

**FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL PROCESAMIENTO DE FINOS POR
CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA**

Yajaira García Villamizar

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2016

**FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL PROCESAMIENTO DE FINOS POR
CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA**

Yajaira García Villamizar

TRABAJO DE GRADO REALIZADO EN LA MODALIDAD PRÁCTICA
EMPRESARIAL COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA METALÚRGICA

Director: Hugo Javier Arango Paternina

Ingeniero de Materiales

Líder de Tecnología - CMSA

Co-director: Ángel Manuel Meléndez Reyes

Químico, Dr., Profesor Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

AGRADECIMIENTOS

La autora de este proyecto desea agradecer a Dios por poner en su camino personas que fueron de gran ayuda para la realización de este proyecto. Gracias a mi familia por todo el apoyo. A mis padres María Azucena Villamizar y Eustorgio García Pérez, son el motor fundamental para la realización de cada logro. A mis hermanos Deider García y Andrew García, de cada uno recibí siempre grandes enseñanzas. A mi abuela Margarita Durán pues ha sido símbolo de lucha y amor por la familia. A la memoria de mi abuelo Nolberto Villamizar, pues siempre representó la superación y la fuerza para enfrentarse a grandes retos. A mi tío Raúl Villamizar quien fue un soporte y un gran ejemplo a seguir.

Igualmente agradezco al ingeniero Hugo Javier Arango, Antonio Tapia, Julian Navas y Jorge Murillo todo el aporte en cuanto a conocimiento, experiencia y acompañamiento durante este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. ANTECEDENTES	12
1.1. Proceso de producción	12
1.2. Estudios relacionados	16
1.3. Nivel de Upgrading.....	18
1.4. Recuperación de masa concentrada.....	18
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GENERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	20
3.1 Obtención, preparación y caracterización de los finos.....	20
3.2 Calcinación reductora	20
3.3 Concentración magnética	22
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
5 CONCLUSIONES	31
6 RECOMENDACIONES.....	32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de producción de Fe-Ni desde la explotación del mineral hasta la fase de fundición	13
Figura 2. Fotografía del Tubo Davis en CMSA.	17
Figura 3. Diagrama de flujo seguido para determinar la factibilidad de concentración de níquel a partir de una muestra de finos.	21
Figura 4. Fotografía indicando las partes del tubo Davis.	22
Figura 5. Rampas de calentamiento a) progresivo y a') con temperatura de sostenimiento. Pérdida de peso de una muestra de mineral fino con un contenido de carbono de 3% (b,b') y 5% (c,c').....	25
Figura 6. Resultados de nivel de concentración de finos calcinados en el TGA para las rampas de calentamiento indicadas en la figura 6: calentamiento progresivo y calentamiento con sostenimiento de la temperatura en 1000°C.	26
Figura 7. Recuperación de níquel después de la concentración magnética de finos calcinados en el TGA.....	28
Figura 8. Nivel de concentración de finos previamente calcinados en un horno de tipo rotatorio con 4% de carbón, para un calentamiento progresivo y un calentamiento sostenido en 1000°C.....	29
Figura 9. Recuperación de níquel después de la concentración magnética de finos calcinados en el horno de tipo rotatorio.	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición del grafito usado para la calcinación en el TGA (porcentaje en peso).	20
Tabla 2. Número de concentraciones magnéticas de los finos calcinados en el TGA.	23
Tabla 3. Diseño de experimentos para la concentración magnética de los finos calcinados en el horno de tipo rotatorio.	23
Tabla 4. Composición porcentual en peso de la muestra de mineral fino crudo.	24

RESUMEN

TÍTULO: FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL PROCESAMIENTO DE FINOS POR CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA.*

AUTOR: YAJAIRA GARCÍA VILLAMIZAR**

PALABRAS CLAVES: Calcinación reductora, concentración magnética de baja intensidad, ley de mineral, nivel de concentración, recuperación de masa.

DESCRIPCIÓN:

Con el fin de determinar si el proceso de concentración magnética de baja intensidad es viable para procesar los finos producidos en el proceso de producción de ferróníquel en Cerro Matoso S.A., y de esta manera incrementar la producción y disminuir problemas operacionales se mezcló el mineral fino con 3% y 5% de grafito pulverizado (carbono fijo de 96.5%) y se sometió al proceso de calcinación-reducción en un analizador termogravimétrico, adicional a esto se calcinó una mezcla de mineral fino con 10% de carbón (carbono fijo de 40%) en un horno de tipo rotatorio, con atmósfera reductora, alcanzando temperaturas de 1000°C, con diferentes tiempos de residencia, con el fin de lograr la reducción parcial de los óxidos de hierro y níquel presentes en el mineral. Posteriormente, la calcina obtenida por ambos métodos de calcinación se sometió a un proceso de separación magnética en medio húmedo, con un separador de baja intensidad. Se utilizó la intensidad máxima de campo magnético con diferentes tiempos de residencia del material en el separador; se cuantificó el material recuperado en cada ensayo para hallar los índices de concentración y recuperación de masa de níquel. En los procesos de concentración de mineral, se obtuvo que el punto óptimo se consigue cuando se tiene el mayor nivel de concentración junto con la mayor recuperación de masa del elemento concentrado; en este caso, se encontró que el mejor resultado se obtuvo calcinando los finos en el horno rotatorio con atmósfera reductora en una curva de calentamiento a 1000°C durante dos horas y media, para un tiempo de residencia en el separador de 10 minutos, bajo estas condiciones se consiguió un 15 % de enriquecimiento de Ni y 91% de recuperación de masa de Ni.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Ing. Hugo Javier Arango, Ingeniero Metalúrgico. Co-director PhD Ángel Manuel Meléndez Reyes, Químico.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL FEASIBILITY OF FINE FOR PROCESSING MAGNETIC CONCENTRATION.*

AUTHOR: YAJAIRA GARCÍA VILLAMIZAR**

KEYWORDS: Reductive calcination, low intensity magnetic separation, ore grade, upgrading, mass recovery

DESCRIPCIÓN:

In order to determine if a low intensity magnetic concentration process is viable to upgrade the Ni-bearing fines produced in the production process of ferronickel in Cerro Matoso S.A. (CMSA), thereby increasing the production and diminishing operational problems. In order to achieve partial reduction of iron oxides and nickel present in the mineral, fine ore (nickel bearing fines) was mixed with 3% and 5% of pulverized graphite (fixed carbon 96.5%) and subjected to calcination-reduction process on a thermogravimetric analyzer. In addition, fine ore was calcined with 10% of pulverized coal (40% fixed carbon) in a furnace, with reducing atmosphere reaching temperatures of 1000 °C and with different residence times. Subsequently, the calcine obtained with both calcination methods was subjected to wet magnetic separation process using a low magnetic intensity device. Maximum magnetic field strength was used with different residence times of the material in the separator. The material recovered from each test was quantified, to find the concentration indices and nickel mass recovery. In the process of mineral concentration the optimum point was achieved when a high level of concentration (grade up) is reached, along with most of the concentrate mass recovery element. In this case, it was found that the best result was obtained by calcining the fines in a furnace with a heating curve at 1000 for two hours, for a residence time in the device of 10 minutes; under these conditions it was achieved a nickel upgrade of 15 % and a nickel mass recovery of 91%.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Advisor: Ing. Hugo Javier Arango, Metallurgical Engineer. Co-advisor PhD Angel Manuel Meléndez Reyes, Chemist.

INTRODUCCIÓN

La separación magnética durante años ha sido usada para incrementar el contenido de hierro (concentrar) en minerales antes de someterlo al proceso pirometalúrgico; este proceso aprovecha la alta susceptibilidad magnética del mineral de hierro para separarlo de otros componentes de la mena. En este proceso de enriquecimiento es necesario tener una granulometría suficientemente fina para garantizar la liberación de los minerales magnéticos y por lo tanto lograr altas eficiencias de separación y concentración del mineral de interés.

Para Cerro Matoso S.A. (CMSA) el proceso de enriquecimiento del mineral, a través de este método, puede ser aplicado en diferentes etapas del proceso, para incrementar la ley de níquel del mineral, entre estas se encuentra el proceso de manejo de material particulado (finos) aprovechando que este se encuentra con la granulometría apropiada, por lo que no es necesario implementar un circuito de molienda para adecuar el mineral a los requerimientos del proceso de separación magnética en húmedo.

Este tema es de especial relevancia ya que la generación de finos actual se duplicará en un mediano plazo, como consecuencia de la implementación de otros proyectos y por lo tanto se sobrepasará la capacidad de manejo de finos instalada. Así, el objetivo de este proyecto es mostrar si el método de concentración magnética de baja intensidad (LIMS por las siglas en inglés de *Low Intensity Magnetic Separation*), es técnicamente viable para tratar los finos de CMSA. Para tomar decisiones, es importante saber cuál es el incremento de la ley de níquel, así como el de la recuperación de masa de níquel de los finos tratados.

1. ANTECEDENTES

Cerro Matoso en su proceso de producción desde hace algunos años se encuentra elaborando tareas relacionadas con el beneficio de minerales, esto debido a que como todo recurso natural a medida que pasa el tiempo de extracción, la riqueza del metal de interés en el yacimiento va disminuyendo. Upgrading II es uno de los proyectos en los cuales se ha trabajado para aumentar la concentración de níquel en el material clasificado que entraría a los secadores, uno de los beneficios es que este upgrading o enriquecimiento permitiría ingresar al proceso material que hasta el momento se encuentra en stocks de la mina (por no considerarse con la composición química de níquel viable para el proceso), teniendo como consecuencia directa un aumento significativo en la cantidad de mineral fino que se produce en el proceso. Estos finos (con alto contenido de níquel) se reportan en la corriente de gases de los diferentes hornos (secadores, calcinadores y hornos eléctricos) que posee Cerro Matoso y se recuperan para reintroducirlos al proceso lo cual genera un reciclaje incrementando así los costos de operación.

El objetivo de este proyecto, es evaluar la factibilidad técnica para disminuir la cantidad de finos que recirculan en el proceso, usando un método de concentración magnética aplicado a un mineral fino previamente calcinado. Con base en esto, es pertinente definir conceptos necesarios para el desarrollo óptimo del proyecto. Se iniciará con el conocimiento del proceso de producción, seguido de los estudios relacionados y las condiciones sobre las que se llevó a cabo el proyecto.

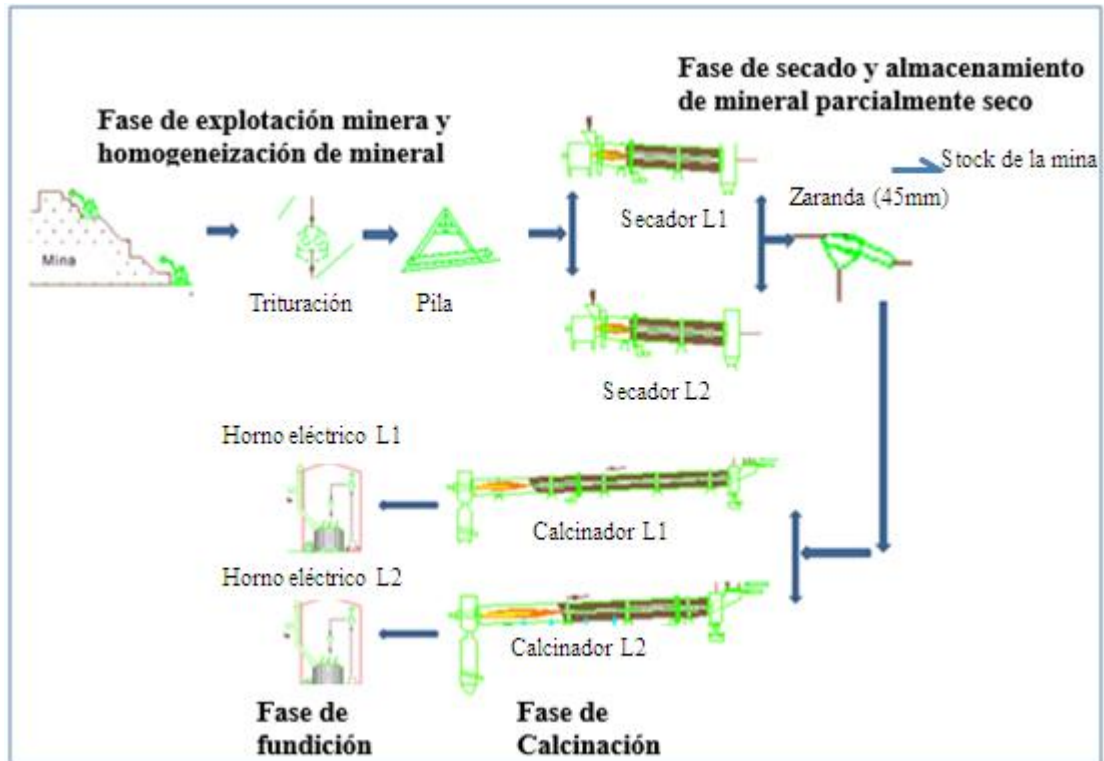
1.1. Proceso de producción

Este proceso se lleva a cabo en dos líneas, L1 y L2 (Figura 1) que trabajan en forma paralela, dividiéndose el proceso en las siguientes etapas o fases:

- Explotación minera y homogeneización de mineral.
- Secado y almacenamiento de mineral parcialmente seco.
- Calcinación.
- Fundición.

- Refinación, granulación.
- Manejo de producto terminado.

Figura 1. Esquema del proceso de producción de Fe-Ni desde la explotación del mineral hasta la fase de fundición



En la fase de homogeneización, el material que entrega la mina llega a la malla de cribado Grizzly en donde el pasante de 750 mm se tritura hasta una granulometría de 90 mm. Allí se muestrea, pesa y homogeniza, construyendo pilas de 120.000 toneladas en especificaciones de composición química dados por los porcentajes de Ni, Fe, MgO, SiO₂ y Al₂O₃, y así entrega mineral apilado y homogeneizado que pasa a la fase de secado y almacenamiento del mineral.

En la fase de secado se produce mineral parcialmente seco (mineral con humedad entre 10-12%) para calcinación y finos recuperados para aglomeración, los secadores reciben mineral húmedo con granulometría de -90 mm de la fase de homogeneización. La finalidad de secar el mineral es permitir un mejor manejo en las fases posteriores del proceso, y

eliminar la mayor cantidad de agua para manejar un menor volumen de gases en el proceso de calcinación. Además, en esta fase, se clasifica el mineral parcialmente seco con una zaranda vibratoria de 45mm de apertura, ya que el sobretamaño es pobre en níquel este es rechazado, acarreado y llevado a un depósito de la mina, mientras el clasificado (pasante) se almacena en 4 silos y un depósito cubierto. En esta fase de secado se realiza la limpieza de gases y recuperación de finos mediante un precipitador electrostático (uno para cada horno secador).

En la fase de calcinación se recibe de manera dosificada el mineral parcialmente seco de la fase de secado. Esta se puede dividir en 4 etapas:

- Almacenamiento y transporte de mineral y carbón.
- Pre-reducción.
- Limpieza de gases y recuperación de finos.
- Aglomeración y extrusión de finos.

Como agente reductor se adiciona carbón, este se mezcla con el mineral parcialmente seco y la mezcla se dosifica junto con pellets de las extrusoras hacia los hornos calcinadores donde ocurren los primeros cambios químicos del mineral (reacciones de reducción), en la pre-reducción entran en contacto con los gases calientes producto de la combustión (del gas natural con el aire) que fluyen en contracorriente. Los gases y polvos que se producen en esta subfase de pre-reducción pasan a un sistema de limpieza de gases y recuperación de finos de los calcinadores.

La fase de fundición recibe la calcina generada en la fase de calcinación y entrega como resultado metal líquido (crudo) para la fase de refinación-granulación, escoria líquida para la fase de granulación de escoria, y gases de reducción que se dirigen al sistema de limpieza de gases del horno eléctrico.

En este proceso hay tres fuentes de finos del mineral: a) aquellos que forman parte del mineral procesado y que ingresan al secado, b) los que se producen en el secado por efecto de atrición y c) los que provienen del calcinador por efecto de decrepitación y por

destrucción de los aglomerados (pellets). Los finos del mineral (granulometría menor a 250 μ m) deben ser reincorporados al proceso porque su ley de níquel es más alta que la del mineral grueso, algunas especies minerales presentes en estos finos al ser expuestos a altas temperaturas en atmósferas reductoras experimentan una transformación química/mineralógica, la cual mejora su susceptibilidad magnética y potencia o posibilita la concentración por medio magnético. El hecho de tener un tamaño de partícula muy fino facilita la separación magnética y evita tener que instalar un sistema de molienda para ajustar el tamaño antes de este proceso de concentración.

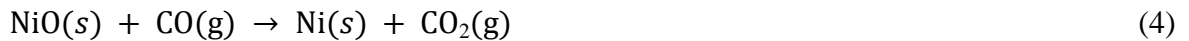
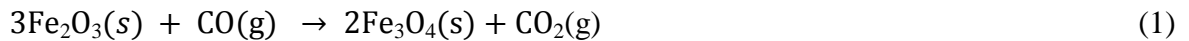
Existen varios factores de riesgo relacionados con el manejo de finos en el proceso que sigue CMSA, a) factores ambientales (polución y emisiones al medio ambiente), b) factores de riesgo de salud ocupacional (exposición de las personas a material particulado) y, los consecuentes c) factores técnicos que influyen en la producción (mecánicos, metalúrgicos, entre otros). Los finos son manejados en un proceso de recirculación a los hornos calcinadores, realizando una mezcla compuesta principalmente de finos del calcinador, finos verdes (o del secador) y agua, seguido de un proceso de extrusión por medio del cual se elaboran los pellets que se alimentan al calcinador. Dado que el volumen de finos generados en los hornos calcinadores es muy alto con respecto a la carga que se alimenta, estos ocupan un porcentaje importante de la capacidad de los hornos calcinadores, especialmente en la parte del proceso denominada “Línea 2, L2”. Los finos que se generan en todo el sistema, además de generar un recicló, ocasionan la formación de costras en el calcinador que llevan a problemas operacionales dado que estas poseen menor punto de fusión, debido a su composición química y gran área superficial.

Actualmente en CMSA, la velocidad de generación de finos es aproximadamente 75 toneladas por hora (tph) entre las líneas 1 y 2, L1 y L2: 15 tph en los secadores, 10 tph en el calcinador de la L1 -KN01- y 50 tph en el calcinador de la L2 -KN150. Debido a proyectos que entrarán en funcionamiento en el mediano plazo con la finalidad aumentar la ley de mineral que entra a secadores, como lo es Upgrading II, se espera un incremento en el flujo de finos.

1.2. Estudios relacionados

Estudios realizados a nivel laboratorio²⁻⁷ muestran que el método de concentración magnética puede ser una alternativa para tratar mineral laterítico de baja ley, aunque la compleja mineralogía (por ejemplo, la presencia de otros metales como Mg y Fe) demanda un control adecuado del tratamiento térmico y la atmósfera reductora en la calcinación, así como determinar una adecuada densidad de pulpa y campo magnético aplicado.

En el presente trabajo se usa grafito como fuente de carbono para el proceso de calcinación de finos de mineral, para posteriormente evaluar la viabilidad de concentración magnética en un tubo Davis. Al calcinar el carbón se forma el agente reductor CO, el cual reduce a los óxidos a su forma metálica. Las siguientes reacciones de reducción se presentan durante la calcinación:



En un entorno en el que se involucran fuerzas de tipo magnético, gravitacional y de arrastre, las partículas magnéticas pueden separarse de las partículas no magnéticas por concentración magnética. Los procesos de concentración magnética pueden ser de baja o alta intensidad, realizarse en seco o en húmedo, a baja o alta velocidad.⁷ Para realizar la concentración magnética de finos en el laboratorio de CMSA se cuenta con un *tubo Davis* (Figura 2). La fuerza y el campo magnético que experimentan las partículas en el tubo Davis representan la experimentada en un tambor de separación magnética.⁸ Esta técnica de separación magnética utiliza bobinas de inducción magnética y sólo pueden ser procesadas muestras pequeñas. Este equipo es útil para determinar la malla de la liberación, el índice de selectividad, el grado y la recuperación de compuestos ferromagnéticos.

Figura 2. Fotografía del tubo Davis usado en CMSA.



Este estudio se enfoca en evaluar si el método de concentración propuesto es viable desde el punto de vista práctico, basado en resultados de laboratorio. Esta fuera de los alcances de este trabajo hacer análisis o hipótesis que expliquen la fenomenología del éxito o fracaso del método.

El alcance de este proyecto está limitado a:

- Ensayos de laboratorio
- Material particulado producido en CMSA
- Ensayos de calcinación dentro y fuera de CMSA
- Ensayos de concentración magnética en CMSA
- Análisis químico en CMSA

El estudio no trata con:

- Ensayos piloto o industriales
- Mineral grueso de CMSA ni de otras fuentes
- Calcina fina o gruesa de CMSA o de otras fuentes
- Molienda de mineral
- Otras técnicas analíticas diferentes al análisis químico
- Concentración por otros medios incluyendo concentración magnética en seco o de alta intensidad.

- Análisis financiero de la implementación.

Entre los beneficios potenciales que involucra el método de concentración magnética de CMSA se destacan:

- Proporcionar un alivio al cuello de botella que por años ha significado el mineral fino al proceso en la compañía Cerro Matoso.
- Aumentar la ley de níquel del mineral fino por concentración magnética.
- Disminuir el consumo de agua y otros elementos usados en el proceso de peletización, ya que de esta forma recirculan algunos finos al calcinador.
- Liberar la capacidad de alimentación de los calcinadores rotatorios del proceso con carga nueva si se deja de utilizarla para alimentar pellets reciclados.
- Disminuir los problemas actuales de operación de los calcinadores.

Las pruebas estarán enfocadas en la búsqueda de las condiciones adecuadas del proceso de calcinación y del proceso de concentración magnética, para las cuales se presenta la mayor recuperación junto con una adecuada concentración de Ni; las condiciones o parámetros a tener en cuenta son el tiempo de residencia del material en el tubo, el tiempo de sostenimiento en la calcinación y el porcentaje de carbono usado en la calcinación.

1.3. Nivel de Upgrading

Junto con la recuperación de níquel, el porcentaje de upgrading (% UG) es el indicador clave de desempeño más importante para este proyecto, y se calcula de la siguiente forma:

$$\%UG = \frac{\%Ni \text{ en mineral concentrado} - \%Ni \text{ en mineral crudo}}{\%Ni \text{ mineral crudo}}$$

1.4. Recuperación de masa concentrada

Este índice se define por el porcentaje o fracción de masa de níquel presente en el mineral concentrado con respecto a la masa total de níquel en la muestra inicial.

$$\% \text{ recuperación de masa de Ni} = \frac{\text{Masa de Ni en concentrado}}{\text{Masade Ni inicial}} * 100$$

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño del proceso de separación magnética en la concentración y la recuperación de níquel utilizando finos recuperados en los calcinadores de CMSA después de la calcinación/reducción.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el impacto de la temperatura y del tiempo de residencia del proceso de calcinación/reducción de los finos del calcinador en el proceso de separación magnética en un tubo Davis.
- Evaluar el impacto del tiempo de residencia en el proceso de concentración magnética en un tubo Davis.
- Identificar las condiciones operativas del proceso de calcinación/reducción y del proceso de concentración magnética que permitan obtener los mejores resultados en términos de concentración y recuperación de níquel.
- Determinar si el proceso de concentración magnética es aplicable desde el punto de vista de beneficio de minerales a los finos de los calcinadores de CMSA.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Obtención, preparación y caracterización de los finos

Se recolectaron muestras de finos del calcinador de la línea 2 con granulometría menor a 250 μ m. Antes de llevar la mezcla finos-carbón a la calcinación en un instrumento de termogravimetría (TGA), se pulverizó grafito con un contenido de carbono fijo (C elemental sin contenido de cenizas, humedad o volátiles) de 96.5% (Tabla 1) y se mezcló de manera homogénea con el mineral fino. De manera similar, una muestra de este mineral fino fue calcinada en un horno de tipo rotatorio con una dosificación de 10% de carbón de reducción (40% C fijo). Para el control del carbono fijo se utilizó un analizador de azufre y carbono LECO, y se realizaron 3 lecturas para cada muestra de mineral fino crudo mezclado con grafito pulverizado. El análisis químico de los finos fue realizado en un equipo de fluorescencia de rayos X.

Tabla 1. Composición del grafito usado para la calcinación en el TGA (porcentaje en peso).

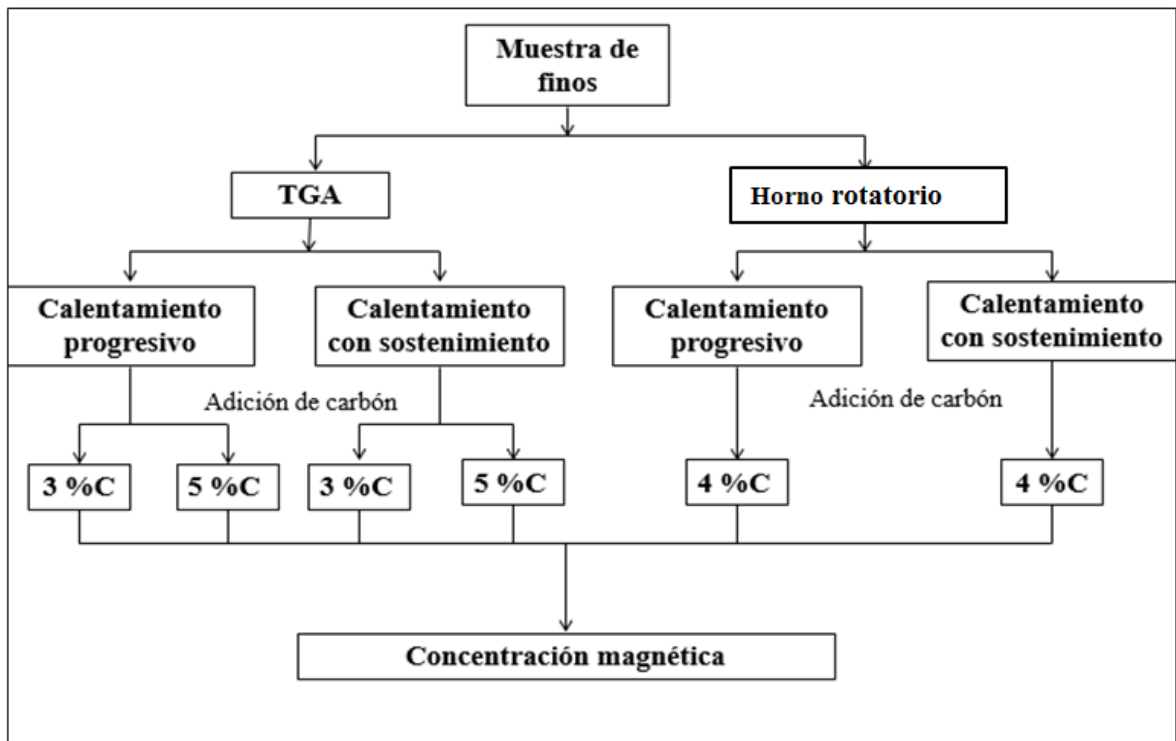
Carbono Fijo	Cenizas	Humedad	Volátil
96,5	0,73	0,06	2,71

3.2 Calcinación reductora

La calcinación reductora de las mezclas fino-carbón se realizó en dos distintos equipos. Por un lado, la mezcla con una dosificación de 3% y 5% de carbón se calcinó en un TGA con dos rampas de calentamiento. En un caso se usó un calentamiento progresivo hasta alcanzar 1000 °C en 3 h, y en el otro se elevó la temperatura de manera progresiva hasta alcanzar los 1000 °C en 80 min, sosteniendo el calentamiento en esta temperatura durante otros 80 min. Para evitar la oxidación del mineral, el mineral calcinado se enfrió inyectando nitrógeno dentro de la cámara del TGA. De esta manera, se simuló la duración del proceso actual de los calcinadores. Con la finalidad de tener la suficiente cantidad de mineral fino calcinado para realizar los ensayos de concentración magnética, para cada rampa de calentamiento se

calcinaron 19 muestras en crisoles conteniendo cada uno 2 g. Así, se realizaron en total cuatro calcinaciones reductoras por duplicado según se indica en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de flujo seguido para determinar la factibilidad de concentración de níquel a partir de una muestra de finos.

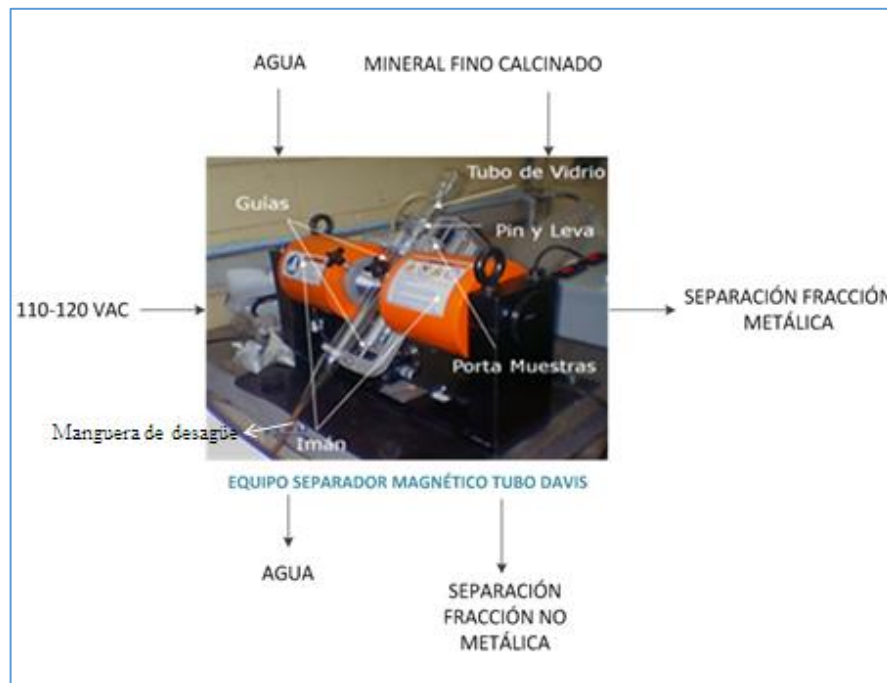


Por otra parte, para proporcionarle un dinamismo al proceso que es favorable para la transferencia de masa y la difusión de gases, la mezcla fino-carbón fue calcinada en un horno de tipo rotatorio con dos rampas de calentamiento, la primera calentando hasta alcanzar una temperatura de 1000°C durante dos horas y media (calentamiento progresivo), mientras que la segunda consistió en calentar la muestra hasta 1000°C en una rampa de 2.5 h, manteniendo el calentamiento en esta temperatura por 1 h (calentamiento con sostenimiento). De igual manera que la calcinación en el TGA, se realizaron cuatro calcinaciones reductoras por duplicado según se indica en la Figura 3.

3.3 Concentración magnética

Las muestras previamente calcinadas fueron llevadas a un proceso de concentración magnética en un tubo Davis (Figura 4). En este la muestra fluye por gravedad intentando salir por el desagüe del tubo de vidrio pero antes pasa entre los conos, los cuales retienen el producto magnetizable de la muestra, separándolas del resto de muestra que sale con agua al recipiente externo. En estos ensayos el tubo Davis se encontraba a una inclinación de 35°, y los parámetros de operación fueron: 0.4L/min del flujo constante de pulpa (30 g muestra en 2 L de agua), 1,5 amperios de corriente nominal y una agitación de 90 ciclos/min. Para facilitar la dosificación se prepararon pulpas de baja densidad. El concentrado obtenido en cada pasada se filtró al vacío con un embudo Buchner y el producto recuperado se secó en una estufa por 12 h, al finalizar el secado se registró el peso del material recuperado en cada ensayo. Las muestras se analizaron por fluorescencia de rayos X.

Figura 4. Fotografía indicando las partes del tubo Davis.



Se realizaron concentraciones consecutivas a una intensidad de corriente de 1.5 amperios, cada una con una duración de 5 min. Los experimentos seguidos en la concentración

magnética son mostrados en la Tabla 2. Las etiquetas t1, t2 y t3 representan los tiempos de residencia acumulados de 5, 10 y 15 min, respectivamente. Las muestras usadas para la concentración fueron las mezclas finos-carbón calcinadas reductivamente con a) una rampa de calentamiento progresivo y b) una rampa de calentamiento sostenido, como fue indicado en la sección anterior. Además se concentraron las muestras con las dos cantidades de carbón: 3 y 5 %. Todos los ensayos fueron realizados por duplicado.

Tabla 2. Número de concentraciones magnéticas de los finos calcinados en el TGA.

Cantidad adicionado a los finos (% peso)	Rampa de calentamiento					
	Progresivo			Sostenido		
	t1	t2	t3	t1	t2	t3
3	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2

De manera similar, las muestras calcinadas en un horno de tipo rotatorio fueron concentradas en un tubo Davis, usando sólo un porcentaje de carbono y dos tiempos de residencia acumulados (Tabla 3). Los ensayos también fueron realizados por duplicado.

Tabla 3. Diseño de experimentos para la concentración magnética de los finos calcinados en el horno de tipo rotatorio.

Cantidad adicionado a los finos (% peso)	Rampa de calentamiento			
	Progresivo		Sostenido	
	t1	t2	t1	t2
4	2	2	2	2

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Determinación de las condiciones de calcinación

De acuerdo a los análisis químicos, la cantidad de Ni presente en el mineral fino crudo (-250 μm) (Tabla 4) lo hace conveniente para ser concentrado y recuperado, evitando además los problemas operacionales asociados al manejo de finos. Con el propósito de probar distintas condiciones de calcinación para aumentar la cantidad de Ni y recuperar una mayor cantidad de este posterior a la concentración magnética, minimizando así la cantidad de finos, se realizaron 12 ensayos usando un analizador termo gravimétrico (TGA).

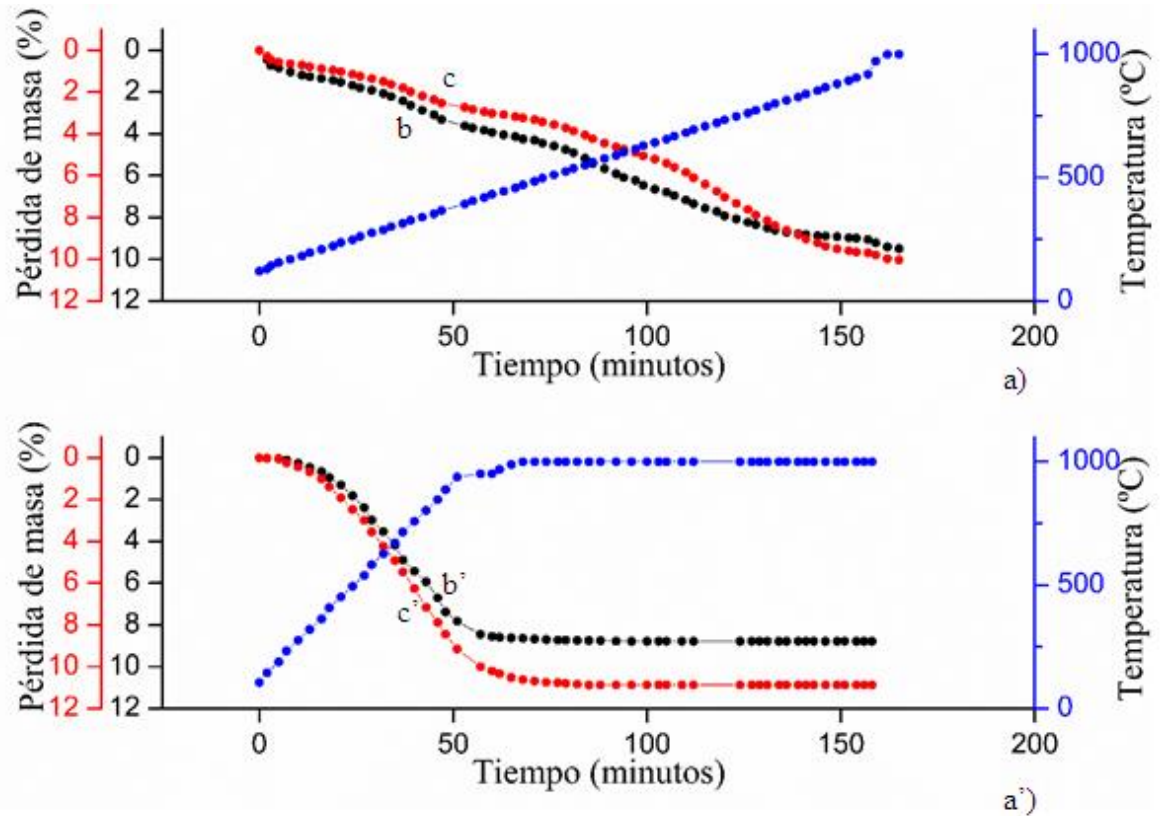
Tabla 4. Composición porcentual en peso de la muestra de mineral fino crudo.

Al_2O_3	Fe	Fe_2O_3	MgO	Ni	NiO	SiO_2
2,63	19,9	28,5	17,57	2,54	3,24	39,33

En la Figura 1 se presentan las dos rampas de calentamiento experimentadas durante 160 min, la primera calentando desde 100°C hasta una temperatura de 1000°C (Fig. 5a), y la segunda calentando desde 100°C hasta 1000°C y con un tiempo de sostenimiento en esta última temperatura durante 80 min (Fig. 5a'). A medida que se aumenta la temperatura ocurre una pérdida gradual de masa hasta que se alcanza una temperatura de 1000°C, a la cual ya no ocurre una pérdida de masa (Fig. 5b,b',c,c'). La pérdida de masa antes descrita corresponde al LOI (pérdida de masa por ignición por sus siglas en inglés) del mineral fino, asociada a la humedad de cristalización y a la materia volátil de la muestra. La mayor pérdida de masa se presenta para la muestra con mayor cantidad de carbón, debido a que un mayor porcentaje de carbono produce mayor cantidad monóxido de carbono y una mayor cantidad de óxidos son reducidos a partículas metálicas.

Con la finalidad de saber si es posible evaluar en el laboratorio de CMSA el efecto de la calcinación del mineral fino en el upgrading, después de su concentración magnética en un tubo Davis, con la característica de trabajar con una pequeña cantidad de muestra (30 g), los ensayos de calcinación se realizaron en un TGA.

Figura 5. Rampas de calentamiento a) progresivo y a') con temperatura de sostenimiento. Pérdida de peso de una muestra de mineral fino con un contenido de carbono de 3% (b,b') y 5% (c,c').



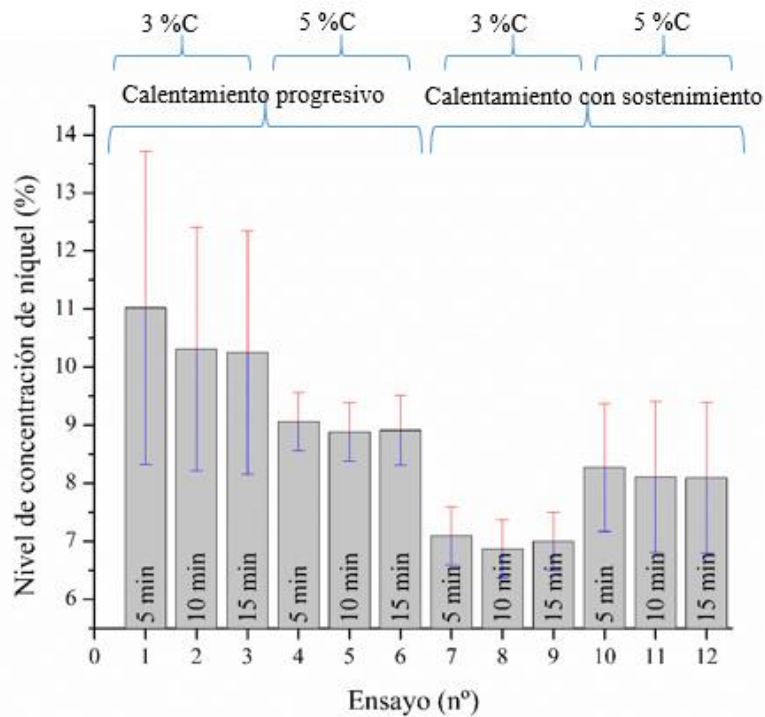
5.2 Evaluación del upgrading para la muestra calcinada en un TGA

Durante la concentración magnética se obtuvieron dos productos: el concentrado y el rechazo (colas). El tiempo de residencia para obtener el concentrado fue de 5 min y de aquí en adelante se denominará así a este producto. Posteriormente, el rechazo fue concentrado nuevamente durante 5 min para un total de 10 min de procesamiento, y finalmente este procedimiento fue repetido con el rechazo de esta concentración. De esta manera, estas muestras son denominadas como concentrado de 10 y 15 min, respectivamente.

Al aumentar el tiempo de concentración y con ello la recuperación de masa, el nivel de concentración disminuye esto es debido a que en una segunda pasada, el rechazo que se

generó en una primera pasada tiene una menor densidad lo que permite que la velocidad a la cual fluyen las partículas de níquel sea mayor o lo que es equivalente estas partículas se someten un menor tiempo al campo magnético lo que genera que se atrapen menos partículas de níquel por el medio colector (Figura 6).² Teniendo en cuenta que el nivel de recuperación no varía significativamente para la concentración de 10 y 15 min, y los gastos de energía y tiempo asociados, sería recomendable concentrar sólo una vez el rechazo con el fin de aumentar la cantidad de níquel (ver más abajo). Comparativamente, los mejores resultados de concentración se obtienen para el calentamiento progresivo de la muestra de finos (Figura 6), y para un 3% de carbón.

Figura 6. Resultados de nivel de concentración de finos calcinados en el TGA para las rampas de calentamiento indicadas en la figura 6: calentamiento progresivo y calentamiento con sostenimiento de la temperatura en 1000°C.



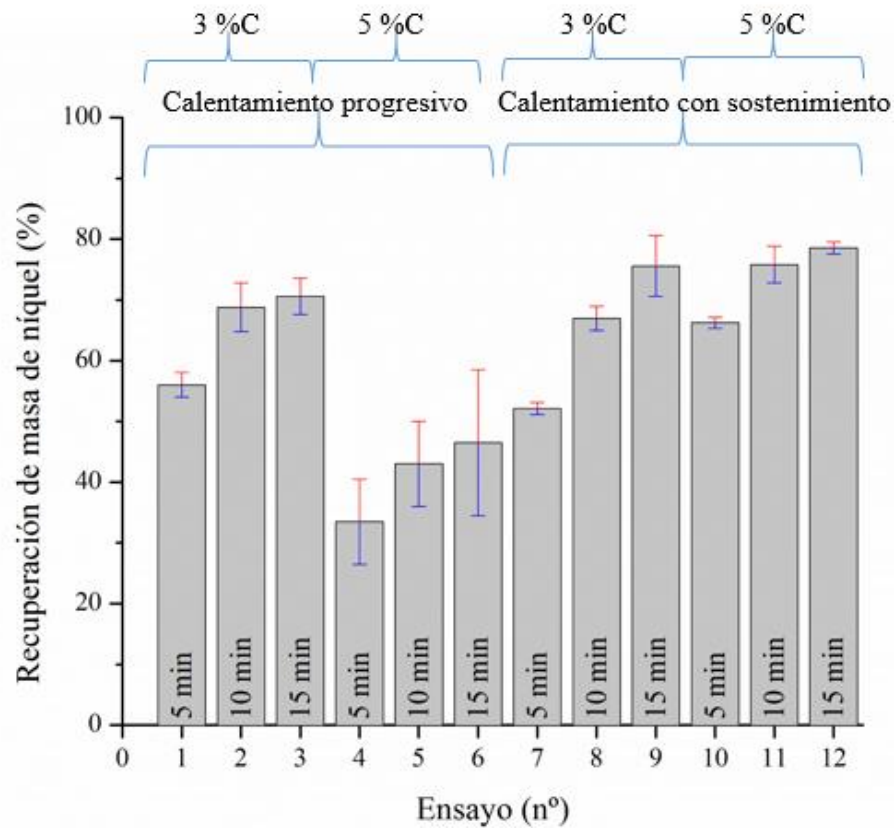
Los resultados anteriores pueden explicarse debido a que cuando se mantiene durante un tiempo prolongado una temperatura constante de 1000°C pueden darse dos fenómenos, se empobrece la atmósfera reductora y algunas partículas se oxidan o una mayor aglomeración de las partículas o sinterización de las mismas puede ocurrir que cuando el calentamiento es progresivo.³ Debido a que dos de las tres fuerzas involucradas en la concentración magnética de baja intensidad en húmedo (la fuerza de gravedad y la fuerza de arrastre del agua), dependen del tamaño de partícula, el balance de fuerzas puede ocasionar una menor concentración. Es importante señalar que los experimentos se realizaron por duplicado, y el error determinado en el nivel de concentración (Figura 6) se debió a la dificultad para manipular la muestra en el tubo Davis, ya que la muestra tendría a aglomerarse en el tubo de vidrio o en la manguera del desagüe (Figura 4).

Debido a que el nivel de concentración sólo indica el grado de enriquecimiento de níquel en una masa determinada de concentrado, la cual no es igual en todos los concentrados, es necesario saber la cantidad de níquel recuperada en cada uno de ellos. El aumento en el tiempo de residencia acumulado en la concentración magnética da como resultado un aumento en la recuperación de masa de níquel (Figura 7). Sin embargo, el contenido de níquel es comparativamente más bajo en el concentrado al aumentar el tiempo de residencia acumulado (Figura 6). Esto se debe a que a mayor exposición al campo magnético del mineral fino, otras partículas pueden ser arrastradas en el concentrado.

5.3 Evaluación del upgrading para la muestra calcinada en un horno de tipo rotatorio.

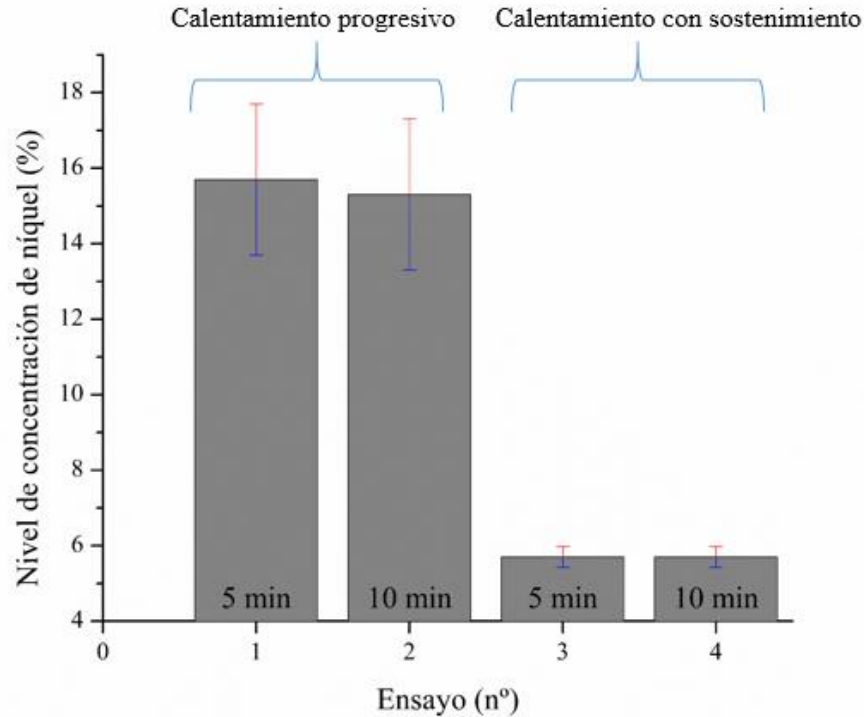
El calentamiento progresivo hasta 1000°C se hizo por un tiempo de 150 min en lugar de los 160 min usados en el TGA. En el caso del calentamiento con sostenimiento de la temperatura en 1000°C, el tiempo para alcanzar esta temperatura fue de 150 min, el cual es casi el doble de tiempo que el usado en el TGA (80 min); además, el tiempo de sostenimiento (60 min) fue menor que el usado en el TGA (80 min). Es importante señalar que se usó la misma cantidad de muestra para los ensayos de separación magnética en el tubo Davis y la carga de carbón fue del 4 %. Dados los resultados obtenidos en el TGA, sólo se usaron los tiempos de residencia acumulados de 5 min y 10 min.

Figura 7. Recuperación de níquel después de la concentración magnética de finos calcinados en el TGA



En la Figura 8 se muestra que al aumentar el tiempo de residencia en el tubo Davis el nivel de concentración disminuye. Además, el mayor nivel de concentración corresponde al calentamiento progresivo de los finos durante la reducción, de manera similar a los resultados obtenidos con el TGA. Sin embargo, este índice es casi un tercio mayor para la reducción con el horno de tipo rotatorio que con el TGA, ya que el nivel de concentración es de 15,7% en el primer caso y del 11,0% en el segundo. El nivel de concentración es ~3 veces más alto cuando se realiza el calentamiento progresivo que con el calentamiento sostenido, lo cual marca otra diferencia con los resultados obtenidos en el TGA, ya que este índice tan sólo es ~1/3 mayor. Esto podría atribuirse a que el movimiento de la carga en el horno de tipo rotatorio favorece una reducción más eficiente, ya que al estar estática la muestra en el TGA puede formarse una costra que evite el eficiente contacto entre el reductor y los finos.

Figura 8. Nivel de concentración de finos previamente calcinados en un horno de tipo rotatorio con 4% de carbón, para un calentamiento progresivo y un calentamiento sostenido en 1000°C

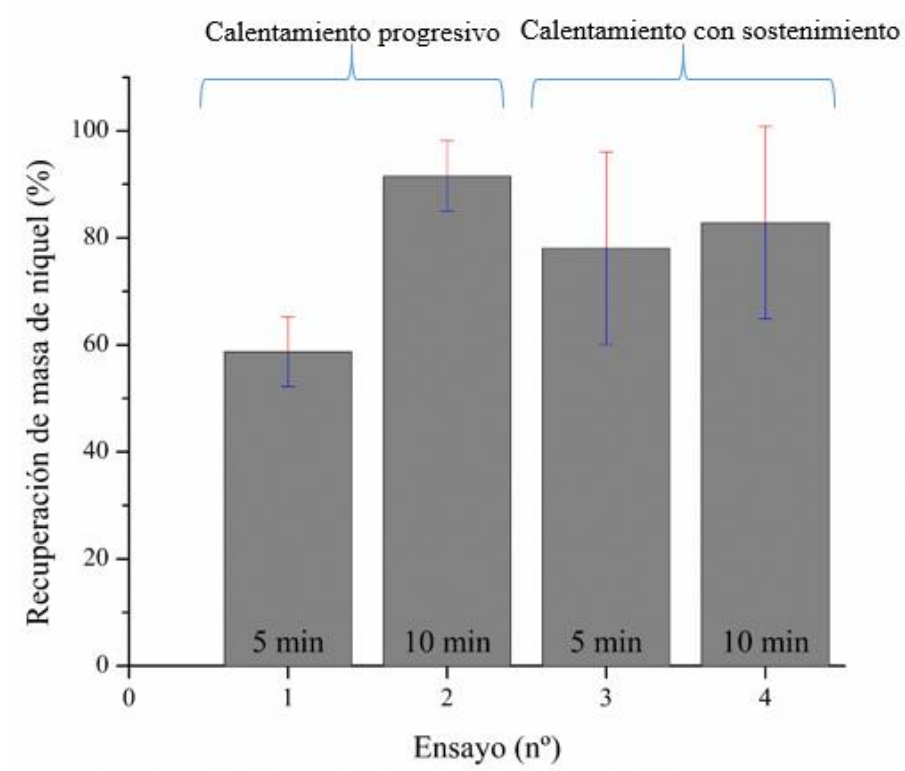


Por otra parte, un aumento en el tiempo de residencia acumulado en la concentración magnética da como resultado un aumento en la recuperación de masa de níquel (Figura 9), siendo mayor este índice (91.5%) cuando los finos son reducidos con una rampa de calentamiento progresiva, que cuando se realiza un calentamiento con sostenimiento de la temperatura (82.8%). Este resultado es contrario al obtenido con el TGA, ya que con este instrumento los finos reducidos alcanzaron una mayor recuperación para el calentamiento sostenido (78.5%) que para el progresivo (68.5%). Estos resultados contrastantes pueden deberse a las pobres condiciones de calcinación en el TGA: a) falta de movimiento de los finos, b) falta de contacto entre los finos y el reductor y c) una pequeña cantidad de muestras en relación a la cavidad del instrumento.

Finalmente, la mejor combinación entre el nivel de concentración y la recuperación de masa, corresponden al mineral fino calcinado en el horno de tipo rotatorio ya que este le proporciona un dinamismo favorable para las reacciones de reducción que ocurren en el

horno favoreciendo la transferencia de masa y la difusión de gases ⁴ para una rampa de calentamiento progresiva, obteniendo un nivel de concentración de 15% y una recuperación de masa de 91% (Figuras 8 y 9).

Figura 9. Recuperación de níquel después de la concentración magnética de finos calcinados en el horno de tipo rotatorio.



5 CONCLUSIONES

Se demostró que la separación magnética es un proceso alternativo que permite incrementar la concentración de Ni en los finos producidos y calcinados de CMSA. El mejor resultado logrado muestra que se puede obtener un enriquecimiento (upgrading) de níquel hasta de 15% en los finos calcinados, con una de recuperación de masa de níquel de 91%. Las condiciones de calcinación que permiten lograr estos resultados consisten en llevar el mineral con un calentamiento progresivo hasta 1000°C en un horno de tipo rotatorio con atmósfera controlada durante 2.5 horas, con una adición de carbón de 4%.

El tiempo de residencia acumulativo dentro del separador que da los mejores índices de concentración y de recuperación de masa es 10 minutos.

A pesar que los resultados muestran un aumento en el contenido de níquel comparado con el desempeño del actual sistema de upgrading aplicado al mineral de CMSA, los índices de upgrading no son suficientemente significativos para implementar un sistema de calcinación y separación magnética para procesar finos. Además el porcentaje del rechazo obtenido del proceso de la concentración no es lo suficientemente grande como para disminuir de manera significativa la cantidad de finos reciclados, y con ello disminuir el problema de manejo de finos en el proceso de producción de la planta CMSA

6 RECOMENDACIONES

Evaluar el impacto de la densidad de la pulpa en el proceso de separación magnética, ya que si es posible disminuir la densidad de la pulpa se podría mejorar la eficiencia de la separación y así lograr incrementar el grado de enriquecimiento de Ni.

Se recomienda realizar un análisis granulométrico y hacer un estudio del comportamiento magnético por tamaños de partícula.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual de Cerro Matoso S.A.
- [2] DODBIBA, Gjergj. Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation En: Minerals Engineering. (2010) vol. 23 No 4. p. 282-288.
- [3] LI, Yan-Jun. Coal-based reduction mechanism of low-grade laterite ore. En: Transactions of Nonferrous Metals Society of. (2013) vol 23 No 11. p. 3428-3433.
- [4] LIU, Run-Zao. Ferronickel enrichment by fine particle reduction and magnetic separation from nickel laterite ore. En: International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. (2014) vol 21 No 11. p. 955-961.
- [5] RAO, Mingjun. Beneficiation of nickeliferous laterite by reduction roasting in the presence of sodium sulfate. En: Minerals Engineering. (2012) vol 32. p. 19-26.
- [6] SUN, Tichang. Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process. En: International Journal of Mineral Processing. (2013) vol 123. p. 32-38.
- [7] Y.Cui. Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation. En: International Journal of Mineral Processing. (2012) No 106-109 p. 1-7.
- [8] FUERTENAU, M., and HAN, K. Principles of mineral processing. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 221 p.
- [9] MURARIU, V., and SVOBODA, J. The applicability of davis tube tests to ore separation by drum magnetic separators. En: Physical Separation in Science and Engineering. (2003) vol 12 No 1. p. 1-11.