



# **Trabajo de Diploma en Opción al título de Ingeniero en Metalúrgia y Materiales**

**Obtención de un producto metalizado base hierro, a  
partir de colas del proceso CARON**

**Autor: Arianna Suarez Leyva**



---

## Obtención de un producto metalizado base hierro, a partir de colas del proceso CARON

Autor: Arianna Suarez Leyva

Tutores: Dr. C. José Alberto Pons Herrera.

Dr. C. Lorenzo Perdomo González.

Dr. C. Amado Cruz Crespo.

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Yo Arianna Suárez Leyva autor(a) del Trabajo de Diploma, “Obtención de un producto metalizado base hierro, a partir de colas del proceso CARON”, declaro la propiedad intelectual al servicio de la Universidad de Moa Dr. “Antonio Núñez Jiménez” para que disponga del uso cuando considere necesario.

Autor(a): Arianna Suárez Leyva Mena

Firma: .....

Tutores:

Dr.C José Alberto Pons Herrera. Profesor Titular. UMOA

Firma: .....

Dr.C Lorenzo Perdomo. Profesor Titular. UCLV

Firma: .....

Dr.C Amado Cruz Crespo. Profesor Titular. UCLV

Firma: .....

*Pensamiento*

*Seamos realistas y hagamos lo posible.*

*Che*

## *Dedicatoria*

*Dedico este trabajo a cada uno de mis seres queridos, quienes han sido mis pilares para seguir adelante.*

*Es para mí una gran satisfacción poder dedicarles a ellos, que con mucho esfuerzo, esmero y trabajo.*

*A mis padres Salvador Suárez e Idalmis Leyva, porque ellos son la motivación de mi vida, y mi orgullo de ser lo que seré.*

*A mi hermano Adrián y mi prima Kenia, porque son la razón de sentirme tan orgullosa de culminar mi meta, gracias a ellos por confiar siempre en mí.*

*Y sin dejar atrás a toda mi familia por confiar en mí, a mis abuelitos, tíos y primos, gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo.*

## *Agradecimientos*

*Agradezco este gran logro de mi vida, a todas las personas que me han apoyado de forma incondicional, pero en especial:*

*A mis padres por ser los principales promotores de mi sueño, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas.*

*A mis tutores José Alberto Pons Herrera, Lorenzo y Amado que en todo su momento brindaron su ayuda, y que me dedicaron su tiempo y dedicación.*

*A mis compañeros de estudio, por apoyarme y escucharme y brindarme su tiempo.*

*A todo el colectivo de profesores que influyeron en la formación integral y profesional de mi persona, pero en especial a Falconeris y Yuniór.*

*A mis tíos por haber sido parte de mi formación profesional.*

*Al resto de la familia y amigos por apoyarme a cumplir y haber confiado en mí en todo momento.*

## RESUMEN

La tecnología de producción de níquel y cobalto Carbonato Amoniacal (CARON), localizadas en Moa y Nicaro, generan gran cantidad de Colas Negras, sin un uso definido hasta el momento, a pesar de que el país necesita materias primas siderúrgicas para sus principales plantas productoras de aceros. A partir de la inexistencia de productos metalizados base hierro en Cuba, que puedan ser obtenidos a partir del tratamiento de las colas del proceso CARON, capaces de constituir una carga para la producción de aceros aleados en las Empresas siderúrgicas cubanas, se desarrolla esta investigación, consistente en la obtención de un arrabio base hierro (91 % Fe metálico), enriquecido con Ni, Cr, Si, Mn, que aportan elementos importantes para la toma de decisiones para el uso de las colas residuales y la reducción de la contaminación ambiental que actualmente provocan. Se obtuvo una recuperación metálica de 65 %, y un rendimiento metálico de 29.4 %, indicadores que deben ser refinados con el desarrollo de nuevas mezclas metalúrgicas. Las escorias poseen un contenido de FeO que oscila entre 26 y 28 %, el cual debe ser recuperado para su futura reutilización industrial.

**Palabras Claves:** Colas Negras, Fusión Reductora, Arrabio.

## ABSTRACT

Nickel and cobalt Ammonia Carbonate (CARON) production technology, located in Moa and Nicaro, generates a large amount of Black Tails, without a defined use so far, despite the fact that the country needs Steel raw materials for its main production plants of steels. Based on the non-existence of iron-based metallic products in Cuba, which can be obtained from the treatment of the tails of the CARON process, capable of constituting a load for the production of alloy steels in Cuban steel companies, this research is developed, consisting of obtaining an iron-based pig iron (91% metallic Fe), enriched with Ni, Cr, Si, Mn, which provide important elements for decisionmaking for the use of residual tailings and the reduction of environmental contamination that currently cause. A metallic recovery of 65 % was obtained, and a metallic yield of 29.4 %, indicators that must be refined with the development of new metallurgical mixtures. The slags have a FeO content ranging between 26 and 28 %, which must be recovered for future industrial reuse.

**Keywords:** Black Tails, Reductive Fusion, Pig Iron.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD.....	III
Pensamiento.....	IV
Dedicatoria.....	V
Agradecimientos.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IX
INDICE DE TABLAS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
Problema de investigación.....	3
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Objeto de investigación.....	3
Campo de acción.....	3
Aportes de investigación.....	4
Estructura de la tesis.....	4
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	5
1.2 ¿Qué son los aceros?.....	5
1.2.1 Características generales de los aceros.....	6
1.2.2 Tipos de aceros.....	6
1.2.3 Materias primas para la producción de acero.....	10
1.3 Aceros aleados.....	10
1.3.1 ¿Qué son los aceros aleados?.....	10
1.4 Características generales de los PAMMs.....	11
1.4.1 Conceptualización de los PAMMs.....	11
1.4.2 Tratamiento de los pasivos ambientales.....	12
1.4.3 Usos de los Pasivos Ambientales, generados por la industria del níquel.....	14

1.5 ¿Qué son las colas? .....	16
1.5.1 Caracterización de los residuos.....	16
1.5.2 Composición mineralógica del proceso CARON en Moa.....	16
1.5.3 Características químicas .....	17
1.5.4 Mineralogía de las colas de Moa .....	18
1.5. Obtención de metalizados de hierro a partir de los residuos sólidos de la industria del níquel en Nicaro.....	24
1.6 Proceso de Reducción.....	27
1.6.1 Características de los Procesos de Reducción .....	28
1.6.2 Reducción por el método de Carbotérmica.....	28
1.6.3 Procesos con reductor sólido .....	28
1.6.4 Procesos con reductor en fase gaseosa .....	29
1.6.5 Procesos de reducción en estado líquido .....	29
1.6.6 Procesos de reducción por aluminotermia .....	30
1.7 Conclusiones del Capítulo I.....	32
<b>CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>33</b>
2.1 Materias primas utilizadas .....	33
2.1.1 Colas del proceso CARON en Moa.....	33
2.1.2 Reductor .....	34
2.1.3 Fundente .....	35
2.2 Preparación de las muestras de investigación.....	35
2.3 Técnicas experimentales empleadas .....	36
2.2.1 Equipamiento utilizado en las pruebas experimentales.....	36
2.4 Descripción de los experimentos realizados .....	39
2.5 Desarrollo de las pruebas experimentales.....	40
2.6 Caracterización de los productos de las pruebas experimentales .....	41
2.7 Conclusiones del Capítulo II.....	44
<b>CAPÍTULO III. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
3.1 Características químicas de las colas de los procesos CARON.....	45
3.2 Resultados de la fusión reductora de las colas de ECG .....	48

3.3 Fusión reductora de la mezcla de las colas de las Empresas ECG de Moa y RRL de Nicaro .....	49
3.4 Consideraciones finales .....	50
3.2 Conclusiones del capítulo III .....	52
CONCLUSIONES GENERALES.....	53
RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de las colas obtenidas en las etapas de lixiviación y recuperación de amoníaco. ....	18
Tabla 2. Composición Mineralógica Cuantitativa, según recálculo mineralógico, de las colas de lixiviación. ....	21
Tabla 3. Composición Mineralógica Cuantitativa, según recálculo mineralógico, de las colas de recuperación de amoníaco. ....	22
Tabla 4: Rango de variación de la composición química promedio de las colas de Nicaro. ....	26
Tabla 5. Reacciones típicas de algunos procesos aluminotérmicos. ....	31
Tabla 6. Composición química promedio (%) del carbón bituminoso empleado en las pruebas experimentales. ....	34
Tabla 7. Composición química promedio de las colas del proceso CARON de Nicaro y Moa. ....	45
Tabla 8. Cantidad de oxígeno presente en las colas del proceso CARON de Nicaro y Moa. ....	46
Tabla 9. Resultados del proceso de fusión reductora aplicado a las colas de las empresas ECG y RRI de Moa y Nicaro, respectivamente. ....	47
Tabla 10. Composición química (%) del metal obtenido como resultado de la fusión reductora de colas negras de la Empresa Che Guevara de Moa. ....	48
Tabla 11. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas como resultado de la fusión de las colas de la Empresa Che Guevara de Moa. ....	48
Tabla 12. Composición química (%) del metal obtenido como resultado de la fusión reductora de colas negras de la ECG de Moa y RRI de Nicaro. ....	49
Tabla 13. Composición química (%) de las escorias obtenidas como resultado de la fusión reductora de la mezcla de las colas de la Empresa Che Guevara de Moa y Rene Ramos Latour de Nicaro. ....	49

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Difractogramas de las muestras de colas en la etapa de lixiviación. Mh: maghemita; Mt: magnetita; Fy: fayalita; Cr: Mgcromita; Q: cuarzo.....	23
Figura 2. Difractogramas de las muestras de colas en la etapa de recuperación de amoniaco. Mh: maghemita; Mt: magnetita; Fy: fayalita; Cr: Mgcromita; Q: cuarzo. ...	23
Figura 3. Cuadro difractométrico comparativo de las fases maghemita y magnetita.....	24
Figura 4. Proceso de selección y toma de muestras experimentales de las colas.....	33
Figura 5. Carbón bituminoso empleado en las pruebas experimentales.....	35
Figura 6. Caliza utilizada como fundente en las pruebas experimentales. ....	35
Figura 7. Presa de colas nuevas de la ECG de Moa. ....	36
Figura 8. Mezcladora empleada para la conformación de las mezclas experimentales. ....	37
Figura 9. Balanza técnica empleada para el pesaje de los materiales y productos obtenidos en las pruebas experimentales. ....	37
Figura 10. Crisol de grafito empleado en las pruebas de fusión reductora. ....	38
Figura 11. Sistema horno eléctrico-fuente de corriente directa.....	39
Figura 12. Obtención del metal a través de la fusión reductora. ....	40
Figura 13. Principales productos de las pruebas experimentales, metal y escoria. ....	41
Figura 14. Espectrómetro de masa utilizado para la caracterización química del metal obtenido en las pruebas experimentales. ....	42
Figura 15. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos. ....	43

## **ABREVIATURAS Y SIMBOLOS**

**CARON:** Tecnología carbonato Amoniacal de producción de Níquel

**HPAL:** Tecnología de lixiviación ácida a presión de producción de Níquel

**PAMMs:** Pasivos ambientales minero metalúrgicos sólidos

**PAM:** Pasivos ambientales mineros

**NPI:** Nickel Pig Iron

**ECG:** Empresa Productora de Níquel y Cobalto Ernesto Che Guevara de Moa.

**RRL\_Nicaró:** Empresa Productora de Níquel y Cobalto René Ramos Latour de Nicaro.

## INTRODUCCIÓN

Las industrias productoras de níquel en Cuba, se ubican fundamentalmente, en el nordeste de la provincia de Holguín, específicamente en la región de Moa, donde existen las dos principales plantas, que utilizan la tecnología Carbonato Amoniacal (proceso CARON) y la tecnología ácida a presión, conocida como HPAL. La producción de níquel, genera gran cantidad de residuos, que constituyen un problema ambiental y son objeto actualmente de investigaciones, que permitan evaluar alternativas para su tratamiento, disposición y mejora, con el fin de disminuir el impacto negativo que provocan sobre el medio ambiente y así lograr su revalorización o reconversión en activos industriales. (Tirado Hernández, 2018, pág. 1 y 2)

La generación de colas de la industria del níquel cubana, comenzó con la puesta en marcha en 1943 de la Empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro, seguida en 1959 con el inicio de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba” (Moa nickel S.A), y posteriormente en 1986 con la arrancada de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara "(ECG) de Punta Gorda. Estos residuales metalúrgicos constituyen una importante materia prima para la futura obtención de importantes elementos valiosos contenidos en ellas, cuyos volúmenes se incrementan en la medida que aumenta la producción de Níquel en las empresas productoras. (Brefe, Evaluación de las principales características físico-químicas del pasivo ambiental "colas viejas " para su posible uso industrial, 2017, pág. 1).

En la planta metalúrgica Ernesto Che Guevara de Moa, se extrae níquel más cobalto mediante el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco conocido mundialmente como tecnología Caron. Los residuos no lixiviados (colas) son enviados por tuberías a presión hasta las presas de almacenamiento para su posterior utilización, (Turro Brefe & Izquierdo Pupo, Introducción, 2008, pág. 3).

La Empresa Comandante Pedro Soto Alba (PSA) de Moa, es una de las principales industrias procesadoras de mineral lateríticos, con un alto contenido de níquel, cobalto, hierro y otros metales valiosos, con una eficiencia que oscila entre, 88 y 90 %, con una menor producción de residuos que otras empresas productoras de níquel y cobalto a nivel mundial. Sin embargo, esta empresa ha generado volúmenes considerables de residuos

sólidos, que son las llamadas colas rojas, los cuales, son depositados en diques contruidos para estos fines, denominados presas de colas, como la existente en el centro de la ciudad de Moa, la cual cuenta con más de 8,0 MM de toneladas de estos residuos, sin un uso apropiado ni perspectiva, (Tirado Hernández, 2018, pág. 2).

Las colas son mezclas compuestas de partículas sólidas de mena laterítica en suspensión acuosa, con cierta cantidad de amoníaco disuelto, que al ser conducidas a través de tuberías forman un flujo trifásico. En la literatura consultada no se reportan evaluaciones de las pérdidas hidráulicas para pulpas minerales con estas características, (Turro Breffe & Izquierdo Pupo, Introducción, 2008, pág. 3).

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. (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003, pág. 22).

Las Colas Viejas de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” de Moa, constituyen un pasivo ambiental, que plantean que:

Los Pasivos Ambientales Mineros son todos aquellos elementos, tales como instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinaria o parques de mineral, que estando en la actualidad en entornos de minería abandonada o inactiva, constituyen un riesgo potencial permanente para la salud de la población y el medio ambiente, (Breff, Introducción, 2017, pág. 2).

Uno de los grandes problemas que resultan de estos pasivos ambientales es la generación de drenajes ácidos, los cuales pueden afectar los cuerpos de agua, como ríos, lagos, lagunas, las aguas subterráneas y el mar, los suelos, el aire, el paisaje, la cobertura vegetal, el ambiente, la salud humana y la infraestructura. Los efectos que ocasionan estos residuales pueden ser variados, pudiéndose alterar las características químicas, físicas y

biológicas de los cuerpos receptores. La forma cómo estos cuerpos se alteran también es variada, dependiendo de la temperatura local, la geografía del lugar, el aislamiento poblacional de la zona, la pluviosidad, los ecosistemas circundantes. (García, Introducción, 2018, pág. 2)

### **Problema de investigación**

Inexistencia de productos metalizados base hierro, obtenidos a partir del tratamiento de las colas del proceso CARON, que puedan ser utilizados como carga para la producción de aceros aleados en las Empresas siderúrgicas cubanas.

### **Objetivos**

#### **Objetivo general**

Evaluar el proceso de obtención de un producto metalizado base hierro, a partir del tratamiento de las colas del proceso CARON, que puedan ser utilizados como carga para la producción de aceros aleados en las Empresas siderúrgicas cubanas.

#### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar las materias primas a utilizar para el desarrollo de mezclas metalúrgicas, principalmente, colas, fundentes y reductores.
2. Evaluar el proceso metalúrgico de fusión reductora a partir del desarrollo de las mezclas metalúrgicas conformadas.
3. Evaluar las características de los productos (Arrabio y Escorias), obtenidos como resultado de las pruebas experimentales empleando la tecnología de fusión reductora.

### **Objeto de investigación**

Colas del proceso CARON de las Empresas Ernesto Che Guevara y Rene Ramos Latour de Moa y Nicaro.

### **Campo de acción**

Fusión reductora de las colas del proceso CARON de las Empresas Ernesto Che Guevara y Rene Ramos Latour.

## **Aportes de investigación**

### **Ambiental**

Se utilizarán residuales de la Industria Cubana del Níquel (presas de colas), que actualmente provoca una gran contaminación a la región de Moa y Nicaro, para la obtención de un producto metalizado.

### **Social:**

Reducir y mejorar el efecto que puede ocasionar a la salud, de las personas que viven en Moa y Nicaro, así como la posible generación de nuevos empleos con la implementación de una planta para la obtención de productos metalizados base hierro, a partir de materias primas nacionales

### **Económico**

Darles un valor económico a las colas residuales de las plantas productoras de Níquel y Cobalto en Moa y Nicaro, a partir de su reaprovechamiento por la industria siderúrgica nacional.

### **Metalúrgico**

Desarrollar una práctica metalúrgica, basada en la fusión reductora, que facilite la obtención de un producto metalizado base hierro, a partir de las colas del proceso CARON en Moa y Nicaro.

## **Estructura de la tesis**

La tesis esta estructurada en las partes siguientes:

**Introducción:** Donde se exponen los principales elementos del diseño experimental, definiéndose el problema científico, objetivos, objeto, campo de acción e hipótesis.

**Capítulo I:** Se fundamenta el marco teórico de la investigación, demostrándose la necesidad de desarrollar esta tesis, como parte de un proyecto para la obtención de productos metalizados base hierro para la futura obtención de aceros aleados en Cuba.

**Capítulo II:** Se exponen los principales materiales y métodos empleados para el desarrollo de la parte experimental y el procesamiento de los resultados obtenidos.

**Capítulo III:** Se analizan los principales resultados obtenidos, durante el desarrollo de las pruebas experimentales, empleando las colas de la ECG y mezclándolas con las de Nicaro.

**Conclusiones y recomendaciones:** Se consolidan los resultados de la investigación y se dejan nuevas líneas de trabajo para la continuación de este proyecto de Innovación y Desarrollo.

## **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre los principales aspectos teóricos, que se tienen en cuenta para el desarrollo de la investigación, relacionada con la caracterización y uso del Pasivo Ambiental Minero Metalúrgico sólido “Colas del proceso CARON”, que generan las empresas de producción de níquel en Moa y su uso como materia prima para la obtención de productos metalizados base Hierro.

### **1.2 ¿Qué son los aceros?**

El Acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05 % hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados.

Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero, (Castro, 2009, pág. 56).

Los aceros llamados simple carbono son aquellos que generalmente tienen aparte del carbono cantidades o porcentajes pequeños de Mn, Si, S, P. Ejemplo es el acero 1045 que tiene un 0,45 de fósforo, 0,50 de azufre y 0,22 de silicio, (Flores, 1996, pág. 1).

Se caracteriza por su resistencia y porque puede ser trabajado en caliente, es decir, solamente en estado líquido. Pues, una vez que se endurece, su manejo es casi imposible. En cuanto a los dos elementos que componen el acero (hierro y carbono), se encuentran en la naturaleza, por lo que resulta positivo al momento de producirlo a gran escala, (Adrián, 2021).

### **1.2.1 Características generales de los aceros**

Tienen propiedades importantes y esenciales que le permite ser utilizado por la industria automotriz, en la edificación de viviendas y en infinidad de elementos. Entre sus características esenciales se encuentran, (Adrián, 2021).

#### **Componentes**

En cuanto a la composición del acero es básico el hierro y otros elementos como el carbono, manganeso, fósforo, níquel, azufre, cromo y más. Las variaciones en la composición son responsables de una gran variedad de grados y propiedades.

#### **Densidad**

Su densidad media es de  $7850 \text{ kg/m}^3$ . En función de la temperatura se puede contraer, dilatar o fundir. El punto de fusión depende del tipo de aleación y los porcentajes de elementos aleantes.

#### **Corrosión**

La continua exposición del acero a factores climáticos externos como la lluvia y el sol pueden llegar a alterar la composición eléctrica del metal, permitiendo así que se desgasten las moléculas y partículas.

#### **Conductividad**

Posee una alta conductividad eléctrica. Aunque depende de su composición, es aproximadamente de  $3 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ .

### **1.2.2 Tipos de aceros**

Este tiene muchas aplicaciones en la vida diaria de las personas, ya que es común en utensilios, herramientas y electrodomésticos, así como en las estructuras de las viviendas y edificios modernos, todo depende de su tipo, (Adrián, 2021).

### **Acero galvanizado**

Es el resultado de combinar las propiedades de resistencia mecánica del metal y las propiedades anticorrosivas del zinc. Este tipo es utilizado para la edificación, la fabricación de grandes estructuras, en la comunicación, electricidad y transporte.

### **Acero inoxidable**

Es aquella clase que es moldeado, compuesto por cromo y níquel, que lo hacen brillante y resistente a la corrosión aun cuando se encuentre expuesto a la humedad.

### **Acero de construcción**

Primero el mineral de hierro crudo es triturado y clasificado. Se carga en un alto horno, la reacción resultante comienza a eliminar las impurezas. Se extrae y calienta aún más para permitir la inclusión de sustancias, como el manganeso, que otorgarán diferentes propiedades al producto acabado.

### **Acero calmado**

Este tipo se encuentra desoxidado totalmente antes de la colada, mediante la adición de metales.

### **Acero forjado**

Es ese el que se ha modificado en forma y estructura interna, mediante la aplicación de técnicas de forjado realizadas a una temperatura superior a la de la recristalización. Tiene menos porosidad superficial, una estructura de grano más fina, más resistencia a la tracción y a la fatiga, y más ductilidad que cualquier otro procesamiento.

### **Acero laminado**

Es aquel que ha pasado a través de rodillos a temperaturas muy altas, más de 1,700 F°, lo que excede la temperatura de cristalización de la mayoría del metal. Esto hace que sea más fácil de moldear y da como resultado productos con los que es más fácil trabajar. (Adrián, 2021)

## **Otros tipos de acero**

### **Acero puro**

Podría definirse como el acero básico. Sería una versión del acero puro. Cuanto más carbono contenga la composición final, mayor será su resistencia. Pero también tendrá menos ductilidad. En la aplicación práctica, esto significa que la aleación pierde plasticidad. El acero puro se compone de hierro y de un porcentaje de carbono que puede oscilar entre el 0,3 % y 2,14 %.

### **Acero A36**

Esta clasificación se utiliza principalmente en los Estados Unidos, como acero estructural. Su principal característica es que tiene multitud de formas, desde platinas hasta tubos, perfiles o planchas.

### **Acero c40**

Es un tipo de acero bonificado. Tiene un proceso de templado posterior, siempre por debajo del punto crítico de temperatura. Lo que se busca es reducir la resistencia a la tenacidad y la resiliencia.

### **El acero 1045**

Una modalidad con un buen nivel de resistencia que desarrolla, gracias a su proceso de producción, buenas propiedades de impacto. Es por eso que se ha empleado para la fabricación de pinzas hidráulicas, bielas, tornillos u otras piezas de metal que puedan verse sometidas a este tipo de situaciones. En su composición encontramos, al margen del hierro y el carbono, ligeras proporciones de silicón, manganeso y fósforo.

### **Aceros rápidos**

Se usan principalmente para herramientas, debido a que tienen muy buena resistencia tanto al desgaste como a la temperatura. En consecuencia, son ideales para soportar impactos, de ahí que su finalidad sea la fabricación de brocas, machos, etc. En definitiva, cualquier pieza que necesite soportar impacto con resistencia y sin deformaciones.

Los elementos que forman parte de su composición son: el propio Molibdeno, el wolframio, el vanadio y/o el cromo. Y, por supuesto, el cobalto, con el que conseguimos

aumentar la dureza del acero, aunque éste haya sido sometido a altas temperaturas. De nuevo, cobra sentido su utilización en materiales de impacto por repetición, en donde los materiales pueden adquirir, fruto de la fricción, altas temperaturas.

### **Aceros para cementación**

se utiliza para cementar. En su composición química, este tipo de acero destaca por contener muy poco carbono, en comparación con otros elementos similares de acero. La parte proporcional de carbono que deja de utilizarse, es cubierta por el Cromo, el Níquel y Molibdeno. En función de las cantidades aportadas de cada uno de estos elementos químicos, destacaremos unas propiedades u otras. El temple y tratamiento térmico también influirá en las propiedades finales del acero.

### **Aceros resistentes al calor**

El acero, por sí mismo, es un componente resistente al calor. Sin embargo, existen situaciones concretas en donde la exposición es realmente elevada, lo que requiere de una aleación específica que permita someter al aleado a altas temperaturas sin riesgos de deformaciones.

Aquí es donde entran en juego los aceros resistentes al calor, también conocidos como termorresistentes. Su tolerancia puede oscilar desde los 260 hasta los 1.200 grados centígrados.

Para conseguirlo, se emplean una gran cantidad de elementos de la tabla periódica: Cromo, Aluminio, Niobio, Manganeso, Silicio o Molibdeno son algunos de ellos. En realidad, un acero resistente al calor puede estar incluido en esta clasificación y, a su vez, puede estar también catalogado como un acero al carbono.

Con este ejemplo, insistimos en la gran cantidad de aceros disponibles en el mercado. Lo que genera, en consecuencia, decenas de clasificaciones. Por ende, una marca, modelo o tipo de acero puede quedar encuadrado en diversos grupos de los descritos.

### **Acero para nitruración**

La nitruración es un proceso químico y térmico al que se somete el acero. En concreto, se trata de añadir nitrógeno a la aleación, mientras nos encontramos en la fase de

calentado. De este modo, conseguimos piezas finales de mayor dureza, que soportarán mejora tanto la fatiga como una hipotética corrosión. Dentro de esta clasificación tenemos diversos tipos de acero.

Tenemos aceros para nitruración basados en Cromo, Molibdeno y Vanadio. Dentro de ellos encontramos el de alta resistencia, para evitar el desgaste superficial, y el de resistencia media.

Por otro lado, la aplicación de Cromo, Aluminio y Molibdeno nos da como resultado el acero para nitruración de alta dureza, en donde prime esta condición para la superficie del material, por encima de la resistencia. En este caso, esta última característica pasa a tener un valor medio y menos destacado. (Adrián, 2021)

### **1.2.3 Materias primas para la producción de acero**

Las materias primas fundamentales para fabricar acero son el mineral de hierro y el carbón.

El mineral de hierro es una roca compuesta fundamentalmente por óxidos y carbonatos de hierro (hierro + oxígeno y hierro + carbono), (La Llave del Acero, 2015).

## **1.3 Aceros aleados**

### **1.3.1 ¿Qué son los aceros aleados?**

Un acero es considerado que tiene un grado de aleación cuando el rango máximo dado para el contenido de elementos de aleación excede uno o más de los siguientes límites: (a) 1,65 manganeso, (b) silicon, (c) 0,60 cobre. Es también considerado un acero aleado cuando una cantidad máxima definida de cualquiera de los siguientes elementos es especificada o requerida dentro de los límites de los aceros aleados constrictionales: (a) aluminio, (b) cromo, (c) cobalto, (d) columbio (nubio), (e) molibdeno, (f) níquel, (g) titanio, (h) tungsteno, (i) vanadio, (k) zirconio, o cualquier elemento para obtener un efecto de aleación especificado.

Como regla, la cantidad total de aleación en estos AISI-SE Grados Estándar de Aceros Aleados no excede aproximadamente 4,0 sobre y por encima de la calidad normalmente permitida en acero en carbón. (Flores, 1996, pág. 35)

#### **1.4 Características generales de los PAMMs**

El término pasivos ambientales mineros, empleado comúnmente para referirse a la minería abandonada en Iberoamérica, hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas, con o sin dueño u operador identificables, y en donde no se haya realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad competente; aunque cada vez más comienza a existir cierto consenso en considerar el riesgo como un factor definitorio, de tal forma que sólo se consideran pasivos ambientales mineros (PAM) a aquellos elementos asociados a actividades mineras abandonadas, que representen un riesgo potencial permanente sobre la salud y seguridad de las personas, la biodiversidad y el medio ambiente, (García N. C., 2018, pág. 8)

##### **1.4.1 Conceptualización de los PAMMs**

En países de América Latina como Bolivia, México, Perú y Colombia, se han realizado investigaciones y bases normativas que muestran avances en la definición sobre los Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Veamos algunos ejemplos de esta afirmación, a partir de los trabajos investigativos realizados:

En Bolivia, de acuerdo con la Ley Nro. 1333- Ley de Medio Ambiente, un pasivo ambiental es el conjunto de impactos negativos perjudiciales para la salud y/o el medio ambiente, ocasionado por determinadas obras y actividades existentes en un determinado período de tiempo y los problemas ambientales en general no solucionados por determinadas obras o actividades en ejecución, (García N. C., 2018, pág. 8 y 9).

En México, los pasivos ambientales se definen como: “aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación, (García N. C., 2018, pág. 9).

El informe preliminar “Inventarios de Pasivos Ambientales Mineros” del Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Minería del Perú en el año 2006 define como Pasivo Ambiental Minero “todas las instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad”.

En Colombia, por ejemplo, no existe una legislación para evaluar los PAM, pero se han propuesto las siguientes definiciones:

- Se denomina PAM a la obligación de incurrir en un gasto por una persona como consecuencia de una responsabilidad cuantificable económicamente, causada por actividades mineras inactivas o abandonadas que generan un riesgo para la salud y el patrimonio.
- Se entiende por PAM “la obligación económica causada por un daño ambiental generado por actividades mineras inactivas o abandonadas que pone en riesgo la calidad de vida, el ecosistema, bienes públicos o privados”. (García N. C., 2018, pág. 9)

#### **1.4.2 Tratamiento de los pasivos ambientales**

(Pinedo Medina, y otros, 2008, pág. 28), estudiaron la lixiviación de las Colas del Proceso Caron utilizando como lixivante orgánico, al ácido acético y al ácido piroleñoso, lo que permitió analizar el comportamiento de la extracción de níquel, cobalto, hierro y manganeso contenidos en colas del proceso carbonato amoniacal de la industria niquelífera “Ernesto Che Guevara” de Moa.

En este trabajo, los agentes de lixiviación utilizados fueron obtenidos por pirólisis de bagazo de caña, y los resultados mostraron que los mayores porcentajes de extracción de Ni y Co (35 y 39 %, respectivamente) se lograron en el nivel superior de temperatura y concentración del ácido acético, por otra parte la lixiviación de la cola, aplicando el ácido piroleñoso, se realizó a diferentes niveles de temperatura, alcanzándose a la máxima temperatura (60 °C) extracciones de Ni y Co de 35,6% y 36,0 %, respectivamente, mientras que la extracción de Fe fue muy superior a la obtenida con soluciones de ácido acético, lo cual influyó en que los niveles de selectividad alcanzados con ácido piroleñoso

fueran inferiores. Adicionalmente los análisis de microscopía electrónica de barrido, mostraron la acción de estos ácidos sobre el mineral, mientras que los difractogramas de rayos X, demostraron que no existen transformaciones de fases mineralógicas importantes en las colas, ni la aparición de nuevas fases como resultado de la lixiviación con estos agentes orgánicos.

Este trabajo fue tomado en cuenta para el desarrollo de nuestra investigación, debido a los métodos utilizados para el tratamiento de este pasivo ambiental, que, aunque no es el mismo objeto, ni método de investigación empleado en nuestro trabajo, sí aportó importantes elementos sobre las características, físicas y químicas de estos pasivos. El desarrollo de las investigaciones fue con el propósito de recuperar componentes metálicos valiosos como el níquel, cobalto, hierro, óxido de silicio, óxido de magnesio, aluminio, cromo y magnesio presentes en las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, para ello se sometió a la separación hidrogravimétrica en mesa de concentración, con una variación del flujo de agua alimentado de 0,16 L/s; 0,22 L/s y 0,28 L/s y con una variación del ángulo de inclinación de la mesa de concentración de 30; 4,50 y 60, luego se determinó su composición química a través de la técnica de fluorescencia de rayos X al producto alimentado a la mesa de concentración y a los productos obtenidos de ésta (concentrado, producto medio y colas) y posteriormente se determinaron los indicadores tecnológicos del beneficio de minerales, en el que se obtuvo como resultado más importante, la recuperación de los metales en el concentrado cuando se utiliza un ángulo de inclinación de 6 grados y un flujo de agua alimentado de 0,16 L/s.

Los resultados obtenidos en esta investigación concluyen que la separación en mesas de concentración, con las condiciones utilizadas, no arroja resultados favorables, por lo que no ocurre el proceso de beneficio de las colas, en las mesas de concentración.

Trabajos encaminados al uso de las colas del proceso CARON en Nicaro, fueron desarrollados por Ferreiro, Sánchez, Domínguez y Palacios, quienes tuvieron como propósito obtener un material con características siderúrgicas, a partir de los residuos sólidos industriales de la Empresa de Níquel René Ramos Latour. Dicho residual fue sometido a un proceso de concentración magnética y aglomeración, mediante la pelletización, empleando como aglutinante la bentonita, donde los pellets entre 14 y 18 mm de diámetro, mostraron valores de resistencia a la compresión en verde de 9,71 y 6,98 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Estos resultados demostraron que las pruebas de reducción, con

una temperatura del horno de 1265 °C y enfriando en atmósfera inerte, se logra obtener 76 % de metalización, así como un grado de reducción de 80,42 %.

Estos resultados indican, que es importante estudiar con mayor detenimiento, el proceso de aglomeración, seguido de la prerreducción de los minerales lateríticos, para facilitar los procesos que se materializan en hornos de fundición, lo cual debe ser objeto de nuevas investigaciones. (Tirado, 2018, págs. 7,8 y 9)

### **1.4.3 Usos de los Pasivos Ambientales, generados por la industria del níquel**

La obtención de lupias de arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro es un ejemplo claro que demuestra la utilidad de los pasivos ambientales.

Entre los elementos de aleación más importantes, se tienen la presencia del carbón, entre 4,32 y 5,10 %, estos elevados valores se justifican, debido principalmente a la presencia del cromo en las lupias (entre 1,786 y 1,931 %), cuya presencia permite que el hierro asimile elevados contenidos de carbono, debido a la formación de un doble carburo de cromo y hierro, lo que trae consigo que el arrabio obtenido tenga una elevada capacidad de absorción de carbono, contrarrestando el efecto grafitizador del níquel cuyo contenido en las lupias se encuentran entre 0,608 y 0,621 %.

En las lupias obtenidas el contenido del silicio oscila entre 0,27 y 0,59 %, con este bajo contenido de silicio la estructura de las lupias debe ser la de un arrabio blanco, mientras que el contenido de manganeso es bajo, oscila entre 0,178 y 0,384 %, en las fundiciones se desea que su contenido oscile entre 0,5 y 1,0 % para proteger a la fundición de la oxidación del baño metálico.

El contenido de azufre oscila entre 0,142 y 0,257 %, contenido característico de los arrabios blancos, para los hierros fundidos grises oscila entre 0,02 y 0,08 %.

Los contenidos de fósforo obtenidos en las lupias oscilan entre 0,023 y 0,026 %, por lo que de acuerdo al bajo contenido de fósforo (menor que 0,1 por ciento) las lupias de arrabio podrían clasificarse como arrabios hematites (Euronorm 1 - 81), no obstante, los

contenidos presentes de níquel y cromo ( $> 0,3 \%$ ) impiden que se clasifiquen las lupias como hematites, sino como lupias de arrabio aleadas dentro de la clase de designación "otros arrabios aleados" (Pig-SPA), de la norma europea Euronorm 1- 81.

Al tener en cuenta la presencia de los elementos de aleación en las lupias, ello trae consigo que el contenido de Hierro sea menor ( $91,23 \%$ ) que el que se obtiene por la tecnología ITMK3 (entre  $96$  y  $97 \%$ ).

De acuerdo a la composición química de las lupias obtenidas sería posible sustituir hasta un ocho por ciento de chatarras de acero por este material en la elaboración de aceros al carbono, por lo que el mayor uso que se le podría dar a este material, sería para la obtención del acero "Mayarí", así como para la elaboración de aceros inoxidables, para el que se podría emplear más del  $80 \%$  como material de carga.

Otro uso evidente fue obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de mina martí de Nicaro.

El arrabio obtenido puede utilizarse en caliente al horno para la fundición de acero en una cantidad que corresponde al  $50 \%$  de la carga metálica de la acería de Acinox Las Tunas. Serían  $6000$  t de arrabio con níquel al mes, entonces esta entidad pudiera economizar  $4000,00$  MGwatt/mes de electricidad, que significan  $712\ 000$  usd/mes.

(Pérez, María Ramírez, 2010) fue otro autor que estudió el posible uso de los escombros lateríticos, demostrando la efectividad del uso de los escombros lateríticos del área 1, yacimiento Moa Occidental perteneciente a la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba, en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40, fundamentado en la caracterización química, física, mineralógica y térmica de esos escombros.

Los dos primeros trabajos mencionados anteriormente hacen referencia al posible uso de los pasivos ambientales, generados por la Minería y la Metalurgia en Nicaro específicamente, las colas y los escombros de Mina Martí; del cual fueron tomadas varias muestras de estos residuales, sometidas al proceso de reducción carbotérmica, con el fin de obtener dos productos aprovechables en posteriores procesos siderúrgicos. La presente

investigación posee gran semejanza con estos trabajos, pero esta vez el área en cuestión es el pasivo ambiental escombros lateríticos de Moa Oriental en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, al cual se le aplicará un proceso reductor por el método de aluminotermia”, (García N. C., 2018, págs. 21,22 y 23).

## **1.5 ¿Qué son las colas?**

Las colas son mezclas compuestas de partículas sólidas de mena laterítica en suspensión acuosa, con cierta cantidad de amoníaco disuelto, que al ser conducidas a través de tuberías forman un flujo trifásico, (Turro Breffe & Izquierdo Pupo, 2008).

### **1.5.1 Caracterización de los residuos**

Estas investigaciones tienen un carácter ambientalista ya que en ellas se analizan los 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 su vertimiento al medio, por lo que se hace necesario la búsqueda con urgencia de métodos que garanticen el almacenaje seguro de los residuos en las presas de colas.

Las colas se caracterizan por ser sedimentos friables, sueltos de granulometría pequeña y fina, fuertemente limosas, saturadas por las aguas, con alta capacidad de fluidez (ante el agua). Las colas provienen de los residuos de los procesos mineros metalúrgicos. La alta capacidad de fluidez puede tener lugar de diferentes formas, desde muy lenta, lenta, a rápida hasta llegar a un movimiento catastrófico. La movilidad de las colas indica que existe una inestabilidad en el medio, así como una pérdida de resistencia y la deformabilidad de este suelo, (Rodríguez, 2017)

### **1.5.2 Composición mineralógica del proceso CARON en Moa**

La composición granulométrica se determinó por vía húmeda, usando los tamices: 0,175; 0,147; 0,074 y 0,044 mm. Las determinaciones químicas se realizaron empleando técnicas de fluorescencia de rayos-X para los elementos Ni, Co, Fe, Mg, Cr, Al y Mn; la determinación de la sílice se hizo por Espectroscopía de Absorción Atómica (espectrofotómetro CDN-18). Como método fundamental para las determinaciones mineralógicas se utilizó la técnica de difracción de rayos-X, según método policristalino,

utilizando un difractómetro alemán del tipo HZG-4 con radiación de  $\text{CoK}\alpha$ , régimen de procesamiento de 30 Kv, 20 mA,  $2\theta$ : 5 a 80 0, y generador de voltaje TUR M-62; para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos se emplearon los softwares ANALIZE y AUTOQUAN, de la SEIFERT X – Ray Technology (Versión 2.26), de procedencia alemana. (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003, pág. 22)

### **1.5.3 Características químicas**

La tabla 1 expone los resultados del análisis químico de las colas analizadas. Éstas son esencialmente ferrosas, y alcanzan alrededor de un 68 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ; presentan, además, contenidos significativos de sílice (alrededor del 12 %), mientras que los óxidos de Mg, Cr y Al alcanzan, como promedio, 7,11; 5,03 y 3,45, respectivamente. Desde el punto de vista químico no existen diferencias notables entre las colas de una y otra etapa.

**Tabla 1.** Composición química de las colas obtenidas en las etapas de lixiviación y recuperación de amoníaco.

Muestras	Contenido en % por muestras							
	NiO	CoO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
R-1	0,38	0,10	68,02	7,13	12,45	3,37	5,11	0,97
R-2	0,36	0,10	68,02	7,13	12,44	3,45	4,78	0,97
R-3	0,36	0,10	68,02	6,88	11,29	3,44	5,00	0,85
R-4	0,36	0,10	68,02	6,96	11,91	3,42	5,20	0,89
R-5	0,37	0,10	67,31	7,31	11,42	3,34	4,89	0,92
L-1	0,33	0,09	68,31	6,88	11,89	3,45	5,04	0,79
L-2	0,41	0,10	68,31	7,96	12,15	3,50	5,03	1,28
L-3	0,37	0,09	68,31	6,88	10,64	3,49	4,79	0,79
L-4	0,22	0,03	55,87	6,86	11,87	3,44	5,42	0,89
L-5	0,39	0,10	68,31	7,10	12,15	3,62	5,04	0,96
Promedio	0,36	0,09	66,85	7,11	11,82	3,45	5,03	0,93

**Fuente:** (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003)

#### 1.5.4 Mineralogía de las colas de Moa

Se detectó la presencia de las fases minerales siguientes: maghemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ), Mg-cromita ( $(\text{Mg, Fe})\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y fayalita  $(\text{Fe, Mg})_2(\text{SiO}_4)$ . Los óxidos de Fe, representados por maghemita–magnetita, constituyen las fases minerales principales de las colas analizadas, con un cuadro difractométrico bien definido, tanto en los residuos de la etapa de lixiviación como en la de recuperación de amoníaco (Fig. 1 y 2). Se reconocen físicamente como un material de color negro, brillo semimetálico, fina granulometría y predominantemente magnéticos. Para comprender las transformaciones de fases que tienen lugar durante la etapa de reducción del proceso CARON, se debe partir de conocer que la materia prima mineral está compuesta fundamentalmente de óxidos de Fe (goethita, hematita, maghemita), y cantidades subordinadas de hidróxidos de Al (gibbsita) y Mn (asbolanas), además de componentes silicatados como cuarzo, olivino y serpentina, (Rojas Purón y otros, 1993).



detectaron diferencias entre estos dos óxidos de hierro, según su comportamiento con técnicas de extracción selectiva (empleando CBD) y espectroscopía Mössbauer, mientras que Costa et al. (1996), utilizando esta última técnica, caracterizan la maghemita de manera más completa, y la proponen como efectiva para el estudio de esta fase de hierro. Los resultados obtenidos de esta investigación corroboran la presencia de la fase maghemita según un criterio difractométrico, donde el reflejo  $d_{220}$  tiene valores más próximos a 0,295 nm que a 0,296 nm. Esto se refuerza con el hecho de que las curvas de ATD obtenidas para colas de estos depósitos (Ponce y otros, 1986) exponen picos exotérmicos de alrededor de los 780 °C, atribuibles a la transformación de la fase  $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$  en  $\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$ . En el gráfico resultante del análisis cuantitativo por difracción de rayos-X, empleando el AUTOQUAN, se observó que los picos difractométricos principales de las colas se ajustan más al patrón de la maghemita que al de la magnetita (Fig. 3), y se observa para esta última cierto corrimiento hacia la izquierda. La similitud entre las fases magnetita y maghemita, por sus propiedades físicas, magnetismo, patrón de difracción de rayos-X y espectroscopía Mössbauer, es declarada por Van Oorschot (2001), quien expone la necesidad de emplear, a fin de discriminar entre estas dos fases de óxidos de hierro, técnicas recientes para el análisis de rocas magnéticas como son: el análisis de las curvas reversibles de primer orden (conocidas en inglés por las siglas FORC) y los análisis de los componentes de las isotermas de magnetización remanente (IRM, en inglés), las cuales no hemos tenido la posibilidad de aplicar en esta investigación. Hay que decir que la formación de maghemita durante las etapas iniciales del proceso puede tomarse como indicador de poca eficiencia en la reducción de las fases ferrosas, lo cual podría ser una de las causas de la baja recuperación del níquel en la tecnología carbonato-amoniaco, al quedar este metal retenido dentro de la estructura de la maghemita. La utilización de técnicas de extracción selectiva pudiera verificar esta idea. Como fases minerales secundarias en las colas de las etapas de lixiviación (Fig. 1) y recuperación de amoníaco (Fig. 2), aparecen las fases de silicatos de Fe y Mg fayalita  $[(\text{Fe}, \text{Mg})_2 \text{SiO}_4]$ , del tipo fayalita-magnésiana, que representan alrededor del 12 % en las muestras. Están también las cromoespinelas: Mg-cromita  $[(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{Cr}_2\text{O}_3]$ , en una cantidad entre 5,5 y 8 %, y el cuarzo que llega a alcanzar hasta 2,6 % en algunas muestras. La fase fayalita ha sido detectada según los reflejos difractométricos principales: 0,354 nm; 0,281 nm; 0,25 nm; 0,1769 nm, y corresponde al mayor flujo al tipo fayalita-magnésiana según la tarjeta ASTM 31-633, en tanto la espínela presenta como principales

reflejos: 0,250 nm; 0,207 nm; 0,160 nm; 0,146 nm, atribuibles a la Mg-cromita, según la tarjeta ASTM 10 – 351; no se descarta la presencia de cierta cantidad de donathita [(Fe, Mg) (Cr, Fe) 2 O 4], como fases isoestructurales de las espínelas cromíferas.

Al valorar la cantidad de las distintas fases minerales en los residuos de cada proceso (Tablas 2 y 3) se observó que las fases maghemita y magnetita constituyen entre el 84 y 88 %. En un segundo lugar aparece la fase de olivino fayalita magnésiana con un contenido de alrededor del 12 %; las espínelas (Mg- cromita-donathita) están del 5,2 al 8 %, y la fase de cuarzo no supera el 2,6 %, (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003)

**Tabla 2.** Composición Mineralógica Cuantitativa, según recálculo mineralógico, de las colas de lixiviación.

Muestras	Contenido en % por muestras				
	Lix 1	Lix 2	Lix 3	Lix 4	Lix 5
Fayalita	10,18	11,30	12,17	12,22	11,10
Maghemita	36,50	37,10	36,85	34,52	38,20
Magnesio cromita	7,87	5,54	8,85	7,59	5,98
Magnetita	42,80	45,40	41,03	43,97	44,20
Cuarzo	2,63	0,66	1,11	1,70	0,48
Total	99,98	100,00	100,01	100,00	99,96

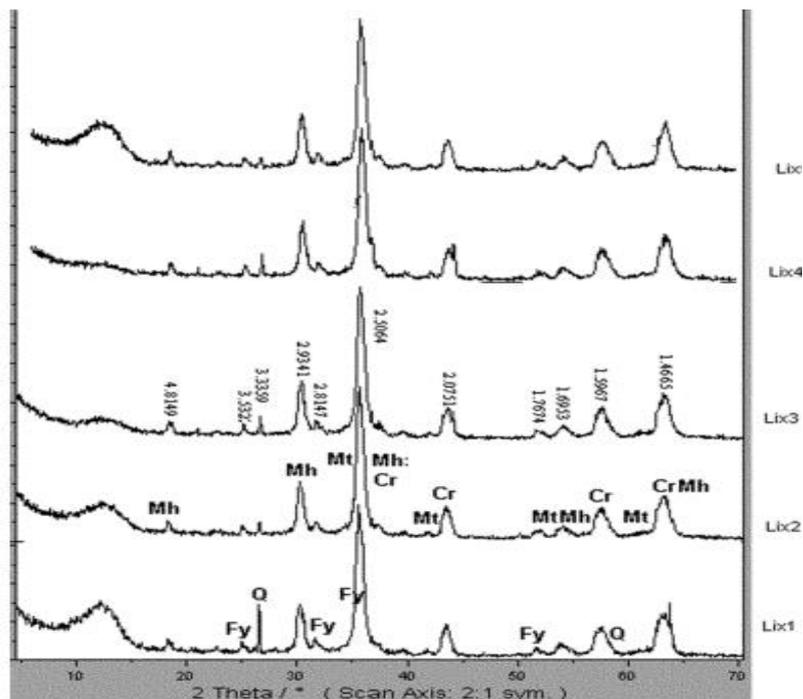
**Fuente:** (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003)

**Tabla 3.** Composición Mineralógica Cuantitativa, según recálculo mineralógico, de las colas de recuperación de amoníaco.

Muestras	Contenido en % por muestras				
	Rec 1	Rec 2	Rec 3	Rec 4	Rec 5
Fayalita	12,34	12,55	11,71	11,25	13,62
Maghemita	37,78	38,69	39,60	38,70	38,50
Magnesio cromita	6,81	6,78	6,81	6,50	6,45
Magnetita	42,27	41,88	41,80	43,30	40,30
cuarzo	0,80	0,10	0,12	0,26	1,14
Total	100,00	100,00	100,04	100,01	100,01

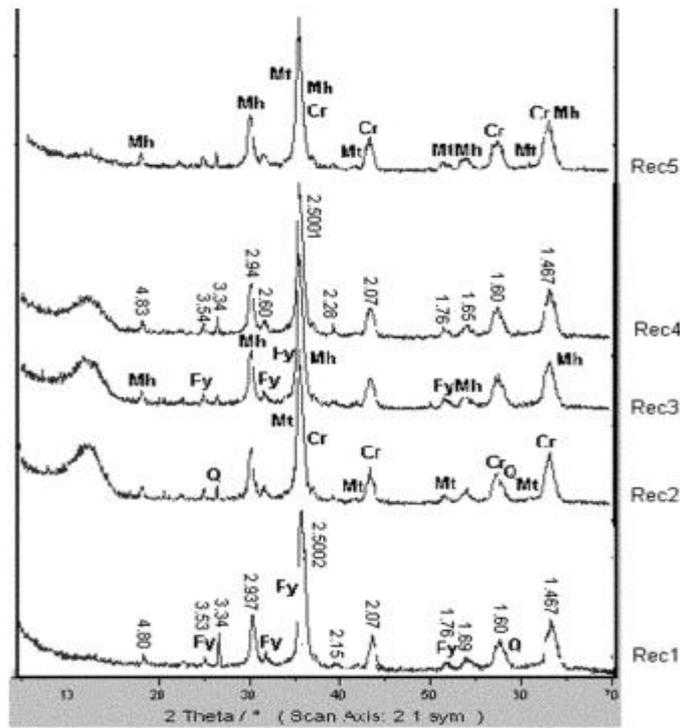
**Fuente:** (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003).

No se observaron diferencias significativas en relación con el contenido de las fases minerales principales (maghemita y/o magnetita) entre la etapa de lixiviación y la de recuperación de amoníaco. Sí se encontró que en las colas de lixiviación la fase de espínelas se encuentra en mayor cantidad y más heterogéneamente distribuida que en las de recuperación de amoníaco, y que en estas últimas existe menos cuarzo y más Fayalita que en las primeras, (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003).



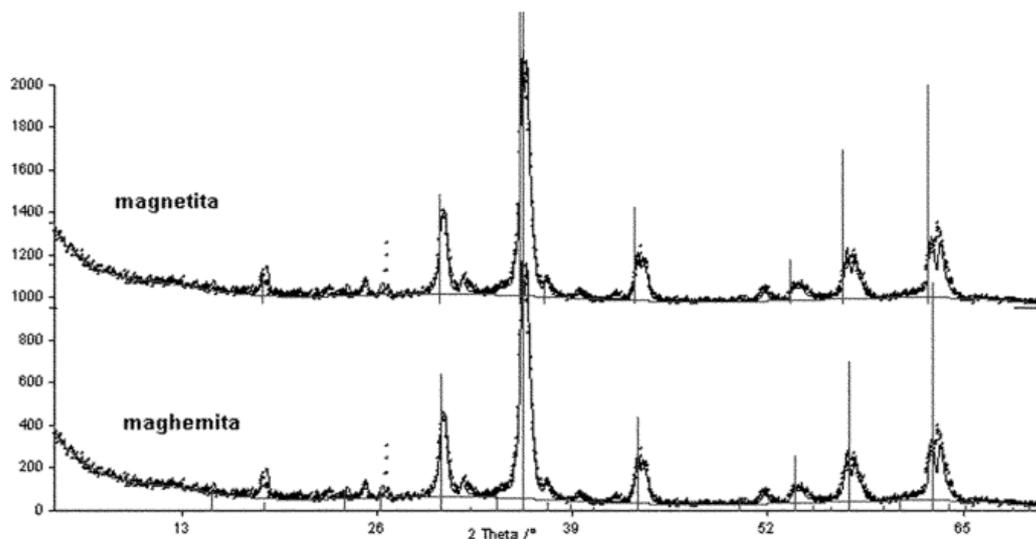
**Figura 1.** Difractogramas de las muestras de colas en la etapa de lixiviación. Mh: maghemita; Mt: magnetita; Fy: fayalita; Cr: Mgcromita; Q: cuarzo.

**Fuente:** (Breff, Mineralogía, 2003).



**Figura 2.** Difractogramas de las muestras de colas en la etapa de recuperación de amoníaco. Mh: maghemita; Mt: magnetita; Fy: fayalita; Cr: Mgcromita; Q: cuarzo.

**Fuente:** (Breff, Mineralogía, 2003).



**Figura 3.** Cuadro difractométrico comparativo de las fases maghemita y magnetita.

**Fuente:** (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003).

### **1.5. Obtención de metalizados de hierro a partir de los residuos sólidos de la industria del níquel en Nicaro**

La producción mundial de hierro siempre ha estado dominada por el Horno Alto. En los últimos tres años fueron empleadas un promedio de 934,9 millones de toneladas de arrabio (fundición con alto contenido de impurezas y entre 3,5 y 4,5 % de carbono) y 64,8 millones de toneladas de hierro esponja o DRI, siglas del término en inglés Direct Reduced Iron (Steel Statistical Yearbook 2010).

El hierro esponja es un hierro poroso que se obtiene como resultado de la eliminación del oxígeno del mineral durante el proceso de reducción, esencialmente con la misma forma y tamaño que la partícula del mineral; es un producto fácil de manejar y transportar y su composición química es uniforme y precisa. La técnica de reducción directa con carbón mineral fue desarrollada durante la década del 50 del siglo XX, en México, debido a la escasez de chatarra que trajo consigo la guerra de Korea (ILC 2012).

Los procesos de reducción se dividen en: procesos de reducción en estado sólido y procesos de reducción en estado líquido (smelting). Los primeros (reducción directa, DRI) se pueden clasificar, además, de acuerdo con el tipo de reductor, en: procesos que

utilizan reductor sólido y procesos que utilizan reductor gaseoso. Actualmente, los procesos que emplean reductor gaseoso obtienen el 73,1 % de la producción mundial de DRI.

La reducción en fase gaseosa requiere del suministro de gas natural para producir el gas reductor. El gas natural es costoso en comparación con el carbón no coquizable. Para reducir costos de energía, o bien si la disponibilidad del gas natural es baja, algunos procesos utilizan carbón como reductor. Al introducir cantidades elevadas de carbón se incrementa el azufre, razón por la cual se coloca cal o caliza en la carga para absorber el azufre. El carbón, además de actuar como reductor, es también la fuente principal de calor; su uso ha aumentado de manera notable, principalmente, por su menor coste en comparación con el petróleo y el gas natural.

En la reducción carbonotérmica (combustible sólido) el reductor principal es el carbono, el cual produce otro agente reductor gaseoso, el CO, responsable del incremento de la presión interna del horno. Cuando actúa el carbono sólido, la reducción se da, únicamente, en los puntos de contacto, actuando temporalmente, debido a que cuando se forma una capa de hierro metálico la reducción ya no procede por contacto sino por difusión de átomos de carbono en el estado sólido. Finalmente, esto ocasiona menor penetración a los átomos de carbono, lo que hace que el contenido de carbono sea menor (entre el 0,1 y el 0,2 %) que en los procesos con reductor gaseoso.

En Cuba no existen yacimientos de carbón y la producción de aceros se realiza en dos acerías: Acinox Tunas y Antillana de acero, las que utilizan 100 % de chatarras de acero mediante la vía del Horno de Arco Eléctrico. La empresa de materias primas suministra la chatarra a las acerías a un precio inferior al del mercado internacional (la quinta parte aproximadamente); de continuar los ritmos de producción actuales la paulatina disminución de la chatarra de acero puede provocar un desabastecimiento en el sector siderúrgico, y su alto coste de adquisición en el mercado internacional influirían negativamente en los costos de producción del acero en este sector.

A pesar de la existencia de yacimientos de minerales de hierro, principalmente en la provincia de Santiago de Cuba, la mayor reserva de este elemento metálico se encuentra en los residuos sólidos industriales del proceso de obtención de níquel, tanto por la vía

carbonato amoniacal o proceso CARON (empresas René Ramos Latour, en Nicaro y Ernesto Guevara, en Moa), como por la lixiviación ácida a presión (empresa Pedro Sotto Alba, Moa). Esos residuos se encuentran almacenados principalmente en represas de colas. La composición química de las colas de Nicaro varía en un amplio rango (Tabla 4) en dependencia de las características del mineral alimentado y de la eficiencia de la planta de extracción de níquel. (Ferreiro Guerrero, Sánchez Cruz, & Santiesteban Domínguez, 2012, pág. 66).

**Tabla 4:** Rango de variación de la composición química promedio de las colas de Nicaro.

Elementos u óxidos.	Contenido, %	Elementos u óxidos.	Contenido, %
Total	38,40 – 44,20	SiO <sub>2</sub>	15,40 – 20,54
FeO	13,17 – 18,50	CaO	Trazas – 0,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,65 - 45,10	MnO	0,67 – 2,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,25 – 5,30	NiO	0,37 – 0,57
MgO	9,54 –13,80	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03 – 0,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35 – 4,00	Cl	0,06 – 0,50
S	0,07 – 0,20	Na <sub>2</sub> O	0,021 – 0,27
CoO	0,09 – 0,12	K <sub>2</sub> O	0,01 – 0,35
CuO	0,006 - <0,01	As	0,01
Fe	0,13 – 0,43	PPI	0,96 – 2,90

**Fuente:** (Ferreiro Guerrero, Sánchez Cruz, & Santiesteban Domínguez, 2012, pág. 66).

Este residuo sólido polimetálico, para poder ser aprovechado con fines siderúrgicos requiere, necesariamente, de un proceso de beneficio, debido al elevado contenido de ganga (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO+SiO<sub>2</sub>+Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que posee.

Para procesar las colas de Nicaro se propuso un esquema de separación magnética de baja intensidad con 8 etapas que permite obtener un concentrado con 58 % de hierro y 0,93 %

de cromo; tal concentrado consigue una recuperación de 77,6 % en peso a partir de colas con un 41,22 % de hierro y 0,87 % de cromo.

La reserva de hierro “colas de Nicaro” ha sido la más estudiada en Cuba, desde escala de laboratorio hasta escala industrial, y se ha demostrado la posibilidad de obtener acero a partir de ellas. Teniendo en cuenta que Cuba no posee reservas de coque metalúrgico, el empleo de este material por la vía convencional de Alto o Mini Alto Horno no es posible, de ahí la necesidad de una alternativa que no dependa del coque metalúrgico.

Es por eso que la presente investigación tuvo el propósito de obtener un material con características siderúrgicas a partir de los residuos sólidos industriales de la empresa de níquel René Ramos Latour mediante un proceso de reducción que no dependa del coque metalúrgico. Para ello el residuo industrial fue sometido a un proceso de concentración magnética y aglomeración mediante la pelletización, y se empleó como aglutinante la bentonita y el carbón antracita como agente reductor, (Ferreiro Guerrero, Sánchez Cruz, & Santiesteban Domínguez, 2012, pág. 66 y 67).

## **1.6 Proceso de Reducción**

En la actualidad se dispone de una gran cantidad de procesos alternativos al horno alto que permiten obtener hierro, como material de carga para la producción de aceros, a continuación de resumen las principales características de estos procesos:

**Proceso de reducción directa:** es el proceso mediante el que se emplean agentes reductores como gas natural, coque, aceite combustible, monóxido de carbono, hidrógeno o grafito, obtenidos de la reformación catalítica del CH<sub>4</sub>. El procedimiento consiste en triturar la mena de hierro y pasarla por un reactor con los agentes reductores, con lo que algunos elementos no convenientes para la fusión del hierro son eliminados.

El producto del sistema de reducción directa es el hierro esponja, que consiste la obtención de pellets de mineral de hierro, que pueden ser utilizados directamente para la producción de acero con características controladas. ([www.Xiderex.org](http://www.Xiderex.org), 2016, pág. 1).

Destacan entre los principales procesos de reducción los que emplean como reductor al carbón, llamado carbotérmica y los que emplean otros metales como el aluminio,

Aluminotérmico, silicio, Silicotérmico, entre los más utilizados en el mundo, (García, Noslén Cobas, 2018)

### **1.6.1 Características de los Procesos de Reducción**

Entre los principales tratamientos realizados a los pasivos ambientales, están los procesos de reducción carbotérmica y reducción aluminotérmica, utilizados como vía para incrementar los contenidos de los principales elementos químicos, contenidos en ellos, los cuales se describen a continuación. (Tirado Hernández, 2018, pág. 12)

### **1.6.2 Reducción por el método de Carbotérmica**

El proceso de reducción con el carbono se verifica de forma general, mediante la reacción química siguiente:



Donde:

X: Elemento químico.

La reducción con carbono (reducción directa) se desarrolla en todos los casos con carácter endotérmico (referida a la temperatura ambiente), o sea, que el calor exigido para la reducción de los óxidos supera al desprendido por la combustión del carbono con formación de monóxido de carbono. Si se realiza una reducción indirecta con monóxido de carbono, la reacción es ligeramente exotérmica pero la reducción del óxido sería aún incompleta. Por esta razón la reducción se realiza en hornos eléctricos que son altos consumidores de energía, y donde las aleaciones obtenidas por este método tienen gran contenido de carbono, sin embargo, no cubren todas las posibles aplicaciones que se presentan en la industria, para este tipo de material.

### **1.6.3 Procesos con reductor sólido**

En los procesos con combustibles sólidos el reductor principal es el carbono, el cual produce otro agente reductor gaseoso, el monóxido de carbono, responsable del incremento de la presión interna del horno. Al actuar el carbono sólido, la reducción se da, únicamente, en los puntos de contacto, con una actuación temporal, debido a que, al formarse una capa de hierro metálico, la reducción ya no procede por contacto sino por difusión de átomos de carbono en el estado sólido. Finalmente, esto da menor penetración

a los átomos de carbono, lo que da lugar a que el contenido de carbono sea menor que en los procesos con reductor gaseoso, entre el 0,1 y el 0,2 %.

En el 2011 se mantuvieron operando en el mundo 54 módulos de reducción empleando carbón, con una capacidad de  $7,03 \times 10^6$  t (World direct reduction statistics 2011), la mayoría de estos procesos operan con la utilización de hornos de tipo rotatorio: SL/RN (Stelco-Lurgi – Republic Steel – National Lead), CODIR (Coal Ore Direct Iron Reduction), DRC (Davy Reduction Corporation), SIIL (Sponge Iron India Limited), OSIL (Orissa Sponge Iron Limited, TDR (Tisco Direct Reduction), JSPL (Jindal Steel & Power Limited). Conejo (2000) considera que esta unidad de reducción es tecnológicamente la más flexible de todas las conocidas en la técnica de la reducción directa, puede aceptar materiales de carga de una amplia variedad granulométrica, lo que permite la utilización de cargas con granulometrías inferiores a las señaladas para los procesos en hornos de Cuba, (García, Noslén Cobas, 2018).

#### **1.6.4 Procesos con reductor en fase gaseosa**

Conejo (2000) considera que los procesos con reductor en fase gaseosa más importantes comercialmente son los procesos Midrex y HYL; ambos representan el 72 % de la producción mundial por esta vía (Steel Statistical Yearbook, 2012), pero tienen el inconveniente que se necesitan contenidos mínimos de Hierro en las menas superiores a 64 %.

Los procesos con reductor en fase gaseosa requieren del suministro de gas natural para producir el gas reductor, donde el producto energético es costoso en comparación con el carbón no coquificable. En este caso, para reducir los costos de energía, o cuando la disponibilidad del gas natural es baja, se cuenta con una serie de procesos que operan con carbón solamente como reductor, (García N. C., 2018).

#### **1.6.5 Procesos de reducción en estado líquido**

El horno alto es la instalación metalúrgica en la que más se produce Hierro líquido en el mundo, se denomina hierro de primera fusión o arrabio, al hierro que procede directamente del alto horno, en el cual se realiza la transformación del mineral en hierro;

y se denomina fundición de hierro al producto no forjable, obtenido por una o varias fusiones del arrabio, solo o mezclado con materiales férreos o especiales.

De acuerdo a la norma europea EURONORM 1-81 "Definición y clasificación de arrabios" las lupias obtenidas pueden clasificarse como lupias de arrabio, por cuanto los contenidos de los elementos de aleación no exceden los límites máximos presentes en la norma.

Se define como arrabio al producto metálico obtenido por la reducción de minerales de hierro en altos hornos, plantea que el mismo es frágil y no forjable y lo clasifica de dos formas.

### **1.6.6 Procesos de reducción por aluminotermia**

Los procesos de reducción empleando al aluminio como reductor, se llaman aluminotérmicos, y sus principales características se describen a continuación, (García, Noslén Cobas, 2018).

Básicamente termita es el nombre genérico dado a las reacciones entre los óxidos metálicos y los agentes reductores. Como agentes reductores pueden utilizarse el aluminio, el magnesio, el calcio y el silicio. Cuando el agente reductor es el aluminio este proceso recibe el nombre de aluminotermia. El agente reductor más empleado ha sido el aluminio, debido a que el magnesio tiene una baja temperatura de ebullición y el calcio presenta carácter higroscópico. También se han utilizado mezclas de silicio y aluminio como elementos reductores, pero la utilización exclusiva de silicio precisa del aporte externo de calor, ya que por sí misma es difícil que la reacción progrese.

Las reacciones típicas de algunos procesos aluminotérmicos se muestran a continuación:

**Tabla 5.** Reacciones típicas de algunos procesos aluminotérmicos.

Reacciones	$\Delta H(\text{KJ/mol})$	Temperaturas
		Alcanzadas (°C)
$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{Al} \rightarrow 9\text{Fe} + 4\text{Al}_2\text{O}_3$	3010	3088
$3\text{FeO} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	783	2500
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	759	2960
$3\text{CuO} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$	1152	4866
$3\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{Al} \rightarrow 6\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$	1089	3138
$3\text{NiO} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$	864	3171
$3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$	2287	2977
$3\text{MnO} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{Mn} + \text{Al}_2\text{O}_3$	1686	2427
$3\text{MnO}_2 + 4\text{Al} \rightarrow 3\text{Mn} + 2\text{Al}_2\text{O}_3$	4356	4993

**Fuente:** (García N. C., 2018)

La variación de energía libre (G) para una reacción química a presión constante puede representarse por la ecuación siguiente:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

Donde:

$\Delta H$ : variación de entalpía del proceso (KJ/mol)

$\Delta S$ : variación de entropía del sistema (KJ/mol·K)

T: temperatura (K)

La igualdad anterior constituye la ecuación de una línea recta de la forma  $y = n + mx$  cuyos coeficientes n y m representan  $\Delta H$  y  $-\Delta S$  respectivamente.

Es la acción reductora del aluminio sobre los óxidos de otros metales, cuando la reacción se inicia en un punto, se desarrolla por sí sola, debido a que el calor de formación del óxido de aluminio es mucho mayor que el de la mayoría de los demás óxidos metálicos,

referidos a la misma cantidad de oxígeno. Es una reacción de oxidación-reducción fuertemente exotérmica, que genera 93,6 kcal y alcanza cerca de 3 000 °C, lo que produce una masa caliente de hierro fundido y escoria de óxido de aluminio refractario. El óxido de aluminio es mucho menos denso que el hierro líquido, lo que facilita la separación de los productos, el metal queda en la parte inferior cubierta de una capa de escoria. En la práctica debe trabajarse en función de lograr la mayor separación posible entre ambos productos. A temperatura tan elevada, no solo se funde el metal que se forma y que por su mayor densidad se reúne en el fondo, sino que también es capaz de fundir el óxido de aluminio formado y que se reúne en la superficie del metal, por su menor densidad, constituyendo una capa protectora.

Estas termitas solo reaccionan cuando un punto de la mezcla se calienta a una temperatura elevada mediante un cebo o fulminante. Una vez iniciada la reacción en un punto, el calor desprendido es suficiente para propagar la reacción a toda la masa de la termita. La propagación tiene lugar con una velocidad intermedia entre las reacciones explosivas y las reacciones ordinarias.

Teniendo en cuenta las características de la reducción Aluminotérmica, y la composición química de los escombros lateríticos, se utilizó este método en esta investigación, como alternativa de procesamiento premetalúrgico de este pasivo ambiental. (García, Noslén Cobas, 2018)

## **1.7 Conclusiones del Capítulo I**

- Los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos, como las colas, constituyen materias primas siderúrgicas, en dependencia de sus características físico-químicas, por lo que las colas de los procesos de producción de Níquel en Cuba, representan una de los posibles materiales capaces de ser utilizados como carga metalizada base hierro para la producción de aceros en Cuba.
- A pesar de los estudios realizados con las Colas de los procesos de producción de Níquel en Moa y Nicaro, aún no se cuenta con los elementos técnicos y económicamente factibles para confirmar su uso en la industria siderúrgica cubana.

## CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se muestran las materias primas a utilizar, los métodos analíticos y experimentales, así como las técnicas empleadas para el procesamiento de las informaciones y los resultados obtenidos.

### 2.1 Materias primas utilizadas

Para el desarrollo de pruebas experimentales, relacionadas con la fusión reductora se utilizaron las siguientes materias primas:

#### 2.1.1 Colas del proceso CARON en Moa

Fueron seleccionadas y tomadas muestras de colas depositas en la nueva presa de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa, como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 4.** Proceso de selección y toma de muestras experimentales de las colas

**Fuente:** Autoría propia.

### 2.1.2 Reductor

Fue utilizado como reductor, carbón bituminoso, adquiridos por cortesía del Centro de Investigación y Desarrollo del Níquel (CEDINIQ), cuya composición química se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 6.** Composición química promedio (%) del carbón bituminoso empleado en las pruebas experimentales.

Características	Norma	Unidad de medida	Valores	
			Natural	Seco
Humedad Total	ISO 589	%	10.1	-
Cenizas	ISO 1171	%	10.6	11.8
Material volátil	ISO 562	%	29.5	32.8
Carbón Fijo	ASTM D 3172	%	49.8	55.4
Azufre	ISO 19579	%	0.49	0.55
Hidrógeno	Seyler	%	4.12	4.58
Valor calórico grueso	ISO 1928	Kj/Kg	26 750	29 088
		Kcal/Kg	6 246	6 948
Valor calórico neto	ISO 1928	Kj/Kg	25 069	28 145
		Kcal/Kg	5 988	6 722

**Fuente:** (CEDINIQ, 2022)

Este reductor se caracteriza por una granulometría uniforme, con el 100 % de su tamaño menor de 6 mm, lo cual favoreció el proceso de fusión. En la figura siguiente se muestra una imagen del mismo.



**Figura 5.** Carbón bituminoso empleado en las pruebas experimentales.

**Fuente:** Cortesía del CEDINIQ.

Importante resaltar que el carbón fijo de este material (55 % promedio), es menor que el del carbón antracita (88 %), empleado en pruebas anteriores, por lo que es imprescindible aumentar la cantidad de este reductor para lograr el proceso de reducción deseado.

### **2.1.3 Fundente**

Fueron utilizadas muestras de caliza como fundente durante los procesos de fusión reductora, con un contenido de  $\text{CaCO}_3$  de 98,57 %. En la figura siguiente se aprecia el tipo de caliza utilizada en las pruebas experimentales.



**Figura 6.** Caliza utilizada como fundente en las pruebas experimentales.

## **2.2 Preparación de las muestras de investigación**

Las muestras fueron tomadas en distintas áreas de la nueva presa de colas de la Empresa “Ernesto Che Guevara de Moa. Las colas de Empresa “René Ramos Latour de Nicaro” ya existían en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), perteneciente a la Universidad Central Martha Abreu. de las Villas (UCLV), y habían sido utilizadas con anterioridad para trabajos de investigación relacionadas con el desarrollo de electrodos de soldadura, por tanto, no fue necesaria su extracción y solo con ellas fue realizado el proceso de mezcla con las colas de la ECG.

Estos pasivos ambientales, son de color negro intenso, y está localizada al este de la ECG; caracterizada por la presencia de grasa y de una textura pastosa, difícil de extraer. En la figura siguiente se muestra el esquema de trabajo que se utilizó, para la toma y preparación de muestras, a partir de las cuales se seleccionaron las sometidas a los procesos de experimentales, consistentes en una fusión reductora.



**Figura 7.** Presa de colas nuevas de la ECG de Moa.

**Fuente:** (Pons Herrera & Rosales Martín, 2022).

### **2.3 Técnicas experimentales empleadas**

Las pruebas experimentales realizadas, consistieron en el desarrollo de ensayos de fusión-reductora, empleando el equipamiento que se describe a continuación.

#### **2.2.1 Equipamiento utilizado en las pruebas experimentales**

Principales equipos disponibles durante la investigación, fueron utilizados en el orden en el mismo orden en que se describen a continuación:

**Mezcladora:** Utilizada para la conformación de las mezclar de las materias primas utilizadas en las pruebas experimentales. Una imagen de este equipo, empleado durante la investigación se muestra a continuación.



**Figura 8.** Mezcladora empleada para la conformación de las mezclas experimentales.

### **Balanza Técnica**

Las diferentes materias primas y productos obtenidos fueron pesados como parte de los trabajos experimentales, con vistas al desarrollo de los balances de carga a utilizar, así como la determinación de los parámetros operacionales del proceso de fusión reductora. A continuación, se muestran momentos del proceso de pesaje.



**Figura 9.** Balanza técnica empleada para el pesaje de los materiales y productos obtenidos en las pruebas experimentales.

**Fuente:** (Pons-Herrera & al, 2022).

### **Crisol de Grafito**

Fue empleado un crisol de gráfico, construido a partir de electrodos de diámetro igual 500 mm, preparados en la Empresa de Aceros Inoxidables de las Tunas (Acinox Las Tunas, especialmente, para el desarrollo de estas pruebas. A continuación, imágenes del mismo durante el proceso experimental.



**Figura 10.** Crisol de grafito empleado en las pruebas de fusión reductora.

**Fuente:** Autoría propia.

### **Horno de arco eléctrico de corriente directa a escala de laboratorio**

Con este crisol, acoplado a una máquina de soldar, utilizada como fuente de corriente directa, conformaron el núcleo del equipamiento empleado en el desarrollo de las pruebas de fusión reductora. A continuación, se muestra imágenes de este sistema



**Figura 11.** Sistema horno eléctrico-fuente de corriente directa.

**Fuente:** (Pons-Herrera & al, 2022).

## 2.4 Descripción de los experimentos realizados

Luego de la preparación de las muestras, las pruebas de fusión reductora se desarrollaron en las instalaciones experimentales del CIS, empleando primeramente las colas nuevas de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa, identificadas según se describe a continuación:

**C\_ECG:** Colas del Proceso CARON en Moa

**C\_Nicaro:** Colas de la René Ramos Latour de Nicaro

**C\_ECG\_Nicaro:** Mezcla de colas de la Empresa Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour de Nicaro.

El objetivo de las pruebas, fue evaluar el comportamiento pirometalúrgico de las colas de ambas empresas, durante el desarrollo de las pruebas pirometalúrgicas, evaluando los indicadores siguientes:

**Rendimiento del hierro:** Recuperación del elemento principal de la carga metalizada obtenida (arrabio), teniendo en cuenta que este producto es el deseado para la obtención de aceros aleados en la Empresa Acinox Las Tunas.

**Relación Fe/Elementos Aleantes:** Relación entre la cantidad de Fe en el Metal con respecto a la cantidad de Ni+Cr+Si+Mn en el metal.

**Basicidad de la escoria:** Relación  $\text{CaO/SiO}_2$ .

**Grado de acidez de la escoria:** Relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ .

**Impurezas indeseables:** Sumatoria del contenido de Azufre y Fósforo en el Metal.

### **Conformación de la mezcla metalúrgica**

Para la realización de los experimentos se conformó una mezcla metalúrgica, para determinar la cantidad de mineral, reductor y fundente a utilizar. La mezcla se elaboró a partir del cálculo de carga, realizado a través del software Microsoft Excel 2010, para luego preparar las muestras en un mezclador de tambor.

## **2.5 Desarrollo de las pruebas experimentales**

El proceso de obtención del metal se desarrolló a través el sistema horno eléctrico-transformador de energía eléctrica, que en conjunto hacen la función de un horno de arco eléctrico de corriente directa (C.D), como se muestra en la figura siguiente.

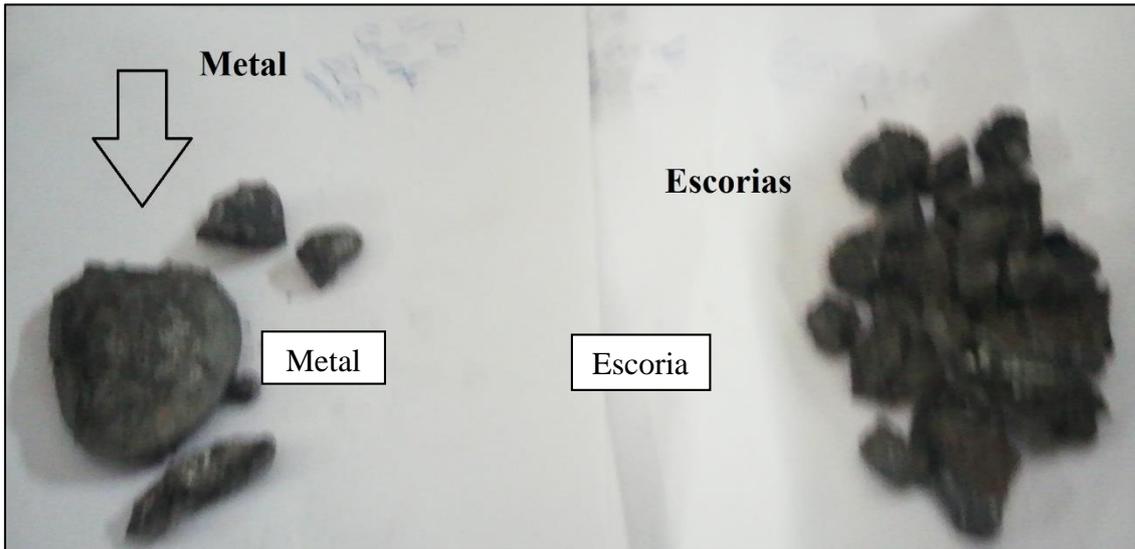


**Figura 12.** Obtención del metal a través de la fusión reductora.

**Fuente:** Arianna Suárez Leyva

A diferencia de las pruebas realizadas con las colas de la Moa Nickel, las colas de la ECG, precisan de menor cantidad de reductor, teniendo en cuenta que estas ya han pasado por un proceso de reducción, como parte del proceso tecnológico CARON. Este elemento fue tomado en cuenta para la determinación de la cantidad de carbón bituminoso a utilizar. Una vez terminado el proceso de fusión-reductora, la mezcla se enfrió y luego se

extrajeron las muestras de metal y de escoria, para los respectivos análisis químicos. En la figura que sigue se observan los productos obtenidos.



**Figura 13.** Principales productos de las pruebas experimentales, metal y escoria.

**Elaborado por:** Arianna Suárez Leyva

## **2.6 Caracterización de los productos de las pruebas experimentales**

Los productos de las pruebas experimentales, fueron preparados y luego sometidos a análisis químico.

Para el análisis químico las muestras de metal fueron analizadas en el laboratorio de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNI), empleando un espectrómetro de masa modelo GS 1000 – II, como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 14.** Espectrómetro de masa utilizado para la caracterización química del metal obtenido en las pruebas experimentales.

**Elaborado por:** Arianna Suárez Leyva.

Las principales características de este equipo se describen a continuación.

**Identificación del equipo:**

1. Espectrómetro OBLEF
2. Modelo: GS 1000 – II
3. Uso: Realizar análisis de emisión óptica
4. Fabricante
5. N° de serie: 2017
6. N° de inventario:1164
7. Principales características: Presión de trabajo, 3 bares
8. Ubicación actual: Laboratorio de fundición
9. Instrucciones del fabricante: Ver manual de explotación del equipo

**Materiales y equipos a utilizar:**

Cepillo para la limpieza del electrodo

Lija de grano 60

Alcohol 60

Argón

Principio de funcionamiento del Espectrómetro

Equipo de Emisión Óptica (Espectrómetro OBLEF).

Por otra parte, las muestras de escorias, fueron analizadas en CEDINIQ, empleando un espectrómetro de absorción atómica, cuyo equipo se muestra en la figura siguiente.



**Figura 15.** Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.

**Fuente:** Adaptado de (Navarro Breffe, 2017).

## **2.7 Conclusiones del Capítulo II**

1. Las mezclas metalúrgicas preparadas a base del PAMMs Colas del proceso CARON, reductor (carbón bituminoso) y fundente (caliza), permitieron desarrollar las pruebas de banco pirometalúrgicas, y evaluar el comportamiento térmico de este pasivo, con vistas a la toma de decisiones, sobre sus posibles usos siderúrgicos.
2. Las técnicas analíticas empleadas garantizaron la caracterización físico-química, de las materias primas y de los productos obtenidos, durante el desarrollo de las pruebas experimentales.

## CAPÍTULO III. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 3.1 Características químicas de las colas de los procesos CARON

Las muestras de colas del proceso CARON, tanto de Moa como de Nicaro, no fueron analizadas químicamente, en esta investigación y fueron tomadas en cuenta los trabajos desarrollados por otros investigadores, debido a dificultades con los contratos con las entidades de servicios. De esta forma para el desarrollo de los cálculos de carga se selecciono la composición química promedio que se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 7.** Composición química promedio de las colas del proceso CARON de Nicaro y Moa.

Compuestos químicos	Colas	
	ECG-CN	RRL_Nicaró
Fe <sub>r</sub>	44.20	43.34
FeO	18.50	19.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.10	40.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.30	4.06
MgO	13.80	12.54
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.00	3.63
S	0.20	0.18
NiO	0.57	0.58
SiO <sub>2</sub>	20.50	19.52
MnO	2.20	2.01
CoO	0.10	0.08

**Fuente:** (Breff, Arturo Rojas Purón y Alberto Turro, 2003); (Ferreiro Guerrero, Sánchez Cruz, & Santiesteban Domínguez, 2012).

**Leyenda:**

**ECG-CN:** Colas Nuevas de la Empresa Che Guevara

**RRL\_Nicaró:** Colas de la Empresa Rene ramos Latour de Nicaro.

Como resultado de estas características químicas se determinaron las masas de oxígeno presente en ambas colas, las cuales se exponen en la tabla siguiente.

**Tabla 8.** Cantidad de oxígeno presente en las colas del proceso CARON de Nicaro y Moa.

Compuestos	Oxígeno en el óxido	
	ECG-CN	RRL-Nicaró
FeO	4.12	0.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.56	20.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.21	5.10
MgO	5.48	0.15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.26	0.77
NiO	0.12	0.31
SiO <sub>2</sub>	7.23	1.50
MnO	0.50	0.35
CoO	0.02	0.004
FeO	19.58	21.90

Los resultados del proceso de fusión reductora se muestran de manera resumida en la tabla siguiente.

**Tabla 9.** Resultados del proceso de fusión reductora aplicado a las colas de las empresas ECG y RRI de Moa y Nicaro, respectivamente.

Número de muestra	Denominación	Parámetros electricos del horno			Tiempo de fusión (min.)	Carga al horno			Peso obtenido		
		Voltage (V)	Corriente (A)	Potencia (Kw)		Colas (Kg)	Carbón Bituminoso) (Kg)	Caliza (Kg)	Metal (Kg)	Recuperación metálica (%)	Rendimiento metálico (%)
1	ECG-CN	30	400-450	13.5	20	0.500	0.114	0.048	0.150	67.87	30
2	RRL-Nicaró	30	400-450	13.5	15	0.500	0.114	0.048	0.146	66.06	29.2
3	ECG+Nicaró	30	400-450	13.5	17	0.500	0.114	0.048	0.142	62.36	28.4
	<b>Promedio</b>	<b>30.0</b>	<b>400-450</b>	<b>13.5</b>	<b>17.33</b>	<b>0.500</b>	<b>0.114</b>	<b>0.048</b>	<b>0.15</b>	<b>65.43</b>	<b>29.2</b>

**Nota:** La muestra número 3 es una mezcla de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara y la René Ramos Latour en proporciones de 50 % de cada uno, es decir 1:1. Par la fusión reductora se empleó la misma carga que en las colas ECG-CN, ya que son similares en composición química y el mismo proceso (CARON).

Como se aprecia en la tabla anterior, la recuperación metálica promedio es de 65 %, mientras que el rendimiento metálico es de 29.4 % como promedio, lo que indica, la pérdida de mas del 30 % del material inicial se convierte en escoria y polvo. Elementos a tener en cuenta para la continuación de esta investigación.

### 3.2 Resultados de la fusión reductora de las colas de ECG

Utilizando solamente las colas negras de la ECG de Moa se desarrollaron 2 coladas, empleando una mezcla de esta materia prima, más fundente y reductor, durante un tiempo promedio de 17.5 minutos, obteniéndose un semiproducto metalizado en el orden del 91 al 92 % de hierro, como se observa en la tabla siguiente.

**Tabla 10.** Composición química (%) del metal obtenido como resultado de la fusión reductora de colas negras de la Empresa Che Guevara de Moa.

Muestras	C	Mn	Si	Ni	Cr	Co	Ti	V	P	S	Otros	Fe
ECG_1	5.71	0.08	0.11	0.92	1.43	0.19	0.002	0.017	0.02	0.34	0.0445	91.1
ECG_2	4.75	0.08	0.10	0.92	1.82	0.19	0.001	0.03	0.03	0.34	0.0361	91.7

**Fuente:** (CEDINIQ, 2022).

Como se aprecia en esta tabla, los contenidos de hierro, cromo, silicio, níquel y manganeso aportarían importancia capital, al uso de este PAMMs como carga metalizada para la producción de aceros aleados, teniendo en cuenta que en Acinox Las Tunas existen las condiciones necesarias para producir este tipo de aleación, demandada en toda Cuba y con posibilidades de convertirse en un rubro exportable.

Por su parte, la composición química de las escorias obtenidas en estas pruebas se muestra en la tabla siguiente, determinada a través de la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica. En ellas se observa la pérdida de hierro, entre 26-28 %, necesario recuperar para incrementar el rendimiento metálico de este proceso metalúrgico.

**Tabla 11.** Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas como resultado de la fusión de las colas de la Empresa Che Guevara de Moa.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	FeO	MnO	Ni	Co	Cr
ECG_1	25.52	8.10	10.48	28.51	1.39	0.296	0.032	1.59
ECG_2	25.22	9.16	11.55	26.25	1.64	0.28	0.030	2.21

**Fuente:** (CEDINIQ, 2022).

### 3.3 Fusión reductora de la mezcla de las colas de las Empresas ECG de Moa y RRL de Nicaro

Por primera vez se realizó una colada mezclando las colas negras de la ECG (50 %) y de la Empresa René Ramos Latour de Nicaro (50 %), más fundente y reductor. Los resultados de esta prueba experimental se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 12.** Composición química (%) del metal obtenido como resultado de la fusión reductora de colas negras de la ECG de Moa y RRL de Nicaro.

Muestra	C	Mn	Si	Ni	Cr	Co	Ti	V	P	S	Otros	Fe
ECG												
+	0.38	0.03	0.02	2.03	0.64	0.29	0.001	0.004	0.02	0.26	0.041	96.3
Nicaró												

Estos resultados demuestran la posibilidad de obtener un semiproducto metalizado a partir de las colas generadas por las plantas productoras de Níquel y Cobalto de Moa y Nicaro. La diferencia más significativa está en el % Fe del producto final, motivado por el % C obtenido en el arrabio final.

La composición química de las escorias obtenidas como resultado de la fusión reductora, de la mezcla de colas de la Empresa Che Guevara y René Ramos Latour de Nicaro, se caracteriza por la presencia de FeO en el orden del 39 %, necesario recuperar para su reutilización en el proceso de fusión. Los resultados de muestran a continuación.

**Tabla 13.** Composición química (%) de las escorias obtenidas como resultado de la fusión reductora de la mezcla de las colas de la Empresa Che Guevara de Moa y Rene Ramos Latour de Nicaro.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	FeO	MnO	Ni	Co	Cr
E-2	16.45	6.45	10.97	38.75	1.04	0.340	0.036	2.48

Fuente: (CEDINIQ, 2022).

### 3.4 Consideraciones finales

Los resultados de las pruebas experimentales de fusión reductora realizadas, empleando las colas residuales de las plantas productoras de Níquel y Cobalto en Nicaro y Moa, permitieron comprobar la posibilidad de obtener un producto metálico, que posibilita sustituir parcial o totalmente, la carga al horno de arco eléctrico para la producción de aceros en la Empresa ACINOX Las Tunas a partir del empleo de estos pasivos ambientales acumulados durante más de 70 años en esta región del país.

A partir de los resultados preliminares obtenidos, consideramos necesario tomar en cuenta los siguientes criterios técnicos:

#### **Desde el punto de vista metalúrgico:**

1. Evaluar las diferentes tecnologías existentes, para la obtención de un producto metalizado que pueda sustituir de modo parcial o total la carga a los hornos de arco eléctrico, y proponer entre ellas la más factible, desde el punto de vista técnico-económico, para el procesamiento de nuestras materias primas.
2. Evaluar diferentes tipos de fundentes, reductores y mezclas de colas, para la obtención de un producto metalizado factible, desde el punto de vista técnico y económico, para la producción de aceros en Cuba,
3. Determinar las proporciones óptimas de cada uno de los componentes de mezcla metalúrgica a utilizar para la obtención de un producto metalizado de calidad para la obtención de aceros en Cuba,
4. Definir las operaciones unitarias necesarias para la obtención de un producto metalizado de calidad,
5. Demostrar la factibilidad técnica y económica del uso de las colas de Nicaro y Moa para la obtención de un producto metalizado que pueda sustituir la carga metálica a los hornos de arco eléctrico de modo parcial o total.

**Económicamente:** es necesario desarrollar el estudio de prefactibilidad para determinar la mejor opción de implementación de una planta procesadora metalúrgicamente de las colas de la producción de níquel, con dos variantes posibles: En la región de Moa, fuente de las materias primas, o en Las Tunas, principal consumidos de los productos

metalizados a producir. Este estudio constituye una futura línea de trabajo de esta investigación.

Desde el **punto de vista social**, la educación ambiental de los trabajadores de las Empresas del Níquel en Moa, es fundamental, con vistas a instruirlos de las reales posibilidades de aplicar la economía circular a partir del reciclaje y tratamiento adecuado de residuales generados por la tecnología CARON, que actualmente provocan daños al medio ambiente y a la cultura empresarial de las entidades que forman parte del grupo empresarial CUBANIQUEL.

Finalmente, la tecnología CARON utilizada durante el tratamiento de los minerales lateríticos de la región de Moa y Nicaro, definen las características químicas de esta materia prima, con contenidos significativos de hierro, níquel, silicio, manganeso y cromo, lo cual facilita la toma de decisiones sobre su futuro uso industrial.

### **3.2 Conclusiones del capítulo III**

1. Desde el punto de vista metalúrgico, los resultados de esta investigación, aunque son preliminares, demostraron que las colas de la producción de níquel en Moa y Nicaro, (procesos CARON), contienen importantes elementos químicos, necesarios para la futura producción de aceros aleados en Cuba.
2. La fusión reductora de la mezcla metalúrgica formada por, colas de los procesos CARON en Moa y Nicaro, demostró la posibilidad de obtener un producto metalizado base hierro, con características similares a los obtenidos con las colas viejas y nuevas de la Moa Nickel S.A, confirmándose la hipótesis de que técnicamente es factible este resultado.
3. Desde el punto de vista ambiental, es un gran resultado la posibilidad de aplicar la economía circular al reaprovechamiento de los residuales sólidos de la producción de níquel en Cuba.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. El uso de la fusión reductora para el tratamiento metalúrgico de las colas del proceso CARON, confirmo la posibilidad de obtener un producto metalizado base hierro, capaz de ser utilizados como carga para la producción de aceros aleados en las Empresas siderúrgicas cubanas.
2. El producto metálico obtenido se considera un arrabio con 91 % de Fe metálico, enriquecido con importantes elementos aleantes, como Cr, Ni, Si y Mn que lo convierten en un atractivo semiproducto para la futura producción de aceros aleados en Cuba.
3. Se obtuvieron valores de recuperación metálica promedio de 65 %, y rendimiento metálico de 29.4 % como promedio, indicadores que deben ser refinados con el desarrollo de nuevas mezclas metalúrgicas, tomando en cuenta los resultados de estos ensayos.
4. Las escorias obtenidas se caracterizan por poseer un contenido de óxido de hierro (FeO) que oscila entre 26 y 28 %, lo que debe ser objeto de próximas investigaciones con el objetivo de reducir estas pérdidas y recuperar la mayor cantidad posible para su reutilización industrial.

## **RECOMENDACIONES**

1. Desarrollar el estudio de prefactibilidad para determinar la mejor opción de implementación de una planta procesadora metalúrgicamente de las colas de la producción de níquel.
2. Evaluar el comportamiento de la escoria y polvo resultante de las nuevas pruebas experimentales que se desarrollen, durante la continuación de esta investigación.
3. A partir de estas pruebas desarrollar nuevos experimentos, definir los intervalos de variación de las variables dependientes e independientes, que permitan concretar los parámetros y condiciones de operación de una futura planta procesadora de las colas de la producción de Níquel en Cuba.
4. Ampliar el escalado experimental y elaborar aceros aleados empleando los arrabios obtenidos, como resultado del tratamiento de las colas de Moa y Nicaro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrián, R. (4 de agosto de 2022). *¿Qué es el Acero?* Obtenido de *¿Qué es el Acero?:* <https://conceptodefinicion.de/acero/>.
- autores, M. P. (2008). Lixiviación de las colas del proceso CARON como lixivante orgánico: ácido acético. *Tecnología Química*, 28.
- Breff, A. R. (2003). Composición Mineralógica del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología*, 22.
- Breff, A. R. (2003). Mineralogía. *Minería y Geología*, 25.
- Breff, Y. N. (2017). *Introducción*. Moa: UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez .
- Breff, Y. N. (2017). *Introducción*. Moa: UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez .
- Castro, G. (2009). Que es el acero. *Historia y evolución del acero. Proceso de producción*, 49-56.
- CEDINIQ. (2022). *Características Químicas de Carbón Bituminoso*. Moa: Centro de Investigaciones y Desarrollo del Níquel.
- CEDINIQ. (2022). *SCT-Acinox -Tunas-1-07-2022*. Moa: Centro de Investigación y Desarrollo del Níquel.
- Ferreiro Guerrero, Y., Sánchez Cruz, A., & Santiesteban Domínguez, E. (2012). Obtención de Arrabio con Níquel a partir de las Colas del Proceso CARON en Nicaro. *Minería y Geología*, 66 y 67.
- Flores, J. L. (1996). *Aceros aleados*. Nuevo Leon: UNINERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.
- García, N. C. (2018). *Introducción*. Moa: UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez.
- La Llave del Acero. (2015). *La Llave del Acero*. Santiago de Chile: ILAFA.
- Navarro Breffe, Y. (2017). *Evaluaciones de las principales características físicas - químicas del pasivo ambiental "colas rojas" para su posible uso industrial*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
- Pérez, María Ramírez. (2010). *Utilización de los escombros lateríticos de la zona A, yacimiento Moa Occidental en el proceso de descarburoización del acero ACI HR40*. Moa: UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez.

- Pons Herrera, J., & Rosales Martín, G. (2022). *Selección y Toma de Muestras Experimentales en la Presa de Colas Nuevas de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons-Herrera, J., & al, e. (2022). *Obtención de Carga Metalizada Base Hierro a partir de las Colas de la Producción de Níquel en Moa y Nicaro*. Moa: Universidad de Moa.
- Rodríguez, C. (2017). *Caracterización de los residuos*. Moa: UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez.
- Tirado Hernández, R. (2018). *Introucción*. Moa: Universidad de Moa, Dr. Antonio Núñez Jiménez.
- Tirado, R. H. (2018). *Tratamiento de los pasivos ambientales*. Moa: UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez.
- Turro Breffe, A., & Izquierdo Pupo, R. (2008). Introducción. *Minería y Geología*, 3-11.
- Turro Breffe, A., & Izquierdo Pupo, R. (2008). Introducción. *Minería y Geología*, 3.