



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia y Química

TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y
MATERIALES

Obtención de productos metalizados base hierro, partir de las colas nuevas de la tecnología
CARON en Moa.

Autor: Henry Antonio BinghamAntuán

Moa, 2024



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad de Metalurgia y electromecánica
Departamento de Metalurgia y Química

TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y
MATERIALES

Obtención de productos metalizados base hierro, partir de las colas nuevas de la tecnología
CARON en Moa.

Autor: Henry Antonio BinghamAntuán

Tutores:

Dr.C José Alberto Pons Herrera

Dr.C Hugo Javier Angulo Palma

Dr.C María caridad Ramírez Pérez

Moa, 2024

AGRADACIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al claustro de profesores de la universidad por trasmitirme sus conocimientos a lo largo de estos seis años. Gracias a su labor pude encaminarme en la carrera y cuando obtenga mi título como profesional, decir que fue gracias a ellos. A mis tutores Dr.C María Caridad Ramírez Pérez, M.Sc Hugo Javier Angulo Palma y en especial alDr.CJosé Alberto Pons Herrera por inculcarme la continuidad de los estudios y siempre estar al tanto de mi progreso en la carrera, a mis compañeros de aula que se apoyaron en mí en momentos de estudio y yo en ellos, a mi madre por estar al tanto en mi recorrido por la vida y llevarme siempre `por el buen camino, a mi mujer por entenderme y saber que quiero para mi futuro y nunca dejar que me desvinculara de mí propósito. A mi familia por darme todo el apoyo para seguir adelante y no mirar para atrás y en general a toda aquella persona que tuvo que ver conmigo en mí formación como futuro profesional. A la Revolución por darme esta oportunidad de manera gratuita y que mejor forma de devolver el favor que contribuyendo con mi tesis, y realizando un aporte al reglón de la metalurgia para la región.

A todos:

Mi más eterno agradecimiento.

DEDICATORIA

A pesar de las incontables personas que estuvieron al tanto de mi progreso en la realización de mis estudios en la carrera como futuro ingeniero metalúrgico, dedicar este importante logro a mis familiares y profesores, en especial a mi madre, mi mujer, mis tutores que han sido espléndidos conmigo en todos los sentidos y a la Revolución por poder formarme como profesional de manera gratuita.

RESUMEN

A nivel internacional Cuba ocupa un alto puesto en cuanto a las reservas de minerales lateríticos de níquel, los cuales se caracterizan por una distribución no igualitaria de los valores metálicos en las diferentes capas que componen el perfil ferruginoso, por lo que las tecnologías que han sido diseñadas para procesar estos minerales no logran su aprovechamiento racional, provocando que se genere una gran cantidad de residuales de los procesos mineros y tecnológicos. En el siguiente trabajo se exponen resultados de análisis físicos, químicos, mineralógicos y térmicos realizados a muestras de colas del proceso (CARON) de la Empresa Ernesto Che Guevara, con el objetivo de obtener muestras a escala de banco y laboratorio de un producto metalizado base hierro para aumentar la producción de aceros inoxidable y de alta calidad en la siderurgia del país. Esta tesis forma parte de un proyecto que incluye el uso de diferentes reductores y materias primas localizadas en la región de Moa, con el objetivo de obtener arrabio enriquecido de Ni y Cr esenciales para la producción de ferroaleaciones y aceros en Cuba.

Palabras claves: Arrabio, Colas proceso CARON.

ABSTRACT

At the international level, Cuba occupies a high position in terms of reserves of lateritic nickel minerals, which are characterized by an unequal distribution of metallic values in the different layers that make up the ferruginous profile, so that the technologies that have been designed to process these minerals do not achieve their rational use, causing a large amount of waste from mining and technological processes to be generated. The following work presents the results of physical, chemical, mineralogical and thermal analyses carried out on samples of process tailings (CARON) of the Ernesto Che Guevara Company, with the aim of obtaining samples on a bench and laboratory scale of an iron-based metallized product to increase the production of stainless steels and high quality in the country's steel industry. This thesis is part of a project that includes the use of different reducers and raw materials located in the Moa region, with the aim of obtaining enriched pig iron of Ni and Cr essential for the production of ferroalloys and steel in Cuba.

Keywords: Pig Iron, CARON Process Tailings.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADACIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
INDICE DE TABLAS.....	X
INDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE ANEXOS	XII
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
Fundamentación del problema.....	1
Problema científico.....	2
Objetivo general	2
Objeto de estudio	2
Campo de investigación	2
Objetivos específicos	2
Hipótesis	3
Aportes de la investigación.....	3
CAPITULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1 Introducción	5
1.2 Minerales lateríticos cubanos.....	5
1.3 Tecnologías de producción de níquel y cobalto en Cuba	6
1.4 Tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL)	7

1.5	Tecnología de lixiviación carbonato amoniacal (CARON).....	8
1.6	Características de las colas generadas por las plantas de producción de níquel y Cobalto en Moa	10
1.6.1	Colas de la tecnología HPAL	10
1.6.2	Colas de la tecnología CARON en Moa.....	11
1.7	Características de las materias primas siderúrgicas	12
1.8	Productos metalizados base hierro.....	13
1.8.1	Arrabio enriquecido con níquel	14
1.9	Características de los reductores	15
1.10	Características de los fundentes	15
1.11	Conclusiones capítulo I.....	16
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....		17
2.1	Principales métodos de investigación empleados	18
2.2	Metódica de investigación utilizada.....	19
2.2.1	Metodología para la preparación de las materias primas	19
2.2.2	Metodología para la conformación de mezclas metalúrgicas.....	20
2.2.3	Metodología para la obtención de arrabio	21
2.3	Técnicas analíticas empleadas	22
2.4	Procesamiento de las informaciones	25
2.5	Conclusiones del capítulo II	25
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....		26
3.1	Caracterización química de las muestras experimentales.....	26
3.1.1	Caracterización química de los reductores y fundente empleados en la investigación.....	26

3.1.2	Caracterización química de las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa	27
3.2	Resultados de la caracterización química de las mezclas metalúrgicas empleadas	30
3.3	Significación ambiental de los resultados obtenidos	30
3.4	Conclusiones del capítulo III	31
	CONCLUSIONES GENERALES	32
	RECOMENDACIONES	33
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
	ANEXOS	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química promedio (%) de los reductores empleados, antracita (A) y bituminoso (B).....	26
Tabla 2. Composición química promedio (%) del fundente empleado en la fusión reductora.	27
Tabla 3. Composición química promedio (%) de las colas nuevas del proceso CARON en Moa.....	28
Tabla 4. Composición química (%) de los arrabios obtenidos a partir de las colas del proceso CARON en Moa.....	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestra de colas rojas del proceso de lixiviación ácida a presión.....	8
Figura 2. a) Muestra de colas negras del proceso Caron, b) Lugar donde se tomaron las muestras experimentales.....	9
Figura 3. Proceso de toma de las muestras del carbón antracita.	17
Figura 4. Proceso de toma de muestras del cieno carbonatado.	18
Figura 5. Estufa utilizada para el secado de las muestras.....	19
Figura 6. Triturador de mandíbula.....	20
Figura 7. Cuarteadores utilizados para la preparación de las muestras.	20
Figura 9. Horno de arco eléctrico empleado en las pruebas de fusión reductora.	22
Figura 10. Equipo de espectrometría de absorción atómica empleado en la caracterización química.	23
Figura 11. Equipo de difracción de Rayos X empleado en la caracterización mineralógica.	23
Figura 12. Espectrómetro de masa empleado en la caracterización química de los metales obtenidos.....	24

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Presa de colas nueva de la tecnología CARON en Moa	37
ANEXO 2. Proceso de preparación de las muestras experimentales	39
ANEXO 3. Desarrollo de los experimentos de fusión reductora en el CIS (UCLV).	40

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

CARON. Tecnología de Lixiviación carbonato amoniacal de producción de níquel.

HPAL: Tecnología de Lixiviación ácida a presión de producción de níquel.

ECG: Empresa Ernesto Che Guevara de Moa.

EMNI: Empresa Mecánica del Níquel.

FeCrNi: Ferrocromoníquel.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto tesis pretende la obtención de productos siderúrgicos, principalmente, arrabio enriquecido con Níquel y Cromo, a partir de materias primas localizadas en Moa. Las materias primas serán caracterizadas, y procesadas a escala de laboratorio y de banco empleando un proceso pirometalúrgico que permitirá la obtención de materias primas metalizadas, utilizada para la producción de aceros aleados en Cuba.

El trabajo incluye el uso de diferentes tipos de reductores, para determinar la pre factibilidad de la tecnología propuesta. Se integran en este proyecto los especialistas e instalaciones de las Universidades y Empresas del Níquel en función de la diversificación de la producción de Níquel en Cuba.

Fundamentación del problema

La región de Moa posee importantes reservas de residuos sólidos (Colas rojas y negras) generados por las plantas de producción de Níquel y Cobalto CARON y HPAL. Existen perspectivas de producción de productos metalizados (Arrabio, FeNi), utilizando las colas de cada tecnología por separado y las mezclas de ambas plantas, lo que brindará la posibilidad de producir los productos siderúrgicos mencionados, (Pons Herrera, 2022, p. 7).

A partir del tratamiento pirometalúrgico de las colas de Moa, se han obtenido semiproductos siderúrgicos, cuyas investigaciones demandan de una mayor profundidad científica, que permitan fundamentar la futura implementación de una planta metalúrgica para la obtención de semiproductos metalizados para la producción de aceros aleados en Cuba.

Como resultado del trabajo conjunto de especialistas de la Universidad de las Villas y de Moa, se han desarrollado diversas investigaciones, con las colas de las plantas productoras de Níquel y Cobalto en Moa, donde se destacan la obtención de Nickel Pig Iron (NPI), (Ortiz Barcenás, 2015), lupias de hierro, (Guerrero, 2013), oxidantes para el proceso de descarburización del acero HK-40, (Ramírez Pérez, 2010), producto metalizado base hierro a partir de las colas rojas de Moa, (Pons Herrera, 2018), entre otros.

Durante los últimos cinco años se han desarrollado pruebas experimentales a escala de laboratorio, con hornos de corriente directa usando las colas de la producción de níquel en

Moa, que permitieron obtener un producto metalizado con un promedio de 92% de Fe metálico y que constituye una motivación y justificación para el desarrollo de esta tesis, en función de garantizar un uso sostenible de los residuales sólidos generados por las plantas Ernesto Che Guevara y Pedro Sotto Alba de Moa, (Pons Herrera, Perdomo, Cruz, & al, 2023).

Por tanto, el objetivo principal de esta investigación es definir la tecnología más efectiva desde el punto de vista técnico-económico para la obtención de productos metalizados base hierro, para la obtención de aceros aleados en Cuba.

Problema científico

Insuficiente conocimiento de las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa, limitan la toma de decisiones sobre su posible uso para la obtención de productos metalizados base hierro, enriquecidos con Níquel y Cromo.

Objetivogeneral

Obtener productos siderúrgicos, principalmente, arrabio enriquecido con Níquel y Cromo, a partir de las colas nuevas generadas por la tecnología CARON en Moa, que faciliten la toma de decisiones sobre su posible uso en la industria siderúrgica cubana.

Objeto de estudio

Colas nuevas de la tecnología CARON en Moa

Campo de investigación

Productos metalizados, a partir de las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa.

Objetivos específicos

1. Caracterizar desde el punto de vista físico-químico y mineralógico las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa.

2. Obtener productos metalizados base hierro a partir de las colas de la tecnología CARON en Moa, utilizando, además fundente y reductor residuales de los procesos de producción de níquel en Moa.
3. Evaluar los productos siderúrgicos obtenidos a partir de materias primas existentes en la región de Moa.

Hipótesis

Con la determinación de las características física, química, mineralógica de las colas nuevas generadas por la tecnología CARON en Moa, será posible la obtención de un producto metalizado base hierro, enriquecido con otros elementos útiles para la producción de aceros aleados en Cuba.

Aportes de la investigación

Practico: Se busca con esta tesis, investigar más a fondo las colas del proceso Caron en Moa, encontrar la dosificación exacta entre reductor + colas + fundente, para la obtención de un producto metalizado base hierro, con el objetivo de proveer de Arrabio enriquecido con Ni y Cr a la siderurgia del país.

Ambiental: Por la parte ambiental, este proyecto es un tanto abarcador, ya que las materias primas a utilizar son, de cierta forma, el desecho del proceso Caron en el municipio de Moa. Contando con grandes reservas de esta materia prima esencial para el proceso, reutilizando estas colas ricas en hierro, cromo, níquel y otros metales. Se busca por este medio la reducción de la contaminación ambiental existente en le región de Moa, a partir de un uso más sostenible de los recursos minerales en esta región del país.

Social: Formación y superación de nuevos técnicos y especialistas en el tratamiento y mezcla de reductor + colas + fundentes para la obtención de arrabio enriquecido con Ni y Cr.

Económico: Desde el punto de vista económico tiene gran importancia ya que se quiere implementar el método de economía circular dándole un nuevo uso a productos que se

tienen como desecho, los cuales se pueden usar mezclándolos con otros productos que se tienen con igual concepto y lograr obtener como resultado una materia prima para la obtención de aceros en la siderurgia del país.

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada en las partes siguientes:

Introducción: Recoge de manera resumida algunos de los objetivos de esta tesis donde se busca ampliar más la información sobre las colas nuevas del proceso Caron en Moa. Su objetivo general es producir un producto metalizado base hierro capaz de ser procesado por las siderurgias del país para la obtención de aceros y aminorar de cierta medida la importación de chatarras. Además de exponer los aportes de esta investigación desde el punto de vista práctico, ambiental, social y económico.

Capítulo I: Se exponen estudios realizados de trabajos anteriores de temas parecidos, pero como objeto de estudio las colas de la Mina Martí en Nicaro. Iniciando con una breve reseña histórica de los minerales lateríticos de Cuba, métodos de extracción, eficiencia de ambas industrias y lo más interesante para nuestro trabajo que son los tipos de residuales de cada una, cual vamos a utilizar y la caracterización desde el punto de vista físico, químico, mineralógico y térmico de las colas nuevas de Che Guevara, además de los componentes con los cuales la vamos a mezclar para la obtención de un producto metalizado base hierro y características de los reductores y el fundente.

Capítulo II: Se exponen los principales materiales y métodos de investigación empleados para el desarrollo de la tesis.

Capítulo III: Se exponen y analizan los resultados de la investigación

Conclusiones y Recomendaciones: Se consolidan los principales resultados de la investigación dando cumplimiento a los objetivos trazados y proponiendo nuevas líneas y vías para la continuación de esta investigación.

CAPITULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Con el objetivo de obtener más información de las colas del proceso (Caron), se realizaron análisis desde el punto de vista físico-químico, mineralógico y térmico. En la siguiente investigación se analizan muestras de colas mezcladas con agente reductor y fundente, con el propósito de obtener un producto metalizado base hierro para la producción de aceros aleados para la siderurgia del país.

El arrabio enriquecido con Ni y Cr, que es lo que se pretende obtener por medio de este proceso, además de (FeCrNi), será un producto nuevo, capaz de ser producido en la región y abastecer de esta materia prima inicialmente a las empresas (EMNI) y la antillana de acero (Acinox) ubicada en Las Tunas, siendo estas dos las principales beneficiadas. Más adelante a medida que aumente la producción se puede pensar en la exportación, dependiendo la calidad del producto. Según algunos especialistas dedicados al desarrollo económico futuro de la región Moa-Nicaró, el proceso minero estará vinculado indisolublemente a la explotación de los minerales almacenados en las presas de colas, ya que la explotación de los yacimientos lateríticos, al igual que todos los recursos naturales, tiene un tiempo de vida limitado, y constituyen recursos no renovables. Debido a esto y a que en el mercado mundial la demanda de los minerales de hierro ha ido en ascenso, se abre una posible alternativa para el empleo de las colas, ya que el metal representa el 45% de la masa total (Ortiz Barcenás, 2015).

1.2 Minerales lateríticos cubanos

Los suelos lateríticos de Cuba han sido estudiados considerando dos objetivos fundamentales: uno económico, para la extracción de níquel y cobalto y otro desde el punto de vista físico mecánico para la construcción de infraestructuras, obras civiles y como materiales de la construcción. En este trabajo nos centraremos en el primer aspecto. En el país hay varios depósitos que cabe destacar su existencia para mayor conocimiento, como

lo es el de la región de Cajalbana (Pinar del Río), Meseta de San Felipe (Camagüey) y otras dos ubicadas en los municipios de Mayarí y Moa en la provincia de Holguín. Las reservas de mineral con contenido de Ni de valor económico ($>0,9\%$ en peso) se estiman en el orden de los 3000 millones de toneladas de Ni, (Riverón Sladivar & Carménate Fernández, 2021).

Desde hace muchos años debido a la explotación en la extracción de níquel y cobalto queda en el proceso como residual las colas generadas por el mismo. Es conocido que en la eficiencia metalúrgica influyen factores de diversa índole, entre los que cabe mencionar la composición de la materia prima mineral. Si la composición química y mineralógica de la materia prima mineral que ingresa al proceso es determinante en la calidad del producto final, el conocimiento de la composición sustancial de las colas obtenidas en cada etapa del proceso metalúrgico es un elemento para considerar, que puede incluso contribuir a incrementar la eficiencia del mismo mediante la modificación de ciertos parámetros operacionales; además, permite trazar líneas perspectivas para el uso de las colas (Rojas Purón & Turro Breff, 2003, pág. 22).

Anteriormente se realizó un trabajo a partir de las colas de la fábrica René Ramos Latour ubicada en Nicaro con resultados satisfactorios en aras de la reutilización de las colas generadas por el proceso (CARON) (Guerrero, 2013).

1.3 Tecnologías de producción de níquel y cobalto en Cuba

Actualmente en Cuba se obtiene níquel por dos procesos distintos, contamos con el método de lixiviación ácida a presión por parte de la Empresa mixta Pedro Sotto Alba y el proceso de carbonato amoniacal en la Empresa comandante Che Guevara. El primero, es totalmente hidrometalúrgico y el segundo es mixto. Esto ha conllevado a que en la región de Moa exista un alto nivel de extracción y procesamiento de este metal muy usado a nivel mundial.

En Moa, provincia de Holguín, dos plantas hidrometalúrgicas procesan cortezas ferro níquelíferas. Para la extracción de níquel: una emplea tecnología ácida a presión, y la otra, emplea la tecnología carbonato-amoniacal, conocida como proceso (CARON). La primera reporta niveles de eficiencia por encima del 90%, en tanto la segunda no supera el

80%,(Rojas Purón & Turro Breff, 2003, págs. 3-4), representando así un importante renglón en la economía cubana.

1.4 Tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL)

El primer paso en el procesamiento hidrometalúrgico de minerales lateríticos es la lixiviación a altas temperaturas usando soluciones de ácido sulfúrico (San Martín Riffo, 2019). Este proceso en general ha demostrado una alta eficiencia llegando a obtener concentraciones de hasta (6g/L) de Ni. El níquel y el cobalto mediante este proceso se lixivian eficientemente de mineral de laterita con soluciones de ácido sulfúrico, a temperaturas del orden de 250°C con consumo relativamente bajo de ácido sulfúrico, (San Martín Riffo, 2019).

Con el privilegio de tener en nuestra región una planta con estas características, cabe resaltar los niveles de eficiencia superando el 90%. Esta planta debido a su gran procesamiento de mineral en la planta de pulpa, en varias ocasiones a sobrepasado su capacidad de diseño, (Urra Abraira, 2015). Demostrando una alta eficiencia a la hora de la producción de Ni+Colgando a estar en los primeros lugares a nivel mundial.

Cuba posee uno de los mayores yacimientos lateríticos del mundo, los cuales son procesados por vías hidrometalúrgicas. Los residuos sólidos representan el 90% de la masa mineral que entra al proceso metalúrgico, las colas de desecho constituyen el principal residuo sólido. Estas se depositan en las presas de residuos anexas a las fábricas, lo que representa un problema ambiental de gran impacto (Pérez García, 2023, págs. 1-2).

Según informes geológicos, las colas son un mineral de hierro complejo, que contiene valores metálicos. Es significativo que en estas colas, que el contenido de (S) se encuentre en un rango bastante alto, de 2.0 a 6.0%, lo cual limita su uso directo para la industria siderúrgica. Por su parte el hierro se encuentra fundamentalmente, en forma de hematita (Fe_2O_3) y es característico además el alto grado de fineza de estos pasivos, donde más del 90% se concentra en la fracción $-40\mu m$,(Pérez García, 2023, págs. 1-2).

Sigue siendo una situación problemática el hecho de buscar un nuevo uso a estos residuos, por este motivo son incontables los trabajos realizados para la obtención de buenos resultados a la hora de usar estos desechos para la formación de materia prima útil en la industria siderúrgica.



Figura1.Muestra de colas rojas del proceso de lixiviación ácida a presión.

Fuente: (Pons Herrera, 2022).

1.5 Tecnología de lixiviación carbonato amoniacal (CARON)

El proceso Caron, trata principalmente mineral laterita del tipo limonita para producir óxido de níquel y otros productos. El proceso es intensivo en energía. También tiene bajo contenido de níquel. Las recuperaciones son de alrededor del 75%. El proceso consta de una secuencia de 9 etapas que se mencionan a continuación:

Etapas 1: Consiste en un secado/molienda para la eliminación del 95% de la humedad arrastrada mecánicamente del mineral y moler el producto seco.

Etapas 2: Reducir los minerales de níquel y cobalto, bajos en hierro, la temperatura del tostador es de alrededor de 760°C que utiliza gas de combustión para la reducción.

Etapas 3: Para evitar la re-oxidación de níquel y cobalto, se comienza con la lixiviación de aleación Ni-Co.

Etapas 4: Disolver Ni y Co de aleación en gases $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{O}_2$.

Etapas 5: Separar los sólidos no difuminados de la solución rica en Ni-Co mediante filtros.

Etapas 6: Purificar la solución, mediante la eliminación de impurezas.

Etapa 7: Precipitación del carbonato de níquel y eliminación de amoníaco mediante calentamiento a vapor.

Etapa 8: Descomposición del carbonato de níquel a 1300°C, para producir óxido de níquel.

Etapa 9: Sinterizar el polvo de NiO. (San Martín Riffo, 2019). Aun teniendo una eficiencia por debajo de lo establecido, sigue siendo una importante fábrica ubicada en nuestra región y muy indispensable para el renglón de la economía del municipio y del país. La producción de Ni y Co con tecnología Caron en Moa produce anualmente millones de toneladas de colas negras, que se vierten al medio ambiente, aun cuando contienen elementos metálicos de valor económico, (Correa Cala, 2022, págs. 1-2). Teniendo en cuenta la búsqueda de utilidad y disminución del impacto medio ambiental de estas, este trabajo tiene el objetivo de profundizar más y obtener resultados satisfactorios a la hora de obtener un producto útil para la siderurgia. Las colas de este proceso son nuestro principal objetivo. Al contar con un contenido de 43% de hierro, una cifra considerable a tener en cuenta para su reutilización y como fases principales cuenta con la maghemita y magnetita, las cuales se forman durante el proceso de reducción en los hornos (Correa Cala, 2022, págs. 1-2).



Figura 2. a) Muestra de colas negras del proceso Caron, b) Lugar donde se tomaron las muestras experimentales.

1.6 Características de las colas generadas por las plantas de producción de níquel y Cobalto en Moa

En la región de Moa podemos contar con la producción de níquel y cobalto por dos vías distintas, existen dos tipos de colas, una es el residual del proceso (HPAL) o sea lixiviación ácida a presión y las colas del proceso (CARON) o carbonato amoniacal. Estos residuales altamente contaminantes para el medio ambiente están almacenados en diferentes ubicaciones, al estar procesados por dos vías diferentes. Estos son fáciles de reconocer ya que cuentan con características diferentes estos residuales, uno es de color rojizo en modo arcilloso y el otro de color negro con granulometría bastante fina y alta compactación. Las estructuras de las presas de colas están formadas por material friable, tienen entre sus funciones almacenar los residuales sólidos del proceso minero metalúrgico. El concepto general de su diseño es construir diques de contención perimetrales que aumentan de forma sistemática su altura, sobre un suelo de cimentación generado por las propias colas a medida que se depositan. (Lezcano Rodríguez, 2018, pág. 6).

Estas tienen altos contenidos de metales pesados que contienen los residuos y su caracterización se orienta hacia la búsqueda de metales preciosos para su futura explotación. La generación del drenaje ácido presenta especial importancia, dada la necesidad de evitar algún vertimiento al medio (Lezcano Rodríguez, 2018, pág. 10).

1.6.1 Colas de la tecnología HPAL

El material de rechazo de la Planta de Pulpa proviene de las cortezas lateríticas de los diferentes yacimientos en explotación a cielo abierto; los cuales han sido depositados en dos zonas desde el año 1958 hasta la actualidad, existiendo en la actualidad varios depósitos de este residual (Abraira & Luis, pág. 4). En la búsqueda de la reutilización de estos residuales, se han realizado estudios atendiendo a sus propiedades y características por lo que en el año 2003 se procedió a realizar una exploración geológica en la PRN, donde se logró definir las perspectivas en relación al potencial de material limonítico acumulado. (Urra Abraira, 2015, pág. 4). Se obtuvo como resultado de la investigación que

las menas limoníticas presentan contenidos de níquel y cobalto aptos para su reutilización. Esto demuestra que a pesar de ser un residual que se van almacenando en los diques en el futuro con nuevas investigaciones que están ya en curso reutilizar de manera eficiente este residual como materia prima para la obtención de otros productos.

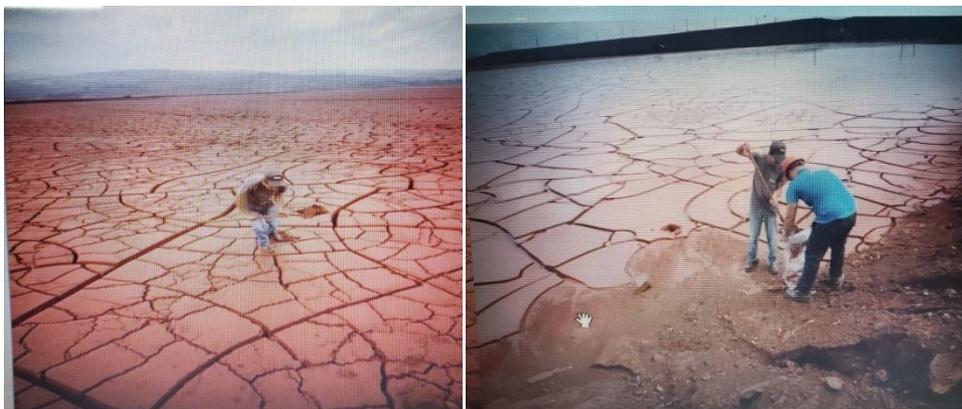


Figura.3: Presas de colas rojas de la fábrica Pedro Sotto.

1.6.2 Colas de la tecnología CARON en Moa

Las presas de cola constituyen depósitos antrópicos de residuales sólidos de las industrias metalúrgicas, en esta investigación se evalúa las características geoquímicas de las colas del proceso de la tecnología CARON en Moa con el objetivo de proponer decisiones futuras sobre su posible utilización. Para el desarrollo de esta investigación se realizó un proceso de caracterización químico y mineralógico en laboratorios de Cuba y el extranjero y se desarrollaron trabajos de campo en las presas de cola como parte de una investigación geológica de la empresa Geominera Oriente (EGMO).

Los resultados de la investigación arrojaron que las colas presentan un alto contenido de hierro(42,23%) y contenidos apreciables de silicio (5,74%), aluminio (4,2%), magnesio (2,17%), cromo (1,36%) y níquel (0,32%), que la convierte en una excelente materia prima para la producción de productos metalizados altamente demandados por la industria siderúrgica de Cuba, la evaluación de las características mineralógicas demuestran como fases principales magnetita, maghemita, espinelas cromíferas y olivino que se corresponden con el quimismo de estos depósitos , y como resultado de la caracterización geoquímica de este material es posible proponer decisiones sobre el posible uso de esta materia prima en la industria siderúrgica cubana teniendo en cuenta los elementos

significativos e importantes que tiene ella para la producción de acero en Cuba (Correa Cala, 2022).

Los principales elementos presentes en esta materia prima están asociados al proceso de reducción que garantiza que el hierro contenido en este material se encuentra en forma de magnetita (Fe_3O_4) y Óxido Ferroso (FeO). Adicionalmente incide en la presencia de otros elementos químicos valiosos, la baja ineficiencia de esta planta por los años de explotación y la tecnología que utilizan, la cual data del siglo pasado (Correa Cala, 2022).

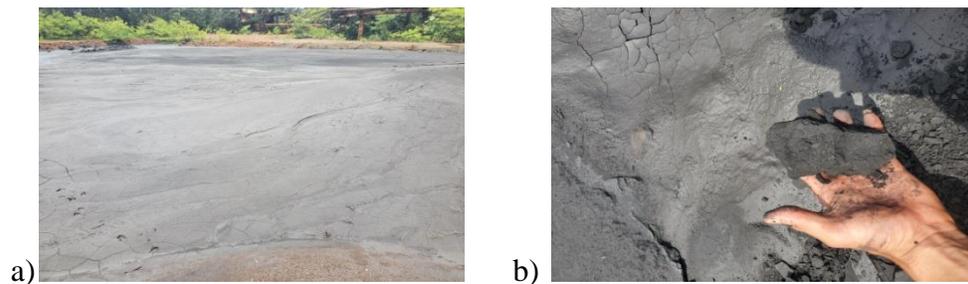


Figura.4: a) Presa de colas negras y b) muestra de colas negras.

1.7 Características de las materias primas siderúrgicas

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. Hay más de 1260 clases de minerales que lo contienen, de todos ellos el 56,4% tiene un contenido de hierro superior al 10%, el 15% tiene un contenido en Fe superior al 30%. Solamente 4 minerales de hierro (tres óxidos y un carbonato) son realmente utilizados para la producción de aceros (magnetita, hematita, gohetita, limonita y siderita) (Ortiz Barcenás, 2015).

En la región Oriental contamos con la Empresa (Acinox) en Las Tunas y la planta de fundición de la Empresa (EMNI) son las que operan en la producción de aceros aleados y fundiciones de piezas respectivamente. Actualmente como materia prima se emplea la chatarra recopilada por la empresa de materias primas en la región y la importación de las materias primas. En esta investigación se busca la obtención de un producto metalizado base de hierro, con el objetivo de proveer de esta materia prima a estas industrias.

La tecnología instalada en estas empresas es la de hornos de arco eléctrico y se utiliza como materia prima fundamental la chatarra nacional. El objetivo estratégico de la siderurgia es lograr producir medio millón de toneladas de acero al año, (Ortiz Barcenás, 2015).

Con el objetivo de lograr menos costes con la importación de chatarra o materias primas, se realizan estas investigaciones para lograr un producto metalizado base hierro con la función de sustituir estas importaciones y lograr un mayor valor añadido al producto final. Una de las soluciones a este problema es la posible obtención de materias primas metalizadas a partir de los escombros lateríticos de las colas nuevas generadas por el proceso (CARON) el cual es el tema que se abordará en este trabajo.



Figura.5: Muestra de arrabio con níquel (NPI), contenido de 1,27 %, de níquel.

1.8 Productos metalizados basehierro

En el escenario actual se necesita estudiar la posibilidad de obtener materiales metalizados y utilizar las tecnologías disponibles, para resolver el problema del déficit de chatarra que poseen las dos fábricas que hoy producen acero, así como establecer las comparaciones tecnológicas y económicas pertinentes para cada yacimiento de hierro, (Ortiz Barcenás, 2015).

Logrando la obtención de dichos productos metalizados base hierro, el siguiente paso sería abastecer de estos a la siderurgia del país. Según trabajos anteriores se estima que estos productos metalizados de producción nacional se produzcan con alta calidad para así lograr una mejor calidad en los aceros a obtener. Por lo antes planteado se define como la carencia de productos metalizados para la producción de acero, a partir de minerales de hierro

nacionales, en este caso los escombros lateríticos de la presa de colas nuevas de la fábrica Che Guevara que posee una baja ley de Ni, pero por otro lado contiene una alta concentración de hierro y otros metales que son rechazo de la obtención de Ni + Co.

1.8.1 Arrabio enriquecido con níquel

China es el líder mundial en la producción de arrabio con níquel (NPI), a partir de mineral laterítico importado, con una producción de 300 mil toneladas por año. Se trata de un producto alternativo para la producción de aceros de baja aleación o inoxidable, que permite utilizar minerales de baja ley en níquel (Ortiz Barcenás, 2015).

Para resolver el problema de la sustitución parcial de la chatarra en la producción de acero. Cuba tiene necesariamente que realizar investigaciones básicas con los minerales de hierro nacionales, como los escombros lateríticos de la región de Nicaro y Moa. Esto significa que en el escenario actual se necesita estudiar la posibilidad de obtener materiales metalizados y utilizar las tecnologías disponibles, para resolver el problema del déficit de chatarra que poseen las dos fábricas que hoy producen acero, así como establecer las comparaciones tecnológicas y económicas pertinentes para cada yacimiento de hierro (Ortiz Barcenás, 2015).

El insuficiente conocimiento de las características físico-químicas y térmicas de las colas generadas por el proceso (CARON), limitan su utilización como fuente de materia prima para la obtención de un producto siderúrgico pre reducido con hierro y níquel, para la producción de arrabio con níquel (NPI). Anteriormente se han realizado estudios para la obtención de un producto con estas características, tal es el caso del estudio de las colas de la presa Martí ubicada en la región de Nicaro (Ortiz Barcenás, 2015).

Como resultado de la explotación de los yacimientos lateríticos en la zona nororiental de Cuba, se ha originado la acumulación de importantes residuos mineros, dentro de los cuales se encuentran los escombros lateríticos de Mina Martí, pertenecientes a la Empresa Comandante "René Ramos Latour" de Nicaro. Dichos escombros son concreciones de óxidos e hidróxidos de hierro no utilizables por las tecnologías actualmente instaladas para la extracción de níquel, debido a que no poseen los contenidos de níquel y cobalto exigidos;

no obstante, presentan un contenido de hierro atractivo para la industria siderúrgica (Ortiz Barcenas, 2015).

Estas colas al poseer un alto contenido de hierro son el objetivo principal para lograr obtener mediante su procesamiento un producto metalizado base hierro para proveer a la siderurgia del país, tales productos pueden ser (NPI) arrabio enriquecido con Ni y Cr o Fe+Cr+Ni.

1.9 Características de los reductores

Se estima la utilización como agente reductor del carbón antracita, residual de la industria de la obtención de níquel. La antracita es un mineral de carbón oscuro y con tonalidades azules brillantes, el cual suele ser usado principalmente en la fundición de metales como el hierro. Es el carbón mineral con una mayor evolución y de esta manera posee la mayor cantidad de carbono puro superando el 90%, con un poder calórico de entre 23 a 33 MJ/Kg (Díaz Padrón, 2014, pág. 17)

Este es usado en la planta de Calcinación y Sínter de la fábrica Ernesto Che Guevara. De esta manera podemos usar, otra materia prima que se tiene como residual para la obtención de un producto metalizado base hierro.

1.10 Características de los fundentes

Un fundente muy usado en las metalúrgicas es el carbonato de calcio. El sector de la siderurgia no se concibe sin el uso de la cal que está presente a lo largo de todo el proceso siderúrgico. Se requiere la adición de de cal en los hornos de arco eléctrico, convertidores y en las cucharas de afino. Esta a su vez cumple con su función de agente purificante, eliminando impurezas, desulfurando, defosforizando y a su vez actúa de fundente y neutralizante. Todo con el objetivo específico de transformar el mineral de hierro en aceros y otros productos férreos.

1.11 Conclusiones capítulo I

1. La reutilización de los residuales vertidos en las presas de colas nuevas de la Empresa Che Guevara, a pesar de haber sido estudiados por diferentes investigadores, aún son insuficientes los trabajos investigativos, sobre su posible uso en la industria siderúrgica cubana.
2. La obtención de un producto metalizado base hierro, específicamente, arrabio enriquecido con Ni y Cr, a partir de las colas de la tecnología CARON en Moa, constituye una gran posibilidad de reaprovechar los contenidos significativos de Fe, Si, Mn, C, que poseen estos residuales, elementos indispensables para la elaboración de aceros.
3. La existencia en Moa de importantes recursos que actualmente, son residuales (Finos de carbón reductor, Cieno carbonatado y Colas), brindan las posibilidades de aplicar la economía circular para la obtención de productos siderúrgicos al país, actualmente muy demandas para la obtención de aceros aleados.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Se muestran en este capítulo los materiales utilizados para la investigación, así como las instalaciones de laboratorio y de banco empleadas para los procesos de caracterización y obtención del arrabio enriquecido con Ni+Cr a partir de las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa.

Para el desarrollo de la investigación se tomaron alrededor de 150 kilogramos vía seca, de cada una de las muestras. Las colas de la ECG se tomaron en flujo dinámico a la descarga de la planta de Recuperación de Amoníaco, para garantizar que presentara bajos porcentajes de NH_3 . La muestra de carbón bituminoso (CB) que se utiliza fue cedida por el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), remanente de la prueba tecnológica a escala piloto de sustitución de petróleo aditivo por carbón bituminoso (Angulo Palma, 2024). En el caso de la muestra de carbón antracita (CA) y cieno carbonatado (CC) se utilizaron los residuales generados por las empresas productoras de níquel y cobalto Ernesto Che Guevara (ECG) y Pedro Sotto Alba (Moa Nickel SA) respectivamente. En la figura 3 y 4 se presentan evidencias de las tomas de muestra de carbón antracita y cieno carbonatado.



Figura 3. Proceso de toma de las muestras del carbón antracita.



Figura 4. Proceso de toma de muestras del cieno carbonatado.

2.1 Principales métodos de investigación empleados

Para darle cumplimiento a la tarea propuesta en esta etapa se utilizaron métodos empíricos, teóricos y experimentales.

Métodos empíricos

El principal método empírico que se utilizó fue la entrevista a especialistas que laboran a diario en la planta de lixiviación y lavado de la ECG, lo que permitió orientar el proceso de selección y tomade las muestras.

Métodos teóricos

Los principales métodos teóricos que se utilizaron fueron el histórico-lógico, análisis-síntesis, inducción-deducción e hipotético-deductivo.

Histórico-lógico: Para estudiar la trayectoria de los fenómenos que se vinculan al proceso de toma, preparación y caracterización de las colas del proceso CARON en Moa.

Análisis-síntesis: Este método se utilizó para analizar la información vinculada al tratamiento y uso de las colas de la producción de níquel reportadas en la literatura, así como la que se obtuvo durante la ejecución de la investigación.

Inducción-deducción: Para realizar generalizaciones a partir de los hechos singulares que se identificaron durante el análisis de la preparación y caracterización química-física-mineralógica de las muestras de colas del proceso CARON.

Hipotético-deductivo: Para establecer conclusiones particulares a partir de la hipótesis propuesta en el diseño de la investigación.

2.2 Metodica de investigación utilizada

Las metodologías que se utilizaron durante la investigación fueron:

1. Metodología para la preparación de las materias primas.
2. Metodología para la conformación de mezclas metalúrgicas.
3. Metodología para la obtención de arrabio a partir de las colas de la tecnología CARON en Moa.

2.2.1 Metodología para la preparación de las materias primas

Para procesar las muestras experimentales se utilizaron como equipos fundamentales la estufa, cuarteadores de cruceta y de Johnson. La estufa eléctrica utilizada en la investigación es de marca MEMMERT, logrando temperaturas en su interior que oscilan desde (30 a 250) °C. Una imagen de este equipo se puede observar en la figura 5.



Figura 5. Estufa utilizada para el secado de las muestras.

Mediante el uso de un triturador de quijada (Figura 6) se garantizó que todas las muestras presentaran un tamaño máximo de partícula inferior a 8 mm.



Figura 6. Triturador de mandíbula.

Las muestras experimentales se homogenizaron y dividieron utilizando cuarteadores tipo cruceta y Johnson, ilustrados en la figura 7.



Figura 7. Cuarteadores utilizados para la preparación de las muestras.

2.2.2 Metodología para la conformación de mezclas metalúrgicas

Las mezclas metalúrgicas fueron conformadas, según los niveles de variación de las variables de entrada, teniendo en cuenta los trabajos desarrollados con anterioridad por Pons Herrera, José, et al (2023).

Se utilizó una relación de reductores de 80/20 de CA/CB y un exceso de 15 % por encima del cálculo estequiométrico realizado de CC para garantizar una basicidad de 0,8 a 1,2.

2.2.3 Metodología para la obtención de arrabio

Para la obtención de arrabio las pruebas fueron desarrolladas en las instalaciones experimentales del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), pertenecientes a la Universidad Central Martha Abreu de las Villas (UCLV).

El procesamiento se realizó en un horno eléctrico de arco con crisol de grafito, el cual tiene un volumen útil de $1,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, correspondiéndole una capacidad de aproximadamente 5,3 kg de acuerdo con la densidad promedio de la mezcla a procesar ($3,81 \text{ g/cm}^3$). Durante el procesamiento se mantuvieron los parámetros tecnológicos en el entorno de 823 A y 35 V. La temperatura se midió con un pirómetro óptico de fabricación checa marca Pyromet Metra con una precisión de $\pm 35 \text{ }^\circ\text{C}$, con valores durante el vertido en el intervalo de 1500–1600 $^\circ\text{C}$; mientras que el enfriamiento de la colada en un molde metálico se realizó de manera natural. El tiempo de fusión promedio fue de 20 minutos. La energía al horno fue suministrada por una fuente de corriente directa Mansfeld, de 500 A de corriente máxima y 48 V de voltaje en vacío. Imágenes del equipamiento empleado en las pruebas experimentales se muestran en las figuras 8 y 9.

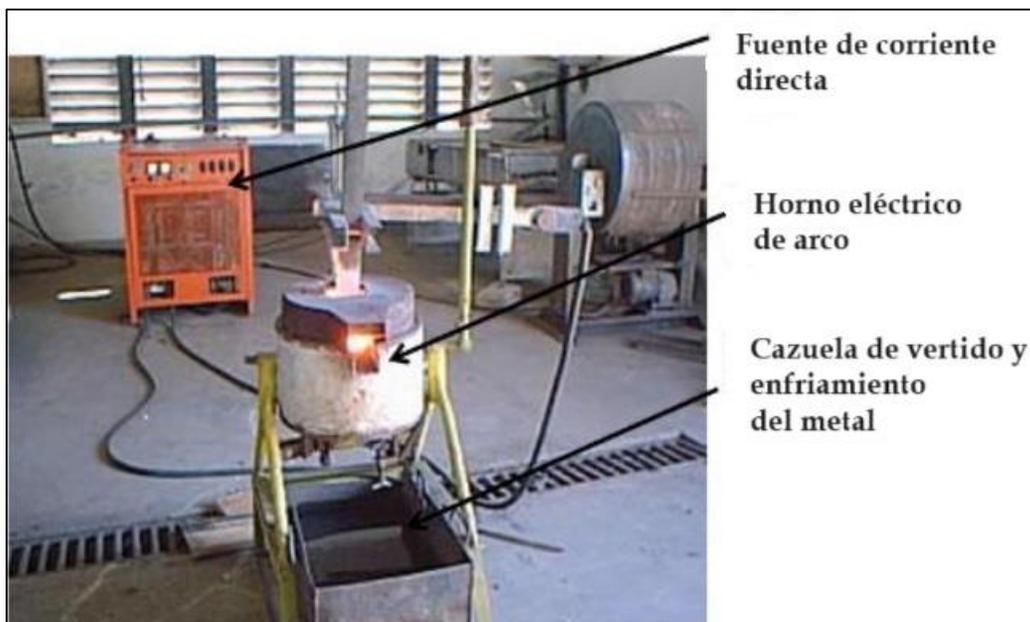


Figura 8. Equipamiento utilizado en las pruebas de fusión reductora.



Figura 9. Horno de arco eléctrico empleado en las pruebas de fusión reductora.

2.3 Técnicas analíticas empleadas

Las técnicas analíticas que se emplearon durante la ejecución del estudio fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA) y la difracción de rayos X (DRX).

La EAA se utilizó con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en las colas nuevas, ya que permite determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los siguientes elementos: hierro, níquel, cobalto, magnesio, y otros metales. Los componentes principales del equipo de EAA son: la fuente de radiación, el atomizador, el monocromador y el detector. La base de esta técnica consiste en pasarel 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 la medida de la variación de la intensidad de la luz, relacionada directamente con la concentración del elemento. En la figura10 se muestra el equipo de forma integral.

La DRX se utilizó para determinar las principales fases mineralógicas presentes en el escombros diferenciado que se alimentó al proceso de molienda. El difractograma de DRX se realizó por el método de polvo en un Difractómetro X'PERT3 de Panalytical con las siguientes condiciones: Barrido tipo Gonio en $[\theta]$ registro angular desde 4.0042 hasta 79.9962 con distancia de paso en 2θ de 0.0080 con radiación de Cu y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. La calibración del equipo se

chequea con patrón externo de silicio. El análisis cualitativo de las fases se realiza con la utilización del programa HighScore de Panalytical. En la figura 11 se muestra el equipo utilizado en esta etapa de la investigación.



Figura 10. Equipo de espectrometría de absorción atómica empleado en la caracterización química.

Fuente: (CEDINIQ, 2024).



Figura 11. Equipo de difracción de Rayos X empleado en la caracterización mineralógica.

Fuente: (CEDINIQ, 2024)

Los análisis químicos realizados a los productos metálicos obtenidos, se desarrollaron en el laboratorio de análisis químico de la Empresa siderúrgica Acinox Las Tunas, empleando un espectrómetro de masa, el cual se muestra en la figura 12.



Figura 12. Espectrómetro de masa empleado en la caracterización química de los metales obtenidos.

Fuente: (Acinox Las Tunas, 2024).

Las características técnicas del equipo empleado en la caracterización química de los metales obtenidos se resumen a continuación:

- ✓ Fabricante: OBLF Spektrometrie.
- ✓ Modelo: QSG750-11. Versión 01
- ✓ Nro. de serie 1064.
- ✓ Datos electrónicos: 230v AC 50/60Hz.
- ✓ Identificación de equipo: Cuánto metro de emoción óptica OBLF QSG 7504.
- ✓ Versión del software: OBLF Win Versión 1.5.15k3.
- ✓ Referencia a la aptitud para su uso previ6: IEN -0102.ASTM E415, ASTM E1086, Analizer QSG750 Operation manual validation de la determinaci6n de la composici6n qu6mica, por espectrometría de emisi6n 6ptica, utilizando el cuantometro OBLF QSG 750-11 y ARL 3460.

- ✓ Ubicación: Local de ensayo del grupo de laboratorio.
- ✓ Referencia a MR: Certificado de los MR.
- ✓ Referencia de mantenimiento: DCA 09121 Plan anual del MPP.
- ✓ Referencia a situación a mal funcionamiento: DCA 0906 "Registro de EIME no calibrado o fuera de servicio " y Libro de incidencias.

2.4 Procesamiento de las informaciones

Los resultados de la investigación se presentaron mediante tablas y gráficos, siendo procesados con la utilización del Microsoft Excel y el software estadístico profesional *Statgraphics Centurion XV*.

2.5 Conclusiones del capítulo II

1. Los principales equipos, utensilios, materiales utilizados cumplen con las normas establecidas para el desarrollo de la investigación.
2. Las técnicas analíticas que se emplearon fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA), Espectrómetro de masa y la difracción de rayos X (DRX).
3. La metodología experimental diseñada e implementada para el desarrollo de los ensayos, garantizan la representatividad y validez de los resultados.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se analizan los resultados experimentales obtenidos durante la evaluación del uso de las colas del proceso CARON en Moa, para la obtención de arrabio, con posibilidades de emplear como materia prima metalizada base hierro para la producción de aceros en Cuba, auxiliándose de tablas y figuras, realizadas con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurión XV y el Microsoft Excel, que muestran de un modo práctico los resultados obtenidos.

3.1 Caracterización química de las muestras experimentales

Las características de los principales materiales utilizados durante la investigación de detallan a continuación.

3.1.1 Caracterización química de los reductores y fundente empleados en la investigación

Las características de las muestras de carbón antracita y bituminoso se presentan en la tabla 1. La relación de material volátil, carbón fijo y capacidad calorífica se corresponden a la clasificación reportada en la literatura especializada (Angulo Palma, 2024). Es importante resaltar que los valores de S inferiores a 1% convierten en reductores ideales para ser utilizados en las pruebas de fusión reductora.

Tabla 1. Composición química promedio (%) de los reductores empleados, antracita (A) y bituminoso (B).

(A) (B)

Características	Unidad de medida	Base seca	Características	Unidad de medida	Base seca
Humedad total	%	3.37	Humedad total	%	10.1
Cenizas	%	4.68	Cenizas	%	11.8
Material volátil	%	6.87	Material volátil	%	32.6
Carbón total	%	77.96	Carbón total	%	69.95
Carbón fijo	%	85.08	Carbón fijo	%	55.4
Azufre	%	0.46	Azufre	%	0.55

H ₂	%	3.45	H ₂	%	4.58
Capacidad calorífica	kJ/kg	33654.4	Capacidad calorífica	kJ/kg	29088
(gruesa)	kcal/kg	8090	(gruesa)	kcal/kg	6948

Las características del fundente empleado (cieno carbonatado) se muestran en la tabla 2. El contenido de CaCO₃, en este residual fue el motivo fundamental de su uso por primera vez, como fundente en Cuba, por tanto, su utilización en este sentido, contribuiría a la reducción de la contaminación ambiental que este provoca a la zona de Moa, principalmente, al reparto Rolo Monterey.

Tabla 2. Composición química promedio (%) del fundente empleado en la fusión reductora.

Muestras	Fe	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr	CaCO ₃	CO ₂
Cieno Carbonatado	0.63	1.559	1.42	0.3	0.01	88,9	23,65

3.1.2 Caracterización química de las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa

Los resultados de los análisis químicos realizados a las colas del proceso CARON en Moa, se muestran en la tabla 3. Se observa que se caracterizan por el predominio de elementos químicos importantes para su uso en la industria siderúrgica, con valores promedios de Fe (42,23%), Si (5,74 %) y Mn (0,68%). Adicionalmente sobresalen la presencia de Ni (0,32 %) y Cr (1,36%), que le dan un valor agregado a esta materia prima para su posible uso siderúrgico, en la obtención de un producto metalizado base hierro, necesario para la industria de elaboración de aceros en Cuba.

En la figura 13 se presentan las principales fases mineralógicas de las colas nuevas de la ECG. Los resultados confirman la presencia de fases de hierro, principalmente, magnetita (Fe₃O₄ = 49,5 %), Fayalita (FeOSiO₂ = 44,6 %), característicos de la tecnología carbonato amoniacoal (Angulo Palma, 2024).

Tabla 3. Composición química promedio (%) de las colas nuevas del proceso CARON en Moa.

Elementos	Composición química promedio (%)
	Colas Nuevas Proceso CARON ECG
Al	4.202
Co	0.071
Ca	0.137
Cr	1.36
Cu	0.009
Fe	42.23
Mg	2.17
Mn	0.68
Mo	0.0001
Ni	0.32
P	0.043
S	0.21
Sc	0.008
Si	5.74
Sm	0.00021
Ti	0.12
V	0.03

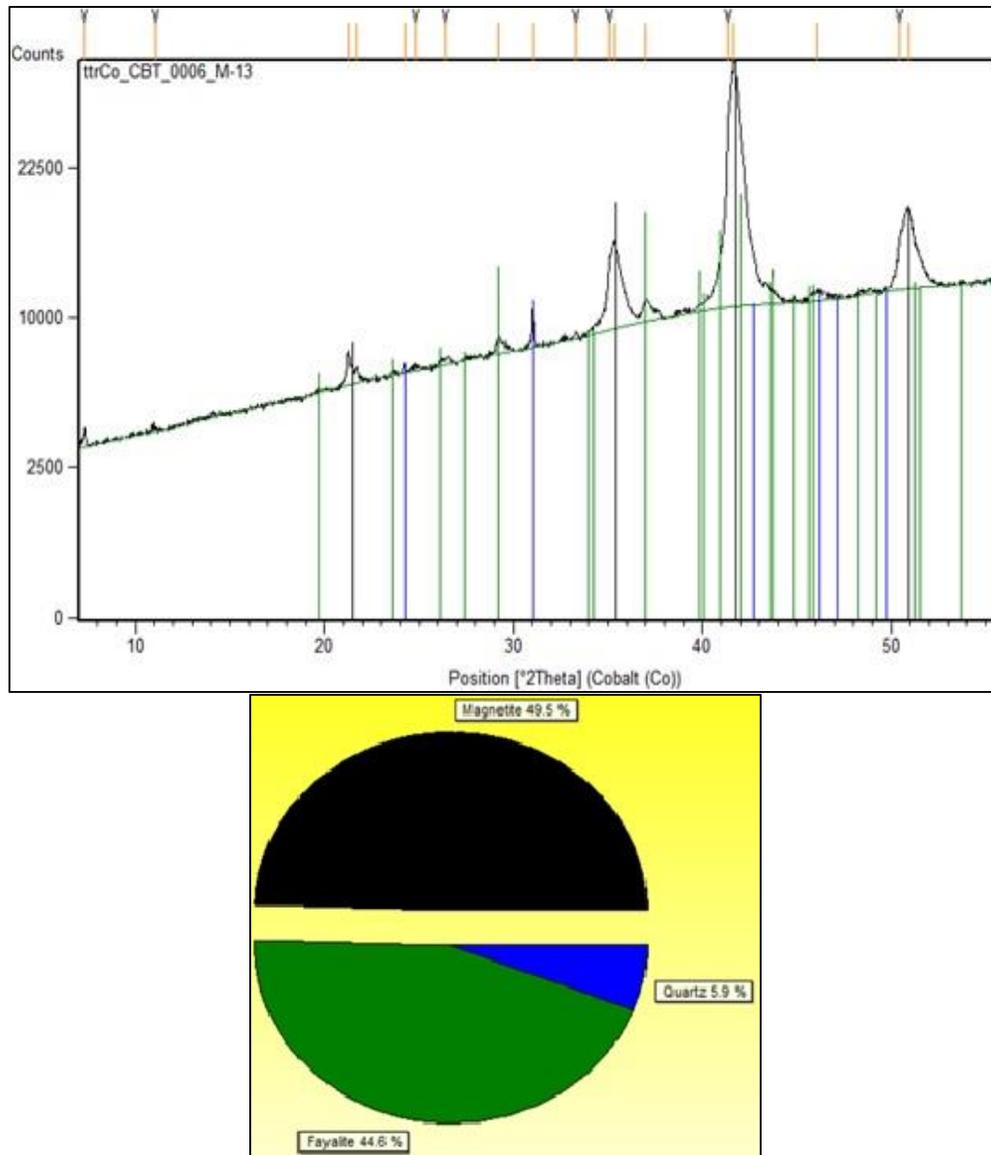


Figura 13. Difractograma de las colasnuevas de la tecnología CARON en Moa.

Es importante resaltar que los contenidos de hierro asociados a estas fases mineralógicas, favorecen la obtención en menor tiempo del proceso de fusión reductora, para la obtención de arrabio, en este caso enriquecido con Cr y Ni, lo que le da un mayor valor agregado para su uso siderúrgico.

3.2 Resultados de la caracterización química de las mezclas metalúrgicas empleadas

Los resultados de los análisis químicos de las mezclas conformadas con colas del proceso CARON en Moa, se caracterizaron por contenidos significativos de Fe y Cr, elementos fundamentales para la obtención de los arrabios planificados. En la tabla 4 se exponen los resultados de estos análisis.

Tabla 4. Composición química (%) de los arrabios obtenidos a partir de las colas del proceso CARON en Moa.

Muestras	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Al	Co	Ti	V	Fe
M-1	2.67	0.403	0.010	0.051	4.253	0.895	1.749	0.100	0.172	0.047	0.027	89.77
M-2	2.51	0.476	0.008	0.010	4.870	0.913	1.994	0.612	0.133	0.1044	0.040	88.62
M-3	2.37	0.416	0.010	0.033	4.472	0.809	1.925	0.055	0.136	0.0877	0.040	89.90
M-4	2.51	0.421	0.010	0.008	4.605	0.844	1.901	0.275	0.142	0.0818	0.036	89.40
Promedio	2.51	0.43	0.01	0.03	4.55	0.87	1.89	0.26	0.15	0.08	0.04	89.42

Como se observa en la tabla 4, fue posible la obtención de un producto metalizado base hierro, con 89.42 % de hierro y con presencia de los principales elementos que deben estar presente normalmente en este tipo de materia prima siderúrgica (C, Si y Mn). Se agregan como valores agregados los contenidos promedio de Níquel (0.87 %) y Cr (1.89 %), que le dan mayor significación a esta materia prima siderúrgica.

Adicionalmente, se presenta la posibilidad de obtener un producto con la presencia de elementos importantes como Co (0.15 %), Ti (0.08 %) y V (0.04%), que pueden ser empleados para la producción de aceros aleados, previstos a producirse en Cuba para los próximos años tanto, en Antillana de aceros como en Acinox Las Tunas. Los bajos contenidos de Al, Si y Mg indican que se garantiza un proceso adecuado de fundición, al pasar a la escoria sin afectar el proceso de elaboración de aceros.

3.3 Significación ambiental de los resultados obtenidos

Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales constituye una prioridad mundial, razón que incrementa la importancia de estos resultados. Actualmente la ECG genera más de 2 millones de toneladas de colas anuales que son consideradas como

residuales, por lo que su utilización para producir arrabio constituye una valiosa alternativa para la recuperación de metales con alta importancia en el contexto económico cubano.

También es importante reconocer que las reservas residuales de las industrias de níquel en Moa (cieno carbonatado y carbón antracita) utilizadas en la investigación; fortalecen la aplicación de la economía circular de recursos naturales en desuso, la disminución de importaciones durante la futura obtención de este tipo de ferroaleaciones y la reducción del impacto ambiental que actualmente provocan sobre el ecosistema de la región.

3.4 Conclusiones del capítulo III

1. Se obtuvo un producto metalizado base hierro, con 89.42 % de hierro, con presencia de elementos importantes para la producción de aceros en Cuba (C, Si y Mn).
2. Los arrabios obtenidos presentan valores agregados de Níquel (0.87 %) y Cr (1.89 %), que le dan valor agregado a esta materia prima siderúrgica.
3. La producción de arrabio constituye una variante tecnológica que tributa directamente a la reducción del impacto ambiental, la disminución de importaciones y el aprovechamiento integral de los recursos naturales de Moa.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Las colas de la producción de níquel generadas por la tecnología CARON en Moa se caracterizan por contenidos promedio significativos de Fe (45 %), Ni (0.45 %), así como de otros elementos químicos que normalmente están presentes en los arrabios, carbono, manganeso y silicio, que garantizan la obtención de una materia prima metalizada, posible de emplear en la producción de aceros en Cuba.
2. Se obtuvieron arrabios enriquecidos con Ni (0.87 %) y Cr (1.89), a partir de las colas de la tecnología CARON en Moa, lo que constituye una gran oportunidad de reaprovechar los contenidos significativos de Fe, Si, Mn, C, que poseen estos residuales, para la elaboración de aceros en Cuba.
3. La utilización de residuales (Finos de carbón reductor, Cieno carbonatado y Colas), para la obtención de materia prima metalizada base hierro, brindan las posibilidades de aplicar la economía circular para la obtención de productos siderúrgicos al país, actualmente demandas para la obtención de aceros aleados.
4. La reutilización de las colas de la producción de níquel en Moa, permitirá la reducción de la contaminación ambiental que estas generan actualmente estos residuales y que ocupan grandes espacios de esta región del país.

RECOMENDACIONES

1. Continuar el estudio de las colas de la producción de níquel en Moa, para el desarrollo de una tecnología económicamente factible para la obtención de materias primas siderúrgicas.
2. Evaluar a partir del estudio de las escorias obtenidas en esta investigación, las posibilidades de su reutilización industrial.
3. Definir la tecnología técnica y económicamente más factible para el procesamiento de las colas de la producción de níquel en Moa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraira, U., & Luis, J. (2015). *Modelación 3D de elementos químicos en la presa de rechazo nueva, Empresa Pedro Sotto Alba*. Moa, Holguín.
- Acinox Las Tunas. (2024). *Informe Análisis Químico a Muestras de Metales Fundidos. Proyecto P104HO001-015: Obtención de Arrabio a partir de Materias Primas de la región de Moa*. Las Tunas: Acinox Las Tunas.
- Angulo Palma, H. J. (2024). *Sustitución del Petroleo Aditivo ´por Carbón Bituminoso en elProceso de Tostación/Reducción de la Tecnología CARON*. Santiago de Cuba: Tesis Doctoral. Universidad de Oriente.
- CEDINIQ. (2024). *Caracterización de Colas del Proceso CARON en Moa. PS104HO001-27: Obtención de Metales y Productos siderúrgicos a partir de las colas de la Producción de Níquel en Moa*. Moa: Laboratorio Análisis CEDINIQ.
- Correa Cala, Y. &. (2022). Enriquecimiento de metales en las colas del proceso Caron, aplicando intensidad variable del campo magnético. *Minería y Geología*, 1-2.
- Díaz Padrón, H. &. (2014). Evaluación de la exposición ocupacional al polvo de antracita. *Revista cubana de salud y trabajo*, 17.
- Guerrero, Y. (2013). *Obtención de Lupias de Hierro como carga para la Producción de Aceros en Cuba a partir de las Colas de la Empresa Rene Ramos Latour de Nicaro*. Moa: Universidad de Moa.
- Lezcano Rodríguez, C. R. (2018). *Evaluación de la vulnerabilidad de las presas de colas inactivas de Moa*. Moa, Holguín.
- Ortiz Barcenas, J. (2015). *Obtención de Arrabio con Níquel (NPI) a partir de los Escombros Lateríticos de la Mina Marti en Nicaro*. Moa: Universidad de Moa.
- Pérez García, L. &. (2023). Bioextracción de especies metálicas de colas filtradas de la industria metalúrgica con agente reductor biológico. *Tecnología Química*, 1-2.
- Pons Herrera, J. (2018). *Obtención de un Semiproducto base Hierro, a partir del Tratamiento por Fusión Reductora de las Colas Blancas de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa*. Moa: Universidad de Moa.

- Pons Herrera, J. (2022). *Características Fisico-Química, Mineralógica y Térmica del Pasivo Ambiental Minero Metalúrgico "Colas de la Producción de Níquel"*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons Herrera, J., Angulo Palma, H., & Ramírez Pérez, M. (2024). *Informe de Avance del Proyecto PS104HO001-015. Etapa 02: Caracterización de muestras de materias primas de la Región de Moa*. Moa: CEDINIQ.
- Pons Herrera, J., Perdomo, L., Cruz, A., & al, e. (2023). *Obtención de productos Metalizados Base Hierro a partir de Materias Primas Nacionales para la Producción de Aceros Aleados en Acinox Las Tunas*. Moa: Universidad de Moa.
- Ramírez Pérez, M. (2010). *Obtención de un Producto para la Descarburización del Acero HK-40, a partir de la Coraza Ferruginosa de la Región de Moa*. Moa: Universidad de Moa.
- Riverón Sladivar, A. B., & Carménate Fernández, J. A. (2021). *Caracterización geotécnica del perfil de los suelos lateríticos de Moa, Cuba*. Moa.
- Rojas Purón, A., & Turro Breff, A. (2003). *Composición mineralógica de las colas del proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba*. Moa, Holguín.
- San Martín Riffo, J. H. (2019). *Estudio de procesos metalúrgicos orientados a la producción de níquel*. Chile.
- Urta Abaira, J. L. (2015). *Modelación 3D de elementos químicos de la limonita en la presa de rechazo nueva, Empresa Pedro Sotto Alba*. Moa, Holguín.

ANEXOS

ANEXO 1. Presa de colas nueva de la tecnología CARON en Moa





ANEXO 2. Proceso de preparación de las muestras experimentales



ANEXO 3. Desarrollo de los experimentos de fusión reductora en el CIS (UCLV).



