

Surgieron con el fin de ampliar el campo de trabajo de los hidrociclones hacia tamaños de corte mayores, por encima de los 150 μm .

En estos se crea un lecho fluido que está dotado de un movimiento de convención alrededor del núcleo central, lo cual favorece la reclasificación de partículas, ligeras o de pequeño tamaño, mal clasificadas, que en su movimiento constante son en algún momento arrastradas por el torbellino interior o principal, siendo finalmente evacuadas con el rebose superior.

Los hidrociclones son muy económicos, los costos de capital son inferiores a los de otros equipos de control (cribas y zarandas). Debido a su simplicidad, el único gasto de operación más significativo es el costo de electricidad que necesita la bomba al impulsar el flujo que debe pasar por el hidrociclón. Los trabajos de instalación y conexiones (ductos) son a menudo más costosos que el hidrociclón mismo.

1.5.3 Eficiencia del hidrociclón

La eficiencia de los hidrociclones no puede ser calculada de forma exacta. Esto se debe a que en la práctica partículas pequeñas pueden quedar atrapadas debido al choque, aglomeración y barrido con partículas mayores. Al igual que partículas grandes pueden ser capturadas por turbulencias o rebotadas con las paredes, saliendo del hidrociclón.

La productividad y efectividad de los hidrociclones dependen de muchos factores, tales como: el porcentaje de sólido en el alimentado, la presión de alimentación, las dimensiones de los tubos de alimentación, rebose y arenas, el diámetro de la parte cilíndrica, el ángulo del cono, las características del material sometido a la clasificación (Coello, A., 1999).

Existen numerosas teorías sobre el cálculo de la eficiencia teórica de los hidrociclones, las cuales relacionan la eficiencia de colección y el tamaño de las partículas.

El método más común de representar la eficiencia de un hidrociclón es por una curva de rendimiento o curva de Tromp (Figura 6). Esta relaciona el rendimiento en peso de cada tamaño de partícula en la alimentación que se reporta a la descarga con el

tamaño de la partícula. El punto de corte (d_{50}) o tamaño de separación del hidrociclón frecuentemente se define como aquel punto sobre la curva Tromp para el cual el 50,0 % de las partículas de ese tamaño en la alimentación se presentan en el derrame, es decir, las partículas de ese tamaño tienen igual oportunidad de ir con el derrame o con la descarga (Wills, B., 2006).

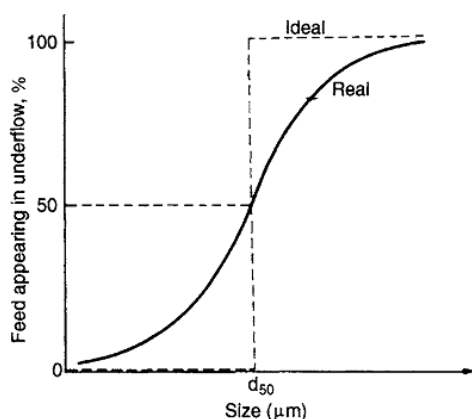


Figura 6: Curva de Tromp para un hidrociclón.

La claridad del corte o separación depende de la pendiente de la sección central de la curva Tromp y mientras más próximo este la pendiente a la vertical, más alta será la eficiencia. La pendiente de la curva se puede expresar tomando los puntos en los cuales el 75,0 % y el 25,0 % de las partículas de la alimentación se reportan a la descarga y estos son los tamaños d_{75} y d_{25} , respectivamente.

La eficiencia de la separación o la llamada imperfección (I) está dada por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \cdot d_{50}} \quad 1.1$$

Conclusiones parciales del capítulo

El análisis de la bibliografía consultada permitió conocer que los polvos de acería son residuos sólidos compuestos por partículas sólidas generadas durante las operaciones de fusión y afino del acero, lo que les infiere características propias como fina granulometría, alta susceptibilidad magnética, presencia de partículas de metales pesados como Zn, Pb y Cd que pueden rondar el 25,0 % en peso; con

elevados contenidos de Fe y Zn, que dañan la salud y contaminan el medio ambiente.

A nivel mundial existen varios procedimientos para recuperar el Fe y el Zn contenido en ellos, es la tecnología Waelz es la más empleada que data de la década del 70 del pasado siglo, cuando comenzó a aplicarse para el tratamiento de los polvos de horno de arco eléctrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para conseguir los resultados deseados en esta investigación se requirieron herramientas que consintieran su desarrollo. Los métodos y materiales empleados certifican los resultados alcanzados en este trabajo, así como la aplicación de los métodos y las técnicas empleadas en el estudio de los polvos de acería con el propósito de su futuro aprovechamiento. Por eso este capítulo tiene como objetivo presentar los materiales, equipos y metodologías experimentales utilizados para dar cumplimiento al objetivo trazado.

2.1 Metodología

El propósito fundamental de la investigación es identificar y proponer una alternativa tecnológica que permita recuperar el Fe y el Zn presentes en los polvos de la acería ACINOX Las Tunas. Con este fin el estudio analizará las viabilidades que ofrece la separación magnética húmeda a baja intensidad, procesando la muestra de polvo íntegra, y realizando una separación magnética a los productos del tratamiento de la muestra en un hidrociclón.

Se toman como base las posibilidades que brindan los métodos de separación de minerales por el contraste de sus propiedades, teniendo en cuenta la procedencia de los polvos, y que según la bibliografía consultada se encuentran fases de alta susceptibilidad magnética. Se asumió que la separación magnética húmeda a baja intensidad podría propiciar la obtención de un producto magnético donde se concentraría el Fe y un producto no magnético donde se concentraría el Zn, todo en función de lograr un tratamiento al residual para su aprovechamiento más integral.

El estudio experimental se llevó a cabo siguiendo el esquema de la Figura 7. Toda la experimentación se realizó a una corrida original y a dos réplicas para asegurar la veracidad de los resultados, bajo el criterio de que en el caso que la diferencia de los

rendimientos en pesos fuera superior al 5,0 %, se repetiría el ensayo para despejar dudas; en todos los casos se unieron las masas de los tres ensayos y se prepararon para análisis químico (A.Q).

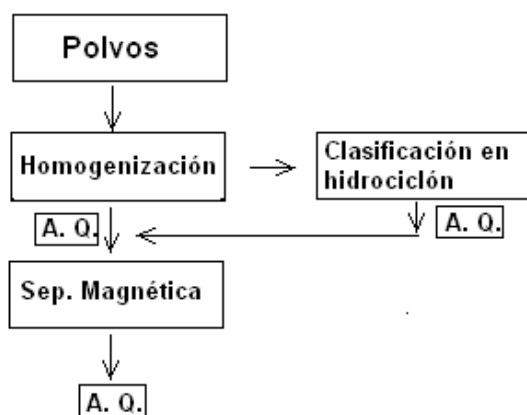


Figura 7: Esquema de flujo general para el tratamiento de los polvos.

La preparación de las muestras, la separación magnética y el análisis magnético se realizaron en el Laboratorio de Beneficio de Minerales del Departamento de Investigaciones y Tecnología del Centro de Investigaciones Siderúrgicas (DSIT), perteneciente al Grupo de la Siderurgia de Cuba (ACINOX). Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de la planta piloto de Nicaro del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), Cuba. La susceptibilidad magnética se midió en el laboratorio Elio Trincado de la Empresa de Geología de Oriente en Santiago de Cuba. El ensayo en el hidrociclón se realizó en la instalación existente en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba.

2.2 Principales materiales y equipos utilizados en la investigación

- Muestra de 400,00 kg de polvos de la acería ACINOX Tunas;
- Accesorios para muestreo (palas, bandejas, brochas, espátulas, desecadoras, muestreador y envases de nylon);
- Cuarteador de Jones;
- Juego de tamices seleccionados según la serie de Tyler;
- Separador magnético de tambor modelo WD-WADR 190x150;

- Balanza densométrica modelo SIMONACCO - 3;
- Recipiente para la preparación de pulpa con agitador mecánico;
- Estufa para el secado de las muestras;
- Balanza digital;
- Probeta graduada a 1000 ml;
- Instalación para ensayos en hidrociclones;
- Canaleta magnética modelo F. A. Magnachute.
- Picnómetro.

2.2.1 Características técnicas de los principales equipos

Características del separador magnético de tambor húmedo:

El separador magnético (Figura 8) tiene las siguientes características:

- Diámetro del tambor: 150 mm;
- Largo del tambor: 190 mm;
- Intensidad del campo magnético, permanente: 103,50 kA/m;
- Velocidad de rotación nominal: variable (se trabajó a 28 rpm).



Figura 8: Separador magnético de tambor húmedo WD-WADR 190x150.

Características del hidrociclón:

Las características del hidrociclón (Figura 9) son las siguientes:

- Altura: 42,00 mm;
- Diámetro de alimentación: 38,80 mm;
- Diámetro de reboso: 40,70 mm;
- Diámetro de descarga: intercambiable (4 mm);



Figura 9: Hidrociclón de laboratorio para la corrida.

Características de la canaleta magnética F. A. Magnachute:

Las características de la canaleta magnética F. A. Magnachute (Figura 10) son las siguientes:

- Intensidad del campo magnético, permanente: 63,69 kA/m;
- Ángulo de la canal: 15 grados
- Largo de la canal: 480 mm
- Ancho de la canal: 150 mm



Figura 10: Canaleta magnética F. A. Magnachute para la corrida de experimentos.

2.3 Toma y preparación de la muestra

La muestra tecnológica de 400,0 kg de polvos de acería fue entregada al DSIT por el Grupo Técnico de ACINOX Las Tunas, la misma fue tomada en el depósito del sistema de captación de polvos.

En el DSIT la muestra de 400,0 kg fue homogeneizada por el método de cono y anillo, posteriormente para la reducción de la masa de muestras para los diferentes ensayos se utilizó el cuarteador de Jones (Figura 11) según secuencia mostrada en la Figura 12. Para las corridas experimentales se tomó una muestra de aproximadamente 30,0 kg para los ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad, 20,0 g para análisis químico y 300,0 g para análisis granulométrico. Posteriormente se tomaron 180,0 kg para ensayos en el hidrociclón.



Figura 11: Cuarteador de Jones.

El procedimiento de homogeneización a utilizar consiste en un cuarteo mecánico. El cuarteador de Jones está diseñado para reducir una cantidad de muestra en 2 porciones iguales, de tal manera que cada porción mantenga la representatividad de la muestra, el equipo consta básicamente de 3 bandejas receptoras más un cajón guía de alimentación que facilita una carga de material constante en toda la dimensión de los chutes y sin que el operador preste atención mientras se produce la división, todos fabricados del mismo material.

Se procede de la siguiente forma:

1. Colocar la muestra de campo en el cucharón alimentador, distribuyéndola uniformemente en toda su longitud para que al verter sobre los conductos, y fluyan por cada uno de ellos cantidades aproximadamente iguales de material.

2. Volver a introducir la porción de la muestra de uno de las bandejas al cuarteador cuantas veces sea necesario, hasta reducir la muestra al tamaño.

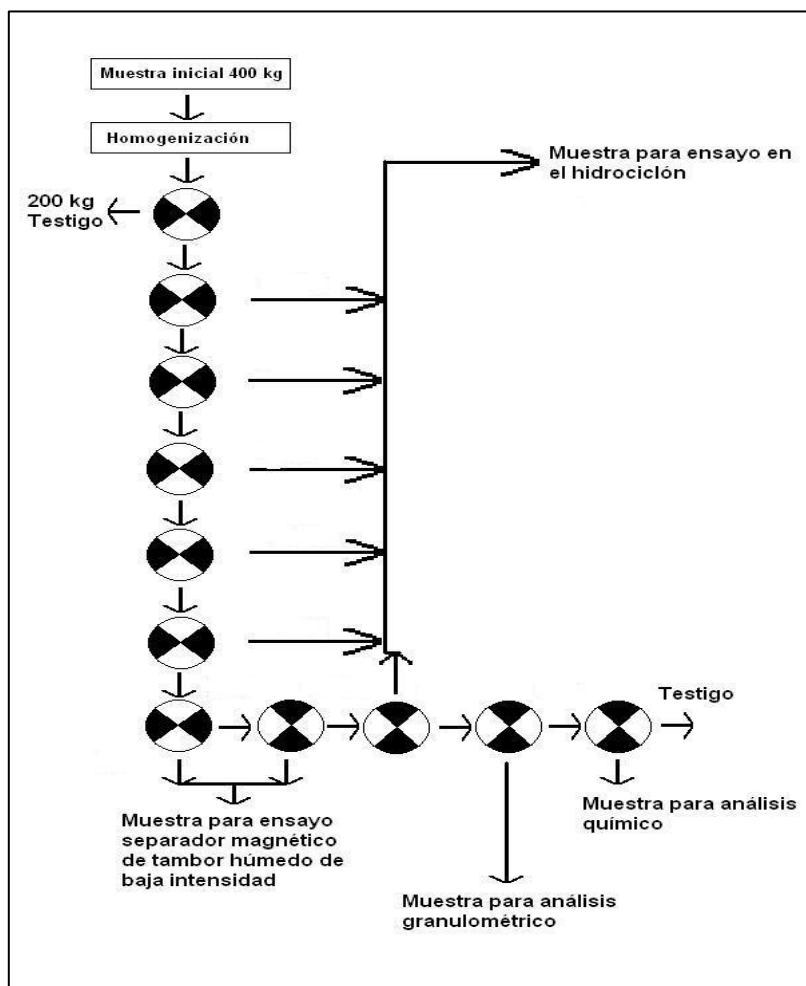


Figura 12: Procedimiento de homogeneización y cuarteo.

2.4. Caracterización de la materia prima utilizada

A la muestra inicial, además de determinar su composición granulométrica y su peso específico volumétrico, se le determinó la composición química cuantitativa, los elementos determinados fueron: Ni, Co, Cu, Zn, Fe_{total} , MnO, MgO, Pb, Cd, Cr_2O_3 , Sn, S y P_2O_5 . A los productos de los ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad (hidrociclón y canal magnética) se les determinó el Fe_{total} y el Zn. Los métodos de análisis empleados fueron: Espectrofotometría de absorción atómica (E.A.A) para la determinación de los contenidos de Ni; Co; Fe_{total} ; Cu; Zn; Pb; Cd; Ca;

Mn; Cr; Al; y Sn. Mientras que el Mg y el Fe^{2+} se determinaron por análisis volumétrico (titulación) y el SiO_2 por análisis gravimétrico.

2.4.1 Análisis granulométrico de la materia prima

El análisis granulométrico se realizó vía húmeda. Los tamices seleccionados son de acero inoxidable y 203,0 mm (8,0 pulgadas) de diámetro, la apertura nominal de los orificios según la escala de Tyler, fueron: 420, 210, 105, 74 y 53 μm .

2.4.2 Determinación química cuantitativa por espectrofotometría de absorción atómica (E.A.A)

La absorción atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del sistema periódico, por lo que sus campos de acción son muy diversos. Este método se puede aplicar para la determinación de elementos como: antimonio, cadmio, calcio, cesio, cromo, cobalto, oro, plomo, níquel, entre otros. Se emplea en el análisis de aguas, análisis de suelos, bioquímica, toxicología, medicina, industria farmacéutica, industria alimenticia, industria petroquímica, etc.

Este método consiste en la medición, mediante un espectrofotómetro de absorción atómica (Figura 13), de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular. La especie atómica se logra por atomización de la muestra, siendo los distintos procedimientos utilizados para llegar al estado fundamental del átomo lo que diferencia las técnicas y accesorios utilizados. La técnica de absorción atómica más utilizada es la absorción atómica por llama o flama, que nebuliza la muestra y luego la disemina en forma de aerosol dentro de una llama de aire acetileno u óxido nitroso-acetileno.



Figura 13: Espectrofotómetro de absorción atómica (modelo Spectra 220FS).

2.4.3 Medición de susceptibilidad magnética en muestras de polvos de acería

La determinación de la susceptibilidad magnética se realizó con un Kappameter digital, marca WODEE, modelo KT-5 como el que se muestra en la Figura 14.



Figura 14: Equipo de análisis de susceptibilidad magnética.

El equipo se utiliza para la medición de la susceptibilidad magnética real a rocas y minerales en estado sólido, con la posibilidad de conexión a PC a través de software de instalación para su operación remota; posee las siguientes características:

Rango de Medición: desde $-0,99 \cdot 10^{-3}$ hasta $999 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$;

Sensibilidad: $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ ($-0,8 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$).

Fuente de Alimentación: Batería única alcalina de 9 V;

Frecuencia de operación: 10 kHz;

Temperatura de operación: desde -10 °C hasta 55 °C;

Longitud: 187 mm;

Diámetro: 65 mm;

Peso: 0,35 kg (incluyendo la batería).

Posee pantalla LCD de fácil lectura con luz solar. Dotado de memoria de datos hasta 100 lecturas. Los datos pueden ser transmitidos a través del canal serie RS-232 a un ordenador para la evaluación inmediata y representación gráfica.

2.4.4 Determinación del peso específico volumétrico (densidad)

La densidad de los polvos se determinó mediante un picnómetro (Figura 15). Este es un instrumento de medición graduado que permite conocer la densidad o peso específico de cualquier fluido ya sea líquido o sólido mediante gravimetría a una determinada temperatura.



Figura 15: Picnómetro.

El procedimiento de trabajo con este instrumento es el siguiente:

1. Este se lava primero con una mezcla de bicromato de potasio con ácido sulfúrico, después con agua, se seca y se pesa.
2. Después se llena con agua destilada (hasta la graduación señalada) y se vuelve a pesar.

3. Luego se seca y se hecha en el la muestra de material (de 5,0 a 10,0 g), y de nuevo se pesa después se añade agua (aproximadamente dos tercios de su volumen total).
4. Mediante volteos y sacudidas se extrae el aire del polvo hasta suspender el desprendimiento de burbujas, y se coloca en un desecador de vacío cerca de dos horas para la humectación completa de las partículas minerales.
5. Si durante las sacudidas no se observa el desprendimiento de burbujas, a este se le agrega agua con una bureta (hasta la graduación señalada) y otra vez se pesa.

La densidad se determina por la siguiente formula:

$$\delta = \frac{(A-B) \cdot \delta_T}{C-B - (D-A)} \quad 2.1$$

donde

A: masa del picnómetro seco con el material, g;

B: masa del picnómetro seco, g;

δ_T : densidad de agua a la temperatura de ensayo, g/cm³;

C: masa del picnómetro con agua, g;

D: masa del picnómetro con agua y el material, g;

2.5 Corrida experimental en el separador magnético de tambor

2.5.1 Ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad (SMHBI)

La SMHBI se realizó en el DSIT en un separador magnético de tambor WD-WADR 190x150 que trabaja por vía húmeda, el mismo es de intensidad campo permanente (Figura 8). Esta pulpa fue preparada en un recipiente con agitación mecánica, la muestra sólida se mezcló con agua y se agitó lo suficiente como para dispersar las partículas sólidas y romper los aglomerados presentes en la misma, donde se determinó la densidad y el contenido de sólidos de esta.

Se realizaron 2 ensayos de SMHBI los mismos se planificaron con cuatro factores fijos y un factor a dos niveles, cada ensayo se realizó por triplicado, los parámetros que se mantuvieron constantes fueron:

- a) Intensidad del campo magnético del separador (H) 103,5 kA/m, ya que el separador es de campo magnético permanente.
- b) Densidad de la pulpa (δ_{pulpa}) 1,15 g/cm³, es la densidad donde se obtienen los mejores resultados con minerales cubanos de granulometría y susceptibilidad magnética similar (las colas de Nicaro).
- c) Flujo de alimentación 1,40 L/min. Flujo volumétrico admisible por el separador magnético.
- d) Velocidad de rotación del tambor 28 rpm. La experiencia ha mostrado que con minerales finos como las colas de la industria del níquel los mejores resultados se obtienen con velocidad del tambor entre 20 y 30 rpm.

El factor que se varió fue el diámetro de salida del producto no magnético, en el primer ensayo se trabaja con el diámetro mayor, 20,0 mm para buscar obtener un concentrado de Fe lo más limpio posible en la operación de separación básica. En el segundo ensayo se redujo el diámetro de salida a 5,0 mm; buscando aumentar la recuperación del hierro y luego limpiar el concentrado en tres operaciones de limpiezas. La Figura 16 (a) muestra el esquema del primer ensayo, y la Figura 16 (b) muestra el esquema del segundo ensayo.

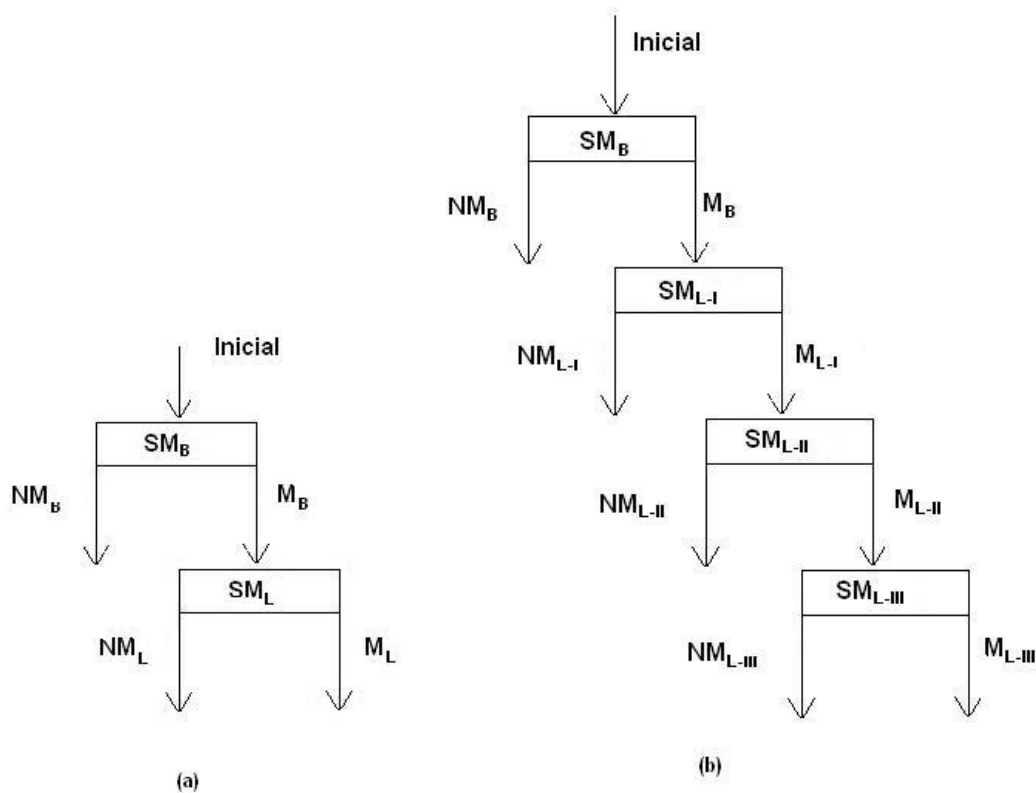


Figura 16: Ensayos de separación magnética: (a) ensayo con una operación de limpieza, (b) ensayo con tres operaciones de limpieza, SM_B) separación magnética básica, SM_L) separación magnética de limpieza, NM) concentrado no magnético, M) concentrado magnético.

2.5.2 Metodología de preparación de la pulpa para los ensayos de separación magnética

La pulpa para los dos ensayos de SMHBI se preparó en un tanque agitado de 2,8 L de capacidad. Se prefijaron y controlaron los parámetros: densidad de la pulpa 1,15 g/cm³, tiempo de agitación 60 min y velocidad de giro del impelente del agitador 1000 rpm; debido a que según criterios con dichos valores se obtienen los mejores resultados en la separación magnética con las colas de Nicaro.

La masa del polvo y el volumen del agua se calculan por las siguientes fórmulas:

$$V_p = Q_p \cdot \left(R_p + \frac{1}{\delta_p} \right) \quad 2.2$$

donde:

V_p : volumen de la pulpa, L;

Q_p : masa del sólido, kg;

R_p : relación líquido-sólido;

δ_p : densidad del sólido, 3,87 g/cm³;

Se sabe que:

$$R_p = \frac{s_p}{1-s_p} \quad 2.3$$

donde:

s_p : contenido de agua en la pulpa;

$$s_p = 1 - p \quad 2.4$$

donde

p: contenido de sólidos en la suspensión;

$$p = \frac{\delta_p \cdot (\Delta - 1)}{\Delta \cdot (\delta_p - 1)} \quad 2.5$$

donde:

Δ : densidad de la pulpa, 1,15 g/cm³;

La cantidad de agua a añadir (W_p) se calcula:

$$W_p = Q_p \cdot R_p \quad 2.6$$

Considerando la humedad de los polvos (8,0 %), se determinó que la masa del polvo a pesar es de 0,61 kg, y el volumen de agua a añadir es 2,60 L. Se verificó la densidad de la pulpa con la balanza densométrica modelo SIMONACCO – 3.

2.6 Corrida experimental en el hidrociclón

Para las corridas experimentales en el hidrociclón la pulpa fue preparada en el tanque agitado de la instalación experimental, situada en el interior de la empresa Pedro Sotto Alba. A la pulpa previamente homogenizada se le tomó una muestra para realizar la caracterización física. En esta caracterización se determinó la densidad de la pulpa y el contenido de sólidos.

2.6.1 Ensayos de clasificación en el hidrociclón

La instalación experimental de clasificación (Figura 17), cuenta con un tanque agitado, una bomba centrífuga que es la encargada de impulsar la pulpa hacia el hidrociclón, un manómetro para medir la presión de operación. Además el circuito está compuesto por tuberías metálicas y mangueras de goma que flexibilizan el trabajo en dicha instalación.

Se realizó un ensayo donde se prefijo el diámetro de descarga de arena en 4,0 mm.

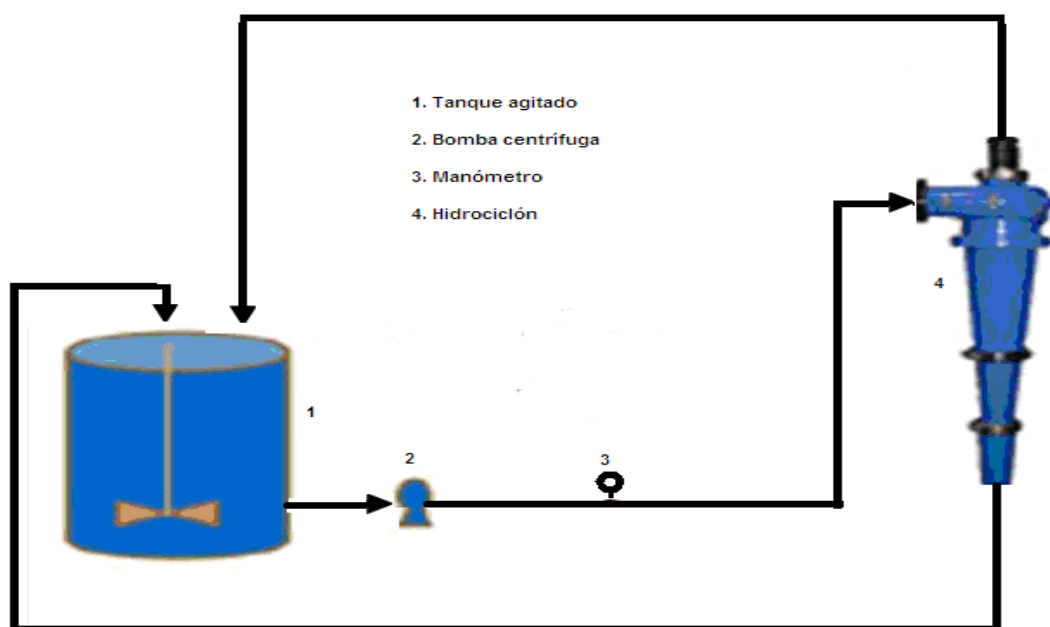


Figura 17: Instalación experimental de separación de partículas mediante el hidrociclón.

2.6.2 Metodología experimental de los ensayos del hidrociclón

Para los ensayos en el hidrociclón se hicieron los cálculos pertinentes para un tanque de preparación de pulpa de 250 L, con agitación constante de 180,0 rpm y contenido de sólidos en la pulpa 15,0 %. Estos cálculos se hicieron utilizando las ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6.

Considerando que la humedad de los polvos es 8,0 %, se determinó que para una pulpa con 15,0 % de sólidos la masa del polvo a añadir es 45,62 kg, y el volumen de agua de 239,08 L. Para esas condiciones se determinó que la densidad de la pulpa debe ser 1,125 g/cm³.

A partir de los 60,0 min, cada 15,0 min se comprobaba la densidad de la pulpa hasta que a los 90,0 min de agitación se comprobó que la densidad era estable en 1,115 g/cm³. Momento en que se inició el ensayo y la toma de muestras (arena y reboso) para el control del proceso, durante todo el ensayo la presión media mostrada por el manómetro fue de 0,07 MPa.

Para determinar el balance del hidrociclón se utilizaron los datos del análisis magnético en la canal F.A. Magnachute, el mismo se realizó para la muestra inicial y los productos del hidrociclón. La canal magnética además de permitir que se realizara el cálculo referido permitió evaluar la concentración del Fe a una intensidad inferior a la del separador magnético de tambor.

El rendimiento en peso de los productos del hidrociclón se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_{arena} = \frac{FM_{inicial} - FM_{reboso}}{FM_{arena} - FM_{reboso}} \cdot 100 \quad 2.7$$

$$\gamma_{reboso} = 100 - \gamma_{arena} \quad 2.8$$

donde:

γ_{arena} , rendimiento en peso de la arena, %;

γ_{reboso} , rendimiento en peso del reboso, %;

$FM_{inicial}$: contenido de fracción magnética en la muestra inicial, %;

FM_{arena} , contenido de fracción magnética en la arena, %;

FM_{reboso} : contenido de fracción magnética en el reboso, %.

2.7 Corrida experimental con la canaleta magnética F. A. Magnachute

La canaleta F. A. Magnachute atrae y retiene las partículas magnéticas contenidas en una muestra de pulpa vertida sobre ella. Está compuesta por una canal abisagrada bajo la cual se encuentran imanes permanentes de 63,14 kA/m.

Toma y preparación de las muestras:

Para las corridas experimentales se utilizaron 50,0 g de cada una de las tres muestras representativas, las cuales son:

1. Material inicial.
2. Reboso del hidrociclón.
3. Descarga del hidrociclón.

A estas muestras se les realizó una caracterización física y química previa. Se mezclaron con agua y se homogeneizaron para eliminar las partículas aglomeradas y dispersar las partículas sólidas.

Procedimiento para el uso de la canaleta magnética:

1. Conectar la manguera de aspersion a un suministro de agua apropiado. Solo se necesita una presión muy baja, suficiente para dispersar y no desprender las partículas magnéticas.
2. Apoyar la canaleta magnética sobre una superficie llana, y asegurar que la canal esté firmemente en contacto con el imán debajo.
3. Colocar un recipiente en la pestaña inferior de la canal para recoger el agua y las partículas no magnéticas de la muestra en el proceso de tratamiento.
4. Agitar la muestra para asegurar que las partículas están en suspensión.
5. Verter el contenido de la muestra por la canal, las partículas magnéticas se agruparán en hileras conforme a la posición de los imanes, dejar de verter

cuando aparezca una capa de material magnético de aproximadamente 2,0 mm en una hilera a lo ancho de la canal.

6. Aplicar una rociada de agua a la canal, orientando la manguera hacia arriba sobre el material magnético para eliminar el no magnético.
7. Cuando la fracción magnética esta lo suficientemente limpia, levantar la canal y utilizando la manguera descargar el material magnético por la pestaña superior.
8. Repetir el procedimiento con el resto de la muestra, y si es necesario volver a tratar el contenido del material no magnético.

En el desarrollo de los experimentos se mantuvieron fijos los parámetros experimentales siguientes:

- Densidad del polvo de acería $3,87 \text{ g/cm}^3$
- Densidad del agua $0,996 \text{ g/cm}^3$

Conclusiones parciales del capítulo

Los métodos y técnicas experimentales utilizadas para el análisis están fundamentados a partir de la necesidad de recuperar el Fe y el Zn de los polvos de acería.

La separación magnética húmeda a baja intensidad es un método de concentración, por el contraste de las propiedades de los minerales, que proporciona una mayor efectividad en la concentración de minerales finos de alta susceptibilidad magnética.

El hidrociclón encuentra su principal aplicación como clasificador que ha mostrado su eficiencia a tamaños finos de separación.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los experimentos, los que fueron realizados aplicando la separación magnética sin clasificación previa, y con clasificación previa en hidrociclones. El objetivo de este capítulo es analizar los resultados de las corridas experimentales, y proponer un esquema tecnológico para el tratamiento de los polvos de acería.

3.1 Características de los polvos de acería

Se tuvieron en cuenta cuatro propiedades fundamentales: composición química, composición granulométrica, densidad y susceptibilidad magnética; las que permiten valorar los procedimientos y alternativas tecnológicas para su tratamiento. Los resultados obtenidos experimentalmente se muestran a continuación.

3.1.1 Análisis granulométrico

En la Tabla 3 se muestra la composición granulométrica de la muestra estudiada, en la misma se puede observar que es un material de alta fineza, el 81,87 % de sus partículas son inferiores a 53,0 μm y el 99,69 % está por debajo de 420 μm .

Tabla 3: Resultados del análisis granulométrico.

Clases, μm	Retenido, %	Retenido acumulado, %
- 500 + 420	0,31	0,31
-420 + 210	7,43	7,74
-210 + 105	8,55	16,29
-105 + 53	1,83	18,13
-53 + 0,00	81,87	100,00

3.1.2 Análisis químico

El análisis químico es muy importante para la evaluación cualitativa y cuantitativa del comportamiento de los polvos de acería en el proceso estudiado. De esta manera se

puede comparar el comportamiento de cada elemento que compone a estos polvos, antes y después de los ensayos.

En la Figura 18 se presenta la composición química de la muestra inicial. Se puede ver que el elemento mayoritario es el Fe con un 29,8 %, seguido del Zn con 9,6 %. Siguen a estos metales el Ca, el Mn y el MgO. Mostrándose en cambio que los contenidos de Ni y Co son extremadamente bajos.

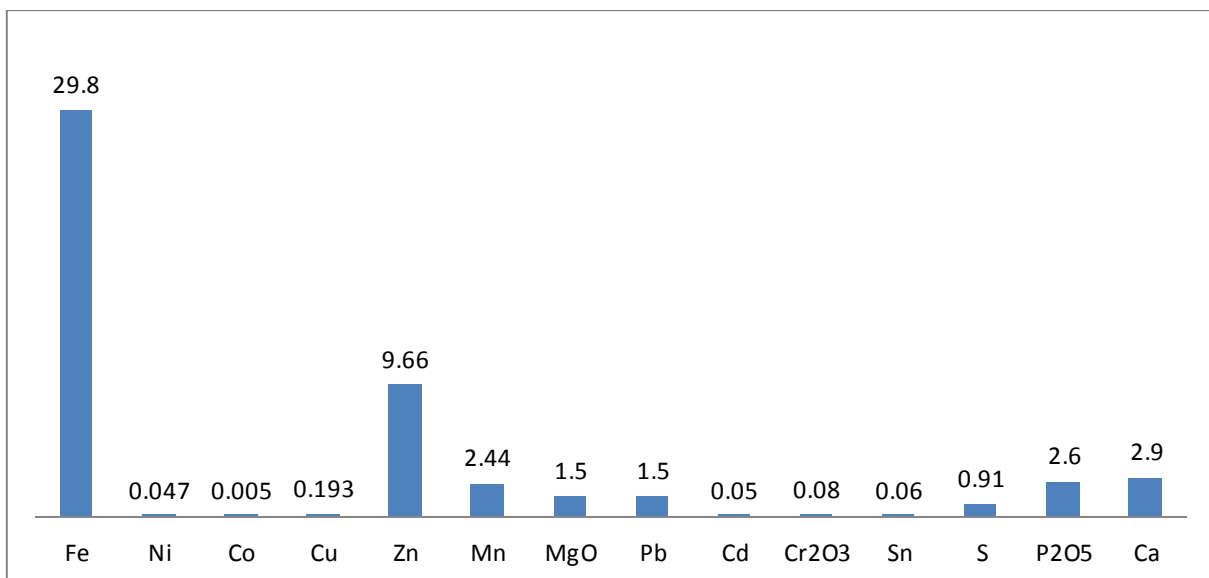


Figura 18: Composición química de la muestra inicial, %.

En la Tabla 4 se pueden observar los contenidos y distribuciones de los elementos Fe y Zn por clases de tamaños, los contenidos de ambos elementos se incrementan con la disminución del tamaño de partículas, distribuyéndose el 86,18 % del Fe y el 93,93 % del Zn en la clase más fina - 53 + 0,0 μm .

Tabla 4: Contenidos de Fe y Zn por clases de tamaños y su distribución.

Tamices, μm	Contenido por clases, %				
	- 500 + 420	- 420 + 210	- 210 + 105	- 105 + 53	- 53 + 0,0
Fe, %	6,87	18,07	25,54	31,21	31,36
Zn, %	2,86	3,48	3,11	2,86	11,08
	Distribución por clases, %				
	- 500 + 420	- 420 + 210	- 210 + 105	- 105 + 53	- 53 + 0,0
Fe, %	0,07	4,51	7,33	1,92	86,18
Zn, %	0,09	2,68	2,76	0,54	93,93

3.2.3 Medición de la susceptibilidad magnética en muestras de polvos de acería

Al realizarle la medición de la susceptibilidad magnética a cada uno de los grupos granulométricos de las muestras de polvos estudiadas, se determinó que estos se encuentran dentro de los materiales ferromagnéticos, con un incremento del valor de susceptibilidad magnética hacia las fracciones más finas; lo que pudiera estar asociado a que el hierro como elemento definitorio de la propiedad física analizada se concentra hacia las clases de menor tamaño.

En la Tabla 5 se expone el contraste de la susceptibilidad magnética (SM) en la muestra inicial de las diferentes clases granulométricas, mostrándose que poseen valores de dicha propiedad mayores que $62,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, por lo que por la clasificación dada por Dercach V. G. 1981 son fuertemente magnéticas, exceptuando las partículas de tamaño mayor que $420 \mu\text{m}$ que se comportan como un producto débilmente magnético al poseer susceptibilidad de $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Tabla 5: Valores de la Susceptibilidad Magnética en muestra global y clase granulométricas.

Muestra inicial	Clases, μm				
	- 500+ 420	- 420 + 210	- 210 + 105	-105 + 53	- 53 + 0,0
166.0	6,6	134,7	218,7	161,2	224,5

Por la clasificación dada por Dercach, 1981, este material caracteriza como fuertemente magnético, por lo que se puede concluir que la separación magnética a los polvos debe realizarse a baja intensidad del campo, menor que 120 kA/m .

3.2.4 Determinación de la densidad de la muestra

La densidad determinada con el picnómetro fue de $3,87 \text{ g/cm}^3$, siendo esta similar a la densidad de las colas de Nicaro ($3,68 \text{ g/cm}^3$) dada por N. Ponce, 1983.

3.3 Resultados de las corridas experimentales

3.3.1. Ensayos de separación magnética húmeda a baja intensidad

Durante la preparación de pulpa y en los ensayos de separación magnética, tanto en el concentrado magnético, como en el rechazo no magnético, se formaron espumas

cuando caían en los recipientes dispuestos para su recogida. Estas espumas al igual que los productos del separador magnético se recogieron, se secaron, pesaron, y posterior a su preparación se entregaron al laboratorio químico para determinar contenidos de Fe y Zn, y evaluar la concentración y distribución de estos elementos para futuras investigaciones.

En la Tabla 6 se plasman los resultados del primer ensayo de SMHBI, en la misma se puede ver que los rendimientos en peso del concentrado básico y concentrado de limpieza (KB y KL-1 respectivamente) son elevados, mayores que el 70,0 %, y los contenidos de Fe son bajos, menores al 35,0 %, mientras que en el rechazo básico y rechazo de limpieza (RB y RL-1 respectivamente) hay un ligero enriquecimiento del Zn, alcanzando contenidos ligeramente superiores al 11,0 %. En las espumas del concentrado básico (EKB) y las espumas del rechazo básico (ERB) se observa un pequeño enriquecimiento de Zn en valores de 10,92 y 14,04 % respectivamente.

Tabla 6: Resultados de la separación magnética (primer ensayo).

Productos	Rendimiento en peso productos, %	Contenidos, %		Distribución, %	
		Fe	Zn	Fe	Zn
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Entra SMB	100,00	30,70	9,98	100,00	100,00
KB	73,66	34,11	9,50	81,84	70,12
EKB	7,72	32,77	10,92	8,24	8,44
RB	17,99	16,35	11,40	9,58	20,55
ERB	0,63	16,83	14,04	0,34	0,88
Suma espumas	8,35	31,57	11,16	8,59	9,33
Entra L-1	73,66	34,11	9,50	81,85	70,12
KL-1	70,15	35,00	9,42	71,98	69,56
EKL-1	0,09	27,80	13,62	0,07	0,12
RL-1	3,42	16,10	11,06	1,61	3,98
Total espumas	8,44	31,53	11,18	8,66	9,46

Como el ensayo anterior mostró que en la limpieza del concentrado básico (KB) el contenido de Fe se incrementaba levemente y el Zn disminuía, se decidió realizar otro ensayo que incluyera tres operaciones de limpieza con la finalidad de obtener un concentrado con mayor contenido de Fe y menor contenido de Zn.

En la Tabla 7 se muestran los resultados del segundo ensayo, en la columna 2 se puede observar que en la separación magnética básica (SMB) se alcanza un rendimiento en peso alto igual a 80,95 %; con bajo contenido de Fe (columna 3) en el concentrado básico (KB) sólo 32,29 %, mientras que el contenido de Zn (columna 4) se incrementa hasta 12,19 % en el rechazo básico (RB). Es de destacar que en las espumas que se forman durante la operación el Zn se enriquece hasta el 15,69 % y 15,87 % en el concentrado (EKB) y el rechazo (ERB) respectivamente, en conjunto se llega a rendimiento en peso de las espumas hasta 4,17 %, contenido de Zn de 15,82 % y recuperación de 6,82 % (columna 5).

En la separación magnética de limpieza 1 (SML-1) se alcanzó un rendimiento en peso del 52,17 %, incrementándose el contenido de Fe en el concentrado de limpieza 1 (KL-1) hasta 36,51 %, mientras que el Zn en el rechazo de limpieza 1 (RL-1) se mantienen en valor similar al del rechazo básico. Las espumas mantienen los contenidos de Zn y Fe en valores similares a los de la operación básica. El rendimiento en peso total de las espumas de la SML-1 con relación a la SMB se incrementa en más de un 1,0 % alcanzando un valor del 5,50 %.

En la segunda operación de limpieza (SML-2) lo más significativo es que se elevó el contenido de Fe desde 36,51 % hasta 41,45 % en el KL-2 y que se reduce el contenido de Zn en dicho producto en un 2,0 % es decir de 7,38 % de Zn en el KL-1 baja a 5,29 % en el KL-2. Se destaca también el rendimiento en peso total de las espumas de la SML-2 con relación a las espumas de la SML-1 disminuye en casi un 2,0% acercándose al valor logrado en la SMB, pero se mantienen los contenidos de Zn en valores similares a los de las espumas de las operaciones anteriores.

Tabla 7: Resultados de la separación magnética (segundo ensayo).

Productos	Rendimiento en peso en productos, %	Contenidos, %		Distribución, %	
		Fe	Zn	Fe	Zn
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Entra SMB	100,00	29,80	9,66	100,00	100,00
KB	80,95	32,29	8,90	86,96	74,45
EKB	1,18	30,20	15,69	1,19	1,92
RB	14,88	18,21	12,19	9,01	18,74
ERB	2,99	30,01	15,87	2,98	4,90
Suma espumas	4,17	30,06	15,82	4,17	6,82
Entra L-1	80,95	32,29	8,90	86,96	74,45
KL-1	52,17	36,51	7,38	63,37	43,23
EKL-1	1,69	30,71	13,54	1,72	2,57
RL-1	23,28	23,33	11,20	18,07	29,28
ERL-1	3,81	30,15	13,71	3,82	5,87
Suma espumas	5,50	30,32	13,66	5,55	7,76
Entra L-2	52,17	36,51	7,38	63,37	43,23
KL-2	29,64	41,45	5,29	40,88	16,21
EKL-2	0,65	32,73	11,84	0,71	1,04
RL-2	18,75	29,74	9,72	18,55	24,70
ERL-2	3,00	30,86	12,38	3,08	5,04
Suma espumas	3,65	31,19	12,29	3,79	4,63
Entra L-3	29,64	41,45	5,29	40,88	16,21
KL-3	25,56	43,12	3,65	36,66	9,65
EKL-3	0,88	33,65	18,13	0,98	1,64
RL-3	2,70	32,88	15,53	2,96	4,34
ERL-3	0,25	32,78	22,19	0,28	0,58
Suma espumas	1,13	33,45	14,07	1,26	2,22
Productos finales					
Concentrado de Fe	25,56	43,12	3,65	36,66	9,65
Rechazo final	55,91	23,85	10,88	44,36	62,81
Total Espuma	14,45	30,71	14,06	14,76	20,98

En la operación de limpieza 3 (SML-3) sólo se logra incrementar el contenido de Fe en el concentrado a 43,12 %, no obstante, se reduce el contenido de Zn en dicho

producto hasta 3,65 %. En la espuma del rechazo (ERL-3) se observa un incremento del Zn hasta 22,19 % con un rendimiento en peso del 0,25 %.

Al final del esquema con tres limpiezas, considerando las espumas como un producto, los índices de dicho esquema son: concentrado final de Fe con salida del 29,64 %, contenido de 41,45 % de Fe y 5,29 % de Zn, así como recuperación del 44,88 % del Fe acompañado con sólo el 16,21 % del Zn. Mientras que en el rechazo final estaría saliendo el 55,91 % de la materia prima con un contenido de 23,85 % de Fe; 10,88 % de Zn con recuperación del 44,36 % y 62,81 % del Fe y el Zn respectivamente. La suma de todas las espumas reportan un producto que es el 14,45 % de la muestra con contenidos de Fe y Zn de 30,71 y 14,06 % respectivamente, así como recuperaciones de 14,76 y 20,98 % del Fe y el Zn respectivamente.

Los resultados del segundo ensayo con relación al primero manifiestan que la introducción de tres operaciones de limpiezas sucesivas propician la obtención de un concentrado con mejor calidad: 9,6 % de Fe superior y 6,61% de Zn menor. En términos cuantitativos en el concentrado disminuye el rendimiento en peso en alrededor del 40,0 % y la recuperación del Fe baja en 26,44 %, mientras que con relación al Zn sólo pasa al concentrado el 9,62 % del mismo. Con relación a los rechazos de ambos esquemas el contenido de Zn es muy similar, pero en el segundo (RL-2) se distribuye el 63,12 % de dicho elemento. Las espumas totales del segundo ensayo como se dijo anteriormente constituyen el 16,35 % en peso de la muestra sometida a estudio, y el contenido de Zn es 4,07 % superior al de las espumas totales del primer esquema, recuperando en ellas el 26,02 % de este metal. Una alternativa interesante para recuperar parte del hierro que pasa a los rechazos pudiera ser introducir una o dos etapas de operaciones de control de los mismos.

Como los resultados de la separación magnética de los esquemas 16 (a) y 16 (b) no se obtuvieron buenos resultados, se decidió aplicar previamente una clasificación en un hidrociclón.

3.3.2. Resultados del ensayo en el hidrociclón

Como se explicó en el acápite 2.1, se realizó un ensayo en un hidrociclón con las características ya expuestas, el objetivo del mismo era evaluar la posibilidad de obtener un preconcentrado de Zn en el reboso del hidrociclón y procesar la arena con la finalidad de obtener un concentrado de Fe por SMHBI con mayor contenido de este elemento.

El rendimiento en peso de los productos del hidrociclón se calculó mediante la ecuación 2.7, los mismo se muestran en la Tabla 8 donde se puede apreciar que el 28,17 % del polvo tratado en el hidrociclón se va en la arena, mientras que el 71,83 % pasa al reboso. Referente a los contenidos de Fe y Zn, en la arena se obtiene un producto con 48,90 % de Fe y 4,79 % de Zn. Comparando estos resultados con los de la SMHBI, en el hidrociclón se logra un producto con contenido de Fe superior en 5,78 % y la recuperación es mayor en un 9,57 %, mientras que con el contenido de Zn pasa todo lo contrario en la arena del hidrociclón es superior en 1,14 % al del concentrado de la SMHBI. Por su parte en el reboso con 11,57 % de Zn, concentra este elemento en un 86,03 %, con contenido relativamente bajo de Fe igual a 22,31 %.

Tabla 8: Resultados del ensayo en el hidrociclón.

Productos	Rendimiento en peso, %	Contenido, %		Distribución, %	
		Fe	Zn	Fe	Zn
Arena	28,17	48,90	4,79	46,23	13,97
Reboso	71,83	22,31	11,57	53,78	86,03
Inicial	100,00	29,80	9,66	100,00	100,00

En la Figura 19 se representan las características de grosor de la muestra inicial y los productos del hidrociclón, en la misma se puede notar que en el reboso se distribuyeron las partículas menores que 80,0 μm y en la arenas las mayores que 60,0 μm . Se incluyen las ecuaciones de los modelos que describen dichas características, en los tres casos son modelos logarítmicos y los valores de R^2 son superiores a 0,96 indicios de que la proporción de la varianza del porciento de material retenido en los tamices es mínima.

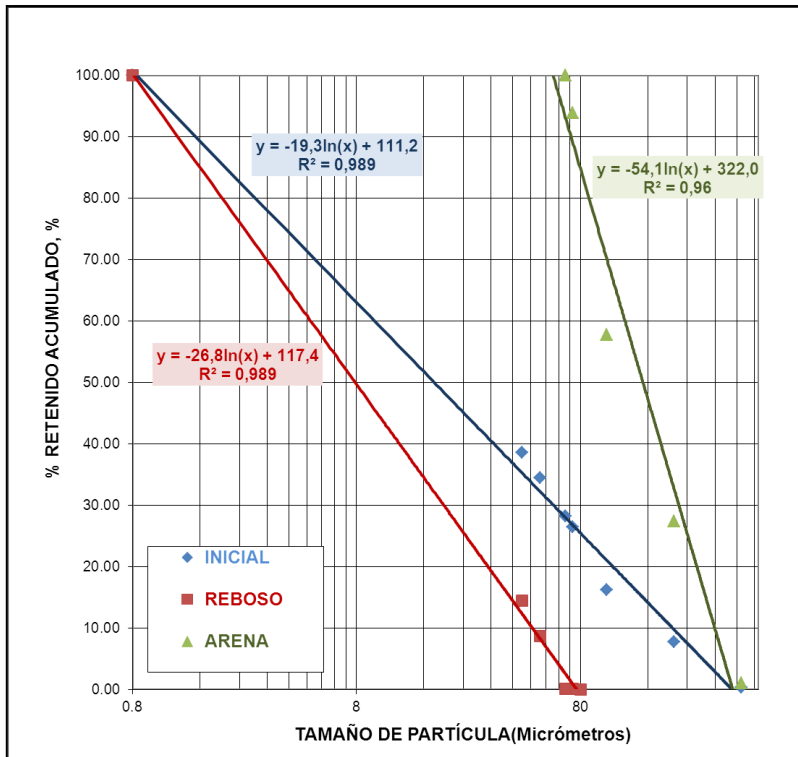


Figura 19: Características granulométricas de los productos del hidrociclón.

En la Figura 20 se representa la curva de rendimiento o curva de Tromp, la cual relaciona la fracción de peso o porcentaje de cada tamaño de partícula en la alimentación que se reporta a la descarga de la arena, la misma sirvió para determinar los valores de los parámetros para el cálculo de la eficiencia de separación o imperfección (I) del hidrociclón. En el Anexo 1 se muestra la tabla auxiliar para la construcción de la Curva de Tromp. Los valores de D_{25} , D_{75} , D_{50} son 65, 77 y 71 μm respectivamente.

Por la Ecuación 1.6 se calculó $I = 8,45 \%$, este valor indica que el hidrociclón clasificó con un 91,55% de eficiencia.

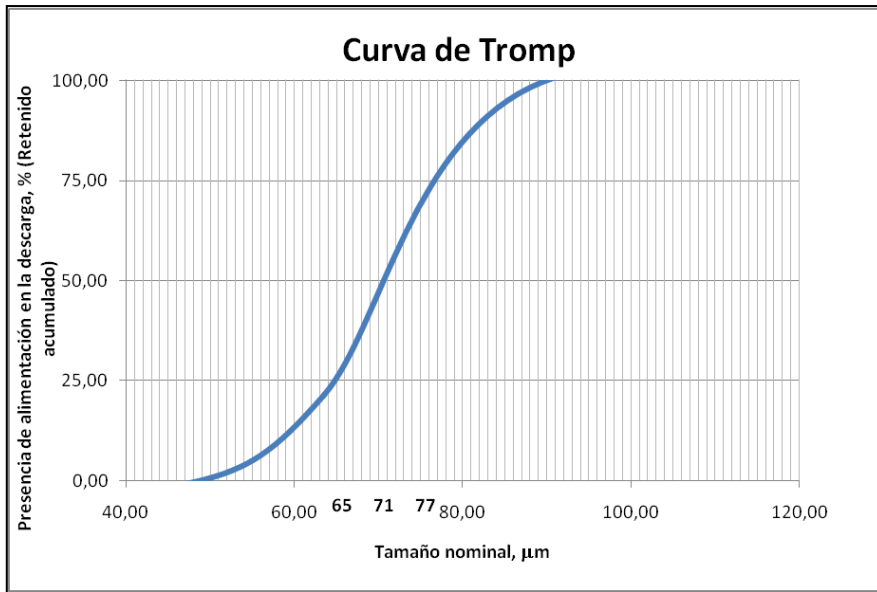


Figura 20: Curva de Tromp para la clasificación en el hidrociclón.

3.3.2. Resultados de los ensayos en la canal magnética

En la Tabla 9 se presentan los resultados de los ensayos en la canal magnética, en la misma se puede observar que los rendimientos en peso de los productos de la muestra inicial de polvo son 30,62 % en la fracción magnética, en la arena y el reboso del hidrociclón son 81,43 y 10,70 % respectivamente, demostrando que el mayor porcentaje de fracción magnética presente en los polvos (74,90 %) se distribuye en la arena del hidrociclón, mientras que sólo el 25,10 % pasa al reboso.

El análisis químico a las fracciones de la canal magnética de los productos del hidrociclón muestra que la separación de la arena en la canal proporciona una fracción magnética con 53,10 % de Fe y 3,31 % de Zn. Mientras que en la separación del reboso se obtiene una fracción magnética con 36,90 % de Fe y 11,42 % de Zn. En las fracciones no magnéticas los contenidos de Zn no superan el 12,60 %.

Comparando estos resultados con los mejores del separador magnético de tambor a 103,50 kA/m, la combinación de la clasificación previa en hidrociclón con separación magnética a intensidad de 63,69 kA/m, en la fracción magnética de las arenas se logra un producto magnético con contenido de Fe superior (53,10 %) a costa de una

merma en la recuperación del Fe de alrededor del 5,0 %, y el contenido de Zn se mantiene en un valor similar al del concentrado del separador magnético de tambor. En la fracción no magnética los contenidos de Fe y Zn son similares a los de los rechazos de la SMHBI.

Tabla 9. Resultados de los ensayos en la canal magnética

Productos	Rendimiento en peso de la operación, %	Rendimiento en peso parcial, %	Contenido		Distribución	
			Fe	Zn	Fe	Zn
Muestra de cabeza						
Fracción magnética (FM)	30,62	-	41,90	4,17	42,75	13,18
Fracción no magnética (FNM)	69,83	-	24,60	12,05	57,25	86,82
Inicial	100,00		30,01	9,69	100,00	100,00
Arena del hidrociclón						
Fracción magnética (FM)	81,43	22,94	53,10	3,31	40,88	7,86
Fracción no magnética (FNM)	18,57	5,23	30,48	11,28	5,35	6,11
Arena HC	100,00	28,17	48,90	4,79	46,23	13,97
Reboso del hidrociclón						
Fracción magnética (FM)	10,70	7,69	36,90	11,42	9,52	9,09
Fracción no magnética (FNM)	89,30	64,14	20,56	11,59	44,25	76,94
Reboso HC	100,00	71,83	22,31	11,57	53,78	86,03

Por su parte el ensayo en la canal magnética del reboso, al igual que el de la muestra inicial no manifestó concentración significativa de los elementos evaluados en las diferentes fracciones.

3.4 Propuesta del esquema para el tratamiento de los polvos de acería

Una vez terminado los análisis de separación magnética y clasificación a las muestras de polvos de acería, así como analizados el comportamiento de los elementos en cada uno de los productos, se llegó a la conclusión de que es posible concentrar el Fe en el producto magnético de la SMHBI en un 53,10 % después de haber pasado este por una clasificación previa en un hidrociclón. En la Figura 21 se muestra el esquema propuesto, que podrá servir para futuras investigaciones.

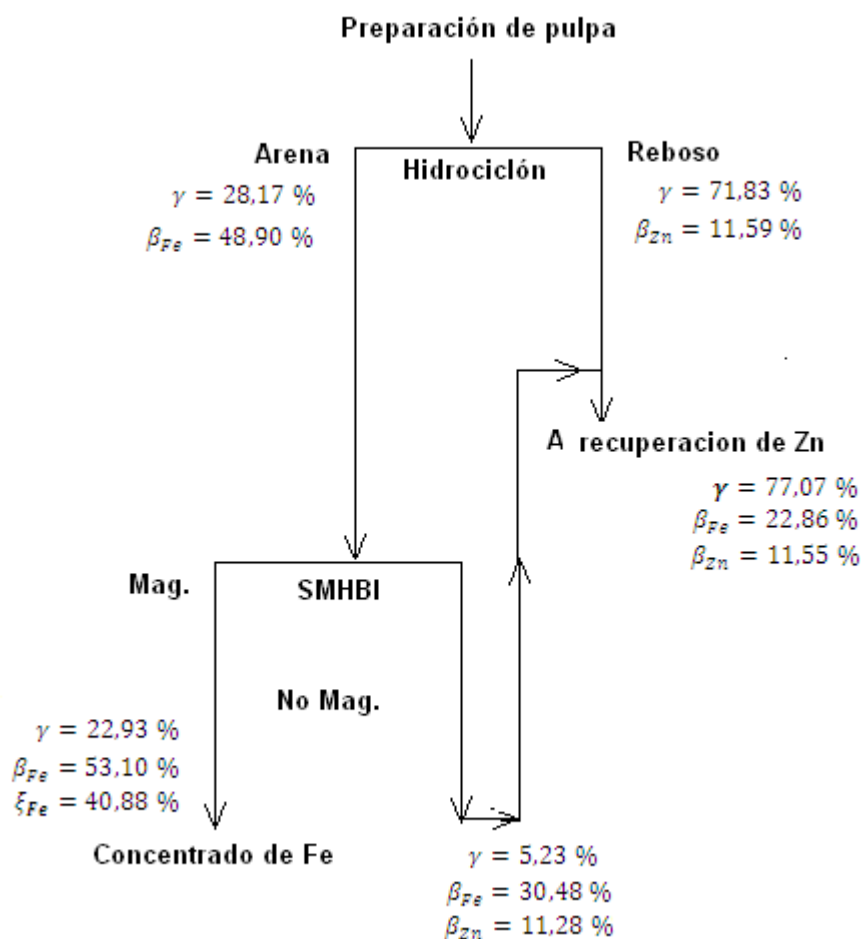


Figura 21: Propuesta del esquema final del proceso.

En el esquema se muestra que la pulpa preparada convenientemente es sometida a una clasificación en un hidrociclón donde las arenas son sometidas a una separación magnética a baja intensidad, obteniendo un producto magnético con un contenido de

Fe del 53,10 %. El producto no magnético representa el 5,23 % de la muestra inicial, con un contenido del 30,48 y 11,28 % de Fe y Zn respectivamente.

El reboso del hidrociclón que representa el 71,83 % de la materia prima alimentada, con contenido de 11,59 % de Zn y el 86,03% del total de dicho metal alimentado.

El producto no magnético junto al reboso del hidrociclón representa el 77,07 % de la muestra inicial, con 11,55 % en contenido de Zn, y una recuperación del 86,03 %. Por lo que se recomienda pasarlo a un proceso para la concentración del Zn; dicho proceso pudiera ser la flotación.

3.5 Evaluación económica orientativa

El objetivo principal de este acápite como su nombre lo indica es realizar una valoración económica orientativa sobre la viabilidad de la investigación. Para ello se tuvo en cuenta el precio de una tonelada de chatarra en el año 2013 (400,0 USD), en información dada en La Mesa Redonda por Tamayo D. J. L., 2013.

Según Tápanes, D., *et. al.*, 2001 por cada tonelada de acero producida se generan entre 15 y 20 kg de polvo. ACINOX Las Tunas tiene previsto producir 150 000 t de acero en el año 2014 (Trotman, J., 2014). Se asume que ACINOX Las Tunas genere 18 kg de polvo/t, para una producción de 150 000 t de acero estaría generando alrededor de 2 700 t de polvos, de estas alrededor de 804,6 t de Fe, si se utiliza el esquema propuesto se estaría recuperando alrededor de 328,75 t de Fe.

Si estas 328,75 t de Fe estuvieran sustituyendo igual cantidad de chatarra, en termino monetario se estarían ahorrando 131 498,96 USD/año, solo por el concepto de recuperar el Fe contenido en los polvos de acería de ACINOX Las Tunas, sin tener en cuenta los gastos asignados al proceso de concentración y manipulación de la materia prima y el concentrado, así como los gastos en insumos y materiales.

Según Trotman, J. 2014, la empresa guatemalteca JUNIOR (que tiene relaciones comerciales con el DSIT) tiene mercado para concentrados de Zn con 18,0 % o más de este elemento, considerando que se llagara a recuperar el 50 % de Zn con 20 % de ley. El precio del Zn para su comercialización mayo 2014 es de 2 058,98 USD/t. En los polvos generados para una producción de 150 000 t/año se encontrarían

alrededor de 260,82 t de Zn por año. Si solo se lograra recuperar el 50 % del Zn (130,41 t/año) al costo actual se le estaría ingresando 268 511,58 USD/año sin incluir gastos.

Conclusiones parciales del capítulo

- El valor de la susceptibilidad magnética de los polvos de la acería ACINOX Las Tunas se incrementa con la disminución del tamaño de las partículas, y a excepción de las clase superior a 420,0 μm en las demás se confirma el carácter ferromagnético.
- Se comprobó que predominan las partículas finas, siendo las menores de 53 μm el 81,87 % de la muestra estudiada.
- En la SMHBI la introducción de tres operaciones de limpieza sucesivas propician la obtención de un concentrado con 43,13 % de Fe y 3,65 % de Zn.
- Los polvos mostraron poseer una alta flotabilidad. En la SMHBI la suma de todas las espumas reportan un producto de 14,45 % de la muestra con contenidos de Fe y Zn de 30,71 y 14,06 % respectivamente, así como recuperaciones de 14,76 y 20,98 % del Fe y el Zn respectivamente.
- El hidrociclón trabajo con una eficiencia de clasificación del 91,55 %.
- La separación de la arena del hidrociclón en la canal magnética proporciona una fracción magnética con 53,10 % de Fe y 3,31 % de Zn. Por su parte el ensayo en la canal magnética del reboso, al igual que el de la muestra inicial no manifestó concentración significativa de los elementos evaluados en las diferentes fracciones.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. El esquema propuesto cuenta con dos etapas de beneficio del material, la primera es una clasificación de la pulpa en un hidrociclón, donde se obtienen dos productos: el reboso y la arena. Después se aplica una separación magnética a esta última, para concentrar el Fe que contiene. Finalmente se obtiene un concentrado de Fe igual a 53,10 % (concentrado magnético), no siendo así en el caso del Zn, el cual queda propuesto para un tratamiento posterior.
2. La separación magnética sin clasificación previa en hidrociclones aportó que el Fe solo alcanza un contenido del 43,12 % en el concentrado de la tercera limpieza. Por su parte, el Zn aumenta su contenido hasta 15,53 % en el rechazo de la tercera limpieza pero constituye sólo el 2,70 % del material y se distribuye el 4,34 % del mismo
3. La clasificación previa en hidrociclones y la posterior separación magnética de las arenas a intensidad de campo de 63,69 kA/m mostró mejores resultados que la separación magnética húmeda en el separador magnético de tambor a intensidad del campo magnético 103,50 kA/m. esta clasificación permitió recuperar 53,10 % de Fe en el concentrado magnético, para un rendimiento en peso del 22,94 %. Mientras que en el reboso del hidrociclón se obtuvo un 11,59 % de Zn para un 71,83 % rendimiento en peso.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Realizar análisis mineralógico a los polvos de ACINOX Las Tunas e identificar y cuantificar las fases presentes.
2. Continuar con los ensayos según el esquema propuesto.
3. Usar la flotación en el tratamiento del reboso del hidrociclón para concentrar el Zn.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Anon, The Sinzing of hidrociclones, Krebs Engeneering, California, 1977.

Bouso J. L., Nuevos tipos de hidrociclones, ERAL, equipos y procesos, S.A. 1990

Bouso J. L., presidente de ERAL Equipos y Procesos. Publicado en Americas Mining (Mayo 1998).

Coello, A., Curso de preparación mecánica de menas y Minerales, 1999.

De La Torre E.; Guevara A.; Espinoza C., Valorización de polvos de acería, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis, Revista Politécnica Vol. 32, No. 1, Páginas: 51–56, 2013.

Del Vasto P., Ibañez B., Sandoval D., Caracterización de polvos de acería eléctrica producidos en Venezuela y Evaluación preliminar de su lixiviabilidad con ácidos orgánicos diluidos, 2011

Dercach V. G., Métodos especiales de enriquecimiento de minerales. Ed. Vnestorgizdat. Moscú. 1981.

Echeverri Londoño C. A, diseño óptimo de ciclones, Medellín, 2006.

Ferreiro Y., Obtención de un concentrado de hierro a partir de los escombros lateríticos del yacimiento Pinares de Mayarí, Revista Trimestral No 3, 2006.

Fuentes Y., tesis Empleo de la separación magnética para mejorar las características del polvo de NiO de la planta Ernesto Che Guevara, para su empleo como pigmento cerámico, 2009.

Góngora N., Evaluación del trabajo de un hidrociclón para la clasificación de la pulpa de cienos carbonatados [Trabajo de Diploma], 2013

Hauke G., Separación de partículas mediante hidrociclón, (eficiencia)

Instrucciones de operación y mantenimiento para canaleta magnética F: A. Magnachute, BOXMAN RAPID, 1981.

Jungah K.; Gjergj D.; Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation. (Resumen). Minerals Engineering. Volume 23, Issue 4: 282-288, 2010:

Madías J., Reciclado de polvos de horno eléctrico, 2009.

Mitrofánov S. I., Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir Moscú, 1974.

Obiols J., Espectrofotometría de absorción atómica, su aplicación en la industria del vidrio, 1969.

Ponce N, *et. al.*, Estudio complejo de las colas de Nicaro. CIG, CNIC, C Habana, 1983.

Rázumov K. A., Perov V. A., 1988, Proyectos de fábricas de preparación de minerales, editorial Mir, Moscú.

Ros A., Reciclado de polvos de acerías (Óxido de Zinc). Procesos hidrometalúrgicos, 2012.

Ruetten J., Crittendon R., Reciclado sostenible de polvo de acería eléctrica: Proceso Waelz versus otras tecnologías, 2012

Tamayo D. J. L., director general de la Unión de Empresas de Materias Primas, en intervención en la Mesa Redonda del miércoles 26 de junio de 2013.

Tápanes Robau D., Álvarez Palacios T., Charles Senguden T. A., 2001, Utilización del polvo de acería de horno de arco eléctrico.

Trotman G. J. A. subdirector de investigaciones del DSIT, en entrevista concedida al autor del trabajo el día 17 de junio de 2014.

Walas S., Chemical Process Equipment, selection and design, 1990, p 339

Williams Y, Optimización de la instalación de clasificación en hidrociclones del CIS, 1991.

Wills B. A., Tecnología de procesamiento de minerales, séptima edición, 2006.

Sitios de Internet.

Zinc Precio Mensual - Dólares americanos por tonelada métrica. Index Mundi.

<http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=zinc> (20/5/14)

<http://www.monografías.com/trabajos87/hidrociclones.shtml> (6/3/14)

<http://html.rincondelvago.com/clasificacion.html/>. (8/4/14)

<http://www.cribacero.com/hidrociclones.html>. (8/4/14)

<http://taninos.tripod.com/hidrociclon.htm>. (8/5/14)

ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1 Datos para la confección de la curva de Tromp.

Tamaño, μm	% en peso		% en peso de la alimentación		INICIAL	Tamaño nominal (media aritmética)	% de alimentación a la arena
	ARENA	REBOSO	ARENA	REBOSO			
+ 420	1.10	-	0.31	-	0.31	460.00	100.00
- 420 + 210	26.35	-	7.43	-	7.43	315.00	100.00
- 210 + 105	30.29	-	8.54	-	8.55	157.50	99.92
- 105 + 74	36.15	0.06	10.19	0.04	10.23	89.50	99.66
- 74 + 53	6.10	8.68	1.72	6.23	7.95	63.50	21.64
- 53 + 44	-	5.71	-	4.10	4.10	48.50	0.00
- 44	-	85.55	-	61.43	61.43	22.00	0.00