



 Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

 **Tema:** Evaluación de los residuos sólidos de la Empresa comandante Ernesto Che Guevara como posible electrodo en las baterías de Ni/Fe.

 Autor: Neider Silveira Pacheco

 Tutor: Ing. Daniel Alberto García Torres

 DrC. Edelio Danguillecourt Alvarez

Moa 2024

Año 66 de la Revolución



Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y
Materiales

Tema: Evaluación de los residuos sólidos de la Empresa comandante
Ernesto Che Guevara como posible electrodo en las baterías de Ni/Fe.

Autor: Neider Silveira Pacheco

Tutor: Ing. Daniel Alberto García Torres

DrC. Edelio Danguillecourt Alvarez

AGRADECIMIENTOS

Ofresco mis agradecimientos principalmente a Dios y a todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a que fuera posible la realización y culminación exitosa del Trabajo de Diploma.

A mi madre, mi padre mis hermanos, tíos, abuelos. mis tutores, amigos

A todos muchas gracias

DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico a toda mi familia, principalmente a: Mi madre Yanet Pacheco Corria y a mi padre Yunion Silveira Zamora siempre me brindaron su apoyo incondicional en mi formación como profesional. Mis hermanos

RESUMEN

En el presente trabajo basado en los antecedentes de investigaciones, caracteriza al tratamiento de los productos de la lixiviación en medio orgánico de los residuos sólidos de la Empresa Ernesto Che Guevara. A partir de la determinación de la composición química y mineralógica mediante las técnicas analíticas fluorescencia de rayos X. Dicho trabajo tiene como propósito determinar su comportamiento ante la variación de la intensidad del campo magnético. Para ello se somete a la separación magnética por vía seca, con modificación de la magnitud del campo desde 0,05 hasta 0,15 A, a tres clases granulométricas: gruesa (+0,2 mm), media (-0,2 +0,045 mm) y fina (-0,045 mm) cuya susceptibilidad se incrementa con la disminución del tamaño de las partículas, lo que demuestra el carácter ferromagnético. El hierro se concentra en el producto magnético de las clases media y gruesa a 0,05 A. En la clase fina la aplicación de un campo magnético no hace ejercer ningún efecto. Con esto es posible concentrar el níquel hasta 1,23 % a través de un esquema de beneficio propuesto.

Palabras Claves: fluorescencia, separación magnética, composición química, campo magnético

SUMMARY

In the present work, based on the research background, it characterizes the treatment of the leaching products in the organic medium of the solid waste of the Ernesto Che Guevara Company. Based on the determination of the chemical and mineralogical composition using X-ray fluorescence analytical techniques. The purpose of this work is to determine its behavior when the intensity of the magnetic field varies. To do this, it is subjected to dry magnetic separation, with modification of the field magnitude from 0.05 to 0.15 A, to three granulometric classes: coarse (+0.2 mm), medium (-0.2 + 0.045 mm) and fine (-0.045 mm) whose susceptibility increases with the decrease in particle size, which demonstrates the ferromagnetic character. The iron is concentrated in the magnetic product of the medium and coarse classes at 0.05 A. In the fine class the application of a magnetic field does not exert any effect. With this, it is possible to concentrate nickel up to 1.23% through a proposed beneficiation scheme.

Keyword: fluorescence, magnetic separation, chemical composition, magnetic field

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	V
SUMMARY	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1 Reseña Histórica de las baterías de Ni-Fe	4
1.2 Fundamentosde alguns métodos de concentración del hierro	6
1.2.1 Esencia del método de separación magnética	7
1.2.2 Fundamentos teóricos del método de separación magnética	8
1.2.3 Separación a baja intensidad del campo magnético	8
1.3 Antecedentes o estado actual del arte en cuanto al estudio y obtención de concentrados de hierro	8
1.4 Revisión de la Literatura, en cuanto a las fases de hierro en las Colas del Proceso (CARON)	10
1.4.1 Composición mineralogica	10
1.4.2 Composición química de las colas	11
1.4.3 Composición granulométrica de las colas	12
1.4.5 Características físicas	12
Conclusiones del Capitulo 1	14
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	15
2.1 Materiales	15
2.2.1 Colas del Proceso (CARON)	15
2.2.2 Análisis químico por el método de fluorescencia de rayos X (FRX).	16
2.2.4 Equipos y técnicas empleadas en la caracterización de las colas	17
2.2.5 Procedimiento de separación magnética	22

2.2.6 Descripción de la instalación para la separación magnética	22
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	27
3.1 Introducción	27
3.2 Caracterización de las Fases de Hierro	27
3.2.1. Composición granulométrica	28
3.2.2. Análisis granulométrico	29
3.3 Análisis de la separación granulométrica	30
3.3.1. Resultados de la separación magnética	32
3.3.2. Análisis de las salidas según los campos magnéticos aplicados	34
3.4. Propuesta de un esquema para el tratamiento de las colas	36
3.5. Análisis preliminar del impacto ambiental	37
3.6. Planteamiento de un esquema para el análisis de la beneficiabilidad y obtención de hierro a partir de las colas rojas.	38
CONCLUSIONES GENERALES	39
RECOMENDACIONES	39
Bibliografía	40
ANEXOS	42

INTRODUCCIÓN

Las industrias metalúrgicas cubanas localizadas en la región de Moa, Holguín se encargan de la producción de níquel más cobalto. En la actualidad se cuenta con dos, una cubana: comandante Ernesto Che Guevara con tecnología Carbonato Amoniacal (CARON) y una mixta comandante Pedro Sotto Alba, esta con lixiviación asida a presión (HPAL).

Estas fábricas hoy en día procesan gran cantidad de mineral con el objetivo de conseguir un concentrado mixto listo para exportación. Al igual que muchas de las industrias en este momento, al procesar minerales para obtener un producto o semiproducto, genera residuos (sólidos o líquidos) en dependencia de la tecnología, estas piltrafas en su mayoría pueden ser aprovechadas.

Estas empresas en particular originan grandes volúmenes de desechos sólidos, con grandes oportunidades a ser utilizados con fines tales como obtención de acero, extracción de minerales raros, construcción de carreteras, grava para la construcción entre otros.

Algunos investigadores de la universidad Drc. Antonio Núñez Jiménez asociados con el estudio de los residuos sólidos han estado encaminados en la verosimilitud del trabajo en cuanto a estas grandes masas de piltrafa, por lo que en estudios se ha podido evaluar la posibilidad de sintetizar electrodos de hierro a partir de estos desechos con el objetivo de poderlos utilizar en las baterías recargables de Ni-Fe.

No es un secreto que con el transcurso de los años el uso de los combustibles fósiles ha ido en ascenso y con este incremento del preciado recurso la disminución en los yacimientos, por lo que con el objetivo de implementar nueva vía y usar en menos medida combustibles fósiles, además de intensificar otros medios como son las baterías recargables, los investigadores del centro de estudio del níquel por sus siglas CEDINIQ con algunos profesores de la universidad trabajan en el desarrollo de esta vía y así contribuir al crecimiento de nuestro país y de igual forma cuidar el medio ambiente teniendo como premisa que con el uso de baterías recargables disminuiría en gran manera los gases contaminantes a la atmósfera.

Es bueno que tengamos en cuenta que para el Grupo Empresarial Cubaníquel la producción de colas por las industrias de níquel cubana con alto contenido de hierro y metales pesados, por más de 50 años, constituye uno de los problemas de mayor impacto ambiental. Los desastres

ecológicos ocasionados por el almacenamiento de estos residuales están relacionados con la pérdida de la biodiversidad, la aceleración del proceso erosivo, la contaminación de las aguas, además que constituyen una enorme fuente de polvos en forma de aerosoles en los períodos de intensa o moderada sequía, que inciden en la calidad ambiental y de vida de la región.

Durante los períodos de lluvia son arrastradas hacia el mar las partículas finas del residual, lo que provoca la contaminación del ecosistema costero aledaño a los depósitos, estimulando que cada día sean mayores las preocupaciones por la solución de los problemas ambientales generados.

La creatividad de los científicos y tecnólogos cubanos en función de desarrollar alternativas tecnológicas que aminoren estas grandes acumulaciones de residuales y por ende que mitiguen el deterioro ambiental; constituye una necesidad imperiosa para la disposición y uso de los residuales sólidos de las industrias de níquel cubana.

Por lo que, el estudio de las facies mineralógicas de estas colas darían la posibilidad de desarrollar y sintetizar un electrodo de hierro dada la necesidad de un uso específico, por un lado a estas colas debido a los problemas ambientales y, por otra parte, darle continuidad a la investigación relacionada con las baterías de Ni-Fe.

En la actualidad se trabajó en la síntesis de un hidróxido de níquel funcionalizado con manganeso a partir de un producto intermedio de la industria comandante Ernesto che Guevara por lo que siguiendo esa línea proponemos el uso de estos residuos como electrodo negativo en este caso (Fe (OH)) en las baterías de Ni-Fe.

La demanda de hidróxido de hierro para baterías recargables en la actualidad está en aumento debido al interés en desarrollar tecnologías de almacenamiento de energía más sostenibles y eficientes. Empresas como FormEnergy, con su enfoque en baterías de hierro-aire, están impulsando esta demanda al crear soluciones de almacenamiento de energía duraderas y escalables basadas en hierro, un material abundante y económico. Estas baterías pueden almacenar electricidad durante períodos prolongados, lo que las hace ideales para aplicaciones estacionarias. Además, se ha observado un impulso hacia el desarrollo de tecnologías alternativas a las baterías de iones de litio, como las baterías de zinc-aire recargables, que también utilizan componentes más recomendables y ofrecen densidades de energía competitivas.

Este enfoque en la innovación de materiales más baratos y sostenibles para baterías refleja la necesidad de reducir costos y mejorar la autonomía de los dispositivos eléctricos y el almacenamiento de energía. En resumen, la demanda de hidróxido de hierro y otros materiales para baterías recargables está creciendo a medida que se busca mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las tecnologías de almacenamiento de energía en la actualidad. Por tanto, **Situación problemática:** Insuficiente conocimiento de las principales fases de hierro y su comportamiento químico en las colas procedente del proceso (CARON) para su utilización como electrodo en sistemas de almacenamiento de energía.

Objeto de estudio: Residuos sólidos de la empresa productora de níquel más cobalto comandante Ernesto Che Guevara.

Campo de acción: Evaluar el comportamiento de las principales fases de hierro presentes en las colas para la obtención de hidróxido de hierro

Objetivo general:

- Caracterizar las principales fases de hierro presentes en las colas procedentes del proceso (CARON).
- Estudiar el comportamiento químico de las diferentes fases de hierro como este serviría podría ser empleado como electrodos en sistemas de almacenamiento de energía.

Objetivos específicos

- Identificar las diferentes fases de hierro presentes en las colas mediante técnicas analíticas hechas en trabajos anteriores.
- Determinar la composición química y la estructura cristalina de las diferentes fases de hierro.
- Exponer los resultados mediante análisis bibliográficos que permitan confiabilizar el trabajo con estas colas

Hipótesis: Si se determinan las fases de hierro presentes en las colas del proceso (CARON) podremos analizar la factibilidad del uso de estas y por consiguiente obtener un resultado que permita desarrollar una metodología para un posterior desarrollo de una instalación para el concentrado de hierro, con el fin de ser utilizado en las baterías de Ni/Fe.

CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

Nuestro país está apostando por incrementar el aprovechamiento de la energía renovable, sobre todo la producida por la biomasa, eólica y fotovoltaica. En pos de ello, se requiere de bancos de baterías recargables para el almacenamiento de la energía obtenida.

Por lo que, en el desarrollo de esta investigación expondremos toda una serie de datos bibliográfica en cuanto al constituyente de las colas de los procesos metalúrgico de la región de Moa así como las principales fases contenidas en estas, teniendo en cuenta que nuestra inclinación está en la caracterización del hierro y como a través de la extracción y posterior síntesis obtenemos un electrodo con características que permita su uso en los acumuladores Ni-Fe.

El capítulo estarán las evidencia de toda una búsqueda bibliográfica en cuanto a la reseña histórica de las baterías de Ni-Fe, ventajas y desventajas de estas además de los fundamentos de algunos métodos de aglomeración del hierro, investigaciones donde se han podido obtener concentrados de este y por último caracterizar las colas en cuanto a la información de estudios precedentes.

1.1 Reseña Histórica de las baterías de Ni-Fe

Orígenes y primeros desarrollos:

Las baterías de níquel-hierro, también conocidas como baterías alcalinas de níquel-hierro, fueron inventadas a finales del siglo XIX por el ingeniero sueco Ernst Waldemar Jungner. Jungner patentó la tecnología por primera vez en 1899 después de años de investigación y experimentación (David, 2019)

La batería Ni-Fe utiliza un ánodo de hierro metálico y un cátodo de hidróxido de níquel, con un electrolito alcalino de hidróxido de potasio. Este diseño proporciona características únicas a la batería, como una larga vida útil, seguridad inherente y robustez. Las primeras aplicaciones de estas baterías fueron en sistemas de alimentación eléctrica para estaciones remotas, faros y aplicaciones similares a principios del siglo XX. (David, 2019).

Popularización y uso en el siglo XX:

Thomas Edison desempeñó un papel clave en la popularización y la comercialización a gran escala de las baterías Ni-Fe a partir de 1901. Edison realizó mejoras significativas en el diseño y los procesos de fabricación, lo que contribuyó a su adopción generalizada.

Durante la primera mitad del siglo XX, las baterías Ni-Fe se utilizaron ampliamente en una variedad de aplicaciones, como vehículos eléctricos, trenes eléctricos, sistemas de respaldo de energía y aplicaciones

industriales. Fueron particularmente populares en la Unión Soviética, donde se utilizaron extensamente en ferrocarriles, vehículos eléctricos e instalaciones militares.

Compañías como Edison Storage Battery Company, Willard Storage Battery Company y otras fabricaron y comercializaron baterías Ni-Fe durante décadas, convirtiéndolas en una opción común para muchas aplicaciones que requerían una larga duración y fiabilidad (David, 2019)

Declive y uso actual:

A partir de la segunda mitad del siglo XX, las baterías de iones de litio y otras tecnologías más avanzadas comenzaron a reemplazar gradualmente a las baterías Ni-Fe en muchas aplicaciones. Esto se debió principalmente a la mayor densidad de energía y eficiencia de las nuevas tecnologías, así como a los avances en miniaturización y portabilidad (David, 2019).

Hoy en día, el uso de baterías Ni-Fe se ha reducido significativamente, pero siguen siendo utilizadas en nichos especializados que aprovechan sus fortalezas, como sistemas de respaldo de energía y algunas aplicaciones industriales. Varias empresas continúan fabricando y comercializando baterías Ni-Fe a pequeña escala, principalmente para mercados de nicho (David, 2019)

Ventajas y desventajas de las baterías Ni-Fe

Ventajas:

- Seguridad: Las baterías Ni-Fe son muy seguras y resistentes al sobrecalentamiento o a la explosión, incluso bajo condiciones extremas.
- Durabilidad: Tienen una vida útil muy larga, pudiendo durar hasta 40-50 años con un mantenimiento adecuado.
- Bajo costo de mantenimiento: Requieren poco mantenimiento en comparación con otros tipos de baterías.
- Resistencia a altas temperaturas: Pueden funcionar bien en climas cálidos sin perder capacidad.
- Reciclables: Los materiales utilizados en las baterías Ni-Fe, como el níquel y el hierro, se pueden reciclar fácilmente.
- Tolerancia a la sobrecarga y a la descarga completa sin daños.
- Funcionan bien en entornos con polvo, suciedad y vibración.
- No requieren un sistema de refrigeración.
- Pueden aceptar sobrecargas temporales sin problema.

Desventajas:

- Baja densidad energética: Tienen una densidad de energía más baja que otras tecnologías de baterías, lo que las hace más voluminosas y pesadas.
- Baja eficiencia carga/descarga: Tienen una eficiencia de carga y descarga relativamente baja, típicamente del 60-70%.
- Autodescarga lenta: Sufren de una tasa de autodescarga más alta que otras baterías, lo que requiere recargas más frecuentes.
- Costo inicial más alto: El costo inicial de las baterías Ni-Fe es mayor que el de otras tecnologías como las de plomo-ácido. Mayor peso y volumen en comparación con otras tecnologías.
- Tiempo de carga más lento, típicamente de 8-16 horas.
- Sensibles a la contaminación por gases ácidos.

En resumen, las baterías Ni-Fe son robustas, seguras y duraderas, pero tienen algunas desventajas como menor densidad energética y eficiencia, lo que las hace más adecuadas para aplicaciones que requieren alta confiabilidad y larga vida útil en lugar de alta densidad de energía (David, 2019).

1.2 Fundamentos de algunos métodos de concentración del hierro

Referente a la obtención de concentrados más ricos en hierro, muchos han sido los métodos de trabajo, sin embargo, algunas de estas podríamos tener en cuenta:

- Variación en el esquema de separación magnética.
- Utilización de la flotación.
- Separación gravimétrica.

Como resultado se obtiene que el método más utilizado y a su vez más apropiado es la separación magnética. Por el método de flotación no se puede obtener un concentrado final con altos contenidos de hierro (Breffe, 2012).

Por el método de separación gravimétrica los resultados no justifican la aplicación del método de beneficio como una vía para el tratamiento de estos residuales y la recuperación de los valores metálicos contenidos en ellos (Batista, 2016).

Por lo que analizaremos la separación magnética y los fundamentos de esta como posible vía de obtención de hidróxido de hierro listo para posteriores pruebas electroquímicas, además de que será un punto de partida para trabajar las colas del proceso CARON.

1.2.1 Esencia del método de separación magnética

Para la separación de las partículas magnéticas y amagnéticas, la fuerza magnética de atracción f'_{mag} (figura 1), que actúa sobre las partículas magnéticas debe superar a la resultante de todas las fuerzas mecánicas $\sum f'_{mec}$ (incluye 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:

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

Dentro de las fuerzas mecánicas, también se puede mencionar: el peso de las partículas, la fuerza higroscópica del agua (en caso de que se realice el proceso por vía húmeda), la densidad de las partículas, el tamaño, entre otras. La desigualdad de dichas fuerzas y la magnética es la que permite la separación de las partículas. Conocido que la fuerza magnética se determina por la susceptibilidad magnética (X) de los minerales y la intensidad del campo (H), entonces la ecuación quedaría de la manera siguiente:

$$F_{mag} = X \cdot H \quad \text{grad} \cdot H \quad 10^5$$

Por la ecuación se deduce que ambos parámetros (X y H) son proporcionales a la fuerza magnética, por lo que al aumentar la susceptibilidad magnética y la intensidad del campo hay mayor fuerza magnética (Pupo, 2011).

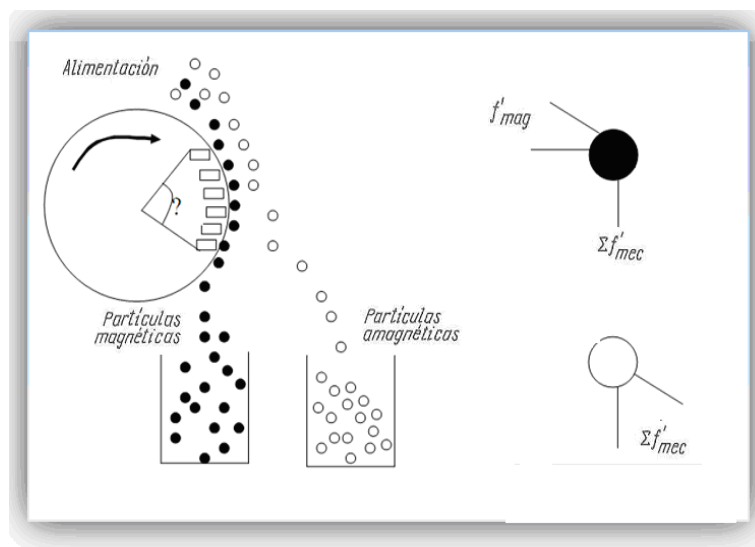


Figura 1. Separación magnética a baja intensidad del campo magnético.

1.2.2 Fundamentos teóricos del método de separación magnética

El método magnético de enriquecimiento de los minerales está basado en la utilización de la variedad de las propiedades magnéticas de los componentes del mineral o material que se someten a la separación. El enriquecimiento magnético se realiza en separadores magnéticos, la particularidad característica de los cuales es la existencia de un campo magnético en su zona de trabajo. Al moverse el mineral o material 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, lo que permite separar las partículas magnética en un producto magnético separado, y las partículas amagnéticas en un producto amagnético separado (Pupo, 2011).

1.2.3 Separación a baja intensidad del campo magnético

El campo magnético es un estado especial de la materia y se revela alrededor de los conductores con corriente eléctrica o alrededor de los imanes permanentes. En este último caso el campo magnético está condicionado por las corrientes eléctricas elementales que existen en el imán que puede ser regulada según la intensidad del campo requerida.

La separación magnética a baja intensidad del campo, es el proceso que se utiliza para separar fundamentalmente especies ferromagnéticas o paramagnéticas, de las especies diamagnéticas (Brefe, 2012).

1.3 Antecedentes o estado actual del arte en cuanto al estudio y obtención de concentrados de hierro

Teniendo como partida estudios bibliográficos sobre las caracterización minearlogica de las colas del proceso CARON, expondremos en un estudio minusioso las diferentes perpectivas de uso de estas colas y algunos de los procedimientos de obtención de estos.

Las primeras referencias de trabajos realizados con el objetivo de aprovechar las colas en forma de un concentrado de hierro aparecen en 1952 por la National Lead Company. En las investigaciones se nodulizaron las colas y se calcinaron a 900 °C, los nódulos se mezclaron con cisco de coque y carbonato de calcio y se calentaron hasta 1150 °C, se enfriaron, trituraron y se le realizó separación magnética seca, obteniendo un producto magnético con 71,2 % de hierro y recuperación del 83,4 %, un procedimiento similar se realizó con mezcla 1:1 de colas y mineral de hierro de baja ley para obtener un producto magnético con 91,1 % de hierro y recuperación del 73,9 % (Kowalski, 1953).

En 1961 el Instituto Mejanoobr de Leningrado en sus estudios de obtención de las mejoreas vías para obtener un concentrado de hierro y teniendo como objetiv principal la determinación de las características de concentración de una muestra de cola de la planta de Nicaro para determinar un flujo de beneficio adecuado con vistas a la proyección de una planta a escala piloto para la producción de concentrado de hierro. Se

determinó que la vía idónea para el beneficio de las colas es la separación magnética húmeda a baja intensidad de campo magnético (Brefe, 2012).

En este estudio se obtuvo un concentrado con 58,1 % de hierro, que según su composición química es apto para la utilización siderúrgica y se recomendó un esquema de beneficio de las colas para una prueba de concentración semi-industrial. El principio del esquema de beneficio propuesto es una separación magnética, seguida por operaciones de limpieza del concentrado y control del rechazo para la recuperación de las pérdidas de hierro que se arrastran junto con este último (Herrera, 1961).

De 1976 a 1977, en México, se realizaron pruebas complementarias a escala de planta piloto, con el objetivo de determinar los índices de beneficios de las colas tomadas del depósito y su comparación con los índices de las pruebas anteriores (ya estimadas). La separación magnética húmeda se realizó en un tambor con intensidad del campo magnético variable. Se lograron resultados satisfactorios, ya que el rendimiento del concentrado y la recuperación del hierro confirmó los datos de las investigaciones en Mejanobr de 1961 a 1962, no obstante el contenido de hierro fue más bajo, 55,2 %. De los resultados obtenidos se recomendó la separación magnética de las colas para mayor escala con mayor intensidad del campo magnético, o sea, más de 95 kA/m, con sus respectivos relavados del concentrado. Esta recomendación fue confirmada por los trabajos en la planta piloto de beneficio, en Nicaro (Brefe, 2012).

López &Carthy (1988) proponen un esquema de beneficio para las colas de Nicaro, en el que se combinan la separación magnética por vía húmeda con la sedimentación, a través de las cuales se obtiene un concentrado de hierro de 55,7% con un rendimiento de 63,6 %. En el mismo definen que los factores que influyen en la separación magnética están: velocidad de rotación del tambor, intensidad del campo magnético, densidad de la pulpa y altura del baño. Se plantea además que una deslamación previa y posterior a la separación magnética, permite incrementar el contenido de hierro en el concentrado (Batista, 2016).

En el 1983 se demostró la posibilidad de obtener pellets calcinados autofundentes de un residual industrial del proceso de obtención de níquel en Cuba a partir de minerales de origen laterítico (Colas de Moa) (Suwardjo, 1983). La síntesis de la tecnología es como sigue: desulfuración, tostación magnetizante, separación magnética húmeda y obtención de un concentrado de hierro con ley superior al 60 %. Los resultados son aceptables con relación a las propiedades metalúrgicas de los pellets, como elemento desfavorable se considera el rechazo de la separación magnética que originaría otro dique de colas. Los pellets calcinados obtenidos cumplen con las propiedades metalúrgicas normadas con la adición de cal como aglutinante, escorificante y desulfurante (BÁRCENAS, 2015).

Rodríguez (2004) a partir de la lixiviación ácida reductora (con dióxido de azufre y ácido sulfúrico) de las colas de la planta niquelífera “Comandante Ernesto CheGuevara”, se trazó como objetivo principal

determinar los parámetros que permiten obtener, con buenos índices de extracción, un licor de sulfato ferroso y de otros metales (níquel y cobalto), para ser utilizado posteriormente en el procesamiento de los nódulos marinos polimetálicos. Como resultado del trabajo se obtuvo, que al lixiviar las colas “amoniacales” en un medio ácido reductor y condiciones atmosféricas, es posible lograr altas extracciones del hierro, níquel y cobalto y obtener un licor de sulfato ferroso con una concentración relativamente alta de hierro 2+ (agente reductor de posible uso en la lixiviación de los nódulos marinos). La investigación se restringe a obtener un reactivo para utilizarlo en otro proceso, y no para extraer por separado algún elemento de interés; lo que lo hace muy costoso y prolongado (Brefe, 2012).

1.4 Revisión de la Literatura, en cuanto a las fases de hierro en las Colas del Proceso (CARON)

Dado las numerosas investigaciones ya sea de la universidad Dr. C. Antonio Nuñez Jiménez u otros vinculados a el estudio de las colas como es el caso de el CEDINIQ. Estos en determinados análisis han podido demostrar por diferentes vías las composiciones mineralógicas, químicas, granulométrica y características físicas de estos residuos sólidos teniendo algunos datos tales como:

1.4.1 Composición mineralógica

Turro (2002-2003), Peña (2010), Hernández (2011) y otros, estudiaron mineralógicamente las colas producidas por la tecnología carbonato amoniacal de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, y confirmaron cuales fases mineralógicas están presentes en la materia prima. El análisis realizado en el 2010 por difracción de rayos X (DR-X) a las colas para cada fase se relaciona en la Tabla 1:

Tabla 1 Composición mineralógica

Fase mineralógica	Formula	Contenido %
Magnetita	$FeO \cdot Fe_3O_4$	51,20
Cromita	$(Fe,Mg)O \cdot (Cr,Al)_2O_3$	8,20
Forsterita	$2(Mg_{0,96}Fe_{0,04})O \cdot SiO_2$	25,10
Andalucita	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	4,80
Fase desconocida	Fe Si mineral	8,00

La magnetita es la fase mineral principal que compone estas colas, con un patrón difractométrico bien definido, es la predominante en todas las muestras analizadas.

La cola constituye un material de color negro muy magnético, brillo semimetálico y se caracteriza por una granulometría fina, menor de 325 mesh, lo que concuerda con los resultados de (Ponce, 1979), donde expone

que casi toda la fracción menor de 63 micrones representa el 74,28 % en peso, predominando el material magnético (Pupo, 2011).

Ya Sobol en 1968 la había detectado al realizar un estudio sobre la pulpa laterítica en el proceso de lixiviación ácida a presión, registrándola como una fase metaestable, colector de algunos metales como el níquel $2+$ y cobalto $2+$ para alcanzar mayor estabilidad cristalina, es una fase isoestructural con magnetita y cromoespinelas pero más propia para los ambientes oxidantes, pH próximo a 7 y a 298 K, como lo exponen (Taylor y Schwertmann, 1974 a y b), en suelos lateríticos.

La maghemita es una fase más propicia en los horizontes superiores de los perfiles lateríticos que la magnetita, pues constituye una de las formas mineralógicas del hierro (Taylor & Schwertmann, 1974), en su proceso de formación a fases de oxihidróxidos de hierro, como la goethita (FeOOH) y ferrihidrita para estos ambientes tropicales húmedos de la región de Moa, a partir de un sustrato de rocas ultrabásicas y básicas.

Por la maghemita ser la fase predominante en todas las muestras analizadas y tener la propiedad de ser muy magnética es conveniente realizar la separación magnética debido a la gran cantidad de hierro presente en la misma. Por otra parte, se debe ser cuidadoso en la separación de estas colas, ya que junto con esta fase mineralógica se van otras fases como la trevorita, forsterita, donathita, entre otras que presentan hierro en su estructura. Además parte del níquel y cobalto que están en la red cristalina de estas fases pasarían a la fracción magnética, influyendo en el producto final a obtenerse (Pupo, 2011).

1.4.2 Composición química de las colas

En la composición química de la muestra inicial de colas (Tabla 2), se observa que el elemento mayoritario es el hierro; de ahí las altas propiedades magnéticas que posee, ya que su fase fundamental es la maghemita-magnetita (Rojas y Turro 2003). Posee, además, contenidos apreciables de metales de gran valor como el SiO_2 , Al, Mg, Cr, y Ni.

En la composición química de la muestra inicial de colas (Tabla 1) se observa que el elemento mayoritario es el hierro; de ahí las altas propiedades magnéticas que posee, ya que su fase fundamental es la maghemita-magnetita metales de gran valor como el SiO_2 , Al, Mg, Cr, y Ni. Tales resultados coinciden con lo reportado en trabajos precedentes (Brefé, 2012).

Tabla 2: Composición química de las colas

Elementos	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Al	Cr	Zn	Cu	SiO_2
Contenido %	0,35	0,06	43,59	0,64	3,55	5,39	2,84	0,02	0,01	9,99

1.4.3 Composición granulométrica de las colas

Se utilizaron para este estudio los resultados granulométricos obtenidos por Rojas - Purón & Turro - Breffe (2003) para las colas del proceso amoniacal de la EECG, usando los tamices: 0,175 mm; 0,147 mm; 0,074 mm y 0,044 mm. Los referidos autores definen tres grupos granulométricos, en los que predomina, con un 66 % en peso de la muestra, una fracción muy fina (menor a 0,044 mm). Alrededor del 3 % lo componen partículas gruesas, entre 0,147 y 0,175 mm y el resto son partículas entre 0,044 y 0,147 mm. Estos datos apuntan a que las colas derivadas del proceso carbonatoamoniacal tienen una granulometría esencialmente fina, lo cual concuerda con los resultados de Ponce (1979) para las colas de la empresa René Ramos Latour, de Nicaro, que utilizaba esta misma tecnología (Torres, 2013).

En cuanto a su porosidad el análisis pignométrico de las colas (Peláez, 2002) revela que esta posee un 42,50 % de poros y una humedad molecular capilar de 42,40 %, debido a que en los hornos de reducción la hematita (fase ferrosa fundamental) se reduce a magnetita. Producto de esta reducción escapa del mineral parte del oxígeno contenido dejando pequeños poros en los granos de magnetita, lo que provoca una configuración esponjosa en los granos (Fernández, 2011).

1.4.5 Características físicas

Este residual es un material de color negro, muy magnético, brillo semimetálico y se caracteriza por una granulometría fina. La clasificación granulométrica realizada a muestras estudiadas demuestra que forman sistemas polidispersos, siendo las partículas de tamaño inferior a 0,043 mm las mayoritarias, y constituyen alrededor del 65,9 % en peso de la fase sólida en las muestras, lo cual se ilustra en la tabla 3 (Brecht, Puyans, & Pupo., 2003). Las clases granulométricas que se encuentran entre +0,043 y -0,175 mm constituyen alrededor de un 25,52 % y la clase granulométrica + 0,175, más gruesa, el 8,59 % en peso de la muestra (Fernández, 2011).

Tabla 3. Análisis granulométrico de las colas de mineral a partir de muestras de varias etapas del proceso de lixiviación (Brecht, Puyans, & Pupo., 2003)

Clase tamaño (mm)	Diámetro medio (mm)	Fracción peso %			
		R1	R2	R3	R4
0.175	0.20	10.00	8.80	7.50	8.00
-0.175 +0.147	0.16	2.00	2.75	2.70	2.80
-0.147 +0.074	0.11	14.80	11.09	10.16	12.00

-0.074	+0.043	0.059	11.95	9.51	10.72	11.00
-0.043		0.022	60.65	67.85	68.92	66.20
Total			100	100	100	100

Conclusiones del Capítulo 1

El análisis bibliográfico permitió conocer aspectos generales de la caracterización y utilización del residuo sólido de la tecnología carbonato amoniacal. A partir de las literaturas consultadas se considera insuficiente el conocimiento que existe sobre la perspectiva tecnológica que se tiene en cuanto al aprovechamiento de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal, el empleo de esquemas combinados de beneficio químico y físico para la recuperación del níquel y el cobalto y el aprovechamiento del hierro, con el fin de obtener concentrados de diferentes metales, en lo que inciden los siguientes aspectos:

- Las principales investigaciones están relacionadas con la aplicación del método de beneficio magnético para la obtención de concentrados de hierro y métodos de lixiviación ácida a presión atmosférica para la recuperación de níquel y cobalto. Pero no existe una concepción tecnológica que designe el hierro como elemento primario; y que considere el aprovechamiento de metales con valor comercial como el níquel y el cobalto.
- La lixiviación con ácidos orgánicos permite la recuperación selectiva del níquel y el cobalto y las colas residuales del proceso pueden ser beneficiadas empleando métodos físicos con vista a obtener un concentrado de hierro para la siderurgia.
- Las colas de la tecnología Caron están constituidas fundamentalmente por minerales fuertemente magnéticos, con diferencias en la composición mineralógica entre las colas de Nicaro y las de Moa.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Tras el desarrollo y búsqueda de las bibliografías necesarias para la investigación propuesta (estudio del hierro como electrodo en baterías de Ni-Fe) damos paso a los materiales y métodos de la investigación sobre estudios antecedentes.

Por lo que desarrollaremos las vías utilizadas por algunos investigadores así como las caracterizaciones hechas por cada uno de ellos los equipos y métodos de trabajo.

2.1 Materiales

En el presente capítulo se describen los materiales utilizados y los métodos empleados para llevar a cabo el estudio, así como la caracterización físico-química y mineralógica de las colas negras. Los cuales se realizaron sobre las bases de la tesis de maestría de (Fernández, 2011) y tesis maestría de (Brefe, 2012). Se realizaron análisis fraccional magnético y granulométricos utilizando técnicas como difracción y fluorescencia de rayos X. Además, se utilizaron equipos como el Tamizadora digital modelo R.X.-29. La caracterización mineralógica se efectuó mediante difracción de rayos X también se empleó para la determinación de las fases minerales contenidas en la cola y en los precipitados obtenidos a partir de los licores de lixiviación. Las mediciones se realizan en un difractómetro de rayos X Phillips PW 1804 con software de identificación "Identify" mediante los cuales se obtuvieron los difractogramas. Para estos análisis se emplean la cartoteca 4-865 ASTM y el Manual de Mineralogía de Dana.

2.2.1 Colas del Proceso (CARON)

- Fuente y composición de las colas
- Preparación y tratamiento de las muestras

(Fernández, 2011) en su tesis demostró que las muestras fueron tomadas en forma de pulpa se sometieron a una sedimentación, luego a una decantación y por último se secó en la estufa durante dos horas a temperatura entre 110 y 120 °C.

La masa de muestra seleccionada se sometió a una homogeneización por el Método del Anillo y el Cono y se realizó el muestreo por la Técnica de las Redes y Puntos

Por otra parte (Brefe, 2012) utilizó el método de redes y puntos, aplicado a un sector de la presa de colas correspondiente al período 1987-1997. Las muestras fueron sometidas a una etapa de secado preliminar en una estufa a la temperatura de 100 °C, para evitar que la humedad provoque el aumento de la fuerza de adhesión mutua de las partículas finas, y lograr una buena homogeneización de la materia prima por el método del Anillo y el Cono, como se muestra en la figura 2.

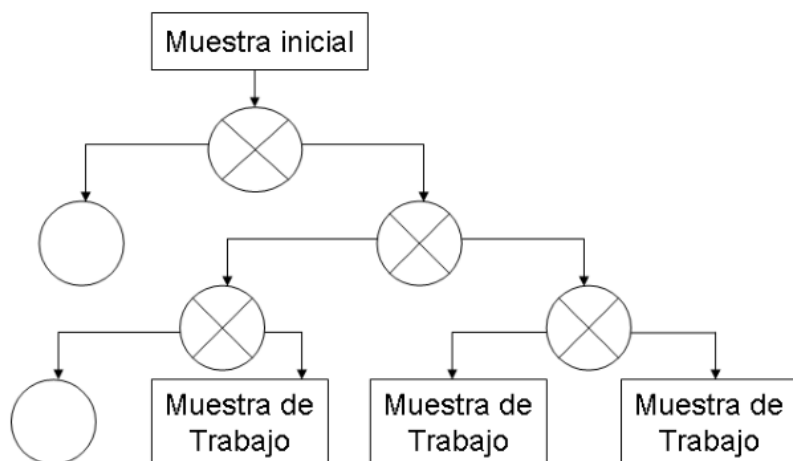


Figura 2: Procedimiento de homogeneización y cuarteo

El material utilizado es una pulpa de color negro que constituye el desecho de la planta de Lixiviación y Lavado de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la que se somete a destilación para recuperar el NH_3 y CO_2 que contiene. Posee una densidad de 1600 a 1700 g/L (PEÑA, 2011).

El sólido contenido en estas colas está constituido por mineral reducido, cuya densidad real es de 3,80 t/m³. Posee un predominio de las partículas finas, ya que el 60 % de ellas está por debajo de los 44 μm ; y una porosidad de 42,50 %, lo que le da la propiedad elevada de susceptibilidad magnética, debido a que la porosidad se logra precisamente en la formación de la Magnetita en los procesos tecnológicos de las Plantas de Reducción y Lixiviación.

La composición química promedio (en %) del material es la siguiente:

Ni = 0,36; Co = 0,09; Fe = 43,09; Cu = 0,01; Zn = 0,03; Mn = 0,64; Mg = 4,06; Cr = 3,04; Al = 8,00 y SiO_2 = 15,82.

Y su composición mineralógica cualitativa y cuantitativa (en %) dadas por Rojas & Turro (2003) está constituida por las siguientes fases:

Fayalita $[(\text{Fe Mg})_2(\text{SiO}_4)]$ = 11,84; Maghemita $[\sigma\text{-Fe}_2\text{O}_3]$ = 37,64; Cromoespinelas $[(\text{Mg Fe}) \text{Cr}_2\text{O}_3]$ = 6,92; Magnetita $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ = 42,67 y Cuarzo $[\text{SiO}_2]$ = 0,90.

2.2.2 Análisis químico por el método de fluorescencia de rayos X (FRX).

Este método fue empleado para determinar la composición química cualitativa de la muestra de cola utilizada en los experimentos. Consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal

emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento, y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad. Mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos relacionándolos con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo.

2.2.4 Equipos y técnicas empleadas en la caracterización de las colas

(Fernández, 2011) realizó el análisis de la composición granulométrica de las colas fue llevado a cabo usando un granulómetro laser Modelo 715 CILAS.



Figura. 3: Granulómetro Laser, Modelo 715” CILAS

El método es exacto para diámetros de partículas pequeños, permite obtener la distribución sumaria por clases de tamaño y el tamaño de partículas predominantes en la muestra analizada. Los datos se registran en el equipo y se obtienen las curvas de cernido y retenido.

Para el análisis químico fraccional se realizó una separación húmeda por clases de tamaño para evitar la aglomeración de las partículas más finas, usando una tamizadora digital, modelo HAVER EML 200-89, con juegos de tamices según la serie de Tyler.

También realiza lixiviación por percolación con ácidos orgánicos se realizaron con 65 g de muestra de cola y 4 L de solución a las concentraciones que aparecen en la tabla 4, durante cinco días. Se tomaron muestras cada 24 horas para su análisis químico.

Tabla 4: Diseño experimental para la lixiviación por percolación con ácidos orgánicos.

No. experimento	Agente Lixivante	Concentración de ácido (mol/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de recirculación (mL/min)
1	Ácido Tartárico	0,15	20	10
2	Mezcla de Ácidos Oxálico-Tartárico	0,05 – 0,15	20	10

La instalación usada para los experimentos de lixiviación por percolación se muestra en la figura 4.



Figura.4: Instalación para la lixiviación con ácidos orgánicos.

Se emplearon dos columnas de acrílico con diámetro de 8 cm y una altura de 30 cm. En la parte inferior de cada columna se depositaron dos capas de vidrio triturado, primero 200 g con un tamaño mayor de 2,5 mm y luego 300 g con un tamaño entre 0,63 y 2,5 mm, para su preparación se empleó el triturador que se muestra en la figura 5:



Figura.5: Triturador empleado para preparar el material inerte.

Se tomaron 65 g de muestra de cola y se mezclaron y homogenizaron manualmente en una relación 1:1 con vidrio de tamaño entre 0,10 y 0,63 mm para incrementar la porosidad e impedir la compactación de la cola húmeda; al mismo tiempo facilita el acceso del agente lixivante y como consecuencia favorece el proceso de lixiviación. El material inerte se alimentó a la columna para garantizar que la cola, por su granulometría muy fina, no sea arrastrada por el flujo del agente lixivante. Posterior a la alimentación del material inerte y la muestra de cola; el agente lixivante presente en el frasco receptor de 5 L fue enviado hacia el reactor con

una bomba, la cual garantizó la recirculación constante del agente lixivante a una velocidad de 10 mL/min durante 5 días.

(Brefe, 2012) realizó una separación magnética se realizó por vía húmeda para lograr una mayor efectividad del cribado de las clases estrechas. Primeramente, se determinó la composición granulométrica con una serie de tamices seleccionados por la escala de Taylor (resultado de la división del mayor tamaño por la raíz de 2); realizado en el cuarto de preparación de muestras del CEDINIQ, con el uso de una tamizadora digital de laboratorio mostrada en la figura 5. El rango de tamices son los siguientes: 0,200; 0,150; 0,075; 0,053 y 0,038 mm.

Características del elutriador

Para el proceso se utilizó un elutriador criollo ubicado en el Laboratorio de Beneficio del ISMM, con una instalación como la que se muestra en la figura 6. Este posee las siguientes características:

Diámetro: 0,102 m; Alto: 0,8 m; Volumen: 5 L; Concentración de sólido admisible:

50 g/L.

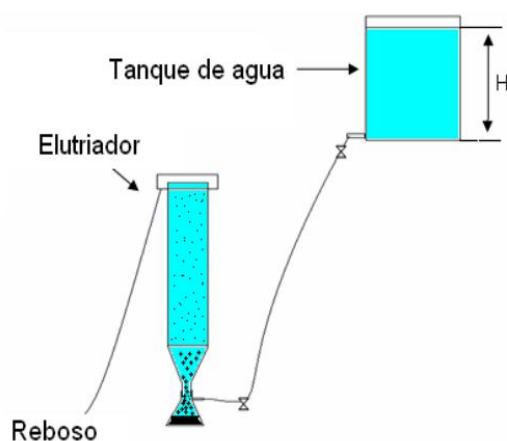


Figura 6: Esquema del proceso de elutriación.



Figura 7: Tamizadora digital modelo R.X.-29.

Como segunda operación, y para simplificar la experimentación, se dividió la muestra en tres grupos granulométricos fundamentales, de granulometría fina, media y gruesa. Para ello se seleccionaron los tamices 0,200 y 0,045 mm.

En la figura 8 se muestra el esquema de trabajo utilizado para la separación por grupos de tamaños, a los que se realiza además análisis químico.

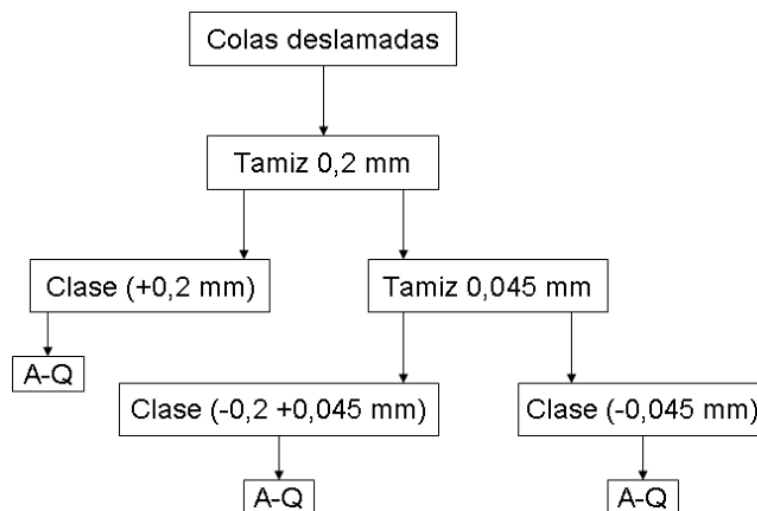


Figura 8. Esquema de flujo para el análisis granulométrico

La determinación de la susceptibilidad magnética por unidad de volumen, es un método sensitivo para detectar la presencia de cantidades traza de material magnético en las rocas y minerales. Tiene relación con el predominio de minerales ferromagnéticos (magnetita o pirrotina monoclinica) (Clark, 1999).

El estudio de la susceptibilidad magnética se realizó sobre la base de la clasificación magnética dada por (Loyola-Brefe, Beyris-Mazar, Palacios-Rodríguez, & Correa-Cala, 2014) en unidades del SI ($\times 10^{-5}$), la

que plantea lo siguiente: $> 3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ (necesidad de utilizar una intensidad del campo magnético hasta 120 kA/m); minerales fuertemente magnéticos ó ferromagnéticos.

Entre los límites de $7,5 \times 10^{-6} \geq \chi \geq 1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (necesidad de utilizar una intensidad del campo magnético de 800 a 1600 kA/m); minerales débilmente magnéticos ó paramagnéticos. $< 1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$; minerales amagnéticos.

La determinación de la susceptibilidad magnética de las colas se realizó con un Kappameter digital KT-9 modelo SAIC® Exploranium como el que se muestra en la figura 9.



Figura 9. 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: $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$;

Fuente de Alimentación: Batería única alcalina de 9 V, IEC Standard, tipo 6F22;

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).

2.2.5 Procedimiento de separación magnética

El proceso de separación magnética permite separar partículas Fuertemente magnéticas de otras débilmente magnéticas, cuando existe una notable diferencia de la susceptibilidad entre ellas (Loyola-Breffé, Beyris-Mazar, Palacios-Rodríguez, & Correa-Cala, 2014). A las colas analizadas se les aplicó el método de separación por vía seca, en un rango de la intensidad de corriente desde 0,05 hasta 0,15 A, con variación en una escala de 0,05 A como se muestra en la figura 8. A cada clase de tamaño, tanto para la muestra original como para las dos réplicas se les aplicó una intensidad del campo magnético de 0,05 A (21,03 kA/m), 0,10 A (40,33 kA/m) y 0,15 A (59,03 kA/m), como resultado se obtienen productos magnéticos (PM) y (PNM) (producto no magnéticos), a los que se realizó análisis químico.

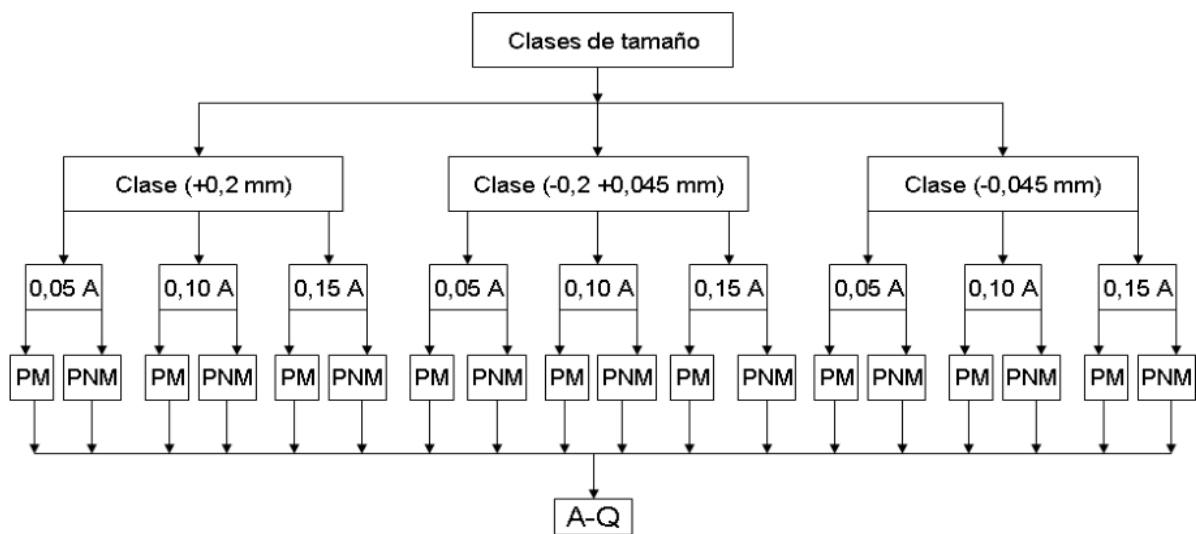


Figura10. Esquema de flujo para el análisis magnético.

2.2.6 Descripción de la instalación para la separación magnética

Para el estudio de la separación magnética de las colas, se utilizó un separador magnético por vía seca modelo ЭБС 138 Т (figura 11a), acoplado a una fuente de 36 corriente (figura 11b), dicho equipo está instalado en el Laboratorio de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

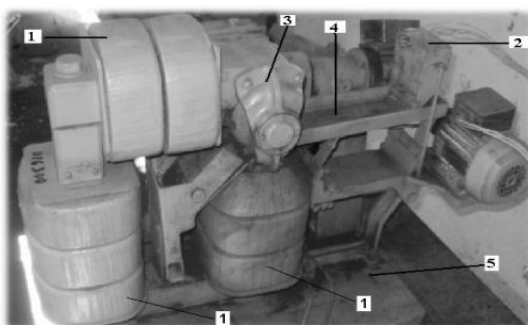


Figura 11: Equipamiento de separación magnética.

a) separador magnético ЭБС 138 Т; b) fuente de corriente

La descripción técnica del equipo se basa en las especificaciones del diseño.

Forma del diseño

El separador ЭБС 138Т cuenta con un sistema electromagnético (1), un alimentador (2), un rodillo receptor (3), una canal transportadora vibratoria (4) y una base (5) como se muestra en la figura anterior.

Objetivo y especificaciones

El separador se utiliza para la separación magnética en seco de minerales con componentes magnéticos y no magnéticos.

Tabla 5: Parametros principales

PARÁMETROS PRINCIPALES	VALORES
Tamaño máximo del mineral separado, mm	2,0
Diámetro del rodillo, mm	100
Longitud del rodillo en operación, mm	88
Velocidad del rodillo, min ⁻¹	6037

Tabla 6: Valor de la energía para el motor

Valor de la energía para el motor,	kW:
Para el rodillo	0,18
Para el alimentador	0,06

Tabla 7: Dimensiones

Dimensiones	mm
Longitud	1000
Ancho	480

Alto	570
Masa kg	190

Estufa

El secado de las muestras iniciales y de cada una de las clases de tamaño obtenidas, se realizó en una estufa de control digital modelo DH6-9146A, ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico del ISMM, la misma se muestra en la figura 12.



Figura 12: Estufa utilizada para el secado de las muestras.

Balanza

Como técnica para contabilizar la cantidad de material inicial y los productos obtenidos, se utilizó una balanza digital modelo Sartorius BS 124S mostrada en la figura 13, con una capacidad máxima de 120 g y una desviación de 1 mg.



Figura 13: Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

Conclusiones

La muestra de residuo sólido de la Empresa Ernesto Che Guevara seleccionada para ser caracterizada se considera representativa del proceso de obtención de níquel por la tecnología carbonato amoniacal.

Se tomaron como referencia los trabajos relacionados con el tratamiento de las colas en la elaboración de la propuesta de tratamiento realizada para la recuperación del níquel y el cobalto y para el aprovechamiento del residuo sólido.

Las técnicas analíticas que se emplearon fueron aplicadas en instalaciones y equipos que garantizan la confiabilidad de los resultados.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Introducción

En el estudio de las colas del proceso Carbonato Amoniacal de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa, tien gran importancia la aplicación de los métodos de beneficio, debido a que aportan la información necesaria sobre el comportamiento de los elementos, en este caso cuando se aplica la intensidad de un campo magnético variable; y con esto su aprovechamiento.

3.2 Caracterización de las Fases de Hierro

La composición química cualitativa de los elementos presentes en las colas empleadas se muestra en los espectrogramas de la figura 14, obtenidos por el método de fluorescencia de rayos X (FRX).

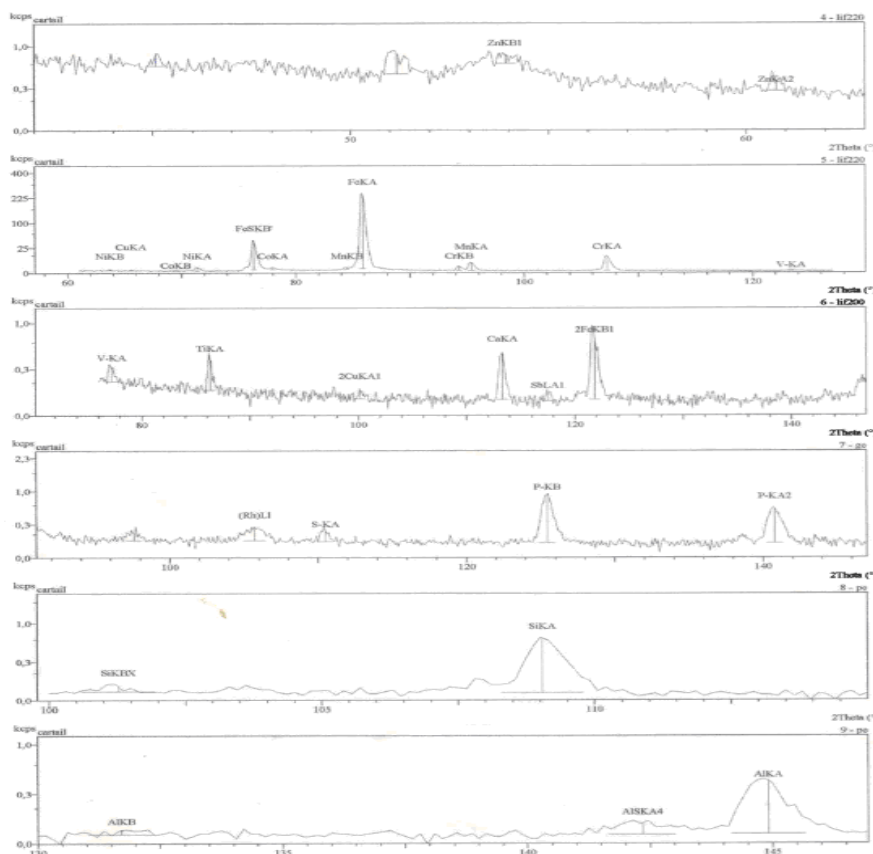


Figura.14: Espectrogramas de Fluorescencia de Rayos – X obtenidos durante la determinación de los elementos químicos presentes en las colas (Fernández, 2011).

3.2.1. Composición granulométrica

La figura 15 brinda la característica de tamaño de las colas estudiadas. Se aprecia que alrededor del 54 % de la muestra se encuentra en la fracción menor de 20 μm . Según la tabla 8 esta fracción presenta un contenido de 55 % de hierro, lo que muestra una alternativa para ser empleada como materia prima en la industria siderúrgica, tal como recomiendan varios investigadores; pero con el inconveniente que más del 50 % del níquel y el 56 % del cobalto se encuentran presentes en la misma. El proceso puede ser propuesto, si se remueve la fracción fina, siendo necesario antes recuperar de forma selectiva el níquel y el cobalto (Fernández, 2011).

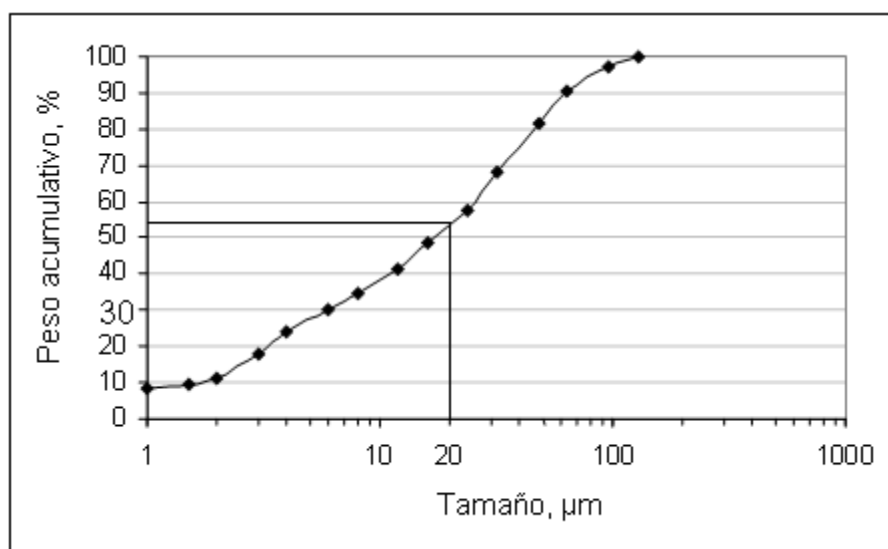


Figura.15: Característica de tamaño de las colas.

Se observa además, como el contenido de hierro disminuye con el aumento del tamaño de partícula, hasta 42,1 % para las fracciones + 60 μm .

Tabla 8: Contenido de hierro, níquel y cobalto por clases de tamaño en la muestra de cola.

Tamaño, μm	- 20		+ 20 - 40		+ 40 - 63		+ 63	
	Contenido %	Recuperación %	Contenido %	Recuperación %	Contenido %	Recuperación %	Contenido %	Recuperación %
Peso %	-	54	-	22	-	13	-	11
Fe	55,10	56,40	52,70	22,0	52,40	12,90	42,10	8,80

Ni	0,30	50,60	0,34	23,30	0,33	13,40	0,37	12,70
Co	0,08	56,40	0,06	19,50	0,06	11,50	0,08	12,50

El contenido de níquel se incrementa de forma progresiva hacia las fracciones más gruesas; comportamiento característico de estos minerales; mientras que el cobalto a pesar de ser el elemento que menor variación presenta, su contenido se modifica desde 0,08 hasta 0,06%, para las fracciones intermedias (+ 20 – 40 y + 40 – 60 μm), resultado también obtenido por (Purón, Breff, & Stroumov, 2003) (Fernández, 2011).

(Brefe, 2012). Como en toda investigación, se debe tener conocimiento de las características químicas del material objeto de estudio, para evaluar cualitativa y cuantitativamente su comportamiento ante un proceso determinado

El análisis químico fue realizado por Fluorescencia de Rayos X, cuyos resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9: Composición química inicial de las colas.

Elementos	Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	Zn	Cu	SiO ₂
Contenido, %	0,35	0,06	43,59	3,55	0,64	5,39	2,84	0,02	0,01	9,99

En la tabla se observa que los elementos metálicos que aparecen en mayores cantidades son: Fe, SiO₂, Al, Mg, Cr, y en menor cuantía Mn, Ni, Co, Zn, y Cu; resultados similares fueron obtenidos en las investigaciones de (Purón, Breff, & Stroumov, 2003) (Fernández, 2011) y (PEÑA, 2011) En tal sentido, se puede considerar las colas como un mineral de hierro que contiene más del 40% de dicho elemento; por tanto es una reserva potencial para los productores de acero. De igual manera contienen cantidades apreciables de níquel y cobalto, dado por la ineficiencia tecnológica de la planta que los procesan; lo que deja una brecha a estudiar para su posible recuperación (Brefe, 2012).

3.2.2. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la tabla 10, donde se aprecia que la clase menor de 0,038 mm representa más del 50 % de la masa total del sólido.

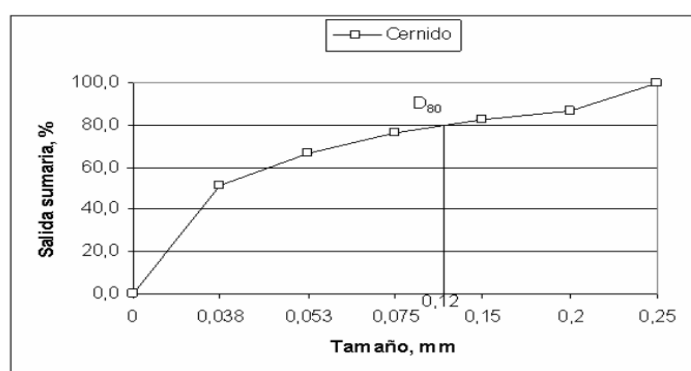
Tabla 10. Composición granulométrica de las colas.

Clases de tamaño, mm	Masa, g	Salida, %	Salida acumulativa según cernido, %
+0,200	67,09	13,41	100,00
-0,200 +0,150	20,47	4,09	86,59
-0,150 +0,075	30,84	6,17	82,50
-0,075 +0,053	49,52	9,90	76,33
-0,053 +0,038	76,67	15,35	66,43
-0,038	255,41	51,08	51,08
Total	500,00	100,00	-

Como se observa en el análisis granulométrico, la salida de la clase -0,075 mm representa el 76,33% de todo el material, lo que evidencia también una distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico de las colas estudiadas; tal aspecto corrobora los resultados alcanzados por Turro (2002), (Fernández, 2011) y (PEÑA, 2011). (Brefe, 2012)

En correspondencia con las salidas acumulativas de la tabla 10, se confeccionó la figura 16, en la que se refleja la distribución de tamaño según cernido; además se puede apreciar que el diámetro por donde pasa el 80 % del material (D80) coincide con el tamaño de las partículas 0,12 mm.

Figura 16: Característica de tamaño acumulativa según el cernido.



3.3 Análisis de la separación granulométrica

Análisis de contenidos según el tamaño de partículas

La figura 17 muestra la distribución del hierro, en la que se observa la tendencia a concentrarse en la menor clase de tamaño con promedio de 50,84 %, con una diferencia de más de % con

respecto a las clases media y gruesa. Dicho comportamiento se puede atribuir a que en los minerales que dan origen a estas colas, el hierro está en su mayor concentración en las limonitas (grupo de mena fundamental), principalmente como fase de goethita que puede llegar hasta un (Chang-Cardona, Rojas-Purón, & Arce-Molina, 2014), entre otros), y su relación con respecto a la serpentina (el otro grupo de mena) es de 3 partes por 1 del último; a ello se le suma con mayor influencia la mejor molibilidad del primer grupo con respecto al segundo (Coello Velázquez, Aguado, authority, & Brown, 2008) (Brefe, 2012).

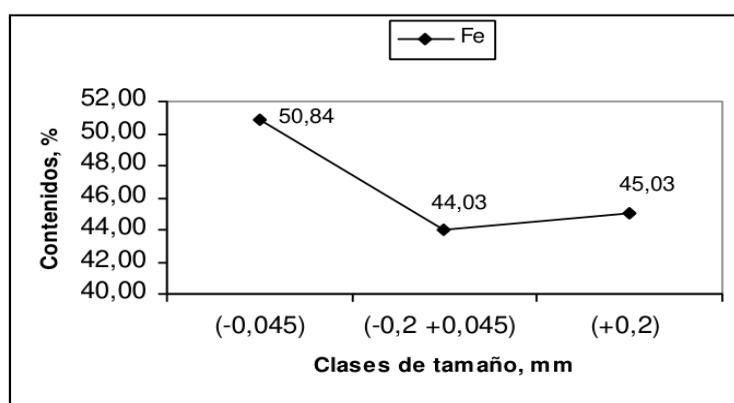


Figura 17. Contenidos de hierro por fracción granulométrica.

El níquel presenta un comportamiento contrario al hierro, en el que se observa una tendencia a incrementar su contenido hacia las clases media y gruesa, como se muestra en la figura 18.

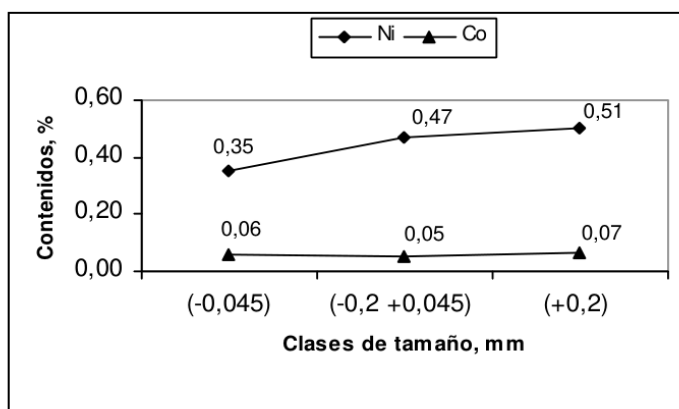


Figura 18: Contenidos de níquel y cobalto por fracción granulométrica

En la figura se observa que el níquel alcanza su máximo contenido de 0,51% en la fracción más gruesa, mientras que en la más fina es de 0,35%. Si se parte de análisis de la molibilidad de los minerales limonita y serpentina, parte del níquel 46 presente en la serpentina no logró reducirse,

ya que como está presente en un grano de mayor tamaño (Coello Velázquez, Aguado, authority, & Brown, 2008) la transformación físico-química en el horno de reducción no se pudo concretar completamente, debido a las condiciones tecnológicas de operaciones, el empeoramiento del proceso de difusión del reactivo y el tiempo de retención insuficiente para que ocurra la descomposición total del mineral en el rango de temperaturas del horno (Cardona, 1999)El cobalto por su parte posee un comportamiento estable entre 0,05 y 0,07%, con su mayor contenido en la clase de tamaño gruesa (Brefe, 2012).

3.3.1. Resultados de la separación magnética

(Fernández, 2011) Al analizar la composición química de las colas considera que este residuo como un mineral de hierro que necesita beneficiarse con vista de ser utilizado como materia prima en la industria siderúrgica, para de ésta forma sustituir importaciones y mejorar los índices técnicos-económicos del proceso de producción de aceros en Cuba.

Se realizaron pruebas de separación magnética húmeda a 95 kA/m de intensidad de campo magnético con las colas residuales de la lixiviación con ácido tartárico y mezcla de ácido oxálico y tartárico. La tabla 11 muestra los contenidos de hierro, níquel y cobalto en el producto magnético y no magnético. El resultado obtenido muestra una tendencia a enriquecer el hierro en la fracción magnética y los contenidos de níquel y cobalto se distribuyen de forma similar en ambos producto

Tabla 11: Contenido de metales en el producto magnético y no magnético de las colas lixiviadas en la percolación con ácido tartárico y mezcla de ácidos.

Elementos/Productos	Ni, %		Co, %		Fe,%	
	Magnética	No magnética	Magnética	No magnética	Magnética	No magnética
Residuos con mezcla de ácidos	0,23	0,20	0,03	0,02	49,2	20,2
Residuos con ácido tartárico	0,20	0,20	0,03	0,04	50,4	41,0

Para suministrar las colas enriquecidas en hierro a los consumidores de concentrado, primero deben conocerse las especificaciones probables, y particularmente las impurezas indeseables, de

forma que puedan establecerse los objetivos mínimos de calidad, permitiendo llegar de ser posible a un producto garantizado en el mercado.

Por otra parte (Brefe, 2012) para conocer el comportamiento magnético de las colas, se alimentaron al separador muestras de 120 g de cada grupo de tamaño (+ 0,2; -0,2 + 0,045 y - 0,045 mm) y a cada intensidad del campo (0,05; 0,10 y 0,15 A) según el esquema de la figura 8.

Como resultado se obtuvieron productos magnéticos y no magnéticos, a los que se les realizó análisis químico.

A partir de la clase media se observa una notable tendencia a la concentración de los metales, lo que se muestra más intenso para la clase gruesa. Tal comportamiento guarda relación con lo analizado en el acápite 3.3.2. El níquel por ejemplo llega a concentrarse hasta 0,87 % como promedio en el PNM (producto no magnéticos) de la clase media, con una insignificante influencia de la variación de la intensidad del campo. Para la clase gruesa su concentración es mayor, hasta valores por encima de 1,50 %, en la que si hay una influencia considerable de la intensidad del campo a medida que se incrementa, hasta alcanzar valores de 1,64 % para 0,15 A.

Desde el punto de vista mineralógico, el níquel también está presente en la serpentina, la que en el proceso de molienda queda con mayor tamaño y por tanto no logra su transformación físico-química total en la reducción, lo que ocasiona pérdidas que a la postre se depositan como colas. Además en la descomposición térmica de la serpentina se forman compuestos amorfos $[Mg_2(Si_2O_6)]$, en cuyo interior queda atrapado el níquel, y no es posible su recuperación (Cardona, 1999). Por cuanto la susceptibilidad magnética de estos minerales es pequeña, entonces su concentración es hacia el PNM (producto no magnéticos).

Por tanto, si se desea recuperar el níquel presente en las colas, entonces es recomendable utilizar un tamiz de 0,045 mm, con el cual se obtiene una clase por encima de este tamaño con un rendimiento de 49,80 %, y puede lograrse la obtención de contenidos del metal con especificaciones industriales de 1,23 % de Ni. Por su parte, el hierro manifiesta un comportamiento contrario al níquel, magnesio y silicio. En la figura 19 se observa como se concentra en los productos de las menores clases de tamaño; también guarda relación con el análisis del acápite 3.3, ya que su predominio es en las partículas finas. Al aplicar el campo magnético a las clases intermedia y gruesa, se refleja que para una intensidad de corriente de 0,05 A se puede obtener más de 50 % de hierro, con una disminución hacia los campos mayores

(anexo 1); significa que como el hierro posee una elevada susceptibilidad magnética, necesita pequeños campos para su separación; por consiguiente si se incrementa el campo, entonces pueden ser arrastradas otras partículas con menor susceptibilidad, lo que reduce la concentración del hierro en el producto magnético. Por tanto, para estas clases basta con aplicar un campo de 0,05 A para lograr las mayores concentraciones del hierro.

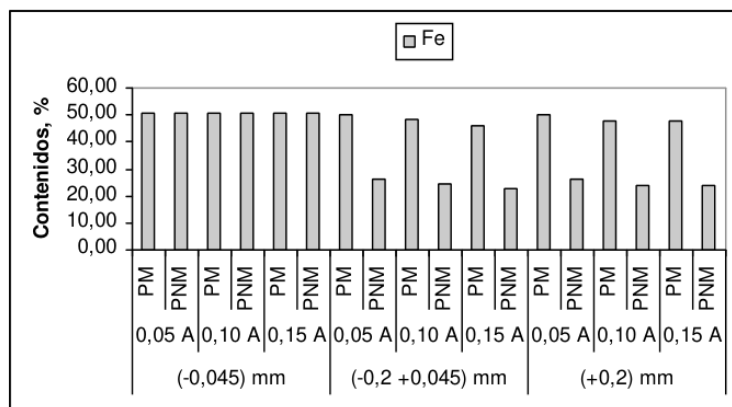


Figura 19: Comportamiento del hierro en la separación magnética.

Un comportamiento estable se manifiesta en la menor clase de tamaño, en la que se obtiene como promedio 50,83 % de hierro entre los PM (producto magnético) y los PNM (producto no magnéticos); lo que tiene su explicación en el fenómeno de floculación magnética al igual que el níquel, silicio y magnesio.

Como resultado, es afirmativo que el hierro puede ser concentrado por encima de 50 % en el producto magnético de las clases media y gruesa, solo con la aplicación de un campo magnético de 0,05 A. Sin embargo, en las partículas finas no es posible incrementar su concentración por el método de separación magnética por vía seca, ya que se obtienen concentraciones parecidas a las iniciales para la clase en cuestión.

3.3.2. Análisis de las salidas según los campos magnéticos aplicados

Gran importancia reviste el conocimiento de las salidas en la separación magnética, ya que permite visualizar la objetividad del aprovechamiento de cualquiera de los productos. En la figura 20 se observa una tendencia a aumentar la masa de los productos magnéticos, y a disminuir la de los no magnéticos en la medida que se incrementa la intensidad del campo en cada clase de tamaño.

Como se observa en la figura, existe un predominio del producto magnético, el que constituye un alto porcentaje con respecto a la masa inicial; de la misma manera, la fracción no magnética representa un porcentaje más bajo, lo que da la medida de la elevada cantidad de hierro que está presente en cada clase de tamaño, que por consiguiente eleva la susceptibilidad magnética de las muestras. La diferencia de las salidas entre cada clase de tamaño, tiene que ver fundamentalmente con la variación del contenido de hierro, ver figura 20.

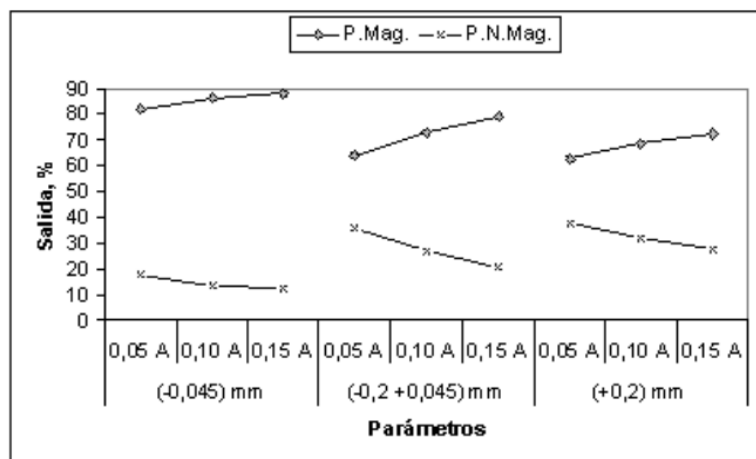


Figura 20. Comportamiento de las salidas según la variación de la intensidad del campo magnético.

El comportamiento es más acentuado en la clase de tamaño fina, en el que disminuye desde 18 % para 0,05 A hasta 12 % para 0,15 A en el producto no magnético (ver valores en el anexo 2); esto significa que la aplicación de un campo magnético a dicha clase pudiera ser no viable técnicamente; más aún si el comportamiento de la mayoría de los metales es parecido para cada salida; por ejemplo el hierro, mantiene concentraciones entre 50 y 51 % tanto para los productos magnéticos como no magnéticos, además su concentración inicial en la clase de tamaño es de 50,84 %. Tales resultados concuerdan con los mostrados por (Loyola-Breffé, Beyris-Mazar, Palacios-Rodríguez, & Correa-Cala, 2014) “los que reflejan que en el enriquecimiento de la magnetita, en las clases menores de 30 μ m se incrementa la salida magnética con respecto a otras clases, pero el contenido de hierro disminuye debido a la formación de flóculos magnéticos que arrastran partículas no magnéticas”; es decir, para dicho tamaño de partículas no es viable su beneficio por separación magnética.

Una particular importancia debe prestárseles a los productos no magnéticos de las clases media y gruesa, debido a que en ellos se manifiesta una elevada concentración del níquel para cualquier

intensidad del campo; por tanto, su estudio reviste un interés particular con vista a su posible aprovechamiento; más aún cuando en dichos productos, las salidas representan más del 21 % y hasta 36 % y 28 % y hasta 38 % para 0,15 y 0,05 A en las clases media y gruesa respectivamente.

En el caso del hierro, si se analizan las figura 19 y 20, se puede concluir que a medida que aumenta la intensidad del campo magnético en las clases gruesa y media, aumenta la masa en las fracciones magnéticas, pero disminuye el contenido de hierro, debido a que también para esos productos pasan materiales no magnéticos; por tanto, para concentrar el hierro hasta 50 % se debe aplicar una intensidad del campo de 0,05 A a las clases media y gruesa, las que representan una salida de 36 y 38 % respectivamente.

3.4. Propuesta de un esquema para el tratamiento de las colas

Una vez terminado el estudio magnético a las tres clases de tamaño de las colas, y analizado el comportamiento de los elementos en cada uno de los productos, se llegó a la conclusión que es posible concentrar el níquel con promedio de 1,23 % en el producto no magnético de la clase de tamaño mayor de 0,045 mm, lo que se logra si se aplica un campo de 0,10 A. En la figura 21 se muestra el flujo tecnológico propuesto.

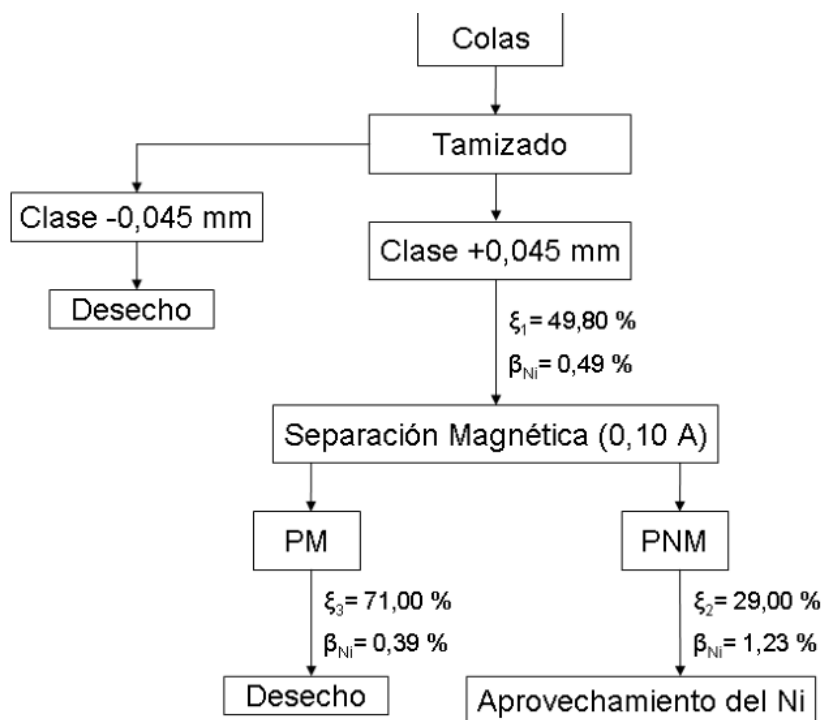


Figura 21: Esquema propuesto para el aprovechamiento del níquel.

En la figura se observa que las colas se somete primeramente a un tamizado en un tamiz de 0,045 mm, cuya clase mayor representa una salida (ξ_1) del 49,80 %, en la que se ve un incremento en el contenido de níquel con respecto al inicial desde 0,35 % hasta 0,49 %. Posteriormente a la clase + 0,045 mm se le aplica un campo magnético de 0,10 A, en la que el producto no magnético representa una salida (ξ_2) de 29,00 %, con contenido de níquel de 1,23 %, apto para ser aprovechado por la tecnología.

Una particularidad de la propuesta con respecto a lo realizado en el trabajo, es que no es necesario aplicar el proceso de elutriación como operación inicial, ya que la clase de tamaño fina no puede ser sometida a la separación magnética, por lo que representa un desecho. Como propuesta tecnológica, se considera que el producto final puede sustituir parcialmente al material alimentado a la planta de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” antes de la operación de molienda; y de esta forma se logra un mejor aprovechamiento de los recursos naturales. De manera tal que el 13,04 % de las colas puede ser realimentada al proceso tecnológico para recuperar el níquel, con lo que se reduciría el porcentaje de mineral serpentinitico (ya que se considera que el níquel pertenece a dichos minerales) extraído de la mina, y se incrementa el tiempo de explotación de tales yacimientos.

3.5. Análisis preliminar del impacto ambiental

La planta de níquel de Punta Gorda “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante más de dos décadas de explotación ha provocado un gran impacto sobre el medio ambiente. Desde sus inicios ha imprescindible de un elevado consumo de energía y de reactivos, que en el transcurso del proceso generan gases y residuos sólidos, los que afectan directamente al medio ambiente.

Uno de los desechos generados que afectan al medio ambiente son las denominadas colas. Las que constituyen un permanente foco de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, con el incremento de la concentración de una serie de elementos por encima de los valores admisibles para el agua potable, los suelos y el aire, en el que resulta ser el hombre su mayor receptor. Tales residuos se agigantan cada día con el avance de la explotación de los yacimientos.

El estudio realizado ha demostrado la posibilidad de proponer vías para recuperar algunos elementos. Pudo constatarse que a partir de la separación magnética se puede concentrar, por

ejemplo: el níquel en el producto no magnético de las clases de tamaño media y gruesa, y el hierro también para estas clases de tamaño en el producto magnético.

Si se analiza en la propuesta hecha para la recuperación del níquel, figura 21, el producto no magnético pudiera reincorporarse al proceso tecnológico para la recuperación y aprovechamiento del metal. Tal aprovechamiento reduciría el impacto ambiental en el área del depósito de colas, ya que se reduciría el volumen del material depositado.

Por otro lado, si se realimenta al proceso tecnológico el producto donde se concentra el níquel, que representa el 13,04% del total de colas, se reduce la masa alimentada desde la mina, con la consiguiente disminución del impacto ambiental en el laboreo minero; además contribuye al uso racional de los recursos naturales.

3.6. Planteamiento de un esquema para el análisis de la beneficiabilidad y obtención de hierro a partir de las colas negras.

En el caso de Orleidis predomina las partículas de 0.045 mm, el 50 % del hierro se concentra en 50,20 - 50,80 % propongo un método bien por tamizado para lograr esas partículas, ya no un tamiz también equipo sería un molino de disco, por que con uno de bola no alcanza esa granulometría para lograr un mayor concentrado. Entonces por separación magnética atraigo todos los concentrados magnéticos, le aplico una preparación mecánica, consta de llevarlo primeramente a esa granulometría a 0,045 mm primero pasa por una serie de criba, después por triturador, después puedo utilizar dos molinos o bien uno de bola y después uno de disco para llevarlo a 0,045 mm y después tamizarlo para que el concentrado de hierro me quede menor que 0,045 mm y ese es el que voy a utilizar. En el caso de Carmen proponer un método para alcanzar la granulometría de 20 μm que es 0,020 mm lograr alcanzar ese que se encuentra en 50% elemento metálico ahí debe estar en mayores cantidades el hierro, silicio, aluminio, magnesio proponer un método de tamizado o mediante un molino y llevarlo a esa granulometría.

CONCLUSIONES GENERALES

El análisis bibliográfico permitió conocer aspectos generales de la caracterización y utilización del residuo sólido de la tecnología carbonato amoniacal. Las principales investigaciones están relacionadas con la aplicación del método de beneficio magnético para la obtención de concentrados de hierro y métodos de lixiviación ácida a presión atmosférica para la recuperación de níquel y cobalto.

Se tomaron como referencia los trabajos relacionados con el tratamiento de las colas en la elaboración de la propuesta de tratamiento realizada para la recuperación del níquel y el cobalto y para el aprovechamiento del residuo sólido.

Las técnicas analíticas que se emplearon fueron aplicadas en instalaciones y equipos que garantizan la confiabilidad de los resultados.

RECOMENDACIONES

Recomiendo utilizar la vía para obtención del hierro por medio de la separación magnética en húmedo.

Continuar profundizando los estudios en el proceso de beneficio del hierro hasta tener un concentrado útil para las baterías de Ni/Fe.

Bibliografía

- Alberto Turro Breft, L. R. (2003). Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso industrial CARON [recurso electronico].
- BÁRCENAS, J. O. (2015). *OBTENCIÓN DE UN PRODUCTO PRERREDUCIDO PARA LA PRODUCCIÓN DE ARRABIO CON NÍQUEL (NICKEL PIG IRON) A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE LOS ESCOMBROS LATERÍTICOS DE MINA MARTÍ DE NICARO.*
- Batista, R. D. (2016). *BENEFICIO EN MESAS DE CONCENTRACIÓN DE LAS COLAS DE LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA.*
- Brefe, O. L. (2012). *COMPORTAMIENTO DE LAS COLAS DE LA EMPRESA “COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA” ANTE LA VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO.*
- Breft, A. T., Puyans, L. R., & Pupo., R. I. (2003). Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso industrial CARON [recurso electronico].
- Cardona, A. R. (1999). Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia carbonato-amoniacaal”.
- Chang-Cardona, A. R., Rojas-Purón, A. L., & Arce-Molina, J. (2014). *Influencia sobre el extractable de níquel de los minerales oxidados del yacimiento Punta Gorda.* moa.
- Clark, D. A. (1999). *magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exporation and magnetic innterpretation.* moa.
- Coello Velázquez, A. L., Aguado, M., authority, J. M., & Brown, R. L. (2008). Grindability of lateritic nickel ores in Cuba.
- David, L. S. (2019). *Tecnologías de Baterías.* moa.
- Fernández, C. M. (2011). *RECUPERACIÓN DE NÍQUEL, COBALTO E HIERRO APARTIR DEL RESIDUO SÓLIDO DE LA EMPRESA “ERNESTO CHE GUEVARA”.* Moa.

- Herrera. (1961). *Comentarios sobre el informe del Inst. Mechanobr sobre el Proyecto para la utilización de las colas de Nicaro como mineral de hierro.*
- Kowalski, T. (1953). *Proposed flow sheet for metals recovery from Nicaro tailings.*
- Loyola-Brefe, O., Beyris-Mazar, P. E., Palacios-Rodríguez, A., & Correa-Cala, Y. (2014). Enriquecimiento de metales en las colas del proceso Caron aplicando intensidad variable del campo.
- Orleidy Loyola Breffe, P. E. (2022). Enriquecimiento de metales en las colas del proceso Caron aplicando intensidad variable del campo magnético. *Minería y Geología*.
- PEÑA, E. G. (2011). *EXTRACCIÓN DE COBALTO POR LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE LOS RESIDUALES SÓLIDOS DE LA TECNOLOGÍA CARBONATO AMONIACAL.* moa.
- Pérez, M. C. (2002). *Estudio de Beneficiabilidad de los escombros lateríticos de Moa.* Moa.
- Pérez, M. C., Priego, F. A., Herrera, J. A., & Rodríguez, A. C. (2006). Caracterización Físico Química de los Estériles Mineros: Yacimiento Moa. Holguín. Cuba . *Los Residuos MINEROS-METALURGICOS en el Medio Ambiente*, 177-194.
- Pupo, A. R. (2011). *Comportamiento de las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara antes la intensidad de un campo magnético.*
- Purón, A. R., Breff, A. T., & Stroumov, M. (2003). CARACTERISTICAS MINERALOGICAS DE LOS RESIDUALES NO LIXIVIADOS DEL PROCESO CARON, EN MOA, HOLGUIN, CUBA. *Minería y Geología*.
- R. M. TAYLOR, U. S. (1974). *MAGHEMITE IN SOILS AND ITS ORIGIN II. MAGHEMITE SYNTHESSES AT AMBIENT TEMPERATURE AND pH 7.* Germany.
- Torres, Y. Á. (2013). Lixiviación alcalina de las colas de la tecnología carbonato amoniacal para la extracción de aluminio. *Mineria y Geología* , 4-5.
- Yennis Ávila Torres, E. F. (2013). Lixiviación alcalina de las colas de la tecnología carbonato amoniacal para la extracción de aluminio. *Minería y Geología*, 4-5.

ANEXOS

ANEXO 1. Composición química de los productos de la separación magnética

Clases de tamaño, mm	Intensidad del campo, A	Productos	Composición química, %									
			Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	SiO ₂	Zn	Cu	Al
-0,045	0,05	PM	0,35	0,06	50,90	0,75	1,23	1,72	5,09	0,03	0,01	3,56
		PNM	0,35	0,06	50,78	0,76	1,16	1,81	5,06	0,03	0,01	3,39
	0,10	PM	0,34	0,06	50,80	0,75	1,10	1,71	4,98	0,03	0,01	3,29
		PNM	0,35	0,06	50,79	0,76	1,11	1,77	5,00	0,03	0,01	3,25
	0,15	PM	0,34	0,06	50,92	0,75	1,09	1,71	4,97	0,03	0,01	3,43
		PNM	0,35	0,06	50,79	0,75	1,11	1,74	4,98	0,03	0,01	3,59
-0,2 +0,045	0,05	PM	0,35	0,07	50,33	0,92	1,49	1,62	5,50	0,03	0,01	3,68
		PNM	0,87	0,02	26,30	0,68	6,07	4,21	10,56	0,12	0,02	4,83
	0,10	PM	0,40	0,06	48,50	0,92	1,82	1,71	5,90	0,03	0,01	3,95
		PNM	0,87	0,01	24,28	0,58	6,44	4,62	10,72	0,13	0,02	4,66
	0,15	PM	0,47	0,06	45,76	0,92	2,32	1,86	6,58	0,03	0,01	3,83
		PNM	0,88	0,01	23,00	0,53	6,89	4,84	11,02	0,13	0,02	5,08
+0,2	0,05	PM	0,32	0,07	50,01	0,92	1,33	1,65	5,23	0,03	0,01	3,73
		PNM	1,51	0,06	26,26	0,89	7,60	1,60	13,63	0,06	0,05	3,44
	0,10	PM	0,39	0,08	47,92	1,03	1,70	1,65	5,79	0,03	0,01	3,75
		PNM	1,62	0,05	23,83	0,68	8,43	1,65	14,61	0,06	0,05	3,26
	0,15	PM	0,41	0,08	47,86	0,99	1,78	1,66	5,91	0,03	0,01	4,05
		PNM	1,64	0,05	24,03	0,59	8,43	1,59	14,72	0,07	0,05	3,23