



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento Metalurgia y Química

Estudio pirometalúrgico del Pasivo Ambiental “Colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, de Moa.

**Tesis presentada en opción al título del Ingeniero en Metalurgia y
Materiales**

Autor: Reinier Hernández Tirado

Moa
2018





Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento Metalurgia y Química

Estudio pirometalúrgico del Pasivo Ambiental “Colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, de Moa.

**Tesis presentada en opción al título del Ingeniero en Metalurgia y
Materiales**

Autor: Reinier Hernández Tirado

Firma:

Tutores: Dr. C. María Caridad Ramírez Pérez. Profesora Auxiliar Firma:

Dr. C. José Alberto Pons Herrera. Profesor Titular Firma:

Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Profesor Titular Firma:

Moa

2018

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo Reinier Hernández Tirado autor del Trabajo de Diploma, Estudio pirometalúrgico del Pasivo Ambiental “Colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, de Moa, declaro la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. “Antonio Núñez Jiménez” para que disponga del uso cuando considere necesario.

Autor: Reinier Hernández Tirado

Firma:

Tutores: Dr. C. María Caridad Ramírez Pérez. Profesora Auxiliar Firma:

Dr. C. José Alberto Pons Herrera. Profesor Titular

Firma:

Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Profesor Titular

Firma:

PENSAMIENTO

“Queda prohibido no sonreír a los problemas, no luchar por lo que quieres, abandonarlo todo por miedo, no convertir en realidad tus sueños”.

Pablo Neruda

DEDICATORIA

- ❖ *Este trabajo va dedicado primeramente a mi mamá y mi papá que son mis seres más queridos y que fueron mi motor impulsor para alcanzar esta meta, los cuales dedicaron todos estos años a mi cuidado y formación como profesional.*
- ❖ *Quiero dedicar también este trabajo a Ceni y Agustín por siempre darme su apoyo y su afecto incondicional en todos estos años.*
- ❖ *A mi novia Laura que en estos 5 años me ha dado su amor y su apoyo en todo momento para que yo pudiera alcanzar mi meta y cumplir este sueño.*
- ❖ *A mi familia por darme su apoyo incondicional y en especial a mis tías, mi hermano y mis primos.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer este gran logro de mi vida a todas aquellas personas que me han ayudado en todos los momentos de mi carrera y de la vida, pero especialmente:

- ❖ A mi mamá y mi papá, por su cariño, dedicación y tolerancia, por siempre guiarme por los buenos caminos, por hacer todo lo posible e imposible por lograr lo que hoy soy, por ser mi inspiración y siempre estar a mi lado, por ser mi ejemplo de esfuerzo de alcanzar cualquier meta que me proponga.*
- ❖ A mis abuelos por haber logrado conocerlos y hacerme sentir un nieto agradecido y queridos por ellos.*
- ❖ A mi novia, Laura por su amor incondicional, por estar a mi lado en los momentos malos y buenos, por su tolerancia, por saber cómo apoyarme en fin POR ESTAR SIEMPRE.*
- ❖ A Ceni y Agustín por su ayuda incondicional durante toda mi carrera.*
- ❖ A mis tutores María, Pons y Lorenzo, por no abandonarme en ningún momento de mi tesis, por hacerme ver que todo problema tiene solución y por abrirme las puertas de su conocimiento.*
- ❖ A mis suegros Madelin y Gustavito por su ayuda incondicional y su apoyo en todo momento.*
- ❖ A mis amistades y compañeros de estudio, por siempre estar ahí, por escucharme y regalarme un poco de su tiempo, que nunca dijeron no, principalmente a los del cuarto 125 y 126.*
- ❖ A todos los que de una forma u otra me apoyaron a la realización de esta tesis, a los que creyeron en mí.*

RESUMEN

Las “Colas Viejas” generadas por la industria del Níquel en Moa constituyen un Pasivo Ambiental Minero-Metalúrgico (PAMMs), sin ningún tipo de utilidad en la actualidad, que representan uno de los principales problemas ambientales en la región, sin embargo existe un insuficiente conocimientos de sus características física, químicas, mineralógicas y térmicas, que limitan la toma de decisiones sobre sus posible usos industriales. En este trabajo se analizan las principales características de estos residuales y se evalúa su comportamiento térmico, a través de estudios termogravimétricos y pruebas pirometalúrgicas de fusión-reducción, empleando dos tipos de reductores, aluminio y carbón bituminoso. Se utilizan modernas técnicas analíticas para su caracterización, en los laboratorios del CEDINIQ y el CIPIMM, así como se obtiene un arrabio con alto contenido de hierro, cromo, níquel, cobalto y vanadio, principalmente, a través de pruebas pirometalúrgicas a escala de banco, desarrolladas en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), de la Universidad Central de las Villas. El trabajo está estructurado en tres capítulos, que muestran el marco teórico, los materiales y métodos empleados, así como el análisis y discusión de los resultados, que permiten decidir sobre las posibles investigaciones que se desarrollarán para mejorar el producto obtenido y tener finalmente un material de calidad, para la industria siderúrgica cubana.

Palabras Claves: Arrabio, colas, fusión reductora, hierro, pasivos ambientales.

ABSTRACT

The " Old Tails " generated by the nickel industry in Moa constitute an Environmental Mining-Metallurgical Passive (PAMMs), without any kind of utility at present, which represent one of the main environmental problems in the region, however there is an insufficient knowledge of its physical, chemical, mineralogical and thermal characteristics, which limit the decision making about its possible industrial uses. In this work the main characteristics of these residuals are analyzed and their thermal behavior is evaluated, through thermogravimetric studies and pyrometallurgical fusion-reduction tests, using two types of reducers, aluminum and bituminous coal. Modern analytical techniques are used for their characterization, in the laboratories of CEDINIQ and CIPIMM, just like you get a pig iron with a high content of iron, chromium, nickel, cobalt and vanadium is obtained, mainly, through pyrometallurgical tests at bank scale, developed at the Welding Research Center (CIS) of the Central University of Las Villas. The work is structured in three chapters, which show the theoretical framework, the materials and methods used, as well as the analysis and discussion of the results, which allow to decide on the possible investigations that will be developed to improve the product obtained and finally have a material of quality, for the Cuban steel industry.

Key words: Environmental passives, tail, pig iron, reductive fusion, iron.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>PENSAMIENTO</i>	iii
<i>DEDICATORIA</i>	iv
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Aportes de la Investigación	4
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	5
1.1 Introducción	5
1.2 Características generales de los PAMMs.....	5
1.2.1 Conceptualización de los PAMMs	5
1.3 Tratamiento de los pasivos ambientales	7
1.4 Antecedentes del uso de los PAMMs	9
1.5 Características de los Procesos de Reducción	12
1.5.1 Proceso de Reducción Aluminotérmica	12
1.5.2 Aluminotermia del Hierro	13
1.5.3 Características del Aluminio, empleado como reductor.....	14
1.6 Reducción carbotérmica	14
1.6.1 Procesos con reductor en fase gaseosa	15
1.7 Leyes que regulan los pasivos ambientales en la actividad minera en el mundo y en Cuba.	16
1.8 Conclusiones del Capítulo I.....	18

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1 Materias primas utilizadas	19
2.2 Selección y Preparación de las muestras de investigación	19
2.3 Técnicas analíticas empleadas	21
2.3.1 Análisis Químicos	21
2.3.2 Análisis Granulométrico	22
2.3.3 Análisis Térmico	22
2.4 Técnicas experimentales empleadas	24
2.4.1 Equipamiento utilizado en las pruebas experimentales.....	24
2.4.2 Descripción de los experimentos realizados	25
2.4.3 Desarrollo de las pruebas experimentales	26
2.4.4 Caracterización de los productos de las pruebas experimentales.....	27
2.5 Procesamiento y desarrollo de la investigación	28
2.6 Conclusiones del Capítulo II.....	29
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	30
3.1 Resultados de la caracterización química de los materiales empleados	30
3.2 Características físicas del PAMMs “Colas Viejas”	32
3.3 Resultados de las características térmicas del PAMMs “Colas Viejas”	35
3.4 Resultados de las pruebas experimentales	37
3.4.1 Resultados de la obtención del metal, en las pruebas pirometalúrgicas utilizando aluminio como reductor	37
3.4.2 Resultados de las escorias obtenidas, utilizando aluminio como reductor. 41	
3.4.3 Resultados del material no fundido, utilizando aluminio como reductor.	43
3.4.4 Resultados de la obtención de metal, en las pruebas pirometalúrgicas utilizando carbón como reductor.....	45
3.4.5 Resultados de las escorias obtenidas, utilizando carbon como reductor. .	48
3.4.6 Resultados del material no fundido, utilizando carbon como reductor	50

3.4.7	Consideraciones sobre los efectos ambientales, sociales e industriales del uso del PAMMs, “Colas Viejas”	52
3.5	Conclusiones del Capítulo III	53
	CONCLUSIONES GENERALES	54
	RECOMENDACIONES	56
	Referencias Bibliográficas.....	57
	ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del equipo empleado para los análisis térmicos.	23
Tabla 2. Materiales de carga empleados en las pruebas experimentales.....	26
Tabla 3. Composición química promedio (%), de las colas viejas de la Empresa PSA. 30	
Tabla 4. Composición química promedio (%), del aluminio utilizado como reductor en las pruebas experimentales.	31
Tabla 5. Características, del carbón utilizado como reductor en las pruebas experimentales.	31
Tabla 6. Composición granulométrica promedio (%), de las colas viejas de la PSA. ...	32
Tabla 7. Composición química (%) por fracciones granulométricas de las colas viejas de la PSA.....	34
Tabla 8. Principales fases semicuantitativas de las colas viejas de la PSA.....	36
Tabla 9. Pesos de los materiales experimentales, para la reducción aluminotérmica. ...	37
Tabla 10. Masas de los materiales empleados en la reducción carbotérmica.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imágenes de la presa de colas viejas PSA, parte Oeste (a), parte sur (b).....	20
Figura 2. Esquema de trabajo empleado para la conformación de la muestra de investigación.....	21
Figura 3. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.	22
Figura 4. Equipo de análisis térmico, de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3.....	23
Figura 5. Equipamiento empleado en las pruebas de fusión-reductora.....	25
Figura 6. Equipamiento empleado en las pruebas de fusión-reductora.....	25
Figura 7. Pasos para la obtención de las termitas	27
Figura 8. Principales productos de las pruebas experimentales, metal y escoria.	27
Figura 9. Espectrómetro de masa empleado para la caracterización química del metal obtenido en las pruebas experimentales.	28
Figura 10. Termograma del PAMMs colas viejas de la Empresa PSA.....	35
Figura 11. Comportamiento del hierro, en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	38
Figura 12. Comportamiento del cromo en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	39
Figura 13. Comportamiento del níquel y cobalto en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	39
Figura 14. Comportamiento del manganeso y carbono en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	40
Figura 15. Comportamiento del Silicio en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	40
Figura 16. Comportamiento del fósforo y el azufre en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	41
Figura 17. Comportamiento del hierro en la escoria obtenida, durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	42

Figura 18. Comportamiento del óxido de níquel y óxido de cobalto en la escoria obtenida, durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.	42
Figura 19. Comportamiento del óxido de manganeso y óxido de cromo (III) en la escoria, durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.....	43
Figura 20. Comportamiento del hierro en el material no fundido, utilizando aluminio como reductor.	44
Figura 21. Comportamiento del cromo, silicio y níquel en el material no fundido, utilizando aluminio como reductor.....	44
Figura 22. Comportamiento del hierro en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.	46
Figura 23. Comportamiento del cromo en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.	46
Figura 24. Comportamiento del carbono, silicio y manganeso en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.	47
Figura 25. Comportamiento del fósforo y el azufre en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.....	48
Figura 26. Comportamiento del hierro en la escoria durante la colada experimental, utilizando carbón como reductor.	49
Figura 27. Comportamiento del óxido de manganeso, dióxido de silicio y óxido de cromo (III) en la escoria, utilizando carbón como reductor.	49
Figura 28. Comportamiento del hierro en el material no fundido, utilizando carbón como reductor.....	50
Figura 29. Comportamiento del dióxido de silicio y óxido de cromo (III) en el material no fundido, utilizando carbón como reductor.....	51
Figura 30. Comportamiento del óxido de níquel y óxido de cobalto en el material no fundido, utilizando carbón como reductor.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo1. Composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de las Colas Viejas de la PSA.....	60
Anexo 2. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.....	61
Anexo 3. Composición química promedio (%) de los productos no fundidos obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.	62
Anexo 4. Composición química promedio (%) de los productos no fundidos obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.	63
Anexo 5. Desarrollo del proceso de fusión reductora.	64
Anexo 6. Proceso de carga de los materiales al horno eléctrico en el CIS.	65

INTRODUCCIÓN

La explotación de los yacimientos minerales, se realiza con el fin de poner a disposición de la humanidad las materias primas necesarias para el desarrollo económico de cualquier país. La explotación de yacimientos mineros en Iberoamérica, es una actividad que data de hace varios siglos, siendo milenaria en la Península Ibérica. En su origen se utilizaban métodos rudimentarios para extraer los minerales desde ricas vetas de oro, plata y cobre. Con el desarrollo industrial los procesos se fueron tecnificando hasta llegar a los sofisticados procedimientos que se aplican hoy en día. Como consecuencia de esta actividad minera, y también minero-industrial, en la mayoría de los países quedaron numerosas minas e instalaciones en estado de abandono, sin que se hayan sometido a un proceso adecuado de cierre, lo que ha significado que en la actualidad existan muchos lugares, en los que se presentan escenarios de riesgo para la seguridad y salud de las personas y para el medio ambiente; se hace por tanto necesario, o cuando menos aconsejable, que se tomen medidas para enfrentar esta amenaza para la salud y el medio ambiente, dando pasos para la solución o mitigación del riesgo (Ríos Azahares, 2015).

A lo largo de la historia de la minería en Cuba, la actividad extractiva de yacimientos no metálicos y metálicos, ha sido y es intensa, fundamentalmente, los referidos al níquel y materiales para la construcción. Asociado a estas actividades se generan, como resultado de las explotaciones minero-metalúrgicas, diferentes tipos de residuos industriales, llamado Pasivos Ambientales, que constituyen huellas o daños ocasionados al entorno social, que recalcan la toma de medidas para su rehabilitación.

Esta actividad minera afecta inevitablemente los ecosistemas donde se desarrolla el laboreo, y por ende, al medio ambiente. En este sentido, desde hace más de seis décadas, los científicos han advertido sobre la consecuencia negativa de esta situación, y se han aplicado medidas de protección ambiental a las empresas mineras y productoras para disminuir dichos impactos (Taype, 2018, pág. 9).

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 Carbónato 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 (Navarro Breffe, 2017, pág. 12).

La Empresa Comandante Pedro Sotto Alba (PSA) de Moa, es una de las principales industrias procesadoras de mineral laterítico, 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 perspectivo, (Navarro Breffe, 2017, pág. 13).

Los residuales sólidos generados por las industrias del níquel en Cuba, Moa y Nicaro, no han sido lo suficientemente estudiados, por lo que se desconocen muchas de sus principales características, que permitan definir sus usos industriales; para una mejor identificación de estos materiales, se han denominado como Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos sólidos (PAMMs), (Pons Herrera, 2017, pág. 22).

Esta **Situación Problemática**, se resumen en: la existencia de gran acumulación de residuales sólidos en la presa de colas viejas de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba de Moa, contenedora de importantes elementos metálicos valiosos, pero sin un estudio profundo, que permitan tomar decisiones sobre sus posibles usos industriales.

Por esta razón se define como **problema científico**: el insuficiente estudio pirometalúrgico del pasivo ambiental “colas viejas” de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, Moanickel S.A, limita la toma de decisiones sobre sus posibles usos, principalmente, en la industria siderúrgica cubana.

El **objeto de estudio** está constituido por: la “presa de colas viejas” de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, ubicada en el municipio de Moa.

Objetivo general: Determinar el comportamiento térmico del Pasivo Ambiental “Colas Viejas”, a través de pruebas pirometalúrgicas y del conocimiento de sus características físicas, químicas, que permitan la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos.

Hipótesis: A partir de las características físicas, químicas y térmicas, del Pasivo Ambiental “colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba de Moa, se desarrollarán pruebas experimentales pirometalúrgicas, que contribuirán a la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos.

Campo de acción: Estudio pirometalúrgico del Pasivo Ambiental “presa de colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, del municipio Moa.

Definimos como **objetivos específicos** los siguientes:

- Caracterizar térmicamente el PAMMs “colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba de Moa,
- Analizar integralmente las características físicas, químicas, y térmicas del PAMMs “colas viejas”.
- Desarrollar pruebas pirometalúrgicas, a escala de banco, y evaluar sus resultados en conjunto con las características físicas, químicas, y térmicas conocidas.

Para darle cumplimiento a estos objetivos definimos como **tareas de investigación**, las siguientes:

- Revisar bibliográficamente los trabajos realizados con las colas viejas de la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba, en Moa.
- Seleccionar y prepara las muestras de investigación.
- Analizar los resultados de la caracterización realizada con anterioridad, al PAMMs “Colas Viejas” de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, y completar

las informaciones técnicas necesarias, que permitan la toma de decisiones sobre los posibles usos de los PAMMs, generados por las industrias del níquel en Moa.

Aportes de la Investigación

Ambiental: Teniendo en cuenta que actualmente, los PAMMs constituyen un problema para el medio ambiente en Cuba, principalmente en Moa, con más de 50 años acumulados en diferentes áreas del municipio, que nunca han sido utilizados con anterioridad, por tanto, el aporte ambiental de este trabajo, está relacionado con el incremento del conocimiento sobre las características térmicas, química, física y mineralógica, del pasivo Ambiental “Colas Viejas”, de la Empresa Pedro Sotto Alba, que acompañada de pruebas experimentales pirometalúrgicas, permiten tomar decisiones sobre sus posible usos en la industria siderúrgica cubana, contribuyendo de esta forma a reducir los contaminantes que existen actualmente en esta región del país.

Social: Lograr el aprovechamiento de este PAMMs, para el posible uso en la industria siderúrgica, sera un logro, para Moa y nuestro país, ya que generará una gran cantidad de empleo en este municipio y por ende mejorar sus índices económicos.

Industrial: A pesar de que los resultados obtenidos en esta investigación son preliminares, el tratamiento y el posible uso de estos PAMMs, le posibilitará a la industria cubana, la utilización de una materia prima, siderúrgica, con altos contenidos de hierro y otros metales valiosos, que aportarán propiedades significativas, de gran demanda para las empresas metalúrgicas en Cuba.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

En el presente capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre los principales aspectos teóricos, que se tienen en cuenta para el desarrollo de la investigación, relacionadas con la caracterización y uso de los Pasivos Ambientales Mineros Metalúrgicos sólidos (PAMMs), que generan las empresas metalúrgicas en Cuba y el mundo, con el objetivo de disponer de los elementos básicos y de las necesidades actuales, que resultan esenciales para la realización de este trabajo.

1.2 Características generales de los PAMMs

A continuación, se detallan las principales características de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos (PAMMs), tanto en Cuba como en el resto del mundo.

1.2.1 Conceptualización de los PAMMs

Uno de los problemas principales de la temática de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), es que no existe una definición única de estos, entre los diferentes países que se dedican a este estudio.

El informe preliminar Inventarios de Pasivos Ambientales Mineros del Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Minería, (2006), define como Pasivo Ambiental Minero, a 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.

La Asociación de Servicio de Geología y Minerías Iberoamericanas, (2010), define los pasivos ambientales mineros como instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinarias o parques de mineral que estando en la actualidad en entornos de minas abandonadas o paralizadas, constituyen un riesgo potencial

permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente.

En Chile, según el proyecto de Ley de la Remediación de pasivos Ambientales Mineros los definen como, aquellas faenas mineras abandonadas o paralizadas, incluyendo, sus residuos, que constituyen un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente, (Oblasser & Chaparro Avila, 2008, pág. 13).

También en el Perú, Oblasser & Chaparro. A, (2008) consideran a los PAM, como todas aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras actualmente abandonadas o inactivas, que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

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. En esta definición se incluye además la contaminación generada por una emergencia, lo cual es recogido por Ríos Azahares en su trabajo investigativo (2015, pág. 16).

Ríos Azahares, (2015), plantea además que en Bolivia, de acuerdo a 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.

En Cuba, no existe como tal una definición específica para los pasivos ambientales mineros metalúrgicos, aunque ya existen varios criterios sobre su denominación, ya que las leyes existentes no la definen claramente, en este sentido Ganesh Persaud, (2014) afirma que, son grandes acumulaciones de residuos y rechazos sólidos con valor económico y social, como consecuencia del desarrollo de las actividades mineras y/o

metalúrgicas, que representan un riesgo e impacto para el medio ambiente y la calidad de vida de las personas, (pág.8).

Los Pasivos Ambientales Mineros Metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por las industrias del níquel, aunque no han sido llamados de esta forma de manera oficial, sí se conocen algunas de sus principales características físicas - químicas, pero son insuficientes para poder definir sus posibles usos, como resultado de las investigaciones realizadas en los últimos años (Navarro Breffe, 2017, pág. 33).

Analizando las definiciones de diferentes países de América Latina, incluyendo Cuba, sobre los PAM, podemos concluir que, ciertamente estas acumulaciones de residuos son un problema que afecta a la sociedad y a la economía en la actualidad, por tanto, en esta investigación clasificamos a las “colas viejas” de la Empresa Comandante Pedro Sotelo Alba, como un Pasivo Ambiental Minero Metalúrgico sólido (PAMMs).

1.3 Tratamiento de los pasivos ambientales

Penedo Medina y otros, (2008), 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.

Por su parte, Del Pino Batista (2016), desarrolló su investigación 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 3° ; $4,5^{\circ}$ y 6° , 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, (2012, pág. 65), 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/cm², 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.

1.4 Antecedentes del uso de los PAMMs

Los Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos sólidos (PAMMs), a pesar de los intentos por ser utilizados en la industria metalúrgica cubana, a través de varias investigaciones científicas, aún no se ha logrado la obtención de un producto técnica y económicamente factible para emplear de manera industrial en Cuba, además en Nicaro se obtuvieron lupias de arrabio, a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro, (Ferreiro Guerrero, 2014); arrabio con Níquel (NPI), a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí, (Ortiz Bárcenas, 2015, pág. 44) y descarburantes a partir de los escombros de Moa Occidental en Moa, (Ramírez Pérez, 2010, pág. 23). Estos trabajos constituyen los principales antecedentes del uso por vía pirometalúrgica de los pasivos ambientales, generados por la industria del níquel en Cuba, los cuales se detallan a continuación.

En el informe de Ferreiro Guerrero, (2014), encontramos que 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 e 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 %, lo que coincide con los reportes realizados por Bethlehem (1923), por Bethlehem archive (1966) y por Ferreiro (d) (2012), citado por (Ferreiro Guerrero, 2014, pág. 80).

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, según lo reportado por Ferreiro y otros, (2012) , por lo que el mayor uso que se le podría dar a este material, sería para la obtención del “Acero Mayarí” o NPI, así como para la elaboración de aceros inoxidable, para el que se podría emplear más del 80 % como material de carga (Ferreiro Guerrero, Obtención de Lupias de Arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las Colas de Nicaro, 2014). A pesar de estos resultados obtenidos a escala de banco, no se han realizado otras pruebas a una mayor escala, que garanticen el uso de este residual en la industria siderúrgica cubana.

Por otra parte, las investigaciones sobre la 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, es el trabajo más reciente publicado, sobre el posible uso de los PAMMs en la industria siderúrgica cubana.

En este sentido, el informe de Ortiz Bárcenas, (2015), concluye que el arrabio obtenido, como resultado del tratamiento de los escombros laterítico de Mina Martí, puede utilizarse en caliente en un horno para la fundición de acero, en una cantidad que corresponde al 50 % de la carga metálica de la acería de Acinox Las Tunas, lo que significa emplear alrededor de 6000 t de arrabio con níquel al mes, entidad que pudiera economizar 4000,00 MGwatt/mes de electricidad, que significan alrededor de 712 000 USD/mes, (p.94).

Por otra parte, Ganesh Persaud, (2014), desarrolló una metodología para el inventario de los Pasivos Ambientales Mineros- Metalúrgicos, generados por las industrias de níquel en Moa, y estudió específicamente los principales PAMMs, generados por las Empresas Comandante Ernesto Che Guevara, Moa Nickel Pedro Sotto Alba S.A y Ferroníquel Minera S.A., (FEMSA); donde a partir de las principales características físicas – químicas, mineralógicas y térmicas de estos pasivos, se establece una metodología que permite contar en un solo documento, con los tipos de pasivos sólidos existentes en estas empresas, sus características, clasificación e inventario de estos recursos minerales.

Con la realización este trabajo se logró, además, elaborar las fichas técnicas de cada uno de los pasivos ambientales estudiados y se establece una clasificación, en dependencia de su matriz de importancia. (Ganesh Persaud, 2014, pág. 85).

A pesar de que los resultados del tratamiento y uso de los PAMMs han tenido un gran impulso investigativo en los últimos años, aun estos son insuficientes, para demostrar la viabilidad técnica y económica del uso de estos residuales. En este sentido, las Colas de Nicaro (CN) se consideran un verdadero yacimiento artificial de níquel y, sobre todo, de cobalto situado en la parte sureste de la ensenada Arroyo Blanco de la Bahía de Nipe, al oeste y en las cercanías de la antigua planta de Nicaro; depósito que data desde el año 1943 y se estima que asciendan a más de 80 millones de toneladas, la cantidad de estos pasivos, depositados en esta presa de colas, (Ortiz Bárcenas, 2015, pág. 45).

Por su parte Bustamante y Samalea, (2007), trabajaron con estos residuales con vistas a sus usos en la industria química, y consideran que las características granulométricas, con gran cantidad de fino, constituyen un aspecto favorable para su utilización industrial, sin embargo, para el posible uso siderúrgico este aspecto es una desventaja, porque ocasiona problemas de operación a las instalaciones metalúrgicas que emplearán estos materiales en sus procesos productivos.

Hechavarría, (2016, pág. 15) evaluó el mineral de hierro contenido en las colas rojas de la Empresa Che Guevara de Moa, a través de un estudio tecnológico y de mercadotecnia, para su posible comercialización con fines siderúrgicos, que repercute en el desarrollo local y socio- económico del municipio; genera nuevas fuentes de ingresos, empleo y puede llegar a sustituir importaciones al país, plantea además que, estos pasivos se pueden procesar mediante la tecnología de fusión-reducción, aprovechando la disponibilidad de hierro contenidos en estos residuos, que superan los 36,0 millones de toneladas, lo que garantizaría la creación de nuevas fuentes de empleo por más de 18 años, con una estimación de producir alrededor de 640,0 toneladas anuales de palanquillas con una concentración de hierro de 90%.

Estos trabajos demuestran las posibilidades de producir productos siderúrgicos a partir del tratamiento de pasivos ambientales, generados por las industrias del níquel en Cuba, específicamente con la introducción de palanquillas de hierro como resultado de la

diversificación de la minería en el mercado internacional, (Abreu Cutiño, 2015, pág. 56).

Las tecnologías que se utilicen para el tratamiento de los PAMMs, deben ser capaces de considerar las ventajas y desventajas que poseen estos residuales industriales, de forma tal que garanticen la protección del medio ambiente y evitar así, el agotamiento o degradación de los recursos naturales del país. Por tanto, la principal finalidad de las tecnologías que se propongan, debe ser la de transformar el entorno humano (natural y social), para adaptarlo mejor a las necesidades y deseos humanos (Hechavarría Tamayo, 2016, pág. 34).

De forma general, todos los trabajos realizados hasta el momento con las colas de los procesos metalúrgicos de producción de níquel en Nicaro y Moa, constituyeron puntos de partida, para la realización de este trabajo de investigación, al ser tomados en cuenta, los aspectos positivos y negativos de las mismas.

1.5 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.

1.5.1 Proceso de Reducción Aluminotérmica

La aluminotermia fue descubierta en 1893 y patentada en 1895 por el químico alemán, doctor Hans Goldschmidt, cuya reacción es llamada "reacción de Goldschmidt" o "proceso Goldschmidt", el autor estaba inicialmente interesado en producir metales muy puros, evitando el uso de carbón en el proceso de fundición, pero pronto se percató de su utilidad en la soldadura, una de sus primeras aplicaciones comerciales fue al soldar tramos de vías ferroviarias en Essen, en 1899 (Díaz Martínez, 2016, pág. 24).

La aluminotermia es un proceso fisicoquímico, basado en la posibilidad de reducción de óxidos metálicos (hierro, cromo, manganeso, cobre), por metales altamente afines por el oxígeno, como son aluminio, magnesio y titanio, la reacción que da lugar en este proceso es altamente exotérmica, obteniéndose un caldo metálico separado de la escoria

por un proceso de reducción, este lleva en vigor más de 50 años y se aplica hoy, casi exclusivamente a la obtención de aceros y con cobres para uniones soldadas complejas, también en la tecnología de los ferrocarriles para la obtención del carril continuo, prácticamente implantado en todo el mundo (Díaz Martínez, 2016, pág. 28).

Cuando se habla de la termita en M & Goldschmidt, (1993) encontramos que es peligroso, debido a las temperaturas extremadamente altas que produce y al hecho de que es casi imposible sofocar la reacción una vez iniciada, la reacción libera radiación ultravioleta, peligrosa para la vista, por lo que debe evitarse mirar la reacción directamente o debe usarse una protección especial como una máscara de soldador, no debe usarse cerca de materiales inflamables, ya que se pueden liberar pequeñas cantidades de hierro fundido durante la reacción, que pueden viajar distancias considerables y derretir contenedores de metal, incendiando sus contenidos, produce además una gran cantidad de luz y calor, cuyo calor producido es utilizado para acelerar el proceso, el metal es recogido en forma de glóbulos brillantes, ya que la temperatura que se alcanza es suficiente para fundir el metal.

1.5.2 Aluminotermia del Hierro

La reacción fundamental que ocurre en el proceso de reducción de los minerales de hierro, con aluminio es la siguiente:



Es por ello que la reducción con Aluminio a alta temperatura de un óxido metálico (aluminotermia), es uno de los procesos más utilizados para la obtención de metales.

En el informe de Beyer. L & V. Fernandez, (2000) podemos encontrar que a nivel industrial, el mineral usado para la obtención del metal correspondiente (mena), se encuentra en la naturaleza mezclado con constituyentes de rocas (ganga), por tanto, en esta reacción es necesario añadir un fundente que facilite la formación de escorias, para separar la ganga del metal puro, esto ocurre en la obtención de hierro en el alto horno. (p. 85).

1.5.3 Características del Aluminio, empleado como reductor

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre; según Hufnagel (1992) sólo los elementos no metálicos oxígeno y silicio son más abundantes, normalmente se encuentra en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre, por otro lado los silicatos no son menos útiles, pero es extremadamente difícil y muy caro extraer el aluminio de ellos, es por esto que la bauxita, un óxido de aluminio hidratado impuro, es la fuente fundamental para el comercio del aluminio y de sus compuestos. (p. 225)

El alto precio del aluminio en el mercado internacional, hace que el producto sea totalmente reciclable, ya sea en forma de laminados, recipientes y hasta las virutas procedentes de las operaciones de maquinado son reaprovechadas, (Díaz Martínez, 2016). Por este motivo en este trabajo investigativo, se recuperan las virutas de aluminio de la industria cubana de producción de cafeteras en la Empresa EIMPUD de Santa Clara, para el desarrollo de las pruebas pirometalúrgicas, mezcladas con las colas viejas de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa.

Por otro lado, en los últimos años se ha desarrollado vertiginosamente la carpintería de aluminio, encontrándose instalaciones diseminadas por todo el país, lo cual ha motivado un incremento considerable de las importaciones de aluminio; así como en la generación de virutas. La Empresa ALCUBA centra el procesamiento y distribución de los laminados de aluminio en el país y la empresa de recuperación de materias primas se encarga de la recolección de estos residuos, (Perdomo, 2009).

1.6 Reducción carbotérmica

Para el estudio de la reducción con carbón, normalmente se utiliza la expresión general siguiente:



Donde:

X: Metal

La reducción con carbono (reducción directa) se desarrolla en todos los casos, con la ocurrencia de procesos 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 (González González, 2013, pág. 19).

El procesamiento carbotérmico se realiza en horno de arco eléctrico utilizando coque como reductor y permite la obtención de ferroaleaciones de alto contenido de carbono; en diversos trabajos donde se ha utilizado esta tecnología han obtenido como resultado diversas aleaciones como: ferrocromo, ferromanganeso, ferrocromo-manganeso, ferrocromo-vanadio y una ferroaleación compleja, dichas ferroaleaciones han sido empleadas en la formulación de cargas aleantes de consumibles de soldadura (electrodos tubulares y fundentes), destinados al relleno superficial de piezas. Las escorias obtenidas de dicho proceso también han sido utilizadas en la conformación de matrices de fundentes, garantizando el adecuado comportamiento tecnológico y metalúrgico del proceso de soldadura (Perdomo González & Quintana Puchol, 2004, pág. 2)

1.6.1 Procesos con reductor en fase gaseosa

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, así cuando actúa el carbono sólido, la reducción se verifica, 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, dado esto finalmente, ocurre una 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 % (Conejo, 2000). Citado en (Ferreiro Guerrero, 2014, pág. 32).

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 del 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, que 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. Citado en (Ferreiro Guerrero, 2014, pág. 33).

1.7 Leyes que regulan los pasivos ambientales en la actividad minera en el mundo y en Cuba.

LEY N° 28271. En Perú.

Artículo 1.- Objetivo

La presente Ley tiene por objeto regular la identificación de los pasivos ambientales de la actividad minera, la responsabilidad y el financiamiento para la remediación de las áreas afectadas por éstos, destinados a su reducción y/o eliminación, con la finalidad de mitigar sus impactos negativos a la salud de la población, al ecosistema circundante y la propiedad (Peace García & Rengifo Ruiz, 2004).

Artículo 4.- Identificación de los responsables de los Pasivos Ambientales

El Ministerio de Energía y Minas a través de su órgano técnico competente, identificará a los responsables de las operaciones mineras que abandonaron depósitos de residuos, labores o instalaciones mineras, generando pasivos ambientales en sus diversas modalidades. También identificará a los titulares de la concesión minera inactivos que mantienen el derecho de concesión y vigencia minera hasta la actualidad y arrastran pasivos ambientales (Peace García & Rengifo Ruiz, 2004).

Artículo 5.- Atribución de responsabilidades

Los titulares mineros responsables de pasivos ambientales que no desarrollen operaciones mineras y mantienen el derecho a la titularidad de concesión a través de la vigencia minera, deberán presentar el Plan de Cierre, salvo que éstos soliciten se cancele sus derechos a la concesión minera, (Peace García & Rengifo Ruiz, 2004).

Artículo 10.- Reutilización de los pasivos ambientales mineros.

Los pasivos ambientales podrán ser reutilizados por el titular de la concesión minera, en los que se encuentren ubicados, siempre que se implementen medidas de manejo ambiental y aquellas destinadas a su mitigación, remediación y cierre, conforme al estudio ambiental correspondiente, según lo establezca el Reglamento (Peace García & Rengifo Ruiz, 2004).

1.8 Conclusiones del Capítulo I

- ❖ Existe densidad de contenidos sobre la conceptualización de los PAMMs, que de manera general constituyen residuos, sin una utilidad definida, que afectan al medio ambiente.
- ❖ 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.
- ❖ Existe insuficiente conocimiento del comportamiento térmico de las colas viejas de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, que permitan tomar decisiones sobre su posible uso en la industria siderúrgica nacional.
- ❖ Aunque se conocen las principales características físicas, químicas y mineralógicas de los PAMMs “Colas Viejas” de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, generadas por dicha industria, no se cuenta con una metodología para el tratamiento y uso de estos recursos minerales.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se muestran las materias primas utilizadas, los métodos analíticos y experimentales, así como las técnicas empleadas para el procesamiento de las informaciones y los resultados obtenidos; que dan continuidad al Proyecto 1501, relacionado con la rehabilitación de los Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos, generados por la industria del Níquel en Moa, principal financista de esta investigación.

2.1 Materias primas utilizadas

Para el proceso de obtención de termitas o mezclas metalúrgicas, fueron usadas las siguientes materias primas:

- PAMMs “Colas Viejas” de la Empresa comandante PSA, las cuales fueron caracterizadas, física, química y mineralógica, en trabajos anteriores, (Navarro Breffe, 2017) y retomadas para la realización de las pruebas pirometalúrgicas, como parte de esta investigación.
- Reductores:
 - ✓ Virutas de Aluminio procedente de la producción de cafeteras en la Empresa EIMPUD de Santa Clara,
 - ✓ Carbón bituminoso, de las Minas de Carbón de Venezuela (Corpozulia).

2.2 Selección y Preparación de las muestras de investigación

Las muestras estudiadas fueron tomadas de distintas áreas de la presa “Colas Viejas” de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” por Navarro Breffe, (2017), el mineral extraído fue trasladado hasta la planta de beneficio de minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) hacia la nave de Beneficio del mismo, donde fueron secadas y luego sometidas a análisis granulométricos y químicos por fracciones.

Este pasivo ambiental, es de color rojo, y está localizada al oeste del Reparto Rolo Monterrey, al este por el Preuniversitario Níco López, al sur se localiza la Empresa Pedro Sotto Alba (PSA), y al norte del reparto Moa Centro. Esta presa está compuesta por abundantes perdigones de hierro, que surgieron por las transformaciones físicas-químicas que han sufrido con el paso de los años, lo que, al unirse a la presencia de abundante agua y el viento, característico de la zona de Moa, hacen que se formen este

tipo de concreciones rocosas, muchas de ellas de color azul, lo cual está asociado a la presencia de minerales de azufre, como resultado de las operaciones de la tecnología ácida a presión (HPAL), (Navarro Breffe, 2017, pág. 18).

Imágenes de la presa de colas viejas de la Empresa Pedro Sotro Alba de Moa, empleadas en nuestra investigación, se pueden observar en la figura 1.

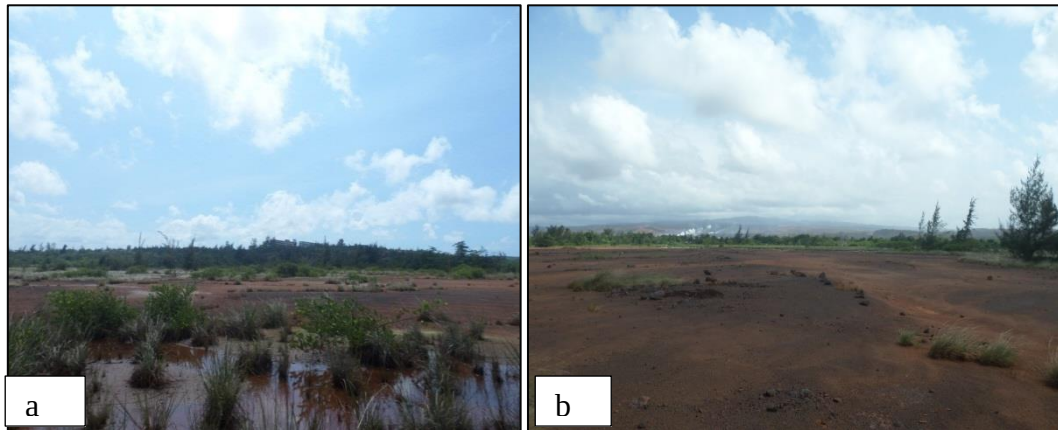


Figura 1. Imágenes de la presa de colas viejas PSA, parte Oeste (a), parte sur (b).

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

En la figura 2, se muestra el esquema de trabajo que se utilizó, para la toma y preparación de las muestras, a partir de las cuales se seleccionaron las que serían sometidas a los procesos de caracterización.

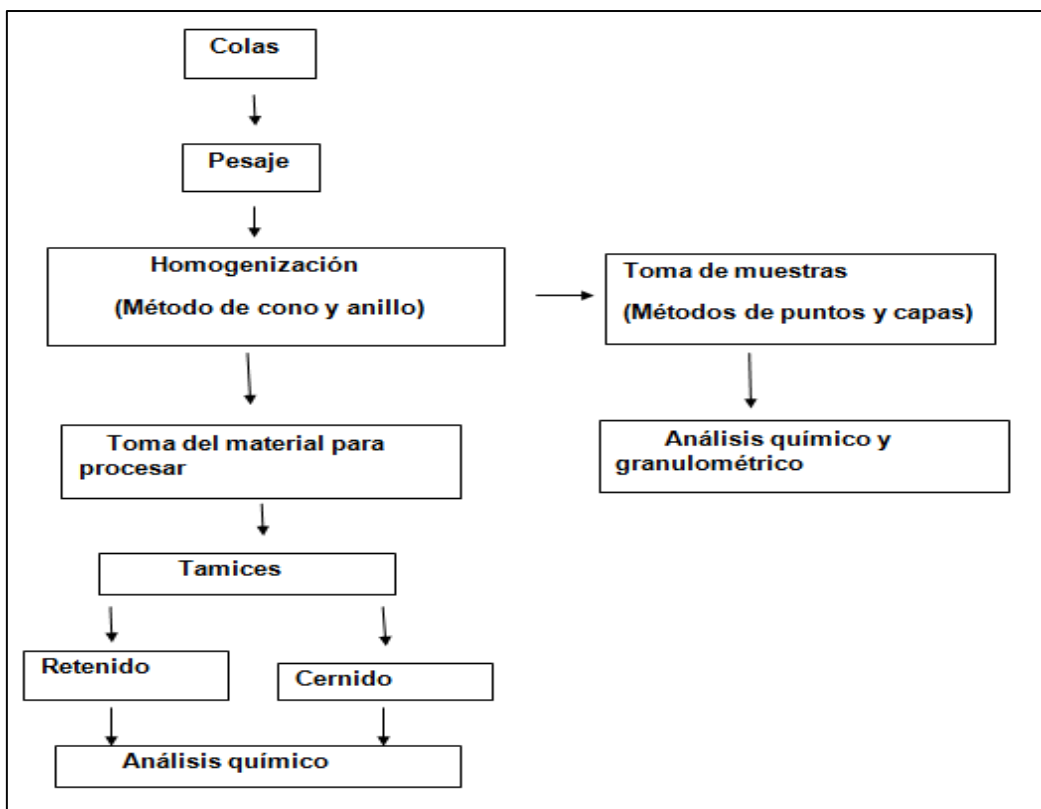


Figura 2. Esquema de trabajo empleado para la conformación de la muestra de investigación.

Fuente: Adaptado de (Navarro Breffe, 2017, pág. 19)

2.3 Técnicas analíticas empleadas

Las principales características de las técnicas analíticas empleadas se describen a continuación.

2.3.1 Análisis Químicos

Los análisis químicos, fueron realizados como parte del trabajo de Navarro Breffe, (2017), que, permitieron determinar los principales elementos químicos presentes en el PAMMs, silicio, aluminio, magnesio, níquel, cobalto, manganeso, cromo y hierro en el mineral, empleando la técnica de espectroscopia por absorción atómica, con una alta confiabilidad, exactitud de los resultados, al emplear una técnica moderna instalada en el Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Industria del Níquel (CEDINIQ), como se muestra en la figura siguiente.



Figura 3. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.

Fuente: Adaptado de (Navarro Breffe, 2017)

2.3.2 Análisis Granulométrico

La determinación de la composición granulométrica del material se realizó por vía seca, a partir de las muestras seleccionadas. Este análisis constituye el elemento básico para la caracterización granulométrica de las colas objeto de estudio, los tamices fueron seleccionados según la serie de Taylor $\sqrt{2}$, (10; 8; 6; 4; 1,4; 0,4; 0,2; 0,147; 0,074; 0,040) mm. La masa mínima empleada para la realización del análisis granulométrico, fue determinada por la siguiente expresión, (Navarro Breffe, 2017, pág. 32).

$$Q_{\min} = 0,02 \cdot d^2 + 0,5 \cdot d \quad \text{kg} \quad (3)$$

Donde:

$Q_{\min}$: Masa mínima ;kg

d: Tamaño de partícula; mm

2.3.3 Análisis Térmico

Los análisis térmicos fueron realizados en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), en la Habana, empleando el equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3, como se muestra en la figura siguiente.



Figura 4. Equipo de análisis térmico, de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Estos análisis se realizaron a través del método de Termogravimetría (TG) y la Derivada de la Termogravimetría (DTG), con el objetivo de realizar y determinar el comportamiento térmico, y las pérdidas de masa de las colas viejas de la empresa PSA, hasta la temperatura de 1000 °C. Los principales parámetros de operación, de este equipo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Parámetros del equipo empleado para los análisis térmicos.

Régimen de calentamiento	Dinámico
Masa de muestras	Se especifica en el termograma
Masa del material de referencia	60.20 mg (Al_2O_3)
Tipo de crisoles	Al_2O_3 (tamaño estándar)
Material del horno	SiC (T.amb. – 1500 °C)
Gas utilizado en la cámara de calentamiento	Ar
Flujo del gas protector de la termobalanza	20.0 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10.0 °C /min
Sensibilidad de la termobalanza	0.001 mg – 35.0 g
Sensibilidad de las curvas	-0.001 - 5000 $\mu\text{V}/\text{mg}$
Tiempo total de medición	1h:37 min
Rango de temperatura de trabajo	27-1000 °C

Los datos de las curvas Termogravimétricas (TG) y su derivada (DTG) se convirtieron en termogramas continuos con el empleo del programa “Proteus” para el procesamiento de datos de Análisis Térmico, en su versión 5.2.1/07.04.2001, el cual suministra el fabricante del equipo, compatible a su vez con Windows para Office, obteniéndose además por esta misma vía los termogramas de las velocidades de cambio de masa (dm/dt), que experimentan las colas analizadas, durante el calentamiento continuo.

2.4 Técnicas experimentales empleadas

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

2.4.1 Equipamiento utilizado en las pruebas experimentales

Los principales equipos utilizados fueron los siguientes:

- Mortero Manual, utilizado para triturar los materiales
- Mezcladora tipo tambor, utilizado para realizar la mezcla de las colas con los reductores
- Tamizadora, (STSJ – 3 Standard Sieve Shaker), utilizada para tamizar las materias primas
- Balanza técnica, (BS 124S, Sartorius), para pesar las muestras
- Estufa, utilizado para precalentar la mezcla
- Crisol de Grafito, se usó para realizar las pruebas pirometalúrgicas
- Imán permanente, para analizar el magnetismo del producto no fundido

Imágenes del equipamiento empleado en el desarrollo de las pruebas de fusión reductora, se muestra a continuación en las figuras 5 y 6.



Figura 5. Equipamiento empleado en las pruebas de fusión-reductora Mezcladora tipo tambor (a), tamizadora (b) y Balanza Técnica (c)

Fuente: Adaptado de (Díaz Martínez, 2016)



Figura 6. Equipamiento empleado en las pruebas de fusión-reductora Mortero manual (d), Estufa (e), Crisol de grafito (f), Imán permanente (g).

Fuente: Adaptado de (Díaz Martínez, 2016)

2.4.2 Descripción de los experimentos realizados

Luego de la preparación de las muestras, estas fueron trasladadas hasta el Centro de Investigación de Soldadura (CIS), ubicado en la Universidad Central Marta Abreu, de la provincia Villa Clara, para la realización de la parte experimental, con el fin de evaluar el comportamiento térmico de las Colas Viejas de la PSA, durante el desarrollo de pruebas pirometalúrgicas.

Para realizar dichos experimentos se elaboró el cálculo de carga empleado, para determinar la cantidad de mineral y de reductor a utilizar; estos cálculos fueron realizados a través del software Microsoft Excel 2010. Luego se trituraron las muestras de mineral y de reductor, en un mortero manual y se tamizo hasta 2 mm, utilizando una tamizadora. Los materiales empleados en los ensayos experimentales se muestran en la siguiente tabla

Tabla 2. Materiales de carga empleados en las pruebas experimentales

Materiales de Carga		Unidad de medida	Contenido
Colas Viejas	Aluminotermia	g	200
	Carbotermia	g	400
Reductor	Virutas de Aluminio	g	48
	Carbón Bituminoso	g	74

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

En total se realizaron 5 coladas o experimentos, para lo cual se pesaron 200 g de mineral y 48 g de reductor, utilizando una balanza técnica, luego de tener estas cantidades se mezclaron en una mezcladora. Posteriormente se calentaron las muestras en una estufa hasta los 270 °C, y se procedió entonces, a realizar la reducción, primeramente, la aluminotérmica y luego la carbotérmica. Como resultado de los experimentos realizados, se obtuvieron tres muestras: metal fundido, escoria y un material no fundido que no logró reaccionar. Los productos obtenidos fueron pesados y comparados con el peso inicial. Posteriormente fueron analizados a análisis químicos

2.4.3 Desarrollo de las pruebas experimentales

El proceso de obtención de las termitas se desarrolló en una instalación, basada en un crisol de grafito, y un transformador eléctrico, que en conjunto hacen la función de un horno de arco eléctrico, como se muestra a en las figuras 7 y 8.

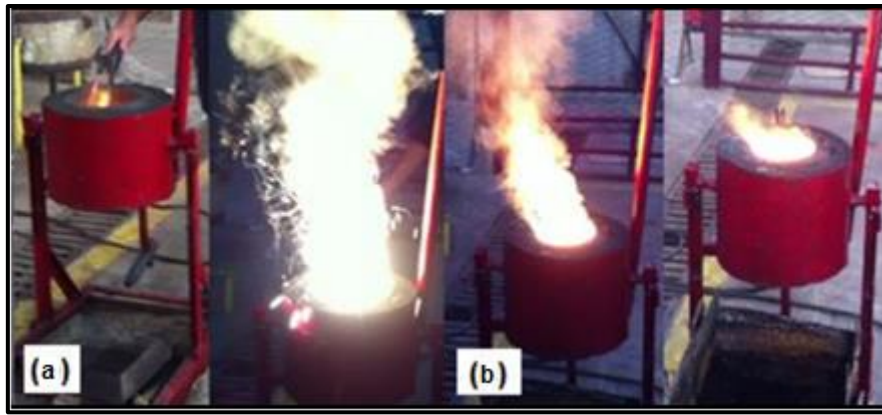


Figura 7. Pasos para la obtención de las termitas

Ignición de la reacción por arco eléctrico (a), Proceso de fusión-reductora (b).

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Una vez concluido el proceso de fusión-reductora, la mezcla se enfrió y luego se extrajeron las muestras de metal, escoria y producto no fundido, los cuales se pueden observar en la figura siguiente.



Figura 8. Principales productos de las pruebas experimentales, metal y escoria.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

2.4.4 Caracterización de los productos de las pruebas experimentales

Los productos de las pruebas experimentales, fueron preparados y luego sometidos a análisis químicos. 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 9; mientras que las escorias y

el producto no fundido, fueron analizados en el CEDINIQ, a través de la técnica de Espectroscopia de absorción atómica.



Figura 9. Espectrómetro de masa empleado para la caracterización química del metal obtenido en las pruebas experimentales.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

2.5 Procesamiento y desarrollo de la investigación

El procesamiento de las informaciones generados durante el desarrollo de esta investigación, se realizó empleando la paquetería de la Microsoft, 2013, mientras que los análisis y experimentos realizados, fueron financiados por el Proyecto 1501, Rehabilitación de Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por la industria del Níquel en Cuba.

2.6 Conclusiones del Capítulo II

- ❖ Las mezclas metalúrgicas preparadas a base del PAMMs Colas Viejas, y reductor (aluminio o carbón), 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.
- ❖ Las técnicas analíticas empleadas garantizaron la caracterización físico-química, mineralógica y térmica, de los materiales iniciales y de los productos obtenidos, durante el desarrollo de las pruebas experimentales

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados de la caracterización física, química, y térmica de las “Colas Viejas” de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A., a partir de trabajos anteriores, así como el comportamiento térmico de este residual durante el desarrollo de pruebas pirometalúrgicas a escala de banco, con el objetivo de contar con elementos que permitan la toma de decisiones, sobre los posibles usos de este material a escala industrial.

3.1 Resultados de la caracterización química de los materiales empleados

Para el desarrollo de esta investigación, primeramente, se prepararon las muestras y materiales con vistas al desarrollo de pruebas pirometalúrgicas a escala de banco. Para ello fueron empleados el PAMMs “Colas Viejas” de la Empresa Comandante PSA y reductores, aluminio y carbón, con el objetivo de evaluar los productos que se podrían obtener como resultado del desarrollo de una fusión reductora, en hornos de arco eléctrico.

A través de trabajos desarrollados por Navarro Breffe en el año 2017, se logró la caracterización física y química de las colas viejas de la Empresa Comandante PSA, que como resultado se obtuvieron las principales características químicas de este residual, las cuales se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 3. Composición química promedio (%), de las colas viejas de la Empresa PSA.

Composición química	CoO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe Total	NiO	V	Fe ²⁺	S	Fe ³⁺
Muestra inicial	0,076	1,425	2,247	17,353	2,373	40,713	0,256	0,066	0,106	0,505	40,607

Fuente: Adaptado de (Navarro Breffe, 2017).

En la actual investigación se realizaron dos métodos de reducción, la aluminotermia y carbotérmica, por su parte la composición química de los reductores empleados se muestra en las tablas 4 y 5, donde se aprecia que el aluminio tiene un alto contenido con un 92 %, teniendo además valores significativos para los demás elementos. En el caso del carbón se considera que posee un contenido relativamente bajo de carbon fijo (Cf)

con un 30,96 %, es por esta razón que se propone para investigaciones futuras, la evaluación de otros reductores, para elevar los indicadores del proceso de reducción.

Tabla 4. Composición química promedio (%), del aluminio utilizado como reductor en las pruebas experimentales.

Elementos químicos	Contenido
Si	0,3 - 0,6
Fe	0,1 - 0,3
Mn	0,1
Cu	0,1
Mg	0,35 - 0,6
Zn	0,15
Cr	0,05
Ti	0,1
Otros	6,0
Aluminio	92

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Tabla 5. Características, del carbón utilizado como reductor en las pruebas experimentales.

Características	Unidades	Composición química
Humedad	%	1.93
Ceniza	%	9.25
Carbón Fijo	%	30.96
Materia volátil	%	53.03
Aluminio	%	1.62
Azufre	%	0.54
Otros	%	2,67
Poder calórico	Kcal/kg	7 319
Poder calórico	MJ/kg	30,64
Densidad	Kg/m ³	0,9

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

3.2 Características físicas del PAMMs “Colas Viejas”

Las Colas viejas de la PSA, poseen una composición granulométrica variable, con predominio de las clases + 10 mm, con el 51 % y la fracción – 4 + 0,4 mm, que agrupan alrededor del 23 % de las partículas minerales, o sea, que más del 70 % se concentran en este rango granulométrico, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 6. Composición granulométrica promedio (%), de las colas viejas de la PSA.

Clase de tamaño, (mm)	Peso (g)	Salida (%)
>10	414,84	51,01
-10 +8	30,21	3,71
-8+6	57,68	7,09
-6+4	63,88	7,85
-4+1,4	107,97	13,27
-1,4+0,4	83,29	10,24
-0,4+0,2	8,00	0,98
-0,2+0,147	32,69	4,02
-0,147+0,074	8,00	0,98
-0,074+0,044	2,03	0,02
-0,044	4,71	0,58
Total	813,3	129,73

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

Estas características granulométricas de las colas, indican que a pesar de que existe más del 50 % de fracciones mayores de 10 mm, se presentan partículas finas, que pueden afectar el proceso pirometalúrgico, como resultado del arrastre de finos, específicamente, cuando se utilicen hornos de arco eléctricos.

Como resultado del análisis granulométrico de este pasivo, vinculado con la composición química por fracciones, como se muestra en la tabla 7, los mayores contenidos son de hierro (40,713%), aluminio (17,353%), cromo (2,373%) y silicio (2,247%), con gran estabilidad en las diferentes granulometrías que componen a este material. Destacan, además, la presencia significativa de azufre y vanadio, los cuales

están asociados al proceso tecnológico empleado, HPAL, y a la presencia del último en el mineral inicial alimentado.

Estas características físicas y químicas de este PAMMs han sido tomadas en cuenta, para el desarrollo de las pruebas pirometalúrgicas, teniendo en cuenta que se pretende obtener un producto, con posibilidades de ser utilizado en la industria siderúrgica nacional.

Tabla 7. Composición química (%) por fracciones granulométricas de las colas viejas de la PSA

Fracciones Granulométricas	CoO	MnO	MgO	SiO₂	Al₂O₃	Cr₂O₃	Fe_T	NiO	V	Fe²⁺	S. Total	Fe³⁺	PPI
Muestra entera	0,076	1,425	0,394	2,247	17,353	2,373	40,713	0,256	0,066	0,106	0,505	40.607	16,04
>10	0,098	1,667	0,054	2,836	14,163	2,154	43,053	0,298	0,037	0,317	0,5132	43.363	15,63
-10 +8	0,028	0,703	0,365	3,023	11,104	2,473	44,063	0,123	0,078	0,211	0,3154	43.852	15,24
-8+6	0,058	1,409	0,398	1,926	16,349	1,761	39,143	0,165	0,086	0,211	0,2714	38.932	16,08
-6+4	0,077	1,754	0,174	2,006	18,439	1,624	40,843	0,243	0,081	0,106	0,3703	40.737	16,03
-4+1,4	0,067	1,93	0,278	2,555	18,357	1,679	38,783	0,165	0,067	0,106	0,3511	38.677	15,82
-1,4+0,4	0,031	0,755	0,212	3,424	14,978	2,044	40,933	0,132	0,077	0,317	0,3072	40,610	16,63
-0,4+0,2	0,024	0,666	0,195	2,996	11,954	2,318	44,833	0,117	0,058	0,211	0,3511	44.622	13,84
-0,2+0,147	0,019	0,567	0,104	4,28	9,367	2,719	45,893	0,118	0,078	0,106	0,9226	45.787	12,8
-0,147+0,074	0,023	0,574	0,324	4,12	9,261	2,911	45,863	0,109	0,114	0,106	1,1498	45.757	14,23
-0,074+0,044	0,021	0,527	0,672	4,013	8,505	3,13	45,373	0,158	0,099	0,106	0,9143	45.267	15,08
-0,044	0,029	0,478	0,32	3,932	9,84	2,783	45,393	0,136	0,106	0,211	0,6863	45.182	13,39

Fuente: Tomado de (Navarro Breffe, 2017).

3.3 Resultados de las características térmicas del PAMMs “Colas Viejas”

Los resultados de los análisis térmicos, obtenidos a través de la interpretación de las curvas Termogravimétricas (TG) y la derivada de la termogravimetría (DTG), permitieron identificar las pérdidas de masa y las fases asociadas a los cambios térmicos, que experimentan las colas viejas, con el incremento de la temperatura, como se manifiestan en el siguiente termograma.

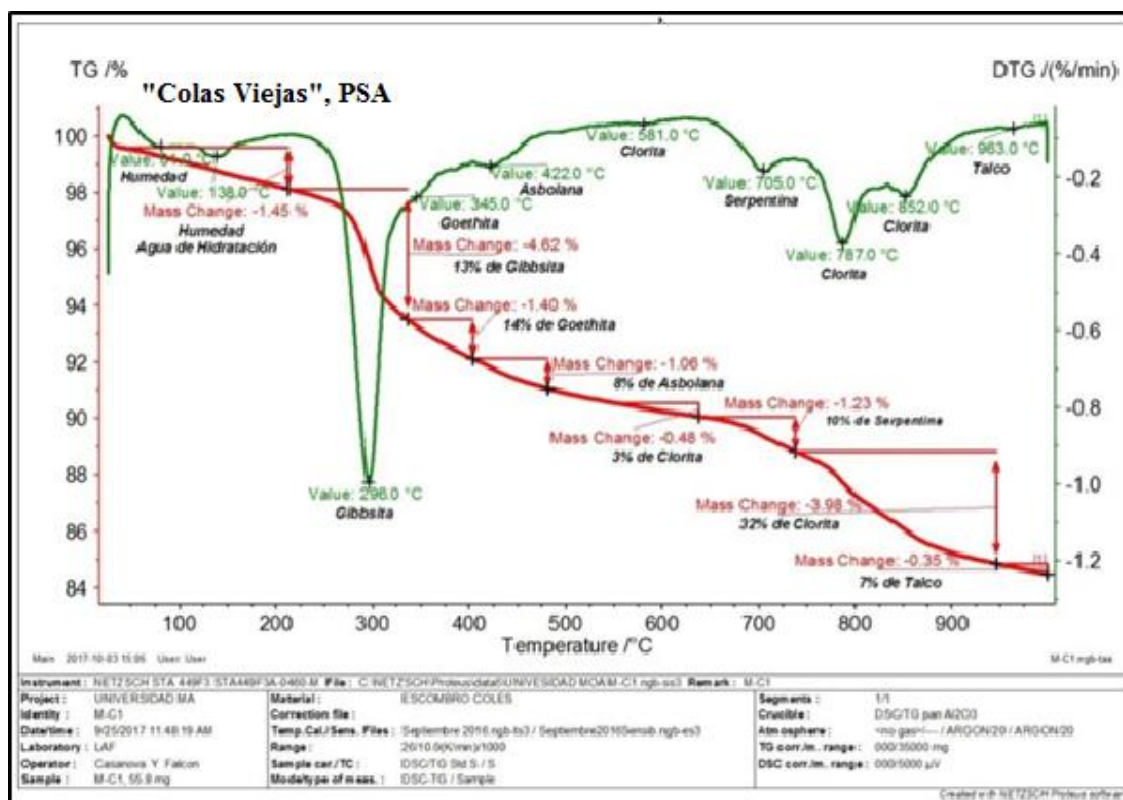


Figura 10. Termograma del PAMMs colas viejas de la Empresa PSA

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

En el termograma se aprecian las principales transformaciones en función de la temperatura, mostrando en la curva de color rojo la pérdida de masa y en la de color verde la variación de la temperatura. El mecanismo de descomposición térmica de las colas viejas de la PSA, se desarrolla en tres etapas o escalones como se puede apreciar en la figura 10, resultado que se resume en los siguientes aspectos:

Un primer escalón en el intervalo de temperatura entre 100 – 200 °C, que posee un pico máximo de 138 °C, que indica la máxima rapidez con que el material pierde masa,

equivalente a 1,45 %, lo cual está asociado a la eliminación del agua de hidratación de este PAMMs,

Luego ocurre una segunda etapa, que comienza aproximadamente a los 250 °C y culmina a 325 °C, con un valor máximo a la temperatura de 296 °C, en la cual ocurre la mayor rapidez de pérdida de masa, que es de 4,62 %, y se debe a la liberación del agua interna o estructural, por la presencia de minerales arcillosos, como la gibbsita y goethita (minerales de hierro).

Por tanto, en estos dos primeros escalones, ocurre la pérdida de la mayor cantidad de masa de este pasivo, 6,07 %, asociado a la eliminación del agua higroscópica e interna que acompaña a estos materiales.

Por último, ocurre la tercera y última etapa, que se desarrolla en el intervalo de temperatura entre 680 - 950 °C, con una pérdida de masa total de 5,56 %, y la ocurrencia de varias velocidades de transformaciones, caracterizado fundamentalmente por la recristalización o reestructuración, principalmente, de minerales de serpentina, donde sobresalen la clorita y el talco, con varios picos máximos relacionados con la rapidez de las pérdidas de masas, asociadas además con la deshidroxilación de las fases mineralógicas, de 705 °C para la lizardita y de 852 °C y 963 °C para el talco.

A manera de resumen, se muestra en la siguiente tabla, los valores semicuantitativos de las principales fases mineralógicas, presentes en este residual, determinado a través de la técnica de DTG-TG.

Tabla 8. Principales fases semicuantitativas de las colas viejas de la PSA.

Muestra	Gibbsita (%)	Goethita (%)	Serpentina Talco (%)	Serpentina Lizardita (%)	Serpentina Clorita (%)	Total de Serpentina (%)
Colas Viejas	13	14	7	10	35	52

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

3.4 Resultados de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales consistieron en el desarrollo de ensayos de fusión-reductora, empleando el pasivo ambiental estudiado y dos tipos de reductores, aluminio y carbón bituminoso, cuyos principales resultados se analizan a continuación. En los (Anexos 5 y 6), se muestran imágenes del desarrollo del proceso de fusión reductora.

3.4.1 Resultados de la obtención del metal, en las pruebas pirometalúrgicas utilizando aluminio como reductor

Los pesos de materiales empleados en las pruebas de reducción aluminotérmica, se muestran en la tabla 8. En ella se observa que la mezcla de pasivo y reductor, en este caso aluminio es uniforme en cada una de las coladas.

Tabla 9. Pesos de los materiales experimentales, para la reducción aluminotérmica.

Productos	colada 1 (%)	colada 2 (%)	colada 3 (%)	colada 4 (%)	colada 5 (%)
Mezcla de Colas + aluminio (g)	248	248	248	248	248
Metal (g)	42 (17)	12 (5)	19 (8)	40,05 (16)	43 (17)
Escoria (g)	102 (41,1)	131 (53)	130 (52)	133 (54)	136 (55)
No fundido (g)	27 (11)	31,05 (13)	36,05 (15)	25 (10)	31,05 (13)
Total (g)	171 (69)	174,05 (71)	185,05 (75)	198,05 (80)	210,05 (85)
Diferencia (g)	77 (31)	73,95 (29)	62,95 (25)	49,95 (20)	37,95 (15)

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

De la tabla anterior se deduce que el aprovechamiento de las colas fue creciendo en la medida que se desarrollaban las coladas, hasta alcanzar el 85 % en la última, lo que permitió a su vez, obtener mayor cantidad de metal en estas. La cantidad de escorias y productos no fundidos, están asociados a los elementos formadores de escoria presentes en las colas, como SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , así como por las insuficiencias en el reductor y las condiciones de trabajo en el horno empleado, aspectos que deben ser tomados en cuenta para los futuros trabajos investigativos.

En la figura 11, se muestra el contenido de hierro obtenido luego de las pruebas químicas realizadas al metal, en el cual se aprecia, que no existen diferencias significativas entre las coladas en cuanto a este elemento, que oscilan entre, 88,3 % y 90,4 %, con un valor máximo de 90,40 %, para la cuarta colada, obteniéndose una aleación con alto contenido de hierro, con un valor promedio de 88,90 %. Este material obtenido es considerado como un arrabio, que de continuarse estudiando puede llegar constituir un posible material de carga para la producción de aceros en Cuba. En el (Anexo 1) se muestra la composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de las Colas Viejas de la PSA.

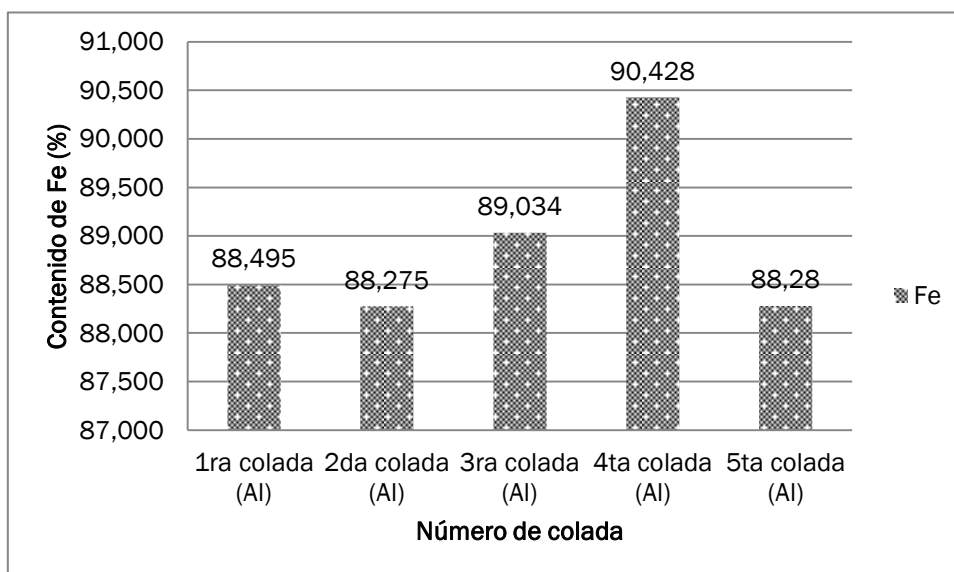


Figura 11. Comportamiento del hierro, en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

En el caso del cromo podemos apreciar en la figura 12, que existe poca variación por cada colada realizada, teniendo un valor promedio de 1,528 %, con un valor máximo de

1,55 % en la cuarta colada. Como es conocido en la siderurgia es importante que exista un porcentaje de cromo en los materiales de carga, esto es favorable para lograr una alta calidad en el producto final; lo mismo ocurre para el níquel y otros metales valiosos que están presentes en este pasivo ambiental.

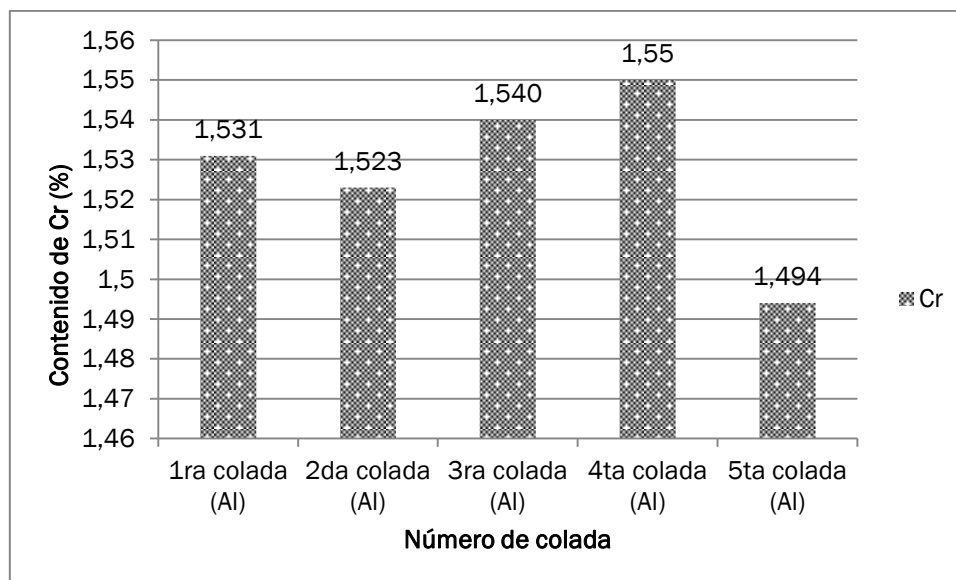


Figura 12. Comportamiento del cromo en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

En la figura 13 se aprecia que el contenido de níquel tiene un valor promedio de 0,226 %, mientras que el cobalto alcanza un valor promedio de 0,010 %, elementos que componen este arrabio y que su importancia en la industria debe ser analizados.

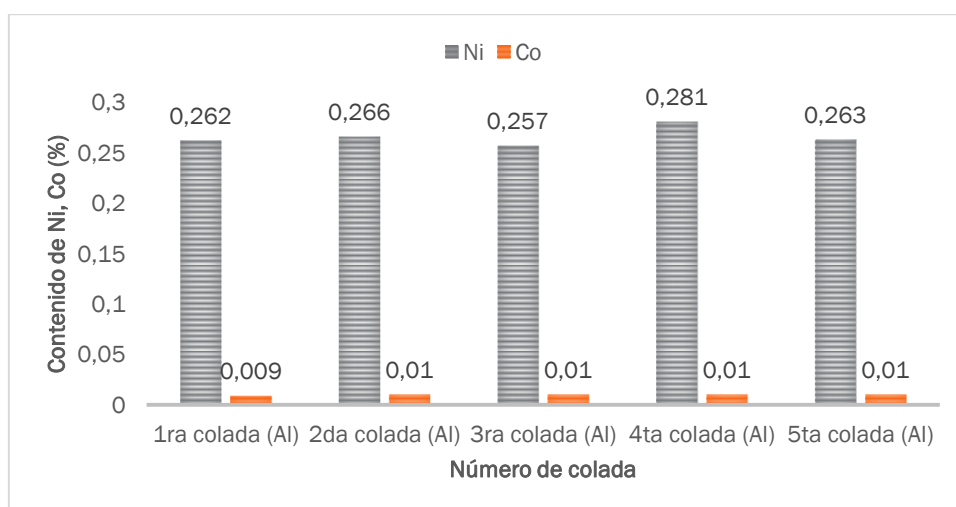


Figura 13. Comportamiento del níquel y cobalto en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

En las figuras 14 y 15 se muestran los contenidos de los elementos manganeso, carbono y silicio, con valores promedios de 0,646 %, 0,250 %, 5,912 %, respectivamente; elementos que constituyen un eslabón importante en la industria de los aceros, ya que le brinda propiedades significativas, como dureza, y resistencia a estas aleaciones.

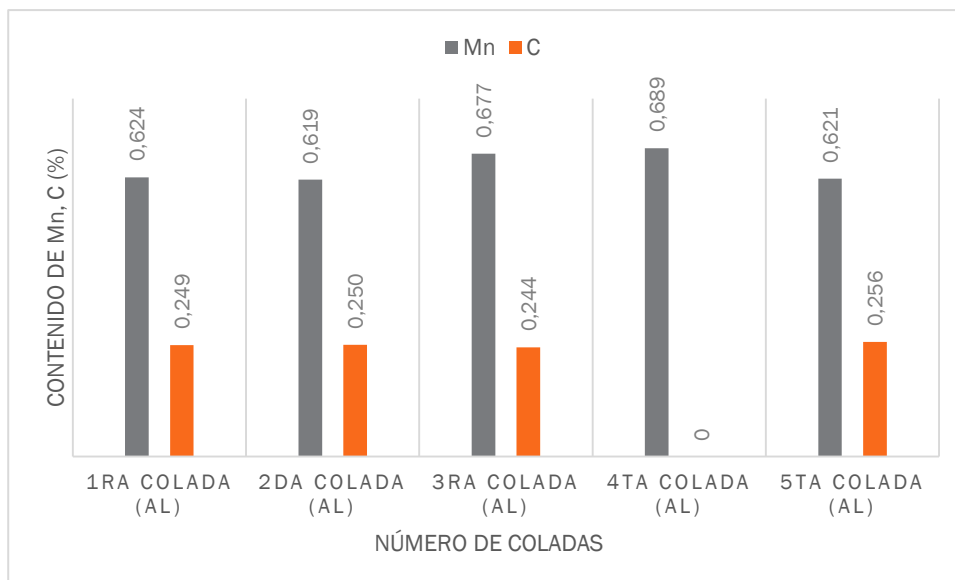


Figura 14. Comportamiento del manganeso y carbono en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

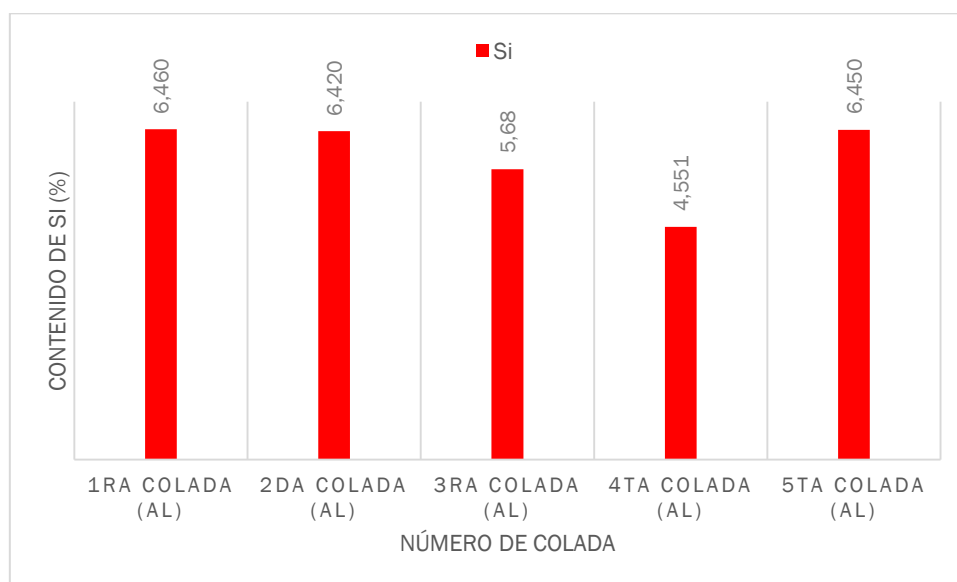


Figura 15. Comportamiento del Silicio en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Las principales impurezas de las aleaciones son el fósforo y el azufre, que provocan fragilidad, es por ello que su comportamiento en el metal, ha sido analizado con detenimiento. En este sentido, en la figura 16 se aprecia el contenido de estos elementos en el arrabio obtenido, donde estas impurezas están por encima del valor máximo exigido, que oscilan entre 0,03 y 0,04 %, por tanto, es importante que para próximos trabajos se tenga en cuenta este elemento, o sea, tratar de reducir el contenido de estos elementos, para poder obtener un producto siderúrgico de mayor calidad.

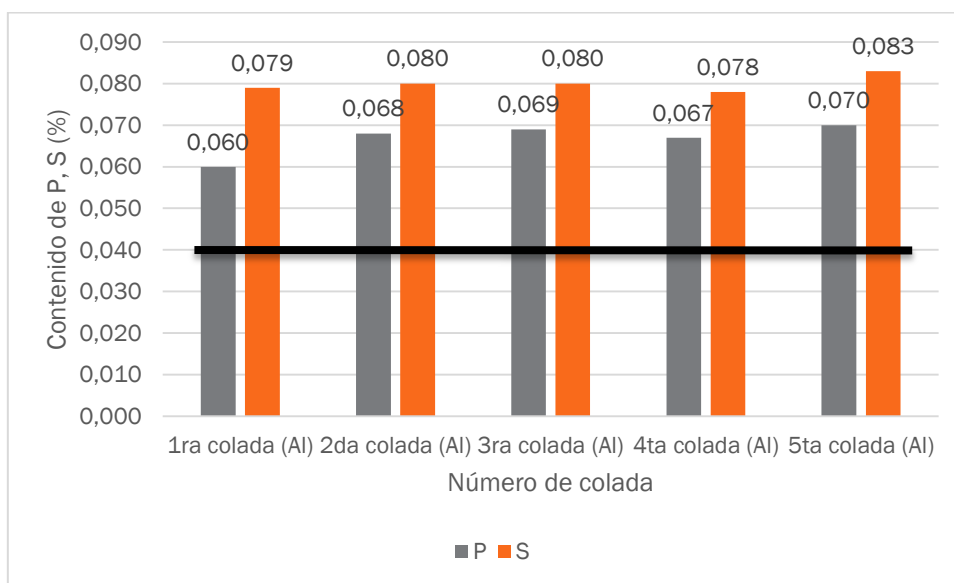


Figura 16. Comportamiento del fosforo y el azufre en el metal obtenido durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

Los altos contenidos de azufre en las colas están asociados al proceso tecnológico empleado en la Empresa Pedro Sotto Alba, lo cual es un indicador a tener en cuenta en las próximas investigaciones con este tipo de material.

3.4.2 Resultados de las escorias obtenidas, utilizando aluminio como reductor.

Las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora, están compuestas principalmente, por Fe, en forma de Fe^{2+} e Fe^{3+} , con valores promedio de 14,4 %, lo que confirma la ocurrencia del proceso de reducción de los óxidos superiores de este elemento, durante el desarrollo de la fusión de las colas viejas y que gran parte de este han pasado a la escoria, este es uno de los aspectos que debe ser investigados en trabajos posteriores, tratando de evitar la pérdidas de este elemento en este producto. En

el (Anexo 2) se muestra la composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

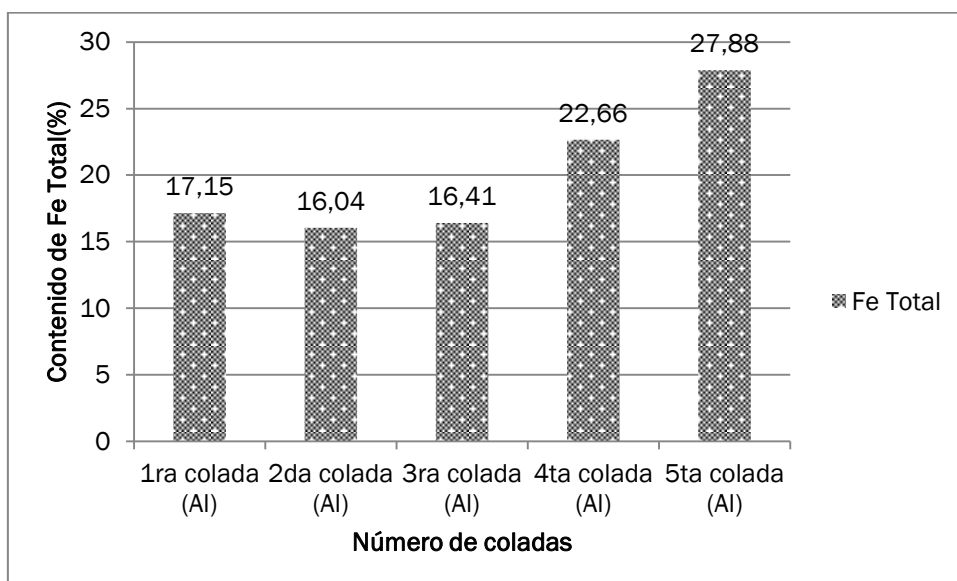


Figura 17. Comportamiento del hierro en la escoria obtenida, durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

También se aprecia la pérdida de elementos valiosos como, níquel, cobalto, cromo y manganeso en las escorias, lo cual se debe tratar de disminuir, en investigaciones posteriores, para obtener un producto con mayor presencia de estos elementos en el metal. En las figuras 18 y 19 se aprecian los contenidos de estos elementos en las diferentes coladas realizadas.

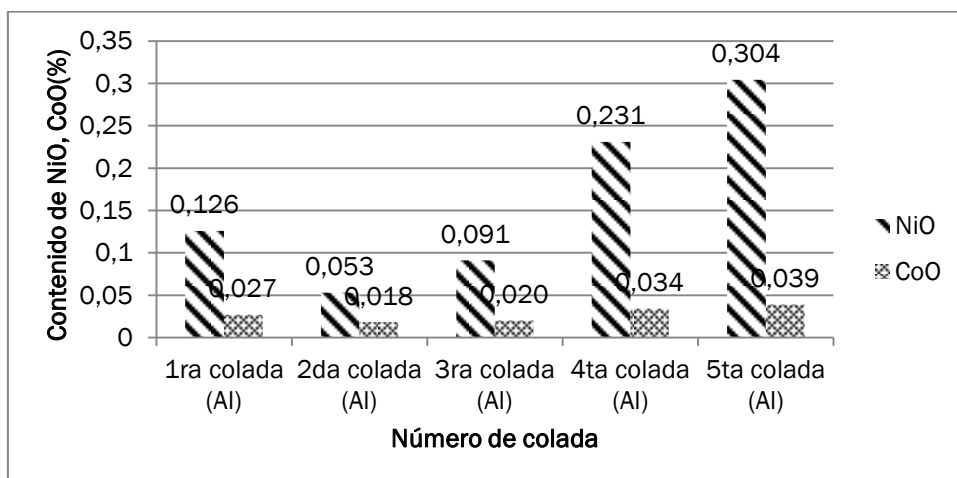


Figura 18. Comportamiento del óxido de níquel y óxido de cobalto en la escoria obtenida, durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

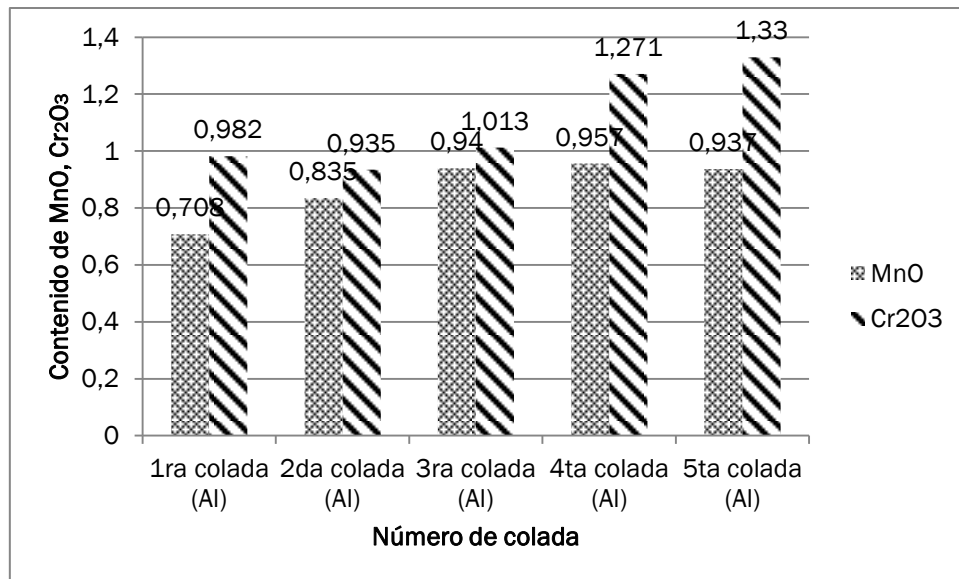


Figura 19. Comportamiento del óxido de manganeso y óxido de cromo (III) en la escoria, durante las coladas experimentales, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

3.4.3 Resultados del material no fundido, utilizando aluminio como reductor

En las pruebas de fusión reductora se obtuvo metal, escorias como se explica anteriormente, pero también se obtuvo un producto no fundido en cada una de las coladas realizadas, lo cual está asociado a la falta de reductor y al tamaño de partícula del mineral el cual era muy fino, en este producto no fundido se tienen valores altos de Fe, Cr, Si, Co, Ni y Mn, principalmente, como se observa en las figuras 20, 21, mientras que en el (Anexo 3) se muestra la composición química promedio (%) de los productos no fundidos obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

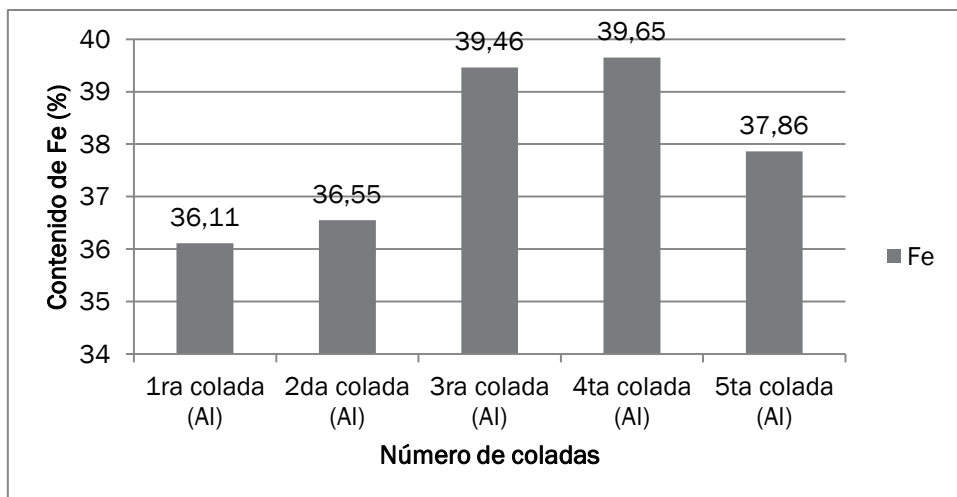


Figura 20. Comportamiento del hierro en el material no fundido, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

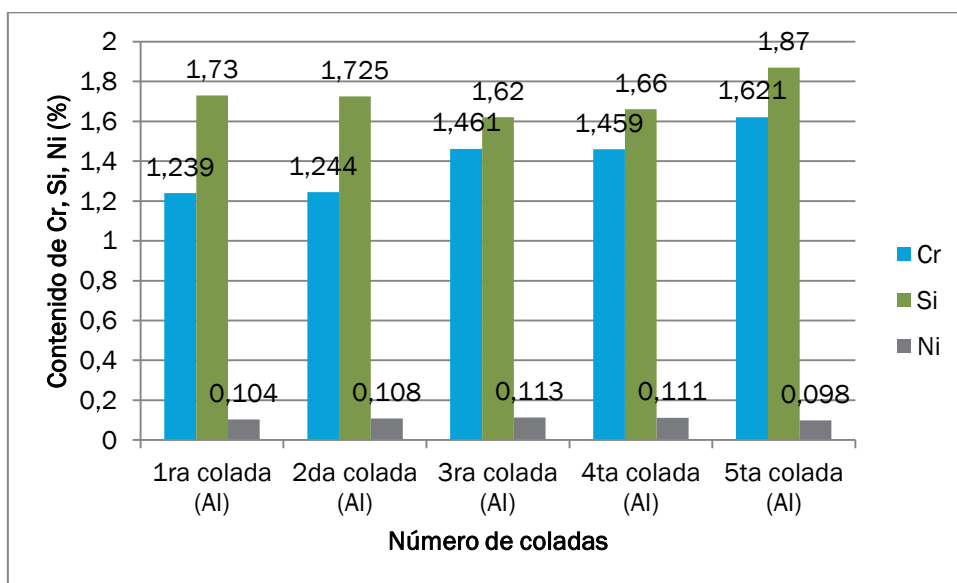


Figura 21. Comportamiento del cromo, silicio y níquel en el material no fundido, utilizando aluminio como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

3.4.4 Resultados de la obtención de metal, en las pruebas pirometalúrgicas utilizando carbón como reductor

En la investigación se realizó la reducción directa utilizando como reductor al carbón bituminoso, mostrándose en la siguiente tabla las masas de materiales empleados en las pruebas carbotérmicas.

Tabla 10. Masas de los materiales empleados en la reducción carbotérmica.

Productos	Muestra de Colas+ Carbón bituminoso	Metal (g)	Escoria (g)	No fundido (g)		Total (g)	Diferencia (g)
				Magnético	No magnético		
Colada	474	21 (4,4)	51 (11)	99,05 (21)	12 (3)	183,05 (39)	290,95 (61)

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

De la tabla anterior se deduce que el aprovechamiento de las colas, realizando la fusión-reducción utilizando carbón, tuvo un 39 % para la colada realizada, lo que permitió a su vez, obtener menor cantidad de metal con un 4,4 %, estos porcentajes bajos se deben a las insuficiencias en el reductor. La cantidad de escorias y productos no fundidos, están asociados a los elementos formadores de escoria presentes en las colas, como SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , así como por las condiciones de trabajo en el horno empleado, aspectos que deben ser tomados en cuenta para los futuros trabajos investigativos.

En las figuras 22, 23, 24, 25 se muestran los comportamientos de los elementos presentes en el metal obtenido, luego de la reducción utilizando carbón, demostrando que a pesar de obtenerse un 4,4 %, de metal reducido, el hierro alcanza un 89 %, de contenido representado en la figura 22, para la realización de estos gráficos se muestra (Anexo 1), la composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de las Colas Viejas de la PSA.

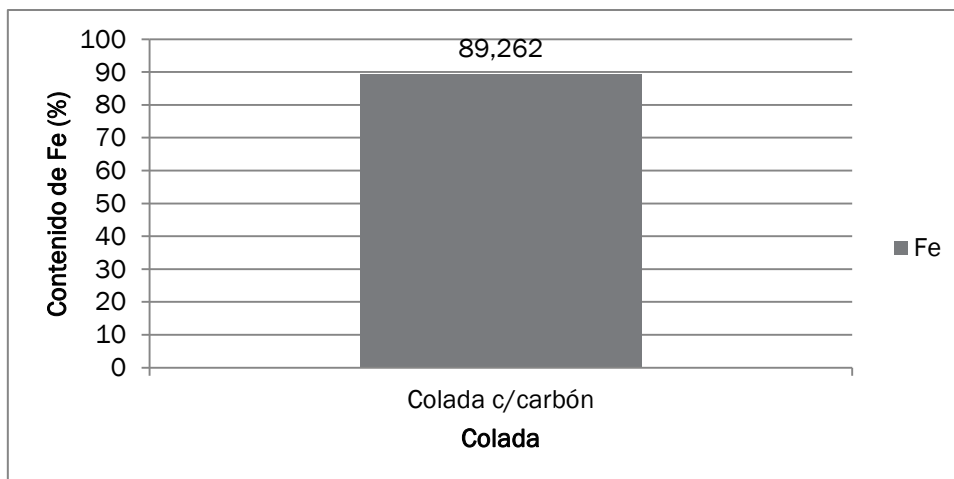


Figura 22. Comportamiento del hierro en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

En el caso del cromo, elemento importante para cualquier proceso de obtención de aleaciones, que le aporta un valor adicional al arrabio obtenido, tiene una cantidad bastante pequeña, con valor promedio de 0,86 %, como se muestra en la figura 23.

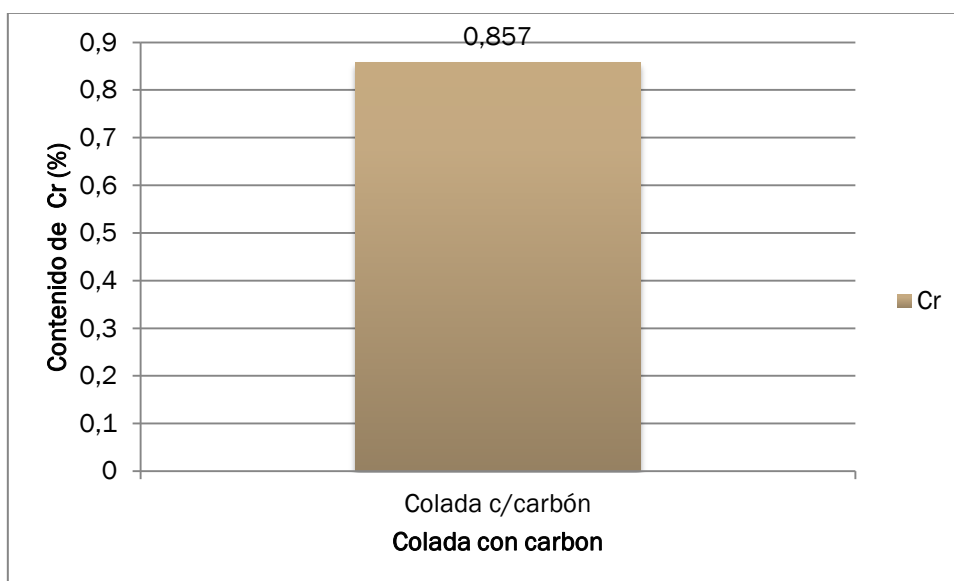


Figura 23. Comportamiento del cromo en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

El contenido de elementos tradicionales en los aceros, como el C y Si sobrepasan los rangos normales para los diferentes tipos de arrabio que se comercializan a nivel mundial, con valores que superan el 1 % , no siendo así para el manganeso, que solo

tiene un 0,29 %, de contenido en el metal obtenido, como se observa en la figura siguiente.

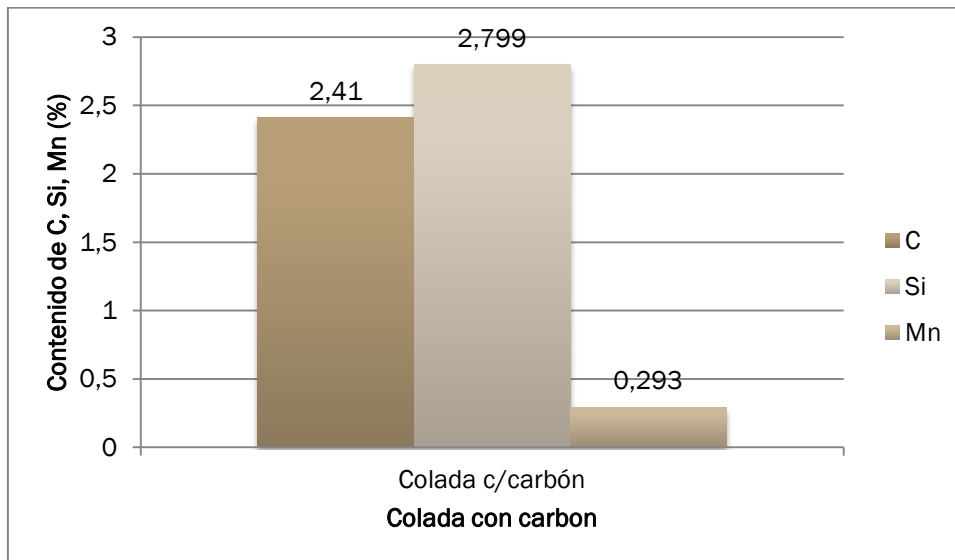


Figura 24. Comportamiento del carbono, silicio y manganeso en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

Otro de los aspectos importantes en los materiales siderúrgicos, es el contenido de las dos principales impurezas, P y S, las cuales, en este caso, tienen valores de 0,05 y 0,06 %, respectivamente, valores que superan lo normalmente exigido, para estos tipos de materiales, el alto porcentaje de azufre es debido al contenido de ácido utilizado en la empresa PSA para la obtención del níquel, en la siguiente figura se muestra su comportamiento.

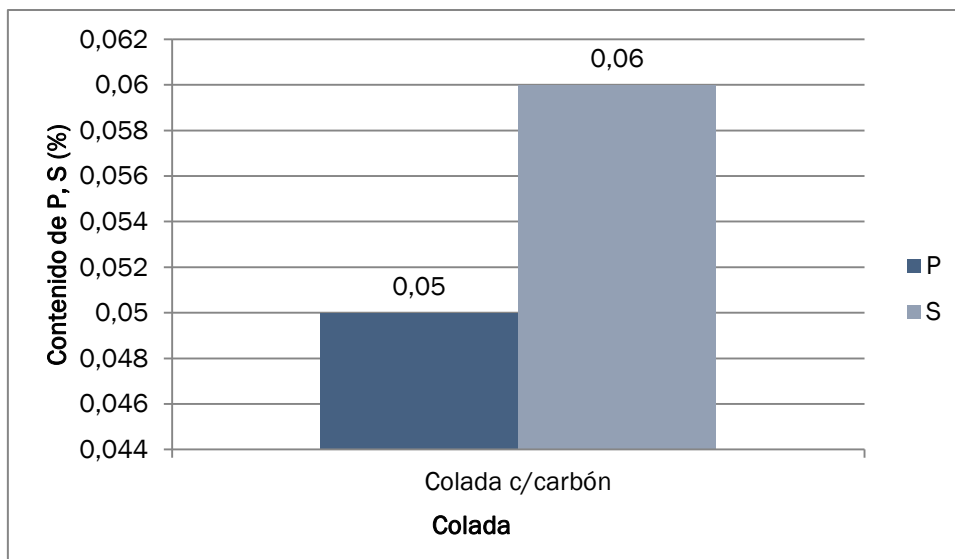


Figura 25. Comportamiento del fósforo y el azufre en el metal obtenido durante la colada experimental, utilizando carbón bituminoso como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

3.4.5 Resultados de las escorias obtenidas, utilizando carbon como reductor.

Para las pruebas pirometalúrgicas utilizando como reductor carbón bituminoso, demostrándose en las figuras 26 y 27, la pérdida de elementos valiosos como el hierro, manganeso, cromo y silicio, teniendo como promedio mayor el hierro con 18,15 %, siendo un valor significativo en la escoria, por lo que, debe ser objeto de análisis en investigaciones futuras. En el (Anexo 2) se muestra la composición química promedio (%) de las escorias obtenidas, durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

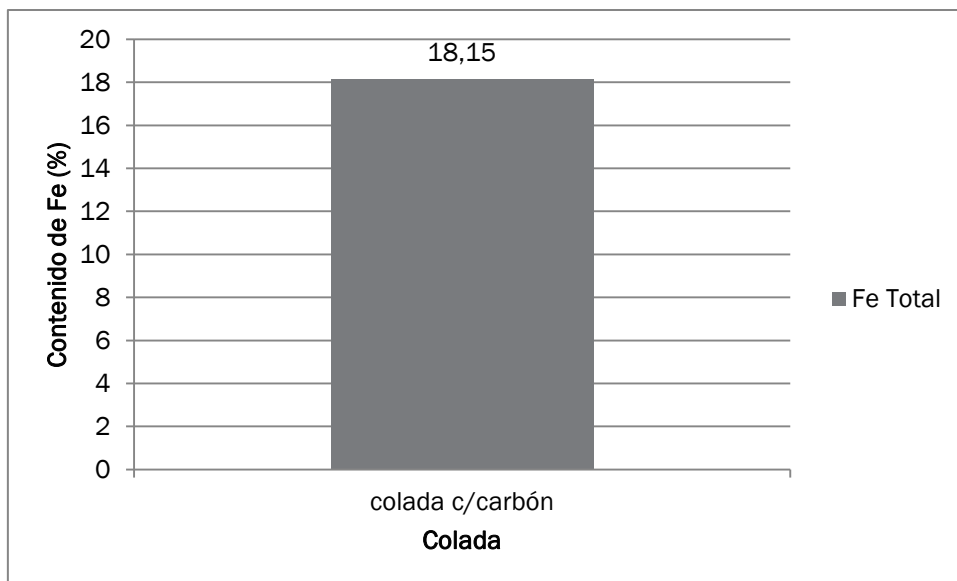


Figura 26. Comportamiento del hierro en la escoria durante la colada experimental, utilizando carbón como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

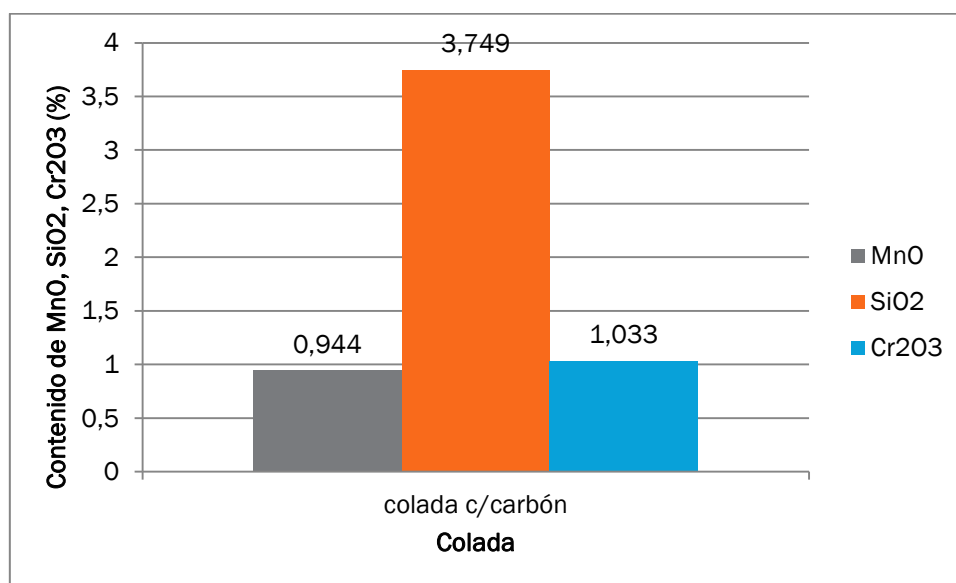


Figura 27. Comportamiento del óxido de manganeso, dióxido de silicio y óxido de cromo (III) en la escoria, utilizando carbón como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

Independientemente de los resultados obtenidos, es importante para nuevas investigaciones, evaluar las posibilidades de implementar procesos de aglomeración, que permitan reducir la cantidad de finos que poseen estos PAMMs, cuando se trata de procesos pirometalúrgicos. También evaluar el uso de otros reductores, como el carbón antracita y gases.

3.4.6 Resultados del material no fundido, utilizando carbon como reductor

Empleando la reducción carbotérmica se obtiene un material no fundido, al cual luego de un proceso de magnetización se comprueba la existencia de un producto magnético, y no magnético, donde el mayor contenido de hierro, como se muestra en la figura 28, está en el magnético, con un 53,34 %.

Los contenidos de silicio y el cromo, poseen valores de 6,66 y 2,12 %, respectivamente, como se muestra en la figura 29. En el (Anexo 4) se muestra la composición química promedio (%) de los productos no fundidos obtenidos (magnético - no magnético) durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

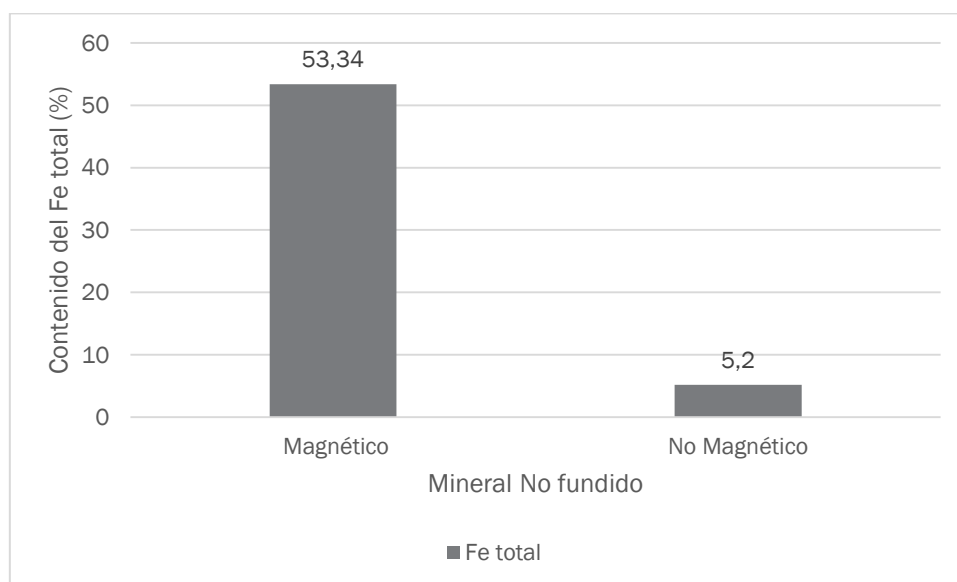


Figura 28. Comportamiento del hierro en el material no fundido, utilizando carbón como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

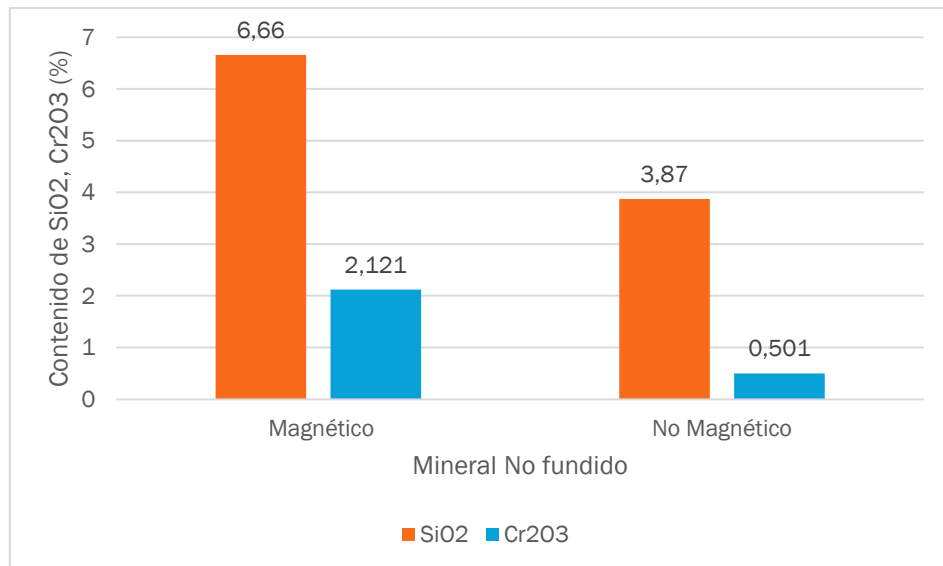


Figura 29. Comportamiento del dióxido de silicio y óxido de cromo (III) en el material no fundido, utilizando carbón como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

La presencia de níquel y cobalto en el material no fundido, constituyen una pérdida de componentes valiosos para el arrabio obtenido, puesto que en todas las industrias de acero se necesitan estos elementos, que le brindan propiedades al acero, en la figura 30, se muestra como un 0,149 %, de níquel se pierde en el producto magnético, por esta razón se proponen medidas para su aprovechamiento, como la mejora del reductor empleado.

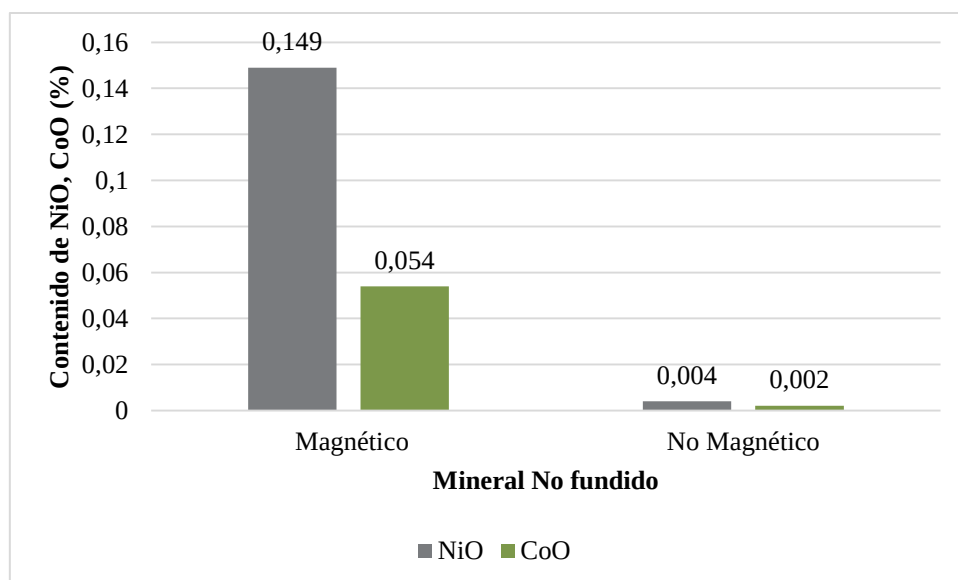


Figura 30. Comportamiento del óxido de níquel y óxido de cobalto en el material no fundido, utilizando carbón como reductor.

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado.

3.4.7 Consideraciones sobre los efectos ambientales, sociales e industriales del uso del PAMMs, “Colas Viejas”.

En esta investigación, los resultados obtenidos constituyen aportes ambientales, sociales e industriales, puesto que, a partir de un Pasivo Ambiental Minero Metalúrgico, el cual lleva ya más de 50 años sin ser explotado, se logra obtener un arrabio con alto contenido de hierro y enriquecido con pequeñas cantidades de Cr, Ni, Co, Si, Mn y C, lo cual presenta un resultado, que aunque preliminar, permitirá disminuir en el futuro la contaminación ambiental que actualmente ocasiona, la presa de colas viejas de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, que actualmente cuenta con más de 8,0 MM de toneladas de dicho residuo, sin definir un uso hasta la actualidad.

Analizando desde el punto de vista social e industrial significa, que, con el desarrollo de estas investigaciones, se podrán obtener productos de uso industrial, lo que generará numerosas fuentes de empleo para la sociedad, así como ingresos económicos, que deben ser determinados con el avance de las nuevas investigaciones relacionadas con esta temática.

3.5 Conclusiones del Capítulo III

1. Las Colas viejas de la PSA, se caracterizan por poseer relativamente, altos contenidos de hierro, aluminio y cromo, con pequeñas cantidades de níquel, cobalto, vanadio y la presencia perjudicial de azufre, elementos que no tiene grandes variaciones en cuanto a su distribución granulométrica, y donde existe predominio de las clases + 10 mm, con el 51 % y la fracción - 4 + 0,4 mm, que agrupan alrededor del 23 % de las partículas minerales, o sea, que más del 70 % se concentran en este rango granulométrico,
2. El mecanismo de descomposición térmica de las colas viejas de la PSA hasta los 1000 °C, se desarrolla en las etapas siguientes:
 - Primera: en el intervalo de temperatura entre 100 – 200 °C, con un pico máximo de 138 °C, que indica la máxima rapidez con que el material pierde masa en ese intervalo, equivalente a 1,45 %, lo cual está asociado a la eliminación del agua de hidratación de este PAMMs,
 - Segunda: en el intervalo entre 250 °C y 325 °C, con un valor máximo a la temperatura de 296 °C, en la cual ocurre la mayor rapidez de pérdida de masa, que es de 4,62 %, asociado a la liberación del agua interna o estructural, por la presencia de minerales arcillosos, como la gibbsita y goethita (minerales de hierro).
 - Tercera: en el intervalo de temperatura entre 680 - 950 °C, con una pérdida de masa total de 5,56 %, y la ocurrencia de varias velocidades de transformaciones, caracterizado fundamentalmente por la recristalización o reestructuración, principalmente, de minerales de serpentina, donde sobresalen la clorita y el talco, con varios picos máximos relacionados con la rapidez de las pérdidas de masas, asociadas además con la deshidroxilación de las fases mineralógicas, de 705 °C para la lizardita y de 852 °C y 963 °C para el talco.
3. Obtención de un arrabio con alto contenido de hierro, (88,4%) y enriquecido con cromo, (1,53 %), silicio (1,9 %), titanio (0,3 %) y vanadio (0,05 %), que lo convierten en un posible material de uso siderúrgico, luego de completar los estudios relacionados con la granulometría de este pasivo, así como los aspectos tecnológicos a mejorar en el futuro.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se obtuvo un arrabio con 88,4 % de hierro, 1,53 % cromo, 1,9 % silicio, 0,3 % de titanio y 0,05 % de vanadio, con posibilidades de uso siderúrgico.
2. El mecanismo de descomposición térmica del PAMMs “colas viejas” de la PSA hasta los 1000 °C, se desarrolla en las etapas siguientes:
 - En el intervalo de temperatura entre 100 – 200 °C, con un pico máximo de 138 °C, que indica la máxima rapidez con que el material pierde masa en ese intervalo, equivalente a 1,45 %, lo cual está asociado a la eliminación del agua de hidratación de este PAMMs.
 - En el intervalo entre 250 °C y 325 °C, con un valor máximo a la temperatura de 296 °C, en la cual ocurre la mayor rapidez de pérdida de masa, que es de 4,62 %, asociado a la liberación del agua interna o estructural, por la presencia de minerales arcillosos, como la gibbsita y goethita (minerales de hierro).
 - En el intervalo de temperatura entre 680 - 950 °C, con una pérdida de masa total de 5,56 %, y la ocurrencia de varias velocidades de transformaciones, caracterizado fundamentalmente por la recristalización o reestructuración, principalmente, de minerales de serpentina, donde sobresalen la clorita y el talco, con varios picos máximos relacionados con la rapidez de las pérdidas de masas, asociadas además con la deshidroxilación de las fases mineralógicas, de 705 °C para la lizardita y de 852 °C y 963 °C para el talco.
3. Las pruebas experimentales consistieron en el desarrollo de ensayos de fusión-reductora, empleando el pasivo ambiental estudiado y dos tipos de reductores, aluminio y carbón bituminoso, cuyos principales resultados son los siguientes:
 - Utilizando como reductor al aluminio se llega a la conclusión de que el aprovechamiento de las colas fue creciendo en la medida que se desarrollaban las 5 coladas, hasta alcanzar el 85 % en la última, lo que permitió a su vez, obtener mayor cantidad de metal en esta, con un contenido de hierro que oscilan entre, 88,3 % y 90,4 %, con un valor máximo de 90,40 %, para la cuarta colada, este material obtenido es considerado como un arrabio enriquecido de Ni, Co, Si, Mn y C, que de continuarse estudiando puede llegar a constituir un posible material de carga para la producción de aceros en Cuba.
 - Las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora, están compuestas principalmente, por Fe, en forma de Fe^{2+} e Fe^{3+} , con valores promedio de 14,4

%, lo que confirma la ocurrencia del proceso de reducción de los óxidos superiores de este elemento, durante el desarrollo de la fusión de las colas viejas, siendo así para otros elementos valiosos, níquel, cobalto y cromo, y que gran parte de estos han pasado a la escoria, este es uno de los aspectos que debe ser investigado en trabajos posteriores, tratando de evitar la pérdida de estos elemento.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar la obtención de un arrabio enriquecido aplicando mejoras tecnológicas a la metodología que se emplee, principalmente, preredución, aglomeración y el uso de otros tipos de reductores.
2. Analizar variantes tecnológicas para lograr reducir la cantidad de impurezas en el metal y de elementos valiosos presentes en las escorias.
3. Desarrollar pruebas pirometalúrgicas, empleando otros tipos de reductores.

Referencias Bibliográficas

1. Abreu Cutiño, E. (2015). Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
2. Asociación de servicio de Geología y Minerías Iberoamericanas. (2010). *Pasivos Ambientales Mineros*. Chile: Sociedad Geología y Minerías de Iberoamerica.
3. Beyer, L., & Fernández, V. (2000). *Química Inorgánica*. Brasil: Ariel.
4. Del Pino Batista, R. (2016). *Benefico en mesas de Concentración de las Colas de la Empresa Ernesto Che Guevara*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
5. Díaz Martínez, J. I. (2016). *Obtención de aleaciones de hierro y escorias abrasivas y refractarias a partir del proceso aluminotérmico de cascarillas de laminación*. Santa Clara: UCLV.
6. Ferreiro Guerrero, Y. (2014). *Obtención de Lupias de Arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las Colas de Nicaro*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
7. Ferreiro Guerrero, Y., Sánchez Cruz, A., Domínguez, E. S., & Palacios Rodríguez, A. (2012). Obtención de metalizados de hierro a partir de los residuos sólidos de la industria del níquel en Nicaro, Cuba. *Minería y Geología*, 62-75.
8. Ganesh Persaud, A. (2014). *Metodología para el inventario de los Pasivos ambientales Mineros-Metalurgicos, generados por las industrias del Níquel en Moa*. Moa.
9. González González, L. E. (2013). *Obtención de FeMn medio carbono mediante procesamiento aluminotérmico*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Villa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
10. Hechavarría Tamayo, N. (2016). *Evaluación técnico-económica del mineral de las colas rojas de Moa para su comercialización con fines siderurgicos*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
11. Hufnagel, W. (1992). *Manual del Aluminio*. Barcelona: Reverté.
12. López Peña, L. M. (2006). *Caracterización geológica de las materias primas minerales de los Municipios Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como materiales de construcción*. Moa: ISMM.
13. M, B., & Goldschmidt, H. (1993). *Reacciones de la Termita: su utilización en la síntesis y proceso de materiales*. Berlín: Hans Goldschmidt y la aluminotermia.

14. M. Bustamante Sánchez; G. Samalea Martínez. (2007). *Estudio de la separación del Fe(III) de las disoluciones ácidas de la lixiviación de las colas de Nicaro con los ácidos sulfúricos y clorhídrico*. Habana: Revista Cubana de Química.
15. Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Minería. (2006). *Inventario de Pasivos Ambientales Mineros*. Lima: Dirección General de Minería.
16. Moreno, C., & Chaparro, E. (2008). *Conceptos básicos para entender la legislación aplicable a la industria minera en los países andinos*. División de Recursos Naturales e infraestructura. Santiago de Chile: Santiago de Chile.
17. 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.
18. Oblasser, A., & Chaparro Avila, E. (05 de 2008). Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*, 10-20.
19. Ortiz Bárcenas. (2015). *Obtención de un producto Prereducido para la Producción de Arrabio con Níquel (Nickel Pig Iron) a partir del Tratamiento de los Escombros Lateríticos de Mina Martí de Nicaro*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
20. Palacios Rodríguez, A., & Garcia Peña, E. (2013). *Extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos en tinajas de percolación*. Moa: Insitituto Superior Minero Metalúrgico.
21. Peace García, H., & Rengifo Ruiz, M. (2004). *Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera*. Lima: Congreso de la República.
22. Penedo Medina, M., Maury Cabrera, E., Giralt Ortega, G., Ariza Borges, S., del Campo Lafita, A. S., & Falcón Hernández, J. (2008). *Lixiviación de Colas del Proceso Caron con Lixivante Orgánico: Ácido Acético y Ácido Piroleñoso*. Santiago de Cuba: Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente .
23. Perdomo González, L., & Quintana Puchol, R. (2004). *Desarrollo de materiales abrasivos y refractarios a partir de los productos obtenidos por procesamiento aluminotérmico de minerales cubanos y residuales industriales*. Villa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
24. Perdomo, L. (2009). *In Afinidad LXVI*. Santa Clara: 541.

25. Pons Herrera, J. A. (2017). *Tratamiento y uso de pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos Sólidos (PAMMs)*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
26. Ramírez Pérez, M. C. (2010). *Utilización de los escombros lateríticos de zona A, yacimiento Moa Occidental en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico.
27. Reyes González, O. (2014). *Extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos en tinas de percolación*. Metalurgia Química. Moa: ISMM.
28. Ríos Azahares, Y. (2015). *Evaluacion ambiental de los Pasivos Ambientales Mineros de la mina de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
29. Seoane, N. P., & Díaz Comesañas, J. L. (2011). *Pasivos Ambientales Mineros en CUBA. Bases Metodológicas*. La Habana: ANPP.
30. Serra, I. N., & Gé Roche, I. (2009). *Estrategias para evaluación de Pasivos Ambientales Mineros en Cuba*. La Habana: Oficina Nacional de recursos minerales.
31. Taype, S. C. (2018). *Características físico - químicas, térmicas y mineralógicas del Pasivo Ambiental Escombros Lateríticos del Yacimiento Moa Occidental, de la Empresa Ferroníquel Minera S.A* . Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.

ANEXOS

Anexo1. Composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de las Colas Viejas de la PSA.

Código	Descripción	C	Si	Mn	Ni	Co	Cr	Al	Mo	Cu	P	S	Mg	Pb	Ti	V	Nb	W	Fe
Metal R-1	1ra colada (Al)	0,25	6,460	0,624	0,262	0,009	1,531	0,001	0,047	1,74	0,060	0,079	0,00	0,033	0,345	0,049	0,006	0,01	88,55
Metal R-2	2da colada (Al)	0,25	6,420	0,619	0,266	0,01	1,523	0,001	0,048	2,01	0,068	0,080	0,002	0,041	0,323	0,048	0,006	0,01	88,35
Metal R-3	3ra colada (Al)	0,244	5,68	0,677	0,257	0,01	1,540	0,001	0,046	1,92	0,069	0,080	0,002	0,038	0,340	0,047	0,005	0,01	89,03
Metal R-4	4ta colada (Al)	0,235	4,551	0,689	0,281	0,01	1,55	0,002	0,045	1,88	0,067	0,078	0,001	0,026	0,332	0,045	0,005	0,01	90,43
Metal R-5	5ta colada (Al)	0,256	6,450	0,621	0,263	0,01	1,494	0,001	0,047	2,0	0,070	0,083	0,002	0,046	0,313	0,048	0,006	0,01	88,28
Metal R-11	Colada (C/B)	2,41	2,799	0,293	0,003	0,008	0,857	0,78	0,048	2,2	0,05	0,06	0,82	0,03	0,321	0,044	0,005	0,01	89,26
Promedio		0,250	5,912	0,646	0,266	0,010	1,528	0,001	0,047	1,910	0,067	0,080	0,002	0,037	0,331	0,047	0,006	0,010	88,90

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Anexo 2. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

Código	Descripción	NiO	CoO	MnO	MgO	Cr₂O₃	SiO₂	Al₂O₃	Fe²⁺	Fe³⁺	Ni/Co	Fe/Cr	SiO₂/MgO
Escoria R-1	1ra colada (Al)	0,126	0,027	0,708	1,141	0,982	4,58	50,88	4,72	12,43	4,67	17,38	4,02
Escoria R-2	2da colada (Al)	0,053	0,018	0,835	1,10	0,935	3,882	47,34	3,18	12,86	2,94	16,93	3,53
Escoria R-3	3ra colada (Al)	0,091	0,020	0,94	1,11	1,013	4,171	52,29	3,56	12,85	4,55	16,25	3,76
Escoria R-4	4ta colada (Al)	0,231	0,034	0,957	1,141	1,271	4,217	55,87	3,28	19,38	6,79	18,53	3,70
Escoria R-5	5ta colada (Al)	0,304	0,039	0,937	1,079	1,33	4,712	55,99	4,43	23,45	7,79	22,06	4,37
Escoria R-11	Escoria colada (C/B)	0,003	0,008	0,293	0,82	0,857	2,799	9,78	2,99	8,11	0,38	12,45	3,41
Escoria R-12	Escoria colada (C/B)	0,051	0,016	0,448	0,944	1,033	3,749	18,95	4,24	13,91	3,19	17,71	3,97
Promedio		0,117	0,028	0,823	1,184	1,121	5,470	39,641	3,7710	14,41	3,95	16,62	4,26

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Anexo 3. Composición química promedio (%) de los productos no fundidos obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

Código	Descripción	Ni	Co	Cr	Fe	Si	Mg	Ni/Co	Fe/Cr
Colas _ R-6	1ra colada (N.F)	0,104	0,0183	1,239	36,11	1,73	0,238	5,68	29,14
Colas _ R-7	2da colada (N.F)	0,108	0,0179	1,244	36,55	1,725	0,226	6,03	29,38
Colas _ R-8	3ra colada (N.F)	0,113	0,0186	1,461	39,46	1,62	0,213	6,07	27,01
Colas _ R-9	4ta colada (N.F)	0,111	0,0188	1,459	39,65	1,66	0,218	5,90	27,18
Colas _ R-10	5ta colada (N.F)	0,098	0,0185	1,621	37,86	1,87	0,210	5,29	23,36
Promedio		0,107	0,018	1,405	37,926	1,721	0,221	5,80	27,21

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Anexo 4. Composición química promedio (%) de los productos no fundidos (magnético - no magnético) obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora de las Colas Viejas de la PSA.

Código	Descripción	NiO	CoO	MnO	MgO	Cr₂O₃	SiO₂	Al₂O₃	Fe²⁺	Fe³⁺	Ni/Co	Fe/Cr
R-13	Colas Pdto. No Magnético	0,004	0,002	0,444	0,281	0,501	3,87	9,92	2,02	3,18	2,00	29,94
R-14	Colas. Pdto Magnético	0,149	0,054	1,00	0,312	2,121	6,66	6,64	9,06	44,28	2,76	8,37

Elaborado por: Reinier Hernández Tirado

Anexo 5. Desarrollo del proceso de fusión reductora.



Anexo 6. Proceso de carga de los materiales al horno eléctrico en el CIS.

