

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA
CARRERA DE METALURGIA

*Evaluación a escala de banco de la
sustitución del petróleo aditivo por
carbón bituminoso en la reducción
del mineral laterítico*

*Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
Metalúrgico*

Abel Salustiano Pérez Cardosa

[Moa, 2012]



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA
CARRERA DE METALURGIA

*Evaluación a escala de banco de la
sustitución del petróleo aditivo por
carbón bituminoso en la reducción
del mineral laterítico*

*Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
Metalúrgico*

Autor: Abel Salustiano Pérez Cardosa

**Tutores: Ángel Legrá Legrá, Ing.
Prof. Asistente, Orleidy Loyola Breffe, Ing**

[Moa, 2012]



DEDICATORIA

Le dedico sinceramente este trabajo a:

- 🚩 A mi hija Maria de Lourdes.

- 🚩 A la memoria de mis padres, a mis hermanos Gisilo, Conrado, Caridad, Antonio, Benito, que tanto se han esforzado por mí y siempre me han brindado su apoyo y a mis sobrinos.

- 🚩 A mi esposa Alisa Lamorú que me ha apoyado en los momentos difíciles.

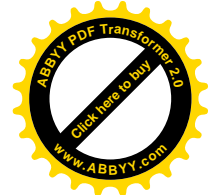
- 🚩 A toda mi familia y a todas las personas que me quieren y desean lo mejor para mí.



AGRADECIMIENTOS

A través de este trabajo hago constar mis mayores agradecimientos:

- ✚ A la memoria de mis padres
- ✚ A mis tutores Ángel Legrá Legrá y Orleydis Loyola por su ayuda y colaboración en la realización del mismo.
- ✚ A mis amigos y compañeros de aula por toda la ayuda que me han brindado a lo largo de todos estos años.
- ✚ A mis amigos y compañeros de trabajo en especial a los trabajadores de planta piloto que sin su apoyo no lograba los resultados.
- ✚ A todos los que de una forma u otra han tenido que ver en la realización de este trabajo.



PENSAMIENTO

Sólo hay nada para aquellos que nada saben producir.

Johann Wolfgang Von Goethe



RESUMEN

En el presente trabajo tiene como propósito determinar la influencia del carbón bituminoso en el proceso de reducción del mineral laterítico a escala de banco para su posible utilización como agente reductor. Para ello se tomaron muestras de mineral en la descarga de los secaderos, de polvos en los transportadores de rastrillos y en la alimentación de los hornos de reducción. Se realizaron pruebas con variación del consumo específico de carbón bituminoso por tonelada de mineral, en un horno de botellas. Las comparaciones demostraron que es posible la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso, con su mejor proporción de 45,5 kg/t, con el que se lograron extracciones de 85,17 %. Desde el punto de vista económico se ahorraron 499 972 737,6 USD/año.

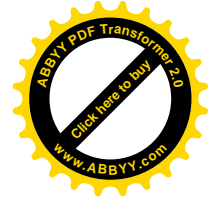
Palabras clave: Carbón bituminoso, petróleo aditivo, reducción de mineral.



ABSTRACT

The present work as purpose determining the mineral laterítico's influence of the soft coal in the reduction process to bench scale give birth to his possible utilization as reducing agent. they drew samples of mineral in the unloading of the drying rooms, of toilet powders in the carriers of rakes and in the reduction ovens's nutrition for it. they accomplished tests with variation of the specific soft coal consumption for ton of mineral, in a bottles oven. The comparisons proved that the substitution of the additive oil for soft coal is possible, with his better proportion of 45,5 kg/t, with the one that 85,17 % extractions got for themselves. They spared themselves from the economic point of view 499 972 737,6 USD/año.

Key words: soft coal, additive oil, mineral reduction.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
1.1. Flujo tecnológico de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” --	6
1.2. Trabajos sobre reducción del mineral laterítico -----	8
1.2.1. Trabajos realizados con diseño inicial en hornos -----	9
1.2.2. Trabajos realizados con la adición de otros aditivos -----	10
1.2.3. Trabajos sobre eficiencia del proceso de reducción -----	13
1.3. Fundamentación teórica -----	16
1.3.1. Flujo tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción -----	16
1.3.2. Principales transformaciones físico- químicas que ocurren en el horno	18
1.3.3. Parámetros que influyen en el proceso de reducción -----	20
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Metodología para la toma de la muestra -----	24
2.2. Metodología de preparación de las muestras -----	25
2.3. Procedimiento para la realización de los experimentos -----	27
2.3.1. Condiciones de experimentación -----	29
2.3.2. Descripción de los pasos seguidos en las pruebas realizadas -----	30
2.4. Equipos utilizados -----	32
2.4.1. Instalación para la reducción -----	33
2.4.2. Características técnicas de la mufla -----	33
2.4.3. Características de la instalación de lixiviación -----	34
2.4.4. Balanza -----	35
2.5. Técnicas analíticas utilizadas -----	35
2.5.1. Técnica de Absorción Atómica -----	35
2.5.2. Técnica de análisis de carbón y azufre -----	36
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	38
3.1. Resultados del análisis químico de las muestras iniciales y las de alimentación a los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” -----	38



3.2. Resultados del régimen operativo logrado durante la ejecución de las pruebas de reducción en el horno de banco -----	40
3.2.1. Resultados de las extracciones -----	45
3.2.2. Análisis de contenido de los elementos en el mineral reducido -----	48
3.3. Valoración económica preliminar -----	50
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

Nuestro país ocupa el segundo lugar de reserva laterítica del mundo, ubicándose este fundamentalmente en el nordeste de la provincia de Holguín, los mismos tienen alto contenido de hierro en niveles superiores al 50 %, además de otros metales, como magnesio, cromo, cobre, níquel y cobalto; materiales que también abundan en las rocas serpentinitas. Tanto el suelo como las rocas son explotados en minas a cielo abierto para la extracción selectiva del níquel y el cobalto.

En nuestro país el proceso CARON, por medio del cual se extrae el níquel de los yacimientos lateríticos, lixiviando el mineral reducido con una solución de carbonato de amonio a presión atmosférica, ha sido un proceso importante en la refinación de las laterititas con alto contenido de hierro. El mismo se aplica en la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro y en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ubicada en Punta Gorda, Moa.

La primera fábrica del mundo para la producción del NiO por la Tecnología Carbonato - Amoniacal (Proceso CARON) fue fundada en Nicaro, Cuba en el año 1943 por la Freeport Sulphur Co. (E.U.A.), actualmente la Empresa lleva el nombre de Comandante “René Ramos Latour”.

Posteriormente surgieron cronológicamente:

1962 - SERED (antigua Checoslovaquia). Procesó minerales importados de Albania.

1974 - Marinduque en Filipinas, actual NONOC.



1974 - *GREENVALE* en Australia. Actualmente se están agotando sus yacimientos y procesa un elevado contenido de minerales importados de Indonesia y Nueva Celedonia adoptando el nombre de *QUEENSLAND NICKEL*.

1980 - Arrancó el Complejo Industrial TOCANTINS en Brasil.

1987- Arrancó Punta Gorda, Cuba.

El actual orden económico mundial que se ha establecido en el planeta exige de los países menos desarrollados un incremento en la eficiencia de su economía, para elevar así su nivel competitivo y conquistar un espacio en el mercado mundial. En Cuba la industria metalúrgica del níquel desempeña un papel significativo en este ámbito, es por ello que todo cuanto se haga para elevar la productividad y la eficiencia de estas industrias repercutirá de manera directa en las posibilidades de adquisición de las mismas.

La tecnología carbonato amoniacal se caracteriza por el alto consumo de fuel oil que representa aproximadamente un 70 % (en el caso de Cuba) del costo unitario por libra de níquel más cobalto producido. Dentro de este contenido alrededor de una tercera parte se consume en el proceso de reducción en los Hornos de soleras múltiples. Es importante señalar que en este proceso se emplea parte del fuel oil como reactivo químico, pues debido a la combustión incompleta del mismo en las cámaras de los hornos se crea una atmósfera reductora a base de monóxido de carbono e hidrógeno; además se emplea como aditivo para catalizar el proceso reductor con lo que se logra el equilibrio térmico en la cinética de reducción del níquel y el cobalto.

La empresa niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara” utiliza desde mediado de los años 90 del siglo pasado la tecnología del petróleo aditivo para efectuar el proceso de reducción en los hornos de soleras múltiples.

El incremento de los precios del petróleo (fuel oil), ha motivado que se hayan planteado propuestas de soluciones tecnológicas que permitan disminuir el efecto de los altos precios en los costos de producción de la libra de níquel y cobalto. Sobresale por su peso económico, la propuesta de sustituir total o parcialmente el petróleo aditivo por carbón bituminoso de altos volátiles.



En la década de los años 80 del siglo pasado en que fue puesta en funcionamiento la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los precios del barril de petróleo rondaban los 18 a 20 dólares, en la actualidad están en el rango de 100 a 107 dólares; sin embargo el carbón prácticamente no ha modificado su precio, estando en valores cercanos a los 80 dólares por toneladas.

En un evento internacional referente al consumo de carbón a nivel mundial se proyectó el incremento del consumo desde 5 262 millones de toneladas en el 2002 hasta 7 245 millones en el 2015 para un 2,5 % promedio por año, y hasta el 2025 el incremento será de 1,3 (más bajo), alcanzando un consumo de 8 226 millones de toneladas. Tendencia que se debe al acelerado desarrollo de las economías emergentes de Asia.

Las reservas recuperables de carbón están estimadas en 1001 billones de toneladas suficientes para aproximadamente 190 años, a los niveles actuales de consumo. El 57 % de estas reservas están localizadas en 3 países (EEUU con 27 %. Rusia con 17 % y China con 13 %, otros países como India, Australia, Sudáfrica, Ucrania, Kazakhstan y Yugoslavia tienen el resto, y representan el 78 % de la producción total y el 90 % de las recuperables.

Se conoce que el carbón se utiliza fundamentalmente en la generación de energía eléctrica, en la producción de cemento y en la producción de acero. En la actualidad se utiliza en plantas productoras de níquel del proceso carbonato amoniacal en Tocantins, Brasil y Queensland Níquel en Australia.

La comisión del MINBAS creada para analizar los potenciales proyectos en relación con la estrategia de integración en el marco de la Alternativa Bolivariana para las Américas (ALBA), actualmente analiza las posibilidades del uso del carbón venezolano como sustituto del fuel oil y el crudo nacional en las industrias del país, específicamente en las plantas productoras de níquel y cobalto pertenecientes al Grupo Empresarial CUBANIQUEL.

La utilización del carbón como reductor en la industria cubana del níquel ha sido investigada principalmente en la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro; los principales efectos de las pruebas a escala de banco efectuadas en los



años 50 reflejan que el carbón bituminoso de altos volátiles da buenos resultados, sin embargo con la antracita debe ocurrir todo lo contrario. El inconveniente principal para ejecutar esta idea fue que los carbones conocidos de la URSS contienen mucho azufre, humedad y cenizas. Se concibe utilizar carbón del estado de Zulia en Venezuela que por sus propiedades carece de estos inconvenientes. Se estima que la principal ventaja de la sustitución del petróleo aditivo por carbón, está en el ahorro económico debido al valor del reductor.

Es por ellos que se tiene como **situación problemática** los elevados precios del petróleo utilizado como aditivo en el proceso de reducción del mineral laterítico con respecto a los del carbón bituminoso.

Y se define como **problema científico**: poco conocimiento de la influencia del carbón de altos volátiles (Bituminoso) como agente reductor del mineral laterítico de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En el que se tiene como **objeto de la investigación**: el carbón bituminoso, y como **campo de acción**: la reducción del mineral laterítico de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” con carbón bituminoso.

De lo antes expuesto se define como **Objetivo general**: determinar la influencia del carbón bituminoso en el proceso de reducción del mineral laterítico a escala de banco, para su posible utilización como agente reductor.

Por lo que se puede plantear como **hipótesis** lo siguiente: si se determina la influencia del carbón bituminoso como agente reductor del mineral laterítico de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, entonces se tendrá la medida de su posible utilización en sustitución del petróleo aditivo.

Del objetivo general se derivan los siguientes **objetivos específicos**:

1. Evaluar el comportamiento de las extracciones de níquel y cobalto con diferentes proporciones de carbón bituminoso.
2. Valorar en que medida puede ser sustituido el petróleo aditivo por carbón bituminoso.



Tareas:

1. Realizar análisis bibliográfico.
2. Validación de los resultados a través de los métodos y equipamientos.
3. Valoración económica de la investigación.



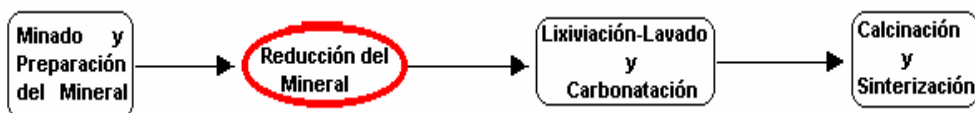
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

El incremento de los precios del petróleo (fuel oil) a niveles superiores a los 700,00 USD/t y la tendencia a continuar su incremento, ha motivado que se hayan planteado propuestas de soluciones tecnológicas que permitan disminuir su efecto en los costos de la libra de níquel y cobalto.

En el proceso de reducción de la tecnología CARON, mediante el empleo de los Hornos de Múltiples Soleras, se han efectuado varias investigaciones que demuestran la importancia de la temática en cuestión. Sobresale por su peso económico, la propuesta de sustituir total o parcialmente el petróleo aditivo por carbón bituminoso de altos volátiles, el que fue evaluado en los años 50 con resultados aceptables.

1.1. Flujo tecnológico de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

El área de construcción de la fábrica se encuentra al norte del Yacimiento Punta Gorda, provincia de Holguín, en la costa Norte del Océano Atlántico, entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la ciudad de Moa. El esquema tecnológico de la fábrica de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido, similar al proceso de la fábrica “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro. El complejo minero – metalúrgico de la empresa comprende las siguientes actividades:



Preparación de Mineral: El mineral procedente de la mina se transporta hacia la Planta de Preparación de Mineral a través de transportadores de bandas. Este



mineral con una humedad de 38 % es secado en los tambores cilíndricos rotatorios (secaderos) hasta valores de (4,0 a 5,5) % de humedad, el que es transportado por bandas hacia la sección de molienda donde es sometido a un proceso de desmenuzamiento en molinos cilíndricos monocámaras de bolas (molienda seca) hasta valores de granulometría de: + 0,149 mm (4 a 7,5) %, + 0,074 mm (7 a 8) %, - 0,074 mm (85 a 87) %.

Planta de Hornos de Reducción: En esta planta ocurre el proceso de reducción del níquel contenido en el mineral, con la adición de petróleo aditivo y gases reductores producto de la combustión incompleta del combustible. Está constituida por 24 hornos de soleras múltiples, los que descargan el mineral a los enfriadores, de donde pasa a la planta de Lixiviación y Lavado.

Planta de Lixiviación y Lavado: La pulpa de mineral reducido pasa por tres sistemas paralelos de tres etapas de lixiviación a contracorriente con el licor carbonato amoniacal. La lixiviación se realiza por medio de la aireación de la pulpa con aire en los turboareadores. Luego de la lixiviación la pulpa se envía al sistema de Lavado (dos en paralelo). El licor enriquecido en níquel y cobalto es enviado a la planta de Separación de Cobalto, la pulpa de desecho es enviada a la planta de Recuperación de Amoniaco.

Recuperación y Separación de Cobalto: El licor enriquecido en níquel y cobalto se somete a una inyección de hidrosulfuro de amonio o sulfhidrato de sodio para precipitar el o en forma de sulfuro, este producto se envasa en big – bag y se comercializa. El licor descobaltizado se envía a la planta de Recuperación de Amoniaco. El licor carbonato amoniacal enriquecido en Ni recibe un tratamiento con vapor en las torres de destilación y se obtiene el carbonato básico de níquel. La pulpa de carbonato de Ni se envía a la planta de Calcinación y Sínter.

Planta de Calcinación y Sínter: Luego de filtrado el carbonato básico de Ni se alimenta a los hornos de calcinación para la obtención del óxido de Ni, que luego se somete al proceso de sinterización en las máquinas destinadas para este fin, se obtiene el óxido de sínter que constituye el producto final principal de la planta y de la fábrica.



1.2. Trabajos sobre reducción del mineral laterítico

Castellanos (1976), compara los resultados de la reducción de minerales oxidados de níquel, donde el proceso de difusión deja de ser el factor determinante en la reducción del óxido de níquel, mientras que para el cobalto influye significativamente. Los resultados indican que al aumentar la temperatura se incrementa la velocidad de reducción del níquel y del hierro mientras que disminuye la del cobalto.

El estudio de influencia del tiempo de reducción demostró que con el aumento del tiempo a 40 minutos, se aumenta la extracción de los metales. Un aumento de 40 hasta 50 minutos incrementa significativamente el contenido de hierro metálico y se disminuye la extracción de los metales en la solución. El paso del mineral de un hogar a otro influye directamente en los resultados de reducción, debido a que en el momento de la caída ocurre el mayor contacto entre las fases y las partículas de mineral son bañadas completamente por el gas, son calentadas a la temperatura indicada y se reducen los óxidos de níquel, cobalto, hierro y se descomponen los minerales superiores, según Rosabal *et al.* (1990).

García, G. (2002), muestra las causas que afectan el extractable de la planta de hornos de reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", la combustión y las reacciones principales que ocurren en el interior de los hornos, descomposición de la materia prima y su intercambio con los gases; también especifica sobre la temperatura y la relación de gases reductores, determina como influyen estos parámetros en el estudio para mejorar el extractable, que es la calidad del producto que se obtiene en la planta de hornos.

Alepuz, H. (1993), refiere el estudio para el mejoramiento de los índices técnico - económicos del procesamiento de mineral en los hornos con tecnología PRIOR de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Se especifican datos sobre la tecnología para adaptarlos al nuevo sistema de trabajo y buscar mejoras técnica - económicas que se adapten a la planta de hornos. En el trabajo realiza algunas reseñas sobre la influencia de los quemadores PRIOR en la parte operacional.



García, S. (2010), obtiene una valoración analítica del comportamiento del carbono que participa en el proceso de reducción a partir de los parámetros de entrada y salida a la planta, hace una valoración económica de la nueva tecnología empleada para el suministro de petróleo aditivo a los hornos mediante lanzas automáticas, y pretende confirmar los resultados obtenidos en cuanto a extractable y consumo de combustible con la utilización de petróleo aditivo para la reducción directa en el horno se analiza el comportamiento del carbono en el proceso de reducción amoniacal.

1.2.1. Trabajos realizados con diseño inicial en hornos

Onischin *et al.* (1968), determinaron que el parámetro que más influye sobre la reducción del níquel y el cobalto es la temperatura, para ellos fue obvio tal comportamiento pues los reductores utilizados eran la Antracita y el Coque del Carbón Bituminoso, siendo estos activos solamente a temperaturas elevadas. Sobre la base de trabajos anteriores realizados en el horno Selas, donde se elaboró un nuevo método de reducción de la fracción serpentínica, se pudo reducir la serpentina a temperaturas comparativamente bajas con el uso como agente reductor el fue l- oil.

Alepuz, H *et al.* (1996), plantearon que la antracita es un combustible de mala calidad por su alta porosidad y bajo contenido de volátiles, por lo que se quema con dificultad. No puede usarse en las calderas diseñadas para petróleo y como reductor en los hornos, lo que fue evaluado hace muchos años a escala de banco y posteriormente a escala industrial.

El hecho de existir industrialmente el uso de carbón bituminoso mezclado con petróleo (COM - Coal Oil Mixture), lo que fue detectado en el curso del estudio de combustión de carbón, indica la posibilidad de quemar la antracita de esa forma como la variante más racional a usarse. La propuesta fue aceptada y se decidió pilotear el proceso en el secadero de la Planta Piloto de Nicaro.



1.2.2. Trabajos realizados con la adición de otros aditivos

Rezvanov *et al.* (1969), plantean que el uso del fuel oil conllevaría a un aumento del carbón en el mineral reducido, en el orden de 2 a 2,5 veces el cual influye a su vez de manera negativa en el proceso de lixiviación ya que existe una disminución de la velocidad de lixiviación del níquel en la primera etapa. Además disminuye la densidad y aumenta la viscosidad de la pulpa por el incremento del contenido de carbono fino en el mineral reducido, el cual al pasar a la pulpa forma espuma, que refleja la influencia del carbono contenido en el petróleo aditivo en procesos posteriores a la reducción.

En pruebas a escala piloto donde se emplea un horno de soleras múltiples (nueve hogares en total), se definen los equipamientos básicos a utilizar en la escala industrial. Durante el proceso de reducción se utilizan varios reductores (pirita, clorita y fuel oil), ninguno de los casos evaluados superó los resultados que se obtuvieron con petróleo. Se prueba por primera vez la tecnología de la mezcladora de paletas, para mezclar el aditivo con el mineral de alimentación al horno de reducción, tecnología que quedó implementada durante la materialización del proyecto industrial. Aparecen modificaciones al esquema carbonato amoniacal propuesto por Caron en 1924, fundamentalmente en la utilización de una etapa de lixiviación, la utilización de la precipitación de sulfuros y obtención de briquetas de níquel metálico (Legrá, 2012).

Para comprobar la efectividad de la utilización de petróleo aditivo como agente reductor en el proceso caron, se discute la forma más efectiva de su utilización por compañeros del (CIPIMM, 1985). La mezcla previa del petróleo aditivo y el mineral antes de la reducción garantiza intensificar el proceso, y se alcanzan altos rendimientos. La atomización del petróleo aditivo directamente al hogar del horno de pisos, aunque mejora la extracción, ocasiona grandes pérdidas del reductor como consecuencia de su volatilización y descomposición sobre la cama de mineral sometida a altas temperaturas. La mezcla eficiente del petróleo aditivo y el mineral aumenta la extracción de metales (Ni y Co), y permite disminuir apreciable el consumo de gas pobre. Para la realización de la investigación se utilizaron



varios métodos: reducción del mineral en el horno tubular en cama estática, reducción en un horno de botella (condiciones dinámicas), en un horno de pisos a escala piloto y en un horno de pisos Industrial.

En pruebas realizadas con vista a sustituir el petróleo aditivo, el cual representa del 0,9 a 1 % de la carga, se adicionó asfáltita hasta el 1 %, (Paz, M. 2012); en el trabajo se llega a conclusiones definitivas:

- En las etapas con adición de asfáltita la extracción de Ni fue mayor en 1,85 – 2,78 % que en la etapa en blanco.
- Al disminuir el consumo de gas desde 105,8 hasta 89,1 m³/t no se afectó el extractable del Horno.
- La relación CO₂/CO en H-10 de ambos Hornos fue superior a 1.

En otro trabajo realizado en diciembre de 1985 en el Horno de Reducción de la Planta Piloto de Nicaro, se adicionó carbón antracita en cantidad de 2 a 3 kg/h (8,8 x 10⁻⁴ kg/s), lo que representa 1 % de la carga al Horno, en base al carbón fijo presente en la antracita. El mismo fue añadido en el sinfín que transporta el mineral de alimentación al Horno. Las extracciones obtenidas fueron bajas, y con muchas fluctuaciones, variaron desde 68 % hasta 82,10 % en la etapa en blanco y de 61 % hasta 79,54 % en la adición, lo que refleja la inestabilidad en la operación del Horno (Paz, M. 2012). Posterior a la adición de carbón antracita en el Horno de la Planta Piloto, se realizó la adición en el horno 18 de la planta metalúrgica de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, en cantidad de 13 kg cada 5 minutos, correspondiente esto al 0,83 hasta 0,85 % de la carga al horno, con relación al carbón fijo contenido en la antracita. Las extracciones obtenidas en ambas etapas fueron bajas, con promedio desde 67,56 hasta 72,32 % para el blanco y la adición respectivamente.

Este trabajo arrojó como conclusiones, que el contenido de carbón en las colas disminuyó en un 30 y 24 % en las pruebas realizadas en el horno de la planta piloto y en el horno de la planta metalúrgica, con relación a lo añadido la



disminución fue de 41,7 %. También se puede comprobar que no se vio influencia de la adición de la antracita sobre el extractable.

Según Reid, G. (1990), los mejores resultados de la reducción se logran mediante la adición combinada de un 2,5 % de petróleo combustible y otros aditivos a la alimentación. Esta mezcla aumenta la eficiencia de la reducción del níquel, en amplias pruebas de laboratorio con agentes reductores de diferentes tipos, que incluyen carbón de varias calidades, la adición de piritas y cloruro de sodio. Se demostró que ninguno de los materiales utilizados posee propiedades reductoras equivalentes o mejores que el petróleo combustible.

En su trabajo sobre la introducción del petróleo aditivo en los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, Alepúz *et al.* (1993), explica el efecto positivo del uso del petróleo aditivo en el incremento de los extractables de níquel y cobalto al potenciarse la atmósfera reductora dentro del horno. Se describen las principales reacciones químicas que ocurren dentro del horno al emplear el petróleo mezclado previamente con el mineral a alimentar al proceso de reducción en el horno de múltiples soleras.

El trabajo da una visión de la influencia en el proceso de reducción del empleo del petróleo aditivo como catalizador de las reacciones de reducción. Además establece las principales fases que componen el sistema heterogéneo de gran complejidad. Con el conocimiento de los factores se podrá dar un enfoque más acertado para mejorar la reducción del mineral.

En estudios realizados sobre la reducción de la serpentina con muestras del yacimiento de Nicaro, se empleó como portador de azufre, un concentrado pirítico con un 49 % del elemento, y como agente clorurante el cloruro de sodio, ambos aditivos se pasaron por un tamiz de 149 mallas (Paz, M. 2012). Como agente reductor se utilizó una mezcla de Ar + H₂ con un 35 % de H₂, la serpentina se redujo en un horno de botella, el control de la reducción se realizó mediante una lixiviación estándar y el grado de reducción del níquel se calculó por la disolución del metal en licor amoniacal.



Se estudió la correspondencia existente entre el níquel extraído y las fases presentes en el mineral reducido, por el método de extracción química. El cálculo de la extracción de níquel y cobalto se realizó por balance para esta fracción analizada en la serpentina reducida y en las colas de la lixiviación amoniaca.

Estas investigaciones se realizaron con la finalidad de estudiar las transformaciones de fases ocurridas. Durante la reducción se establecieron las condiciones óptimas de reducción de la serpentina con y sin adición de pirita. De los resultados del estudio de extracción química se infiere que del níquel que se encuentra en forma activa en la fase libre se disuelve un 90 % cuando se realiza la reducción a 873 K (600 °C) se empleo pirita como aditivo, mientras que la reducción sin aditivo, aún reduciendo a temperatura de 773 K (500 °C) conlleva a una coprecipitación durante la lixiviación amoniaca de parte del níquel inicial presente en la fase.

Legrá, A. (2007), propone instalar mezcladora en los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, y aparejado a esto cambiar las romanas actuales por pesas continuas, con el objetivo de evaluar el efecto del índice de mezclado del mineral con petróleo reductor a la salida de la mezcladora sobre el comportamiento físico metalúrgico del mineral en el horno Herreshoff. Como resultado, se llegó a la conclusión que modificaciones a elementos mecánicos y en la velocidad de la mezcladora, permiten obtener diferentes índices de mezclado del mineral con el petróleo, el que no refleja efecto sobre el comportamiento físico metalúrgico del mineral en el horno Herreshoff. Las extracciones obtenidas en el horno de reducción, son similares a las logradas históricamente en la planta piloto de Moa en pruebas anteriores con condiciones de operación análogas.

1.2.3. Trabajos sobre eficiencia del proceso de reducción

Estenoz & Espinosa (2003), exponen los resultados de la corrida industrial de homogeneización y secado solar del mineral de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, para determinar el comportamiento con secado solar y sin secado de los minerales en el proceso de reducción, donde la homogeneidad de la composición química del mineral que entró a los Hornos de reducción fue



47 grados superior con Secado Solar que sin Secado Solar, en el caso del níquel se incrementó en 45 grados, mientras la del hierro lo hizo en 44 grados.

En minerales con bajos contenidos de hierro (37,7 %), predominantemente serpentinas, se elevaron las extracciones en el proceso de reducción: en 2,3 % para el Ni y en 8,4 % para el Co, lo cual fue el resultado de mayores niveles de homogeneización de la composición química y granulométrica en el mineral de Secado Solar.

Legrá A (2007), realizó un estudio sobre la separación de las fracciones +200 mm, homogeneización y validación de muestras tecnológicas de minerales especiales de Yagrumaje Oeste, utilizó la metodología desarrollada por especialistas del Centro de Investigaciones del Níquel, se obtuvieron grado de homogeneidad de 85,89 y 81,32 para el níquel y el hierro respectivamente; resultados determinantes por ser los análisis de estos elementos los de mayor precisión. El grado de homogeneidad alcanzado por la muestra tecnológica es varias veces superior al que logra la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para el mineral de alimentación (según muestra SM - 2, el grado de homogeneidad es de 20 a 30 y de 5 a 10 para el níquel y el hierro, respectivamente). Por los resultados de los análisis químicos la muestra tecnológica puede considerarse como un mineral limonítico, justificado fundamentalmente por su alto contenido de hierro y bajo contenido de SiO₂ y MgO. Esto debe conllevar a un incremento de las extracciones de níquel durante el proceso de reducción hasta un 3 %.

Álvarez Y (2011), realizó un estudio a escala de banco de la homogeneización del mineral que se alimenta a las plantas de Secaderos y Hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, para determinar su efecto en las extracciones de níquel y cobalto durante el proceso de reducción. Como resultado fundamental se obtuvo que en las condiciones actuales (con alimentación del mineral directamente desde la mina), prácticamente no ocurre proceso de homogeneización, con valores para todos los casos inferiores al 40 %. Además se define preliminarmente, que se puede utilizar un lecho de mezclas (conformado por pilas de prehomogeneización continuas, y se interponen capas sucesivas), se



logra incrementar la homogeneización hasta valores cercanos al 60 %, con un aumento por este concepto de las extracciones de níquel como promedio del 2,44 %.

Legrá *et al.* (2011), realizaron un estudio sobre estrategias para mejorar la homogeneización en pilas del tipo chevrón, aplicó la simulación geoestática, donde se obtuvieron resultados favorables de la propiedad de desviación - modelo que se valora para cada tamaño de pila, además, puede hacerse un gráfico de desviación - modelo para cada pila y obtener la ecuación de ajuste para esta curva. Esto debe conllevar a un incremento de las extracciones de níquel durante el proceso de reducción en el rango de (2 a 3 %).

En el Informe técnico (2011), se muestran los resultados de las inspecciones físicas y técnicas realizadas a los equipamientos tecnológicos que inciden en la homogeneización del mineral en la planta de preparación de mineral y hornos de reducción. Se presenta el esquema que se emplea actualmente por la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” en la preparación del mineral, además de los esquemas con los que se alcanzarán los mejores resultados de homogeneización y extracciones de níquel y cobalto. Se establecen de forma comparativa los inconvenientes y las ventajas de cada uno.

Quedan definidas las características y modificaciones a realizar al equipamiento tecnológico que intervienen en la homogeneización del mineral. Se describe de forma general la metodología que permitirá obtener efecto de homogeneización superiores a 60 %, y que debe sustentar el incremento de las extracciones de níquel en la reducción hasta un 2 % con respecto al que se alcanza con el esquema convencional que se emplea actualmente en la preparación del mineral.

Informe técnico de la misión cubana a la planta de hornos de reducción al Complejo Industrial TOCANTINS en Brasil (2009). Se utiliza como aditivo una mezcla de hasta 25 – 30 % de carbón y el resto de petróleo. El contenido del carbón añadido es en relación a la energía total suministrada como aditivo.

Esta operación se realiza en la mezcladora de paletas de un solo eje que están instalada encima de cada horno. La misma tiene dos puntos de adición; uno para



el petróleo y el otro para la mezcla de petróleo con carbón, de forma tal que cuando se interrumpe la adición de la mezcla se restablece el del petróleo solamente.

El suministro de la mezcla de petróleo y carbón se realiza desde un sistema de preparación y bombeo diseñado para este objetivo ubicado en el nivel 0 de la planta.

1.3. Fundamentación teórica

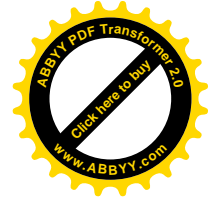
1.3.1. Flujo tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción

Hornos: El mineral almacenado en los silos (1500 t cada uno) es bombeado hasta las tolvas de alimentación de los hornos, dispuestas una para cada dos hornos de donde se alimenta a los dosificadores automáticos, que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno de acuerdo al tonelaje fijado.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra luego de establecer un perfil de temperatura y una concentración determinada de gases reductores ($\text{CO} - \text{H}_2$) para ello el horno dispone de 9 cámaras de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, el que permite además de lograr el perfil de temperatura, enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares o soleras. Además, el horno cuenta con un eje central, al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro en forma de zig - zag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los impares por el centro.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas, pasan a un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de 6 ciclones en cada horno y electrofiltros. El polvo recuperado se incorpora nuevamente al proceso.



El mineral en su descenso es sometido a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual, a la vez que penetra en un perfil gaseoso que garantiza un aumento en la concentración de agentes reductores. La atmósfera reductora es controlada mediante la relación CO_2/CO en el hogar 10 (H10) que debe ser de 1,2 %. Un perfil típico de temperatura se muestra a continuación:

Hogar	Temperatura del Gas	U/M
H0	350	°C
H4	720	°C
H6	690	°C
H7	695	°C
H9	710	°C
H11	720	°C
H13	740	°C
H15	760	°C

En estas condiciones es posible el desarrollo de las reacciones de reducción, a pesar del corto tiempo de retención del mineral en el horno (90 min).

Esta operación se complementa con la introducción de aire en los hogares 4 y 6 (2000 m³/h), para la postcombustión de los gases con contenido de CO y H₂, y evitar un incremento de sus concentraciones en el sistema de limpieza de gases; al mismo tiempo se aprovecha el calor de reacción exotérmica liberado en la combustión para facilitar el perfil de temperatura ideal en el horno.

Después de reducido el óxido de níquel y los óxidos superiores de hierro a níquel y hierro metálico, el mineral es descargado del horno al transportador rotatorio, a su vez, este entrega el mineral a una temperatura de 650 a 700 °C al enfriador, el que tiene el objetivo de enfriar el mineral hasta una temperatura por debajo de los 200 °C. Para ello cuenta con unas paletas y los carros raspadores, los que se encargan de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador e impedir así que el mineral se pegue e interfiera en el proceso de transferencia o intercambio de calor. El enfriador rota sobre la piscina de agua.

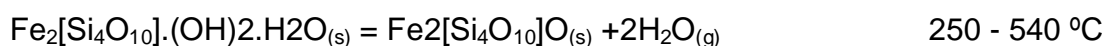
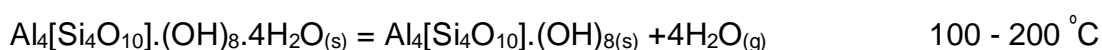


El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de Lixiviación, por donde se introduce una corriente de solución carbonato amoniacal, se forma una pulpa que va a los tanques de contacto. Esta pulpa es bombeada a la planta de lixiviación y lavado a través de bombas instaladas.

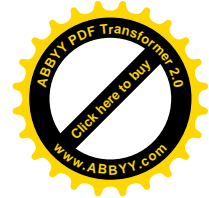
1.3.2. Principales transformaciones físico - químicas que ocurren en el horno

El Horno de Reducción como reactor químico se divide en tres zonas fundamentales, la de calentamiento, la de transición y la de reducción. Seguidamente se da un pequeño bosquejo de las principales transformaciones que sufre la mena alimentada.

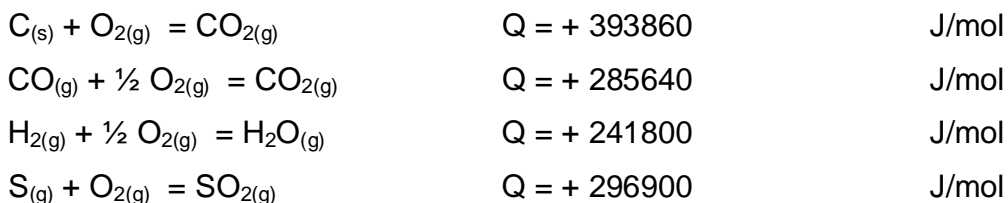
La zona de calentamiento está comprendida entre los hogares del 0 al 6, donde se alcanzan temperaturas de mineral en el rango de 95 a 590 °C. En esta primera zona ocurre el debilitamiento de la estructura cristalina de algunos de los compuestos o minerales que conforman la mena, teniendo lugar las reacciones de descomposición de la Nontronita, Halloysita, Gibbsita y Goethita, simultáneamente se evapora el agua física de forma gradual; además puede ocurrir la reducción parcial adelantada de la magnetita y los óxidos de níquel y cobalto. A continuación se muestran las principales reacciones que tienen lugar, así como el rango de temperatura aproximado de ocurrencia según lo planteado por Chang, (1999):



Para el sistema gas - petróleo aditivo, la temperatura de los gases en régimen de operación normal oscila, entre los 690 y 800 °C en los hogares 4 y 6. A esta temperatura puede ocurrir el craqueo del petróleo aditivo y la inflamación del petróleo, facilita una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, como productos

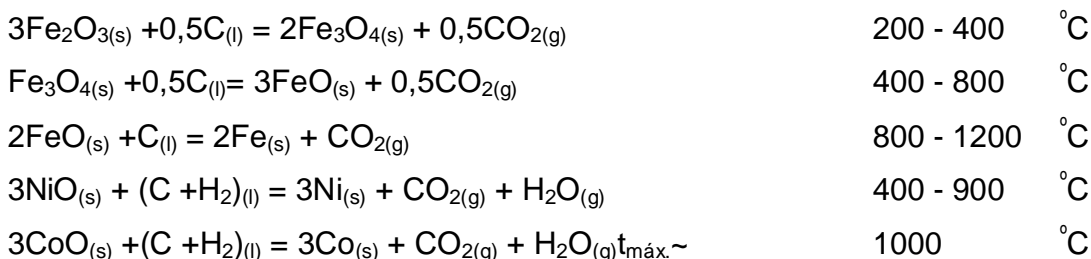


de interés para el proceso en cuestión. Por tanto, a partir de estos hogares será probable la ocurrencia de las reacciones siguientes:



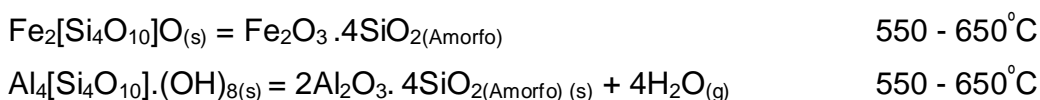
En el sistema sólido–petróleo no catalítico aislado es posible la ocurrencia de la reducción de los óxidos de hierro, níquel y cobalto, ayudando al incremento de la productividad y eficiencia:

Las reacciones de reducción con petróleo aditivo en condiciones teóricas de reducción son las siguientes:



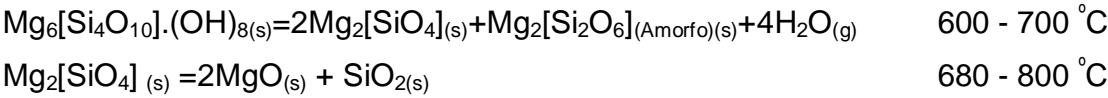
El agente reductor gaseoso se garantiza con el petróleo aditivo craqueado en la superficie del sólido, se difunde al interior de la partícula según el modelo cinético centro sin reaccionar.

En la zona de transición puede efectuarse la reducción parcial más la disociación de compuestos, la misma está comprendida desde el hogar 7 al hogar 9 y se manejan temperaturas de mineral en el rango de 600 a 625 °C. En esta segunda zona comienzan a disociarse los compuestos cuyos productos son amorfos, además ocurre la reacción del petróleo aditivo unido a los productos de la combustión en las cámaras, con la probabilidad elevada de ocurrencia de las reacciones de reducción análogas a las de la primera zona, pero en un grado de transformación mayor. A continuación se muestran las reacciones de disociación que ocurren:

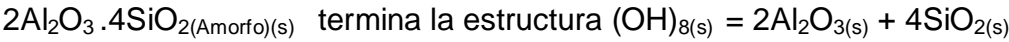




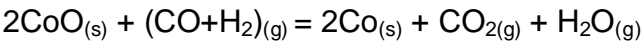
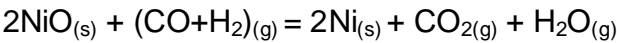
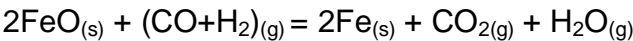
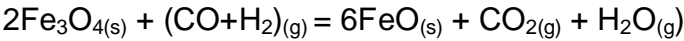
La zona de reducción está comprendida desde el hogar 10 al 16 con temperaturas del mineral en el orden de 660 a 760 °C. En esta tercera zona tiene lugar la disociación de la lizardita o serpentina, la que pierde el agua de constitución estructural junto a la de los compuestos disociados de la misma como es el caso de la Forsterita, y la Enstatita, la cual compete con la reducción del óxido de níquel. Además de llevarse a cabo la reacción del 60 % de carbono en el petróleo aditivo y tecnológico, se concluye de este modo la reducción de los óxidos de hierro, níquel y cobalto. A continuación se muestran las principales reacciones que ocurren:



En esta fase culmina la disociación e interacción de:



Las reacciones de reducción de los óxidos de hierro, níquel y cobalto son:



1.3.3. Parámetros que influyen en el proceso de reducción

En el proceso de reducción actúan varios parámetros que tienen gran influencia sobre la eficiencia metalúrgica. A continuación se describen algunos de ellos.

Influencia de la temperatura

La temperatura facilita la eliminación del agua libre, la descomposición térmica de las estructuras cristalinas y el desarrollo de las reacciones de reducción. Con la misma se mejora la cinética del proceso de reducción.



El perfil térmico actual que se utiliza se trata que esté en correspondencia con las características del mineral, específicamente con los componentes químicos totales de Fe, Co, Ni, SiO₂ y MgO que están en correspondencia con las características del mineral alimentado al proceso, es decir, la relación limonita/serpentina. Por lo que es necesario un incremento gradual de la temperatura de arriba hacia abajo, para evitar una descomposición brusca de los minerales, y con esto reducir las pérdidas de níquel (Chang, 1999).

Concentración de agentes reductores

Los gases utilizados en el proceso de reducción son obtenidos mediante la combustión incompleta del petróleo tecnológico en las cámaras del horno, y con el uso de petróleo aditivo, el que se mezcla con el mineral luego de ser secado. El contacto gas - mineral tiene lugar en las camas de mineral y mayoritariamente, en la caída de un hogar a otro donde se verifica, aproximadamente, el 60 % de las reacciones de reducción.

El perfil gaseoso, para un porcentaje fijo y predeterminado de petróleo aditivo, se controla con la variación de los flujos de aire y petróleo, así mantener constante la relación aire-petróleo en cámara ($\alpha = 62 - 64 \%$). Una buena concentración del gas reductor también cataliza la velocidad de las reacciones.

Granulometría

Por este ser un proceso heterogéneo la granulometría influye determinantemente en los buenos resultados de reducción. Las reacciones ocurren fundamentalmente en la línea divisoria de las fases y la velocidad de la reacción está determinada por la penetración del gas al interior de la partícula. Si estas son pequeñas, aumentará la superficie activa del mineral, será mayor el contacto entre las fases, lo que incide directamente en la conversión de la reacción.



Tiempo de retención

Este parámetro depende principalmente de la cantidad de hogares y en correspondencia con la velocidad del eje central, que depende a su vez de la posición de los dientes en los brazos que remueven y trasladan el mineral en los hogares desde H - 0 hasta H - 16. La actual operación se realiza de forma tal que este parámetro se mantenga en el orden aproximadamente en los 90 min. En los momentos actuales, como está concebido el propio horno "Tipo Herreshoff", muchos especialistas coinciden en que es un parámetro de poca influencia tanto en la metalización de los componentes valiosos de níquel y cobalto, como para la metalización del hierro.

Presión

La presión en el interior del horno debe ser superior a la atmosférica para evitar la entrada de aire desde el exterior que pueda provocar la reoxidación del níquel, cobalto y hierro metalizado. La información de la presión en el horno se obtiene con una frecuencia de segundos, generalmente, estas se encuentran en el orden de:

Hogar Superior H-0 → 10 mm H₂O

Hogar Inferior H-16 → 2 mm H₂O

Cuando por deficiencias del proceso se obtienen valores de presión fuera de los rangos normados, puede el sello de seguridad del horno dispararse y los gases salen directamente a la atmósfera, en caso contrario significa que existe demasiada entrada de aire al horno, esto provoca una oxidación o reoxidación del mineral inicialmente descompuesto y reducido.



Conclusiones parciales

- ✓ En este capítulo se revisaron bibliografías y trabajos realizados como reseña histórica para la actualización de las informaciones existente acerca de la utilización de diferentes aditivos durante el proceso reducción de los minerales lateríticos.
- ✓ Se muestran las transformaciones físico - químicas que ocurren en el horno de reducción, además se visualizan los parámetros influyentes durante este proceso.
- ✓ Está comprobado que el carbón bituminoso es un reductor con altas potencialidades para la reducción del mineral laterítico.



CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La realización del trabajo que se expone en este capítulo se basa en las muestras tomadas en la empresa para efectuar las pruebas a escala de banco, mediante una metodología de trabajo, para de esta forma lograr evaluar el efecto en la reducción de sustituir el petróleo aditivo por carbón bituminoso.

Para la ejecución del trabajo se realizaron las siguientes tareas:

1. Obtención y preparación de muestras de mineral de alimentación a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
2. Preparación de muestras de carbón bituminoso a utilizar durante los experimentos planificados.
3. Procedimiento para la realización de los experimentos.
4. Preparación del horno de botella para realizar las reducciones.
5. Ejecución de los experimentos.
6. Procesamiento y análisis de los resultados.

2.1. Metodología para la toma de la muestra

Se tomaron muestras de mineral de forma aleatoria durante un periodo de 30 días, en la descarga de la correa caliente de los secaderos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, y de polvo en los transportadores de rastrillos. Estas fueron mezcladas en diferentes proporciones para conformar la muestra tecnológica y garantizar dos criterios básicos para estos casos: primero, que la misma sea suficiente para la realización del programa de prueba, y segundo, que sea representativa tanto cuantitativamente como cualitativamente de todo el mineral que procesó la empresa durante el periodo de toma de las muestras.



Además se tomaron muestras durante el mismo periodo del mineral de alimentación a los hornos industriales, según la muestra HR-1.

2.2. Metodología de preparación de las muestras

Para obtener la muestra del mineral de alimentación a hornos fue necesario muestrear el mineral de salida de secaderos y polvos del mismo para mezclarlos en la proporción apropiada para que la mezcla se corresponda con el mineral alimentado a la planta.

La ecuación (1) utilizada para determinar la masa mínima de mineral a tomar para que la muestra sea representativa se representa a continuación, tomada de Mitrofánov (1982):

$$q = k \cdot d^a \quad (1)$$

donde:

q: masa de la muestra, kg;

d: diámetro de la partícula máxima, mm;

k y a: coeficientes empíricos (tabulados).

k= 0,18

a= 2,25

Las porciones de mineral para realizar las pruebas fueron determinadas por cuarteo de la muestra obtenida a partir de los materiales muestreados en la planta industrial.

La homogeneidad y masa de estas para cada caso en particular se logró por cuarteos sucesivos, logrando combinar dos métodos clásicos en la preparación de muestras, el método del cono y anillo además el divisor tipo Rifles.

Ejemplo:

- 1) Se distribuye la muestra de 1000 g (homogenizada) uniformemente a lo largo del cortador; de los dos recipientes que reciben la muestra se descarta uno de ellos.
- 2) El contenido del recipiente que no ha sido descartado, se vuelve a verter sobre el cortador y se repite el proceso hasta obtener la muestra de tamaño deseado.

Muestra de carbón bituminoso

La muestra de carbón bituminoso fue obtenida de la Unidad de Proyectos de Nicaro perteneciente al Centro de Investigaciones del níquel, de las muestras que fueron utilizadas en las pruebas de banco para el Proyecto Ferroniquel. Esta se trituró y molió para realizar análisis químico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y en ACINOX Las Tunas. En la (figura 3 a) se muestra el carbón en estado natural (en situ) y luego de ser preparado para la realización de los experimentos (figura 3 b), en que debe tener un 80 % de la clase – 0,074. El reporte emitido por estas entidades se muestra en la tablas 2.

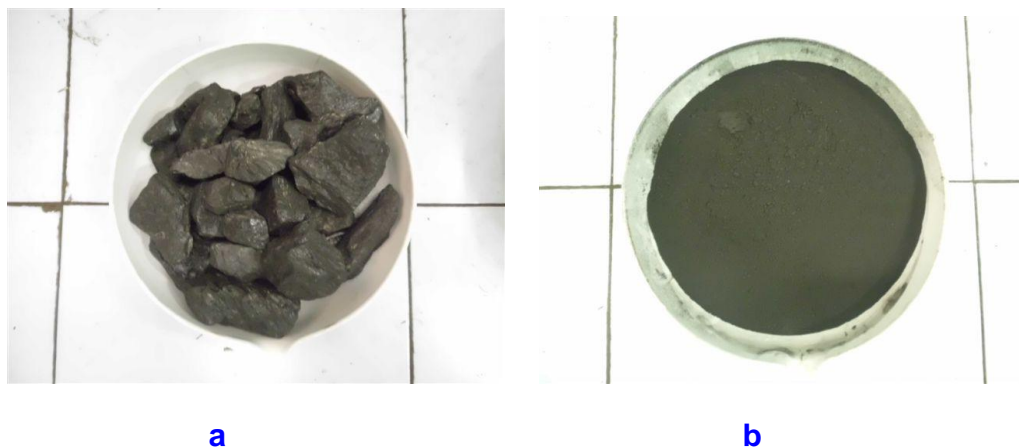


Figura 3. Muestra de carbón bituminoso.

a) Muestra Insitu b) Muestra preparada.

2.3. Procedimiento para la realización de los experimentos

Se obtuvieron tres muestras que son representativas de cada experimento a realizar. Para el caso del petróleo aditivo se realizaron los experimentos y se



obtuvieron los resultados de las extracciones de níquel, esta prueba fue tomada de forma comparativa con el resto de las pruebas a realizar.

Se realizaron pruebas con la sustitución total del petróleo aditivo por carbón bituminoso; además otras con el 114 % de carbón bituminoso. Posteriormente se realizaron con un 88 y 62 % respecto al total de petróleo aditivo que normalmente se utiliza. Y por último se realizó una prueba tentativa con mezclas del 50 % del petróleo aditivo y 50 % de carbón. Todos los experimentos se realizaron con tres réplicas y en las pruebas donde se obtuvieron los mejores resultados se repitieron los experimentos entre 15 y 20 veces. En la figura 4 se observa el procedimiento utilizado para los experimentos.

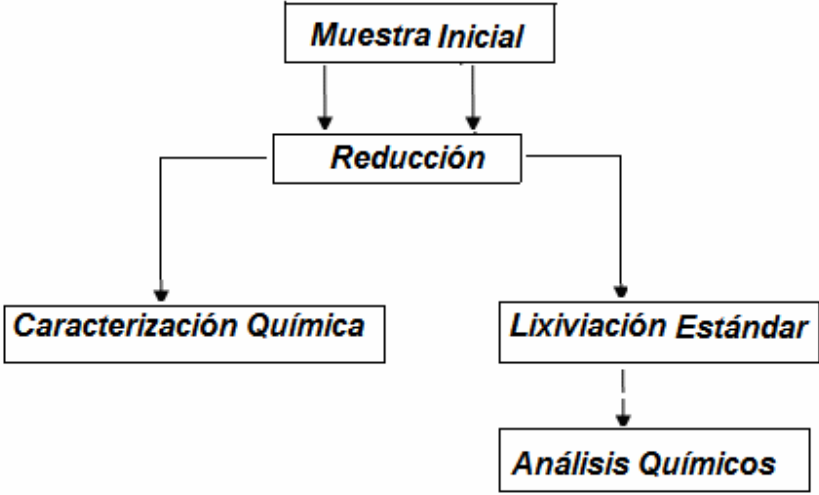
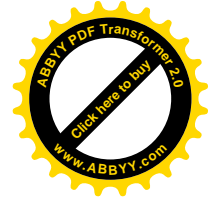


Figura 4. Metodología de experimentación.

Se efectuaron pruebas con mineral que simuló el que procesó la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” en el momento de tomar las muestras primarias (HR-1) a la entrada de los hornos de reducción (consideradas como pruebas en blanco). Los resultados obtenidos sirvieron como indicador de las extracciones que se alcanzarían en la entidad si las condiciones de reducción fuesen similares a las del horno de banco, es decir, en las mejores condiciones; además se utilizaron como datos comparativos con los resultados que se obtuvieron en las restantes pruebas.



2.3.1. Condiciones de experimentación

Las condiciones de reducción se establecieron mediante el criterio de similitud con los hornos de reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, y fueron similares para todas las pruebas, se utilizaron los parámetros que se relacionan a continuación:

Parámetros	Nivel
Mineral alimentado, g	145
Petróleo aditivo, %	2,5
Petróleo combustible, %	2
Temperatura máx, °C	750
Tiempo de residencia, minutos	70 a 75

El tiempo de residencia se prefijó en un rango de 70 a 75 minutos, basado en el informe de identificación del horno Industrial, el régimen de temperatura se prefijó bajo el criterio técnico de lograr en los primeros 30 minutos 600 °C, pues similarmente ocurre en el horno industrial en que se alcanza dicha temperatura en el hogar 7; además de que al finalizar cada experimento la temperatura final fuese de 750 °C.

La cantidad de mineral, carbón y petróleo a introducir se prefijó de acuerdo con las condiciones siguientes:

- Para un volumen de 600 mL de la botella utilizada, se utilizó 145 g de mineral.
- Añadir 2 % de petróleo en sustitución del fuel oil que se suministra como combustible en las cámaras de combustión.

Carbón equivalente es la cantidad de carbón a alimentar para aportar el mismo porcentaje de reductores que aporta el petróleo. Para determinarlo se calcula la cantidad de O₂ que reacciona con el carbón e hidrógeno que contienen ambos materiales. El contenido en el petróleo se tomó de manuales y en el caso del carbón se partió del reportado por Acinox Las Tunas y el H₂, se calculó sobre la



base de datos de manuales en que el H_2 es igual al 5 % del contenido de carbón bituminoso.

Realizar pruebas con 2,5 % de petróleo como aditivo y con cantidades de carbón equivalente algo superiores, inferiores e iguales al petróleo. El carbón equivalente fue calculado en base a que el contenido de carbón e hidrógeno añadido reaccionará con el oxígeno contenido en el carbón y establecido en 1,59 g de carbón bituminoso por gramo de petróleo.

2.3.2. Descripción de los pasos seguidos en las pruebas realizadas

Después de tener disponible el mineral (145 g), el carbón bituminoso (en dependencia de la proporción) y el petróleo equivalente al combustible que actúa como reductor, se añaden en el recipiente y se procede a mezclar con una varilla. Se anota en el reporte de la prueba, la fecha, codificación, hora de arranque, de terminación, las temperaturas de la mufla y botellas en el curso de la operación.

El cumplimiento del régimen térmico planificado en el horno de banco para todos los experimentos realizados se garantizó según el procedimiento siguiente:

1. Se conecta la mufla y prefija la temperatura a 250 °C, la que se incrementa gradualmente a través de las resistencias conectadas, y se mantiene constante al llegar al valor prefijado.
2. Se introducen las dos botellas con las muestras de mineral y se mantiene la temperatura prefijada (250 °C) durante cinco minutos, en este momento se pone en operación el mecanismo motriz y se comienza a tomar lecturas de temperaturas a intervalos de 5 minutos.
3. Se prefija la temperatura de la mufla a 800 °C, la que comienza a subir hasta llegar a 550 °C en que se desconecta una resistencia, el horno continúa con una sola resistencia. Al llegar la temperatura de las botellas a 750 °C, se desconecta la otra resistencia y apaga el mecanismo motriz.
4. Se sacan las botellas de la mufla con las precauciones necesarias (añadir argón). Una vez terminado el proceso, se introduce gas inerte a las botellas a razón de 5 L/minutos, para llevar a cabo el proceso de desacople de las



botellas de la mufla y el mecanismo de transmisión. Sin interrumpir la adición del gas inerte, las botellas se sacan de la mufla, se introducen en la cesta durante 20 minutos. Luego se añade agua corriente para su enfriamiento durante 2 horas.

Terminado el enfriamiento del mineral se procede a extraer una porción para la realización de las pruebas estándar de lixiviación (QT), la cual se efectúa para determinar la máxima extracción durante el proceso de reducción, el procedimiento empleado para la lixiviación se describe a continuación:

1. Se toma un recipiente de 250 mL y se purga con argón.
2. Se le añade amoníaco hasta 200 mL con concentración de 80 a 83 g/L.
3. Se pesan de 70 a 80 g de la muestra del quitasato metálico para añadirla al pomo, siempre se deja suficiente muestra en el recipiente para realizar análisis de metálicos.
4. Se lleva al reactor de laboratorio (cántara) y se le agrega el resto de amoníaco de concentración (80 a 83 g/L) hasta llevarlo a la relación líquido/sólido 10 a 1.
5. Se pone a airear por espacio de 2 horas.
6. Se filtra al vacío.
7. Se lava con amoníaco al 7 %, 3 % y agua destilada, con un volumen de 200 mL cada uno (dividido en tres partes).
8. Se lleva a la estufa a secar, con una temperatura de 150 °C, por un tiempo de dos horas.
9. Se sacan y se ponen en la desecadora hasta que logren temperatura ambiente.
10. Se tritura y se tamiza en un tamiz de 100 mesh.
11. Se envasan en cartuchos de papel previamente codificado e identificados los elementos a determinar (Ni, Co, Fe), para luego ser enviado al laboratorio analítico.



El resto de la muestra que no fue utilizada para la lixiviación estándar, se empleó para la caracterización química del mineral reducido (Fe metálicos, Fe total, S y C).

Para determinar las máximas extracciones de níquel y cobalto a alcanzar se utilizan los resultados del análisis químico del mineral de alimentación para cada prueba en particular, y los del sólido remanente no disuelto luego de haber efectuado la lixiviación estándar QT.

Los cálculos se realizan según la ecuación (2), propuesta en el Manual de control y muestreo (1943) de la empresa “Comandante René Ramos Latour”.

$$Ext.Ni = \left(1 - \frac{Ni_{cola} \cdot Fe_{alim.}}{Ni_{alim.} \cdot Fe_{cola}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

donde:

Ext. Ni – extractable de níquel, %;

Ni_{alim}- contenido de níquel en el mineral de alimentación, %;

Fe_{alim}- contenido de hierro en el mineral de alimentación, %;

Ni_{cola}- contenido de níquel en la cola residual de la lixiviación estándar QT, %;

Fe_{cola}- contenido de hierro en la cola residual de la lixiviación estándar QT, %.

Para el caso del extractable de cobalto se emplea la misma ecuación, con los contenidos del elemento en el mineral de alimentación y en la cola en sustitución del níquel.

2.4. Equipos utilizados

A continuación se describen los equipos fundamentales y auxiliares utilizados en las pruebas de banco, como son:

- Hornos Mufla,
- Balanza digital,

- Reactor de lixiviación,
- Cronometro digital.

2.4.1. Instalación para la reducción

La instalación está formada por una mufla con control automático de temperatura, en la que se introducen dos botellas que se acoplan mediante engranajes movido por un moto reductor que las hacen girar al unísono.

La mufla tiene dos resistencias, que pueden ser conectadas alternativamente según la temperatura que se desee lograr, lo que permite además regular la velocidad de calentamiento. La temperatura es medida por dos termopares que se introducen en el interior de las botellas y envían la señal al sistema informativo de la planta piloto.

2.4.2. Características técnicas de la mufla

En la figura 5 se muestra la mufla utilizada para el calentamiento del mineral en el proceso de reducción.



Figura 5. Horno Mufla

- ✓ Procedencia: Alemana,
- ✓ Temperatura de operación: de 25 a 1200°C,



- ✓ Potencia: 2,8 kw
- ✓ Tensión: 220 V
- ✓ Frecuencia: 60 Hz
- ✓ Revestimiento de la cámara interior de la mufla por óxido de silicio.
- ✓ Tamaño de la cámara
- ✓ Ancho: 550 mm
- ✓ Alto: 95 mm
- ✓ Largo: 300 mm
- ✓ Tamaño exterior
- ✓ Ancho: 550 mm
- ✓ Alto: 350 mm
- ✓ Largo: 550 mm
- ✓ Peso: 30 kg

2.4.3. Características de la instalación de lixiviación

En la figura (6) se muestra el banco utilizado para realizar la lixiviación estándar de las muestras para el posterior análisis químico.



Figura 6. Banco de Lixiviación



- ✓ Reactor de dos litros
- ✓ Agitación: mecánica
- ✓ Alto: 241 mm
- ✓ Ancho: 146 mm

2.4.4. Balanza

- ✓ Pesaje máximo: 10 kg,
- ✓ Error D: 0,1 g,
- ✓ Marca Radwag,
- ✓ Corriente: 220 V.

2.5. Técnicas analíticas utilizadas

2.5.1. Técnica de Absorción Atómica

Con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en las muestras, se utilizó la técnica de espectroscopia de absorción atómica, que permitió determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los siguientes elementos: hierro, níquel, cobalto, magnesio, dióxido de silicio.

Los componentes de un equipo de Espectroscopía de Absorción Atómica son las siguientes: Fuente de radiación, atomizador, monocromador y detector. En la figura 6 se muestra el equipo de forma integral.



Figura 7. Equipo de Espectroscopía de Absorción Atómica



La base de este método consiste en pasar el elemento a analizar a su forma atómica en estado libre por medio de la llama, a través de la cual se hace incidir una radiación continua, que es característica para cada elemento. A través de un dispositivo adecuado se realiza la selección de la radiación y medida de la variación de la intensidad de la luz, relacionada directamente con la concentración del elemento. Esquemáticamente se distingue de la forma siguiente:

Fuente -----Atomizador -----Monocromador -----Registro y medición.

2.5.2. Técnica de análisis de carbón y azufre

Los análisis de carbón y azufre en el mineral reducido se determinaron por el analizador simultáneo de azufre y carbón (figura 7). El equipo asimila muestras en forma de polvo o virutas metálicas, con un rango de análisis de carbón de 0 a 6 % y azufre de 0 a 0,5 %.



Figura 8. Electro analizador de azufre y carbón

Este método se fundamenta en la combustión de la muestra en presencia de oxígeno, el cual emplea un acelerador en un horno de alta frecuencia, el combustible al reaccionar da lugar a la formación de dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de azufre (SO_2), lo que permite determinar cuantitativamente los componentes a través del analizador infrarrojo, en correspondencia con el peso de la muestra y los factores de calibración.



Conclusiones parciales

- ✓ Las muestras tomadas en la empresa “Ernesto Che Guevara” para la reducción, se consideran representativas con respecto al mineral que se procesa actualmente.
- ✓ Las técnicas analíticas empleadas para la reducción, fueron aplicadas en instalaciones y equipos que garantizan la confiabilidad de los resultados.



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos al realizar las pruebas a escala de banco, con las muestras de mineral de alimentación que se tomaron en la empresa “ Comandante Ernesto Ché Guevara” y la muestra de carbón bituminoso.

3.1. Resultados del análisis químico de las muestras iniciales y las de alimentación a los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Posterior a la preparación de las muestras y el análisis químico, se obtuvieron los resultados que se exponen en la tabla 1. Estos son mostrados de forma comparativa, donde se ilustran los parámetros estadísticos de la muestra tecnológica después de preparada y la muestra tecnológica tomada según HR-1 durante el periodo de toma de muestra.

Tabla 1 Comparación de parámetros estadísticos de muestra tecnológica vs muestra HR-1 de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara, %.

Estadígrafo	Ni		Co		Fe		SiO ₂		MgO	
	TEC	HR-1	TEC	HR-I	TEC	HR-1	TEC	HR-I	TEC	HR-1
Promedio	1,23	1,24	0,103	0,104	39,10	39,28	10,62	7,83	6,24	3,33
Máximo	1,24	1,33	0,104	0,106	39,34	40,05	10,82	9,39	6,49	4,37
Mínimo	1,23	1,18	0,103	0,102	38,80	38,28	10,30	6,19	5,79	2,43
Dev. Están	0,006	0,052	0,001	0,001	0,275	0,618	0,282	1,135	0,393	0,681



Tec: Muestra Tecnológica preparada con el mineral de descarga de los secaderos y el polvo de estos.

HR-1: Muestra de mineral alimentado a la planta de hornos de reducción de la empresa “Ernesto Che Guevara”.

Los resultados comparativo de ambas muestras, recogidos en la tabla 1, indican la gran similitud en cuanto a composición química de la muestra tecnológica preparada para la realización de los experimentos y la que se tomó en la entrada de los hornos de reducción de la empresa, lo que confirma que ambos son representativos del mineral que procesó esta entidad durante el periodo de toma de la muestras, lo que confía la posibilidad de efectuar las corridas de banco con el mineral. Los bajos valores de la desviación estándar para todos los elementos analizados en ambas muestras son significativos de la estabilidad del proceso en el periodo en que fueron tomadas, con resultados inferiores para el caso de la muestra tecnológica (TEC).

Los resultados del análisis del carbón bituminoso a emplear como aditivo en sustitución del fuel oil (petróleo), según valores reportados por los laboratorios de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y ACINOX de Las Tunas son mostrados en las tablas 2.

Tabla 2 Resultados de análisis químico y valor calórico del carbón bituminoso.

Carbón, %	Azufre, %	Valor calórico kcal/kg
73,40	0,70	7497,53

Los resultados mostrados en la tabla 2, revelan el bajo contenido de azufre que contiene el carbón bituminoso, con valores muy inferiores al petróleo tecnológico que se ha utilizado históricamente por las plantas cubanas productoras de níquel, lo que constituye un aspecto positivo para su utilización; respecto al contenido de carbón y valor calórico para ambos casos son inferiores a los del petróleo. Significativo resulta el contenido de materiales volátiles con valores superiores a otros carbones (carbón antracita y hulla), lo que resulta de gran interés, pues



favorece su posible empleo como combustible aditivo durante el proceso de reducción.

3.2. Resultados del régimen operativo logrado durante la ejecución de las pruebas de reducción en el horno de banco

Para lograr cumplir el propósito de mantener un tiempo total de residencia de 70 a 75 minutos, una temperatura de 600 °C a los 30 minutos y 750 °C al terminar. Se evaluó la velocidad de calentamiento por tanteo, se conecta una de las resistencias, las dos resistencias y sin resistencias. Esto permitió lograr un régimen de temperaturas apropiado, al introducir las botellas a una temperatura fija, con las dos resistencias conectadas y una sola a intervalos de tiempos fijos, lo que permitió obtener los regímenes de temperaturas que se presentan en las figuras 9 y 10.

Este procedimiento permitió obtener un régimen estable en todas las pruebas, pues la influencia de la cantidad y tipo de reductor sobre las reacciones exotérmicas y endotérmicas es muy baja y el aporte de calor a las botellas era siempre el mismo.

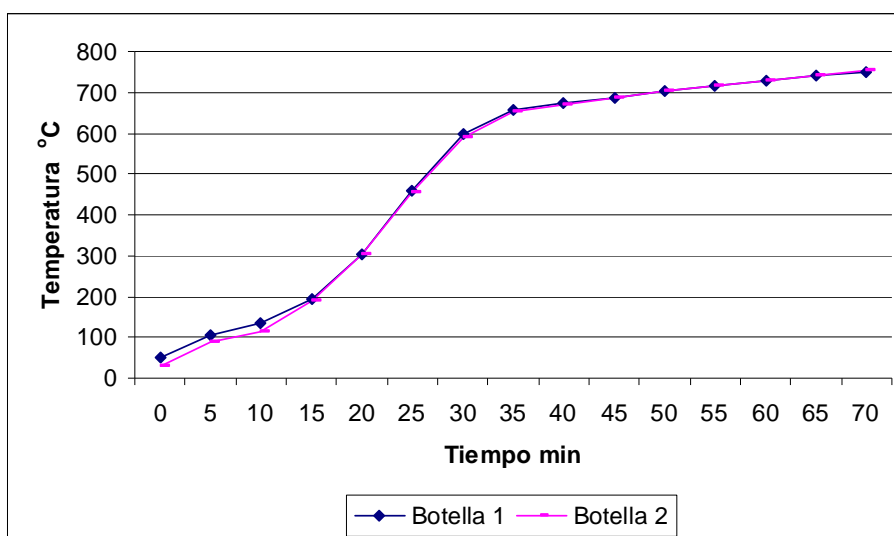


Figura 9 Temperatura de reducción de dos botellas de una prueba.

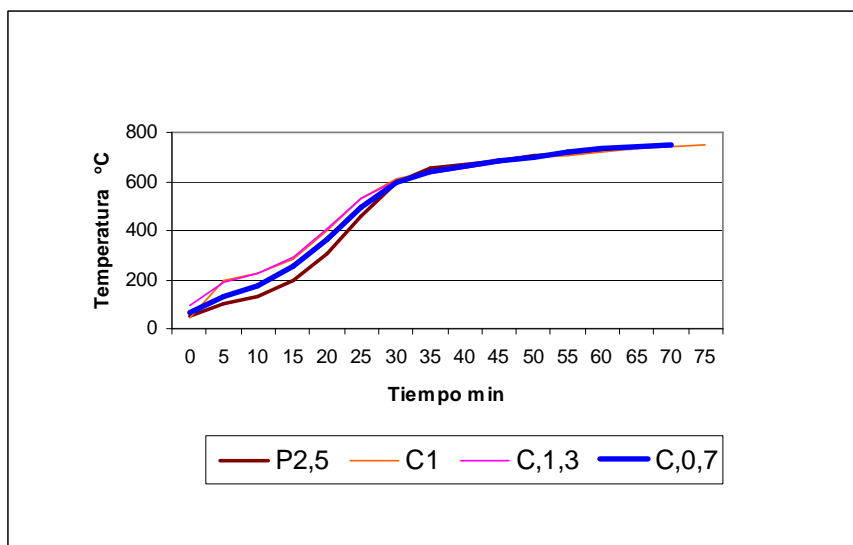


Figura 10 Temperatura de reducción de cuatro botellas de distintas pruebas.

Descripción de las series de la figura 10

P 2,5= Prueba realizada utilizando 2,5 % de petróleo aditivo.

C,1: Prueba realizada sustituyendo todo el petróleo aditivo por carbón bituminoso.

C,1,3: Prueba realizada sustituyendo todo el petróleo aditivo por carbón bituminoso hasta un 130 %.

C, 0,7: Prueba realizada sustituyendo el petróleo aditivo por carbón bituminoso hasta un 70 %.

Ejemplos de pruebas realizadas con diferentes proporciones de aditivos (cantidades de carbón bituminoso y petróleo) se ilustran en las tablas 3, 4 y 5.



Tabla 3 Comportamiento de la temperatura en dos pruebas realizadas con 2,50 % petróleo aditivo y 2 % petróleo combustible.

Pet. Comb, %	Pet. Aditivo, %	Temp. Mufla, °C	Tiempo, min	Temp. Bot. 1, °C	Temp. Bot. 2, °C
2	2,5	267	0	38	60
		253	5	136	160
		306	10	173	199
		385	15	254	271
		463	20	366	372
		540	25	490	502
		596	30	587	593
		627	35	628	635
		654	40	666	661
		678	45	684	679
		702	50	705	701
		717	55	714	713
		736	60	724	723
		753	65	736	738
		760	70	750	750

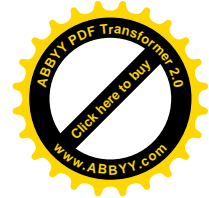


Tabla 4 Comportamiento de la temperatura en dos pruebas realizadas con 45,50 kg de carbón / tonelada de mineral y 2 % petróleo combustible.

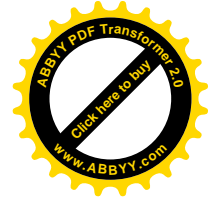
Carbón Equivalente, %	Consumo específico de carbón, kg/t.	Pet. Comb, %	Temp. Mufla, oC	Tiempo, min	Temp. Bot. 1, oC	Temp. Bot. 2, oC
1,14	45,5	2	253	0	36	39
			253	5	99	98
			320	10	137	154
			401	15	218	238
			477	20	322	343
			556	25	468	464
			594	30	589	574
			627	35	642	634
			656	40	669	664
			684	45	693	689
			704	50	712	706
			725	55	731	723
			744	60	748	740
			750	65	750	748
752	70	752	750			



Tabla 5 Comportamiento de la temperatura en dos pruebas realizadas con 24,50 kg de carbón/tonelada de mineral y 2 % petróleo combustible.

Carbón Equivalente, %	Consumo específico de carbón, kg/	Pet. Comb, %	Temp. Mufla, °C	Tiempo, min	Temp. Bot. 1, °C	Temp. Bot. 2, °C
0,62	24,5	2	259	0	60	37
			253	5	143	102
			280	10	173	142
			317	15	199	213
			413	20	278	306
			490	25	379	446
			568	30	514	558
			617	35	615	632
			644	40	641	648
			668	45	664	668
			688	50	682	684
			707	55	700	703
			728	60	714	716
			745	65	729	731
			762	70	744	741
767	72	750	751			

Las curvas de temperaturas mostradas en las figuras 9 y 10, así como los valores que se presentan en las tablas 3, 4 y 5 demuestran la gran estabilidad de este parámetro tan importante en el proceso de reducción. Significativo resulta el hecho que se hayan alcanzado para todos los casos temperaturas en el rango desde 600 hasta 650 °C en un tiempo que fluctúa entre 30 y 35 minutos, además de haber logrado al terminar cada experimento temperatura alrededor de 750 °C, valores que simulan el régimen térmico del horno industrial. Debe destacarse el tiempo de



duración de los experimentos, el que estuvo entre 70 y 72 minutos, valores que están en el rango del tiempo de residencia que tienen los hornos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, (70 a 75 minutos).

La pendiente de las curvas de calentamiento mostradas en los primeros 35 minutos, son indicativa de la alta velocidad de calentamiento durante este periodo de tiempo, y son representativa de la zona de calentamiento y descomposición del mineral dentro del horno industrial, por el contrario en los restante 30 a 35 minutos que dura el proceso de reducción estas son más acostadas, siendo indicativo de la zona de reducción del horno.

3.2.1. Resultados de las extracciones

Se calcularon las extracciones por cociente del níquel metálico entre el níquel total, y de la lixiviación estándar (QT) de cada prueba, se utilizaron los datos del mineral lixiviado y de la muestra obtenida de los minerales de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Se confeccionó una tabla resumen con los resultados promedios de la evaluación de distintos rangos de adición de reductores y los valores de extracciones para las mismas. Para todos los casos se empleó un 2 % de suministro de petróleo, valor representativo de los reductores aportados por el combustible que se adiciona por las cámaras de combustión de los hornos industriales, los resultados promedios se muestran en la tabla 6, derivados de los que aparecen en el anexo 1.

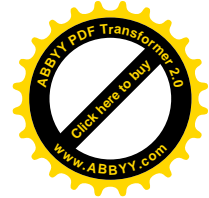


Tabla 6 Resultados promedios de las extracciones logradas con diferentes regímenes de reducción.

°		Petróleo	Petróleo	Mineral Lixiviado			Extracciones	
				QT %			%	
Carbón equiv, %	Consumo específico de carbón, kg/t	Aditivo %	Comb. %	Ni	Co	Fe	Ni	Co
0	0	2,5	2	0,20	0,057	43,00	85,64	50,28
0	0	2,5	2	0,20	0,057	43,00	85,64	50,28
1,14	45,50	0	2	0,21	0,056	43,71	85,17	51,56
1,01	40,25	0	2	0,22	0,05	41,50	83,33	54,68
0,88	35,00	0	2	0,25	0,055	42,46	81,83	51,77
0,62	24,50	0	2	0,33	0,06	41,82	75,37	49,32
C-0,5	20,13	1,25	2	0,28	0,06	43,10	82,57	46,81

Los datos de la tabla anterior indican que los resultados de extracciones con carbón tienen un incremento paulatino y acorde al aumento de este desde 24,50 kg /t en que se alcanza como promedio 75,37 % de extracción de níquel hasta 45,50 kg /t, en que el valor de extracción es como promedio 85,17 %, el que resulta prácticamente similar al que se logra con 2,5 % de petróleo aditivo. Significativo resulta el valor que se obtiene al sustituir el 50 % del petróleo aditivo por el carbón equivalente, pues el resultado de extractable de níquel de 82,57 %, es inferior al que se alcanza con el petróleo aditivo y al sustituir el 100 % de este por el carbón equivalente.

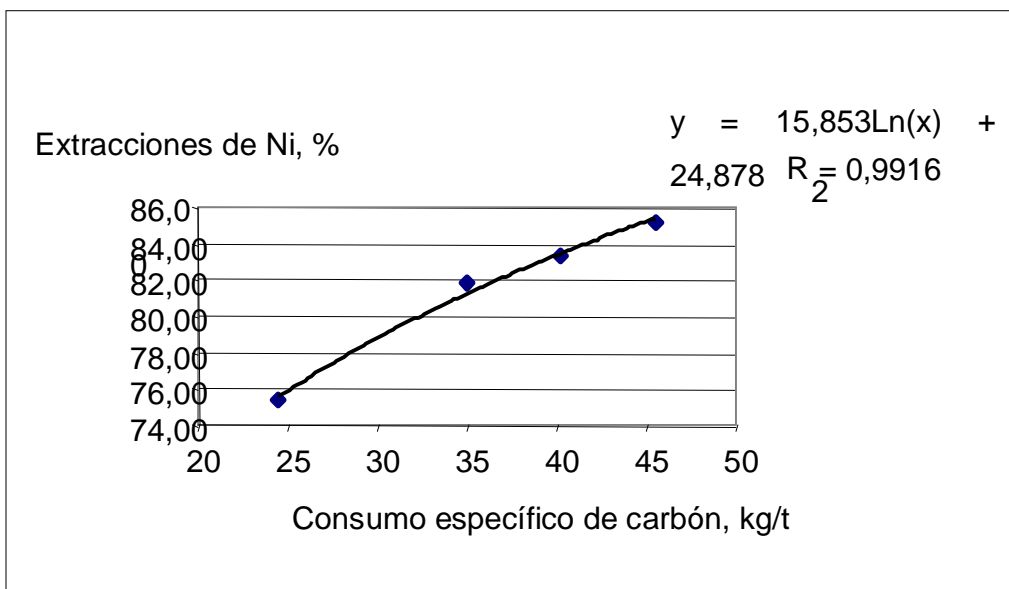


Figura 11. Extracciones de Ni Vs cantidad de carbón añadido con 2,0 % de petróleo combustible.

En la figura 11 se muestran los resultados que permiten evaluar las leyes que rigen el comportamiento del extractable de Ni en función de las cantidades de carbón añadido, en los que se incluyen las ecuaciones de regresión correspondientes.

Para una mejor comprensión se presenta la ecuación de regresión.

$$\text{Extracción Ni} = 15,853 \cdot \ln(\text{kg/t carbón}) + 24,878 \quad R = 1 \quad \text{petróleo 2 \%}$$

La ecuación logarítmica obtenida indica que los coeficientes de correlación son buenos y es concebible interpolar para definir los resultados de extractables de níquel que se obtendrán al aumentar el carbón utilizado como aditivo. Significativo resulta el valor que se obtiene (86,9 %) para el caso de 50 kg/t, superior en 1,34 al que se obtiene con el empleo de petróleo aditivo. Para mejor comprensión se muestran los resultados en la tabla 7.



Tabla 7 Extracciones de Ni según las ecuaciones de regresión.

Aditivos		Extracciones con 2 % combustible
Consumo específico de carbón, kg/t.	% Petróleo	
-	2,5	85,56
55,00	-	88,41
50,00	-	86,90
45,50	-	85,40
40,25	-	83,46
35,00	-	81,24
24,1	-	75,59

Los datos de extracciones con petróleo aditivo y con valores de altos contenidos de carbón, al utilizar 2 % de petróleo combustible son superiores a los alcanzados en el proceso industrial, lo que se debe a las siguientes razones.

- El régimen de temperatura de las pruebas de banco está idealizado, mientras que en la planta industrial no existe un régimen semejante en prácticamente ningún horno.
- En la prueba de banco todo el mineral procesado está sometido a un tiempo de residencia igual, mientras que en el horno industrial la distribución del tiempo de residencia indica que el mismo es muy diferente.

En el anexo 2 se transcribe la parte del informe “Identificación del Horno Industrial”, en que aparece la tabla que indica el tiempo en que sale el mineral del horno.

3.2.2. Análisis de contenido de los elementos en el mineral reducido

En la tabla 8 se presentan los resultados del análisis químico del mineral reducido con 2 % de petróleo combustible.



Tabla 8. Resultados del análisis químico del mineral reducido.

Carbón añadido		Fe ^o %	FeO %	Fe _t %	S %	C %
Equivalente, %	kg/t					
0,00	0,00	2,42	31,04	42,71	0,39	2,04
1,14	45,50	2,92	30,59	43,46	0,36	3,88
1,01	40,25	2,26	30,04	41,27	0,34	3,36
0,88	35,00	2,95	28,60	42,09	0,33	3,02
0,62	24,50	2,18	28,27	41,26	0,32	2,12

Las pruebas realizadas sin carbón equivalente se efectuaron con 2,5 % de petróleo aditivo.

Los contenidos de hierro metálico no siguen una ley en dependencia del carbón añadido para ambas variantes de reducción. El valor para la reducción con la mayor adición de carbón es superior al de la reducción con petróleo.

Los valores de carbono en el mineral reducido son mayores en la reducción con carbón, mientras que para el azufre son ligeramente inferiores, con un incremento ligero al aumentar el carbón añadido, lo que se explica porque se trabajó con un petróleo de bajo contenido de azufre (1,4 %). Más adelante se presenta un balance de azufre y carbón con datos semejantes al proceso industrial, lo que permite una mejor ilustración sobre este aspecto.

Al utilizar carbón en lugar de petróleo, el balance de materiales al horno cambia. En la tabla 9 se presentan los datos de carbón y azufre añadidos con el carbón bituminoso con 50 kg/t y 25 kg de petróleo como reductores, sin considerar el petróleo combustible y con 55 kg/t suministrado por cámaras.

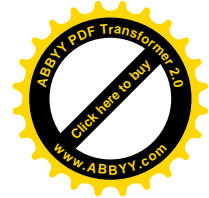


Tabla 9 Balance de carbón y azufre para las condiciones industriales, suministrado con los reductores y con el petróleo combustible.

Balance de Carbón y Azufre	Carbono		Azufre	
	En petróleo	En carbón	En petróleo	En carbón
Contenidos de S y C, %	86,00	73,40	2,00	0,70
Cantidad alimentado con reductores,%	21,50	36,70	0,50	0,35
Relación de cantidades alimentadas C/petróleo,	1,71	-	0,70	-
Cantidad alimentado en total,	68,80	84,00	1,60	1,45
Relación de cantidades alimentadas C/petróleo,	1,22	-	0,91	-

Al sustituir el petróleo aditivo por carbón se adiciona con los reductores un 71 % más de carbón y 30 % menos de azufre y al adicionar la cantidad de 55 kg/t de petróleo por las cámaras de combustión, los resultados cambian a 22 % de aumento del carbón y a 10 % menos de azufre. Se ha considerado el petróleo con 2 % de azufre, en caso de ser más alto este contenido, la disminución de la relación del azufre aumentará considerablemente.

3.3. Valoración económica preliminar

Para lograr resultados semejantes de extracción a los del petróleo aditivo, se añadió una cantidad de carbón de 45,5 kg/t de mineral en lugar de 25 kg/t. El coste del petróleo según reportes de US Energy information Administration es de 778,85 USD/t, y el carbón de 91,45 USD/t. Basado en la alimentación a los hornos industriales de 400 t/h y con una eficiencia operativa de 93 %, se realiza el cálculo económico que se ilustra en la tabla 10.



Tabla 10 Cálculo económico de la sustitución del petróleo aditivo como reductor por carbón bituminoso.

Productividad de los Hornos, t/h	400,00
Consumo específico de petróleo aditivo, kg/t	25,00
Consumo específico de carbón bituminoso, kg/t	45,50
Costo del petróleo aditivo, USD /año	63554160
Costo del Carbón aditivo, USD /año	13581422,40
Diferencia Petróleo – Carbón, USD/año	49972737,60

Basado en los indicadores que aparecen en la tabla anterior se observa que al sustituir 25,0 kg de petróleo como aditivo/tonelada de mineral por 45,50 kg de carbón bituminoso como aditivo/tonelada de mineral; a los costos actuales de ambos reductores se obtiene una diferencia a favor de la utilización del carbón, equivalente a 49 972 737,60 USD, lo que indica preliminarmente la factibilidad económica de la sustitución del petróleo aditivo por carbón.

Conclusiones parciales

1. Al utilizar carbón bituminoso en la reducción:
 - Se logran extracciones semejantes a las alcanzadas con el petróleo aditivo al utilizar dosificaciones de 45,5 kg de carbón/t de mineral.
 - Se considera que los contenidos de carbón en el mineral reducido debe aumentar y disminuir los de azufre.
 - Los contenidos de hierro metálico en el mineral reducido no deben cambiar significativamente.
 - Al sustituir 25 kg/t de petróleo aditivo por 45,5 kg/t de carbón bituminoso en la reducción del mineral, se logra una disminución de los costos de 49972737,60 USD/año.



CONCLUSIONES

La sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el proceso de reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” influye positivamente ya que con la proporción de 45,50 kg/t de carbón bituminoso, se logran extracciones de reducción en el rango de valores que se obtienen con petróleo aditivo, con menor contenido de azufre en el mineral reducido; los costos por este concepto disminuyen en 49 972 737,60 USD/año.



RECOMENDACIONES

Realizar pruebas a escala piloto que permitan corroborar los resultados obtenidos en los experimentos a escala de banco.



BIBLIOGRAFÍA

ALEPÚZ, H. et al (1993). Informes Parciales. Introducción del petróleo Aditivo en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

ALEPUZ, H et al. (1996). Resumen del uso de carbón antracita en la reducción.

ALEPUZ, H. (1993). Mejoramiento de los índices técnico- económicos del procesamiento de mineral en los hornos con tecnología PRIOR

ÁLVAREZ Y (2011). Estudio a escala de banco del efecto de la homogenización del mineral en el proceso de reducción de níquel y cobalto. Trabajo de Diploma.

CASTELLANOS J (1976). Cinética de la reducción de los minerales oxidados de níquel de Cuba

CHANG A (1999). Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato – amoniacal”. Revista Min. Geo., Vol. XVI, No 1: 76-82.

CIPIMM (2012). Información de la conferencia impartida por compañeros.

ESTENOZ, S.; ESPINOSA, M. (2003). Prueba de homogeneización y secado solar del mineral (Parte I): Centro de Investigaciones del Níquel, Cuba. Informe de Investigación. 48p.

GARCÍA G. (2002). Informes técnico del CEDINIQ. Problemas del extractable en la Planta de Hornos de Reducción.

GARCÍA S (2010). Comportamiento del carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo en el proceso de reducción de los hornos de hogares múltiples de la Empresa “Comandante. René Ramos Latour” de Nicaro. Trabajo de Diploma



LEGRÁ et al (2011). Informes técnico del CEDINIQ. Estabilización de la calidad del mineral alimentado a la planta de preparación de mineral y hornos de reducción de la Empresa Ernesto Che Guevara”. 2da etapa. Biblioteca del CEDINIQ.

LEGRÁ (2012). Brinda información sobre el uso de aditivos en Greenvel.

LEGRÁ et al. (2007). Evaluación del efecto del índice de mezclado del petróleo en mezcladora de paletas. Informe técnico.

LEGRÁ, A. (2007). Separación de fracciones +200 mm, homogenización y validación de muestras tecnológicas de minerales especiales. Reporte técnico. FA1/00426.

LEGRÁ, A. (2011). Estabilización de la calidad del mineral alimentado a la planta de preparación de mineral y hornos de reducción de la Empresa Ernesto Che Guevara”. 1ra etapa. Biblioteca del CEDINIQ

MANUAL DE OPERACIONES DE NICARO 19743 Empresa “Comandante Rene ramos Latour”.

MITROFANOV S et al.(1982). Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales.

ONISHIN, B. (1968) Reducción de la Serpentina utilizando como agente reductor el Fuel-Oil en condiciones similares a las del horno rotatorio. Informe Técnico. Nicaro, Minbas.

PAZ, M. (2012). Resumen sobre informes realizados en Nicaro para la reducción del mineral.

REID G (1990). Conferencia sobre las características de la reducción del mineral laterítico impartida en el CILA.

REZVANOV, G. Y CASTELLANOS, J. (1969). Estudio sobre el uso del petróleo aditivo para la reducción del mineral laterítico. Informe Técnico. Nicaro, Minbas.



ROSABAL CARBALLO A., HENRY SERRANO R. (1990): Influencia del rendimiento por cámaras en el extractable y su correlación con la primera etapa de lixiviación. Trabajo de diploma. Moa.



ANEXOS

Anexo 1 Resultados de extracciones de diferentes pruebas

Consumo específico de carbón, kg/t	Petróleo Aditivo, %	Petróleo Comb., %	Mineral Lixiviado QT, %			Extracciones, %	
			Ni	Co	Fe	Ni	Co
0	2,5	2	0,19	0,05	43,55	86,50	57,15
0	2,5	2	0,15	0,05	43,37	88,99	56,97
0	2,5	2	0,21	0,06	41,72	84,06	46,55
0	2,5	2	0,21	0,06	41,72	83,91	42,02
0	2,5	2	0,22	0,06	42,09	83,91	47,92
0	2,5	2	0,20	0,06	45,57	86,44	51,07
24,50	0	2	0,36	0,06	42,27	73,22	49,55
24,50	0	2	0,30	0,06	41,36	77,51	48,92
24,50	0	2	0,35	0,05	43,74	75,39	49,50
35,00	0	2	0,24	0,05	43,19	82,58	55,03
35,00	0	2	0,25	0,06	41,72	81,07	48,37
35,00	0	2	0,25	0,06	43,55	81,85	51,90
40,25	0	2	0,18	0,05	42,46	86,67	59,64
40,25	0	2	0,22	0,05	42,09	83,55	56,57
40,25	0	2	0,23	0,05	41,75	82,65	52,93
40,25	0	2	0,25	0,05	39,71	80,43	49,56
45,50	0	2	0,22	0,05	43,19	83,89	56,79
45,50	0	2	0,20	0,05	41,36	84,68	52,49
45,50	0	2	0,22	0,05	41,54	83,77	51,78
45,50	0	2	0,25	0,05	40,99	81,34	50,21
45,50	0	2	0,15	0,06	45,48	89,43	50,14
45,50	0	2	0,20	0,06	45,93	86,20	50,63
45,50	0	2	0,22	0,06	45,75	84,78	52,09
45,50	0	2	0,20	0,06	44,47	86,17	48,16
45,50	0	2	0,20	0,06	44,65	86,23	51,75
C-0,50	1,25	2	0,24	0,06	43,00	82,80	46,39
C-0,50	1,25	2	0,24	0,06	43,19	82,36	47,50
C-0,50	1,25	2	0,24	0,061	43,12	82,55	46,54



Anexo 2. Tiempo de Residencia

La tabla I muestra el tiempo en que sale el 10 % del mineral, de 28 a 34,5 minutos, mientras que el tiempo de residencia fue de 72 a 74 minutos. Se mantienen los valores originales de la identificación del horno industrial.

Tabla I. Distribución del tiempo de residencia del horno industrial de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Prueba	10 %	Tiempo medio, min
1	28,03	73,0
2	30,63	72,2
3	34,5	74,4

Las figuras siguientes muestran la distribución del tiempo de residencia y el porcentaje de salida del mineral alimentado con respecto al tiempo de una prueba.

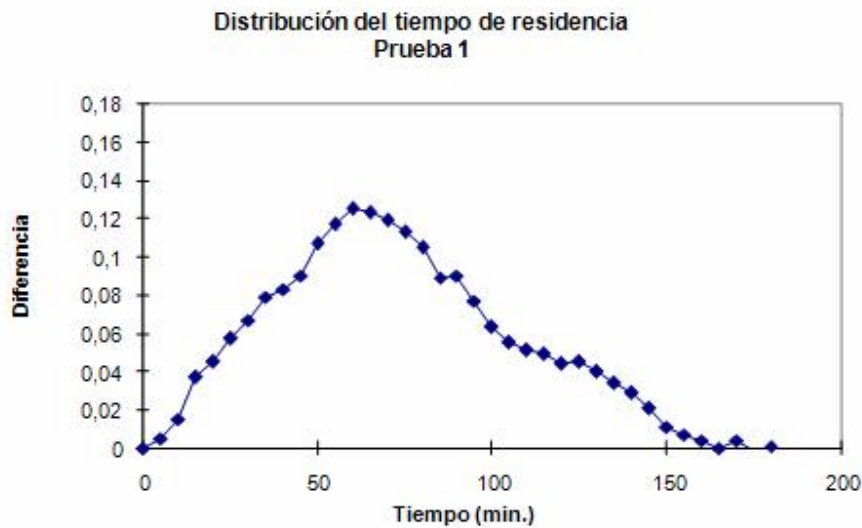


Figura 1



Distribución Acumulativa Prueba 1

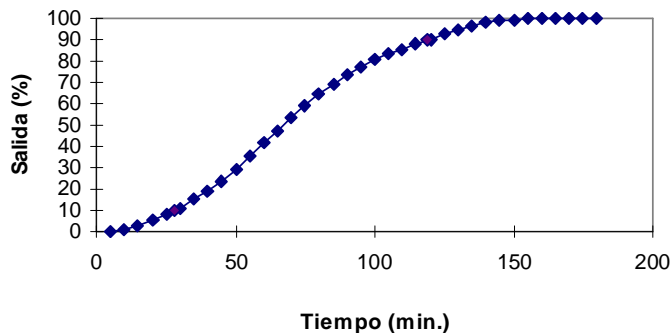


Figura 2

Se observa que en el gráfico 1 el mineral empieza a salir desde el primer minuto, por lo que la extracción del mineral que sale con un bajo tiempo de residencia debe ser muy baja, lo que no puede ser compensado por una extracción extraordinariamente alta del mineral que está más de 100 min dentro del horno. Si además se tiene en cuenta que el mineral que sale primero es el más pesado, de mayor granulometría, mientras que el más ligero es arrastrado por los gases y redepositado en los hogares superiores o atrapado por el ciclón y alimentado de nuevo al horno, queda claro que la prueba de banco, al realizarse con tiempos de residencia y régimen idealizado, debe dar un valor mayor que el industrial.