MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA

Caracterización del rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, para su posible uso industrial

Tesis en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Serguey Salvador Herrera Casas

Moa

2018

"Año 60 de la Revolución"

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA

Caracterización del rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, para su posible uso industrial

Tesis en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Autor: Serguey Salvador Herrera Casas

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

Dr. C José A. Pons Herrera. Profesor Titular.

Moa

2018

“Año 60 de la Revolución”

Declaración

Yo: Serguey Salvador Herrera Casas, autor del trabajo titulado Caracterización del rechazo de la planta de preparación mineral del Yacimiento de Moa Oriental para su posible uso industrial, declaro la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", para que disponga de su uso cuando considere conveniente.

_____

Serguey Salvador Herrera Casas

_____ _____

Dr.C María Caridad Ramírez Pérez Dr.C José Alberto Pons Herrera

Agradecimientos:

A mis padres y a toda mi familia, por la orientación y apoyo que me han brindado y me brindan.

A mis tutores el Dr. C José Alberto Pons Herrera y la Dr. C María Caridad Ramírez Pérez por haber sido la fuente donde surgió este trabajo y por la confianza depositada en mí para la realización del mismo.

A todo el colectivo de profesores del Departamento de Metalurgia-Química que de una u otra manera contribuyeron a mi formación como futuro profesional.

A mis compañeros y amigos que realmente me brindaron su apoyo incondicional en todos estos años.

A todos ellos: Muchas gracias

Resumen

El objetivo del presente trabajo investigativo es determinar las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, del Pasivo Ambiental “Rechazos Serpentiníticos” de la planta de preparación de mineral del yacimiento Moa Oriental, perteneciente a la Empresa Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A, que permitan la toma de decisiones sobre sus posibles usos industriales. Las muestras analizadas fueron seleccionadas y tomadas en conjunto con la dirección de Minería de esta empresa, preparadas y procesadas en la planta de beneficio del ISMM y caracterizadas con la combinación de técnicas de Espectrofotometría de Absorción Atómica, Volumetría, Difracción de Rayos X y Análisis Termogravimétrico, empleando equipos modernos. Se comprobó que las partículas agrupadas en las fracciones de tamaño de - 4 a +1,98 constituyen el 64,54 % del peso total de este residual. Químicamente está representado por óxido de silicio, aluminio, magnesio e hierro, lo que justifica la presencia las fases mineralógicas principales, serpentina, gibbsita y cuarzo, con tres etapas de descomposición térmica relacionados con la pérdida de humedad y la reestructuración de los minerales de serpentina. A partir de estos resultados se comprobó la similitud de este pasivo con los de Moa Occidental y se recomienda su uso industrial, principalmente, como material de construcción y fundente, luego de su certificación por las instituciones competentes.

Palabras Claves:

Rechazo serpentinítico, fases mineralógicas, minerales de serpentina.

Abstract

The objective of this research work is to determine the physical, chemical, mineralogical and thermal characteristics of the Environmental Passive "Serpentinitic Rejections" of the ore preparation plant of the Moa Oriental deposit, belonging to the Pedro Sotto Company Alba Moa Nickel SA, which allow the decision making on their possible industrial uses. The analyzed samples were selected and taken in conjunction with the mining direction of this company, prepared and processed at the ISMM beneficiation plant and characterized with the combination of Atomic Absorption Spectrophotometry, Volumetric, X-ray Diffraction and Analysis techniques. Thermogravimetric, using modern equipment. It was found that the particles grouped in the fractions of size from -4 to +1.98 constitute 64.54% of the total weight of this residual. Chemically, it is represented by silicon oxide, aluminum, magnesium and iron, which justifies the presence of the main mineralogical phases, serpentine, gibbsite and quartz, with three stages of thermal decomposition related to the loss of moisture and the restructuring of the serpentine minerals. . Based on these results, the similarity of this liability with those of Western Moa was verified and its industrial use is recommended, mainly as construction and flux material, after its certification by the competent institutions.

Keywords

Serpentinitic rejection, mineralogical phases, minerals of serpentine.

Índice de contenidos

Resumen iv

Abstract v

Índice de contenidos vi

Índice de Tablas viii

Índice de Figuras ix

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO 5

1.1 Antecedentes y estado actual de la temática tratada 6

1.2 Experiencias en la utilización de desechos serpentiníticos como materiales de construcción alternativos 10

1.3 Conclusiones del Capítulo I 14

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS 16

2.1 Características geológicas del yacimiento de Moa Oriental 16

2.2 Preparación de las muestras 19

2.3 Análisis granulométrico 21

2.4 Equipamiento y técnicas utilizadas durante la caracterización química, mineralógica y térmica del pasivo ambiental estudiado 22

2.4.1 Análisis químicos 23

2.4.2 Análisis mineralógicos 24

2.4.3 Análisis térmicos 25

2.5 Métodos de investigación empleados 26

2.6 Conclusiones del Capítulo II 27

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 28

3.1 Resultados de los análisis granulométricos 28

3.2 Resultados de los análisis químicos 30
3.3 Resultados de los análisis mineralógicos 31
3.4 Resultados de los análisis térmicos 32
3.5 Análisis comparativo entre los resultados obtenidos en el presente proyecto investigativo con respecto a otros anteriormente realizados 35
3.5.1 Comparación de las características químicas de los rechazos serpentiníticos 35
3.5.2 Comparación de las características mineralógicas de los rechazos serpentiníticos 36
3.5.3 Comparación de las características térmicas de los rechazos serpentiníticos 38
3.6 Propuestas de usos a partir de los resultados obtenidos 40
3.7 Conclusiones del capítulo III 41
CONCLUSIONES GENERALES 43
RECOMENDACIONES 44
BIBLIOGRAFÍA 45
ANEXOS 48

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de la evolución de los materiales de construcción desglosada por tipos de rocas extraídas (en toneladas)..... 7

Tabla 2. Composición química (%) de las harzburgitas serpentinizadas del basamento de los yacimientos de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa. 18

Tabla 3. Datos técnicos del equipo de análisis térmico, *STA 449 F3*. 26

Tabla 4. Características granulométricas, retenido y cernido, del pasivo ambiental, rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental. 28

Tabla 5. Composición química promedio (%) del rechazo serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental. 30

Tabla 6. Composición mineralógica semicuantitativa del Rechazo Serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental 32

Tabla 7. Principales fases semicuantitativas de los rechazos serpentiníticos del Yacimiento de Moa Oriental. 34

Tabla 8. Composición química (en %), de los rechazos serpentiníticos 35

Tabla 9. Comparación de las fases mineralógicas de los rechazos serpentiníticos 37

Tabla 10. Comparación de las características térmicas de los rechazos serpentiníticos de diferentes yacimientos de la región de Moa 39

Índice de Figuras

Figura 1. Área donde se enmarca el objeto de estudio de la investigación. 5

Figura 2. Principales países productores de piedra natural (basalto, caliza, granito, mármol, serpentina, dunita.) 9

Figura 3. Muestras del rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental 19

Figura 4. Maso utilizado en la primera etapa de reducción de tamaño de la muestra 20

Figura 5. Trituradora de mandíbulas utilizada en la segunda etapa de trituración 21

Figura 6. Tamizadora eléctrica empleada en los análisis granulométricos. 22

Figura 7. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos. 23

Figura 8. Difractómetro de Rayos-X Bruker AXS D8 Focus, empleado para los análisis mineralógicos. 24

Figura 9. Equipo *NETZSCH*, utilizado para realizar el análisis térmico. 25

Figura 10. Características granulométricas del rechazo serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental. 29

Figura 11. Difractograma de los Rechazos Serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental. 31

Figura 12. Termograma del rechazo serpentinítico estudiado. 33

Figura 13. Comparación entre los termogramas de los rechazos serpentiníticos de A-) Basamentos de Moa Oriental; B-) Yacimiento Yagrumaje y C-) Yacimientos de Moa Oriental. 40

INTRODUCCIÓN

En la antigüedad, las primeras civilizaciones descubrieron que en la tierra se encontraban las mayores riquezas en minerales, dando comienzo así a sus primeros pasos en la minería, extrayendo los elementos necesarios para crear herramientas, y por tanto, la base de sus imperios. De esta manera la minería se convirtió en una actividad vital para el desarrollo de la humanidad junto a una serie de procesos de transformación seguidos de la extracción.

Los resultados de la minería están presentes en cada ámbito de la humanidad, en pos de mejorar y facilitar cada vez más la vida de la misma, dichos resultados se hacen vigentes en el trabajo realizado por Cedrón (2013) "Elaboración de criterios para la transformación de Pasivos Mineros en Activos Socio – Ambientales Sostenibles", donde plantea los diversos usos que proporcionan los resultados de la minería en distintas industrias, tales como, en la manufacturera de herramientas y maquinarias, en la cual se emplea el acero que no es más que una aleación de hierro-carbono y otros metales según sean sus fines; en la aeronáutica se utiliza para la fabricación de aviones el magnesio, el cual es un metal muy liviano y el aluminio como insumo de materia prima, así como la fabricación de naves espaciales utilizando el titanio, debido a que es muy liviano y resistente.

En la industria eléctrica los accesorios eléctricos de potencia, interruptores, dispositivos de control utilizan componentes de plata y oro este último constituye la base de la economía a nivel mundial, también los cables conductores de electricidad son fabricados utilizando el cobre como insumo principal; en la medicina es muy utilizado el mercurio en la fabricación de termómetros, así como el sodio en sueros y el titanio en prótesis de huesos y dientes; en la industria alimenticia las latas de conservas son fabricadas incluyendo un recubrimiento de estaño, además la sal que se consume con los alimentos contiene sodio (cloruro de sodio).

Sin embargo, todos los resultados de la industria extractiva no son positivos, debido a que tras varios siglos de esta práctica el ser humano ha provocado varios daños al medio ambiente, destruyendo tanto hábitats naturales a causa de la extracción minera, como por la contaminación del medio ambiente a causa de emisiones de diversas índoles.

En nuestro país, al nordeste de la provincia de Holguín se encuentra el municipio de Moa, donde por más de 6 décadas se encuentran en explotación los yacimientos lateríticos y donde actualmente se hallan operando las dos mayores empresas metalúrgicas del país,

encargadas del procesamiento de estos yacimientos. Una de estas empresas, la “Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A” con la tecnología ácida a presión, y la otra, la “Comandante Ernesto Che Guevara” con la tecnología Carbonato Amoniacal (proceso CARON).

Según el Dr. José Alberto Pons Herrera (2010) “Hoy, los residuos que se acumulan regularmente en el campo de mina poseen contenidos de minerales útiles muy bajos, que promedian 0,55 % de níquel y 0,045 % de cobalto, hierro 32,04 %, magnesio 8,21 % y de sílice 17,34 %, sin un valor metalúrgico que cumpla con las especificaciones técnicas del proceso de Ferroníquel, pues esa tecnología va a operar con 1,6 % de níquel y es necesario un mineral con contenidos de Fe = 12 % - 16 %, Mg = 24 % - 26 %, SiO_2 = 35 % - 40 % y Co = 0,06 %, precisando mantener una relación SiO_2/Mg = 1,4 – 1,6, pudiendo asimilarse contenidos de hierro hasta un 20 % - 25 %.” Estos procesos de explotación traen consigo la acumulación de grandes volúmenes de escombros, en su mayoría serpentiníticos, los cuales no son utilizados por estas tecnologías, debido a que no garantizan los contenidos de níquel y cobalto requeridos para su procesamiento, por lo que solo ocupan grandes espacios de terreno sin cumplir objetivo alguno, no solo contaminando y dañando el ecosistema circundante, sino también afectando a las personas que viven en las urbanizaciones cercanas a estas empresas.

A consideración de Ruiz (2016)**,** en una gran parte de la sociedad existe la convicción de que el aprovechamiento de los recursos minerales y la protección del medio ambiente son actividades incompatibles, es decir, esta creencia es el resultado de que durante muchos siglos la actividad de la industria extractiva se haya desarrollado de una forma desordenada, donde primaba la rentabilidad económica sin tener en cuenta los costes ambientales derivados de su actuación. Resultado de esta actividad desordenada y sin ningún tipo de planificación de un cierre de minas adecuado, dio lugar a la existencia de un gran número de pasivos ambientales mineros (PAM), (pág. 23).

Con el incremento de la producción también incrementan los volúmenes de pasivos ambientales mineros, en su mayoría compuestos por serpentina, como lo evidencia el rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A, es por esto que el gobierno cubano busca solucionar con eficacia este problema creciente, dando usos útiles a este pasivo a nivel industrial y por tanto, cuidar y proteger el ecosistema colindante a las áreas de explotación,

así como minimizar costos en cuanto a la producción y compra de materiales a utilizar a escala industrial.

Formulación del problema

Lo planteado anteriormente indica el siguiente **problema científico:** Desconocimiento de las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas del pasivo ambiental rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A, que imposibilita la toma de decisiones sobre su posible utilización industrial.

El **objeto de investigación** lo constituye el rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, perteneciente a la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A.

Objetivo General

Se establece como objetivo general: Determinar las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del rechazo serpentinítico de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel SA, que faciliten la toma de decisiones sobre sus posibles usos industriales.

El **campo de acción** lo constituyen las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A.

Sobre la base de lo analizado se plantea la siguiente **hipótesis:** la determinación de las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, del rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel SA, facilitará la toma de decisiones sobre sus posibles usos industriales.

El alcance del presente trabajo para contribuir al cumplimiento del objetivo general se sintetiza en los **objetivos específicos** siguientes:

1. Determinar las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental Rechazos de la planta de preparación de mineral del yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Moa Nickel Pedro Sotto Alba de Moa.

2. Comparar los resultados obtenidos, con pasivos similares generados por la industria del Níquel en Moa.
3. Proponer variantes de utilización de este pasivo ambiental minero, a partir de la caracterización realizada.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen las características generales, así como los usos como activo social del Pasivo Ambiental Minero Rechazos Serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel SA.

La literatura recoge importantes resultados en el campo de la caracterización y de la aplicación de métodos para el aprovechamiento integral de los recursos lateríticos cubanos; la búsqueda de alternativas que posibiliten la utilización de los residuos de la minería y de los procesos tecnológicos del níquel, sin afectar el medio ambiente, (Ganesh Persaud, 2014), debe significar un reto para los investigadores, para lo cual es necesario fundamentar los problemas científicos existentes, a partir de las contribuciones de la bibliografía existente.

Según informes de la Empresa Ferroníquel Minera S.A (2009), el yacimiento Moa Oriental limita al Norte con la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A, al Sur con el río Arroyón, al Este con el río los Lirios y al Oeste con el río Moa y Revuelta de los Chinos, ocupando un área de unos 15 km^2, la mayor parte del yacimiento Moa Oriental y la parte septentrional de Camarioca Norte, con las coordenadas siguientes:

X: 698 000 Y: 215 000

X: 701 000 Y: 221 000

Una imagen de la zona de estudio de esta investigación se puede observar en la siguiente figura.

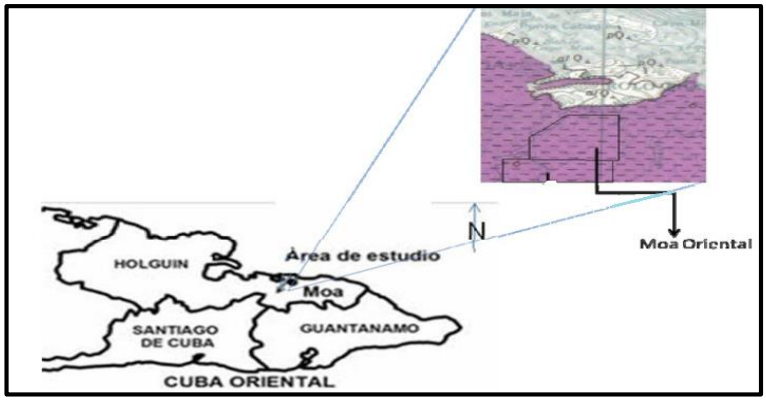


Figura 1. Área donde se enmarca el objeto de estudio de la investigación.

Elaborado por: Serguey Salvador Herrera Casas

A continuación, se establece el estado del arte en el tratamiento de los pasivos ambientales minero metalúrgicos sólidos, generados por la industria del Níquel en Moa y las perspectivas para su utilización.

1.1 Antecedentes y estado actual de la temática tratada

Plantea Gámez (2011), de acuerdo a trabajos realizados anteriormente y los análisis actuales realizados que, la serpentinita se encuentra habitualmente asociada a importantes yacimientos de cobre, hierro, níquel, amianto y talco. Se usa fundamentalmente en la construcción y es trabajada en láminas delgadas, se emplea para el cubrimiento de tejados y revestimientos exteriores. También se corta y pule para usarla como material ornamental de gran efecto. (pág. 8)

De acuerdo a lo anteriormente planteado el uso de estos desechos serpentiníticos sería de gran utilidad para la sociedad, debido a que no solo resolvería el problema de contaminación que representa su acumulación, sino que también se podría utilizar a escala industrial en la construcción de obras de diversas índoles tales como tejados, compuertas para presas hidráulicas, pavimentos, balastro para ferrocarriles, en bloques de hormigón para termoeléctricas y termonucleares debido a las propiedades de los minerales de serpentina, así como en la agricultura para fertilizar suelos ácidos debido a su contenido de magnesio.

De forma general, en todo el mundo la serpentina presenta un color verde oscuro y negro y tiene una textura laminar, con frecuentes manchas, denominadas zonaciones formadas por la presencia de mayor cantidad de otros elementos, especialmente piroxenos; principalmente. La serpentinita está formada antigorita, lizardita y magnetita, de forma accesoria, aparece serpentina en vetas crisotilo y a menudo también se encuentra amianto, talco, garnierita, brucita y clorita, en menor medida, magnesita, dolomita o calcita. Se ha reportado el uso de minerales serpentiníticos como materiales de construcción en el mundo.

A modo de ejemplo se valora la producción de áridos en España, donde según el Instituto Geológico y Minero de España, (2001), la producción de áridos de construcción registrada en la Estadística Minera de España 2001 muestra un incremento superior al 13 %, respecto al año anterior, con algo más de 306 Mt (miles de toneladas), aproximadamente, un 56 % de esta cantidad correspondió a rocas calcáreas sedimentarias (caliza, dolomía, creta), con

un 29 % de productos granulados (arenas, cantos y gravas) y el 15 % restante a rocas ígneas, metamórficas y otras (granito, basalto, cuarcita, ofitas y arenisca). La evolución de la misma en el período 1998 – 2001, desglosada por tipo de rocas extraídas (en toneladas), puede verse en la tabla siguiente.

Tabla 1. Ejemplo de la evolución de los materiales de construcción desglosada por tipos de rocas extraídas (en toneladas)

Materiales	1998	1999	2000	2001
Arena y grava	69129874	71090124	77854563	88077483
Arena sílice	962315	573338	786852	1324865
Arenisca	1653239	2081136	2168974	2618912
Basalto	1685754	2203882	3011566	7246133
Caliza	120477316	143 878 748	149 583 054	163 059 380
Creta	24014	39420	41635	41700
Cuarcita	86501	2264291	2088919	2420154
Dolomita	7234873	7413251	7666654	9034799
Fonolita	1149810	1486250	1478500	1610727
Granito	16210260	18072708	18386278	19825272
Mármol	188269	0	0	95500
Ofíta	2003620	1906924	2481142	3468840
Pizarra	1270835	1152482	1320414	2006621
Pórfido	1533554	1665862	2146729	1899520
Serpentina y Dunita	199319	202233	174000	129600
Otros	1875610	2329145	2530245	3312366
Total	225685163	112481046	122136471	143112492

Fuente: (Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2001)

Se puede apreciar que se emplean dunitas y serpentina en volúmenes discretos en España, pero tenemos que tomar en cuenta que no existe mucha presencia de estas litologías en ese país; tal es el caso del área de Bandeira - Silleda (Pontevedra), donde se explota una peridotita serpentinizada que se destina casi en su totalidad a áridos. La explotación más importante es la cantera de Campomarzo, propiedad de Explotación Minera Campomarzo S.A., que extrae y tritura unas 300 000 t/año de áridos, destinados a balasto de ferrocarril y obras públicas, los cuales pueden ser una variante de utilización para los rechazos de la planta de preparación de Moa Oriental.

Se ha reportado que en España en el municipio de Moeche, existe una explotación de serpentina (formada por metamorfismo de rocas ultrabásicas), llamada cantera Penas Albas, cuya producción (50 000 t/año), se utiliza como fundente básico en la siderurgia de Avilés. La cantera dispone de una pequeña planta de machaqueo dependiente. Según reportes en España se utiliza la serpentinita (principal componente de este rechazo) como árido para el relleno de compuertas de presas y viales de ferrocarril, que aborda el tema del empleo de un concreto que en su composición tiene serpentinita usado en las instalaciones de los reactores nucleares, pues el agua que contiene el mineral serpentino tiene la capacidad de absorber las radiaciones que se desprenden de este proceso para generar electricidad. El uso de hormigones serpentiníticos es acostumbrado para atenuar los neutrones termales, cuya temperatura oscila en el rango de 400-500 grados, según la publicación El Universal de Caracas, (2007).

El asesor en minería de Corpollanos, Simón Rodríguez, informó que la explotación racional de las rocas de serpentinita tiene un gran valor económico, pues, permite fertilizar los suelos ácidos que componen cerca del 60 % de los terrenos agrícolas de Guárico y los cuales se encuentran ubicados principalmente en el eje comprendido entre las ciudades de El Sombrero y Valle de la Pascua, así como Cabruta, al sur de esta entidad regional. La serpentinita podría sustituir a la dolomita, un carbonato de calcio con un porcentaje de magnesio que se ubica entre 18 y 19 %, el cual se ha usado como fertilizante magnesiano en la parte norte del país.

Según Gámez (2011), la oferta mundial de piedra natural, incluyendo pizarras, alcanzó en 1993 los 34,5 millones de toneladas. El primer productor es Italia, con 7,2 Mt, seguido aún por España, con algo más de 4 Mt y, a continuación, se ha incorporado China como gran productor (2,5 Mt). El gráfico que se muestra en la Figura 2, detalla las producciones, en los últimos años, de los ocho primeros países productores de piedra natural.

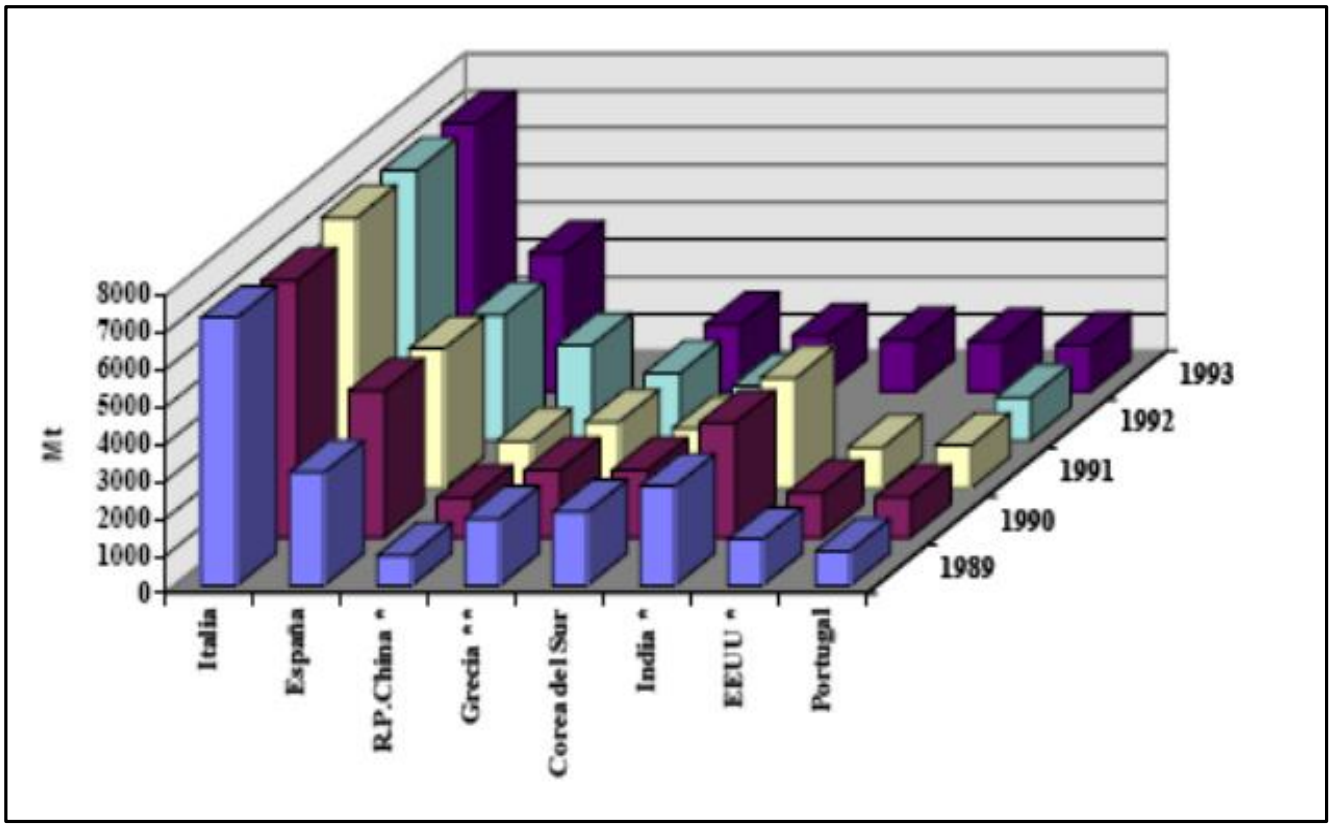


Figura 2. Principales países productores de piedra natural (basalto, caliza, granito, mármol, serpentina, dunita.)

Fuente: Tomado de (Gámez, 2011)

Los principales mercados de la piedra natural son los Estados Unidos, España, Alemania y Francia dentro de la UE, Japón y algún otro país de Extremo Oriente y los países del Golfo Pérsico. Los usos principales son para solados, revestimientos y aplacados exteriores y arte funerario.

Como resultado de la revisión del estado del arte, es posible definir que los desechos serpentiníticos de la planta de preparación de mineral de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, pueden ser utilizados, luego de la caracterización como material de construcción, como balastro, fertilizantes, fundente básico para la fundición, entre otros usos industriales.

1.2 Experiencias en la utilización de desechos serpentiníticos como materiales de construcción alternativos

Los materiales de construcción constituyen una prioridad para el municipio, provincia y país. Los áridos en Moa se necesitan para la construcción y reparación de viales, viviendas, instalaciones sociales, escuelas, etc., Rodríguez (1985) en su trabajo, "Materiales serpentiníticos en la construcción de presas de materiales locales", se encaminó a mostrar el uso del material serpentinítico en la construcción de presas locales; en la parte general del trabajo se expone el resultado de un análisis detallado de los materiales de archivo y de las investigaciones realizadas para la utilización de materiales serpentiníticos como base de las obras hidráulicas y su empleo en materiales de construcción.; este autor abordó además, la clasificación de las rocas y su composición química y mineralógica, así como los resultados de las investigaciones geológicas realizadas para el diseño de presas locales, en los cuales se han empleado materiales serpentiníticos.

Otros trabajos realizados en cuanto al uso de estos materiales se deben a la propia minería, en la construcción de escolleras y en el mejoramiento de los caminos mineros y respecto a los estudios realizados por Casals (1986), referido a las Serpentinitas en la Construcción de Obras Hidráulicas y más recientemente los de López, (2006), sobre la caracterización geológica de las materias primas minerales de los Municipios Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como materiales de construcción, en el cual se estudia y analiza la composición granulométrica del material grueso mayor de 20 mm para su posible utilización como árido en la construcción y donde el 21,92 % de las muestras está constituido totalmente por material grueso (fragmentos de serpentinitas).

Lavaut Copa, (2001) en su informe sobre la caracterización del mineral de rechazo por el Proceso de Planta de Preparación de Pulpa, hace referencia a un rechazo de serpentinitas no menor de 200 000 m^3 al año, comparativamente este rechazo posee más contaminación de material laterítico que su similar de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. La caracterización geológica de las materias primas de los municipios de Moa-Sagua de Tánamo y su empleo como áridos para la construcción, fue desarrollada por López Peña (2006), quien conformó algunos morteros con la mezcla de material de rechazo de la planta de pulpa de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A., y material de rechazo de la Empresa Ernesto Che Guevara, obteniendo resultados satisfactorios para estudios posteriores.

En su trabajo: Valoración geólogo – técnica de las perspectivas de empleo de los desechos serpentiníticos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara como materiales de construcción alternativos, Ánidos, (2007) demuestra que los ensayos realizados a los materiales serpentiníticos, muestran resultados positivos para su uso como material de construcción, específicamente como mortero para la construcción de muros portantes, vestido en interior y exterior, así como en la construcción de pasillos y pavimentos, estos últimos de manera alternativa; también refleja que el promedio de desechos serpentiníticos que generó la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara en el año 2007 fue de 7 412,56 t/mes, promedio que debe ser incluido finalmente como un impacto ambiental al entorno y en el cual el acomodo demostrado, se relaciona con el uso de este material como árido para la construcción.

Céspedes, (2007) en su trabajo, "Caracterización y perspectivas de uso del rechazo serpentiníticos de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" como árido para la construcción", realiza una evaluación de este residuo con el objetivo de utilizarlo en la industria de los materiales de construcción, en el cual fueron tomadas una serie de muestras de material serpentinítico y enviado al Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción (CTDMC), donde se realizaron una serie de ensayos destinados a conocer las propiedades físicas – mecánicas y químicas que tendría este material, teniendo en cuenta los principales aspectos que imposibilitarían su uso, donde se demuestra la factibilidad de empleo de estas rocas como áridos para obras sociales en hormigones, con valores de resistencia a la compresión de hasta 30 Mpa.

En su trabajo "Caracterización y perspectivas de uso del rechazo serpentinítico de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A. como árido", Montero (2007), realizó ensayos similares a los de Céspedes (2007), pero en este caso, el material que utilizó para los ensayos fue el rechazo serpentinítico del yacimiento de Moa Occidental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A., demostrando en sus resultados el uso de este material como árido en la confección de hormigones de hasta 20 Mpa, de resistencia.

Cardero, (2007) en su trabajo, "Estudio del proyecto de una planta procesadora de grava y arena para el municipio de Moa", establece los parámetros tecnológicos del proceso de preparación mecánica y beneficio de los materiales de construcción, al igual que se intentan diseñar algunos de los equipos componentes del proceso tecnológico de producción de áridos, donde tienen en cuenta materias primas tales como vidrio volcánico,

aluviones y materiales serpentiníticos rechazados en el proceso CARÓN de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

León (2007), en el trabajo "Propiedades de la Menas Niquelíferas del yacimiento Punta Gorda", interrelación con la cadena productiva y beneficio de las mismas, presentado y discutido en la Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, demuestra los beneficios físicos mecánicos que recibe el mineral durante los eventos que ocurren en el proceso industrial. Recoge, además, las características granulométricas y la composición química del rechazo serpentinítico para las siguientes clases de tamaño: +12 -18; +18 - 25; +25 - 50 y mayores de 50 mm.

La "Caracterización de las serpentinitas del municipio de Holguín como áridos para la construcción", fue desarrollado por Wilson (2008), que empleó muestras de los túneles populares de ese municipio; realizó una caracterización físico - mecánica y el estudio de dosificaciones, sin embargo, los resultados de las prestaciones obtenidas de los hormigones fueron bajas, siendo muy probable imputar estos resultados a que las serpentinitas estudiadas tenían indicadores deficientes, producto de la gran trituración natural del material y su estado avanzado de alteración.

Jiménez (2008) en su trabajo tenía como objetivo determinar la caracterización química, físico y mecánica del material de rechazo y establecer las características típicas de trituración del material rechazado, en las trituradoras de mandíbulas 320 x 65 mm y 150 x 75 mm, cuyos objetivos demostraron que, a través de los ensayos realizados, los desechos serpentiníticos de la Empresa Che Guevara son perspectivos para su posible uso como árido en la industria de los materiales de la construcción. En cuanto a las características típicas de las trituradoras de mandíbulas para un diámetro máximo del grano, igual a 75 mm para la trituradora TQ 320 x 65 y 40 mm para la trituradora TQ 150 x 75, permitió establecer las características de trituración del material serpentinítico, mediante la determinación del diámetro relativo para ambas trituradoras, a partir de la anchura de la boca de salida y el diámetro de cada clase de tamaño.

Pérez, (2009) realiza una investigación similar a la de Céspedes con el tema, Caracterización y evaluación del desecho serpentinítico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara como áridos para la obtención de hormigones hidráulicos, en el cual fueron tomadas una cantidad de muestras representativas del material serpentinítico y enviado al laboratorio de la ECRIN ubicado en el municipio de Moa, destinados a realizar

el complejo de ensayos para establecer las dosificaciones requeridas para obtener hormigones hidráulicos de medias prestaciones, a partir de los áridos serpentiníticos del rechazo de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara; con la dosificación 1 se demuestra que pueden obtenerse hormigones de resistencia de hasta 20 Mpa, por lo cual está dosificación es la más apropiada de las estudiadas; estos hormigones pueden ser empleados, según la norma cubana en: cimientos aislados, corridos y en prefabricados; pedestales in situ y prefabricados; muros de contención forzados y vigas de cerramientos.

Según Gámez (2011), hace aproximadamente doce años se efectuaron ensayos de diferentes tipos a los materiales serpentiníticos de las Empresas Comandante Che Guevara y Moa Nickel S.A., con la colaboración del Centro Técnico para el desarrollo de los materiales de construcción (CTDMC), perteneciente al MICONS de Ciudad de La Habana, los cuales argumentan su evaluación positiva, adicionalmente se desarrollaron ensayos a estos mismos materiales en el laboratorio de la ECRIN, ubicado en el municipio de Moa, donde se obtuvieron resultados similares.

Un aspecto importante es el hecho de que actualmente en el municipio de Moa, se cuenta con una planta de beneficio ubicada en Cayo Guam, del tipo CM-739-740, la cual brindaría las condiciones requeridas para convertirla en una planta de áridos para abastecer al municipio.

Gámez (2011)**,** utiliza las serpentinas en el proceso de hormigonado de la Termonuclear de Cienfuegos, para la protección contra neutrones, por lo que interesan materiales de elevada sección de captura que, en general, son cuerpos que poseen elementos de número atómico pequeño, siendo muy eficaces los cuerpos hidrogenados, agua, polietileno, hidruros, madera comprimida, etc. El hormigón es un buen material de protección, debido a que posee los elementos precisos para capturar los neutrones y para atenuar la radiación gamma, posee hidrógeno, agua en el gel de cemento hidratado, agua libre entre sus poros y agua de cristalización en algunos áridos, especialmente si éstos son pesados seleccionados con este fin, pues al mismo tiempo que actúan frenando los neutrones, al poseer calcio, silicio e hierro, pueden absorber también las radiaciones gamma, (pág. 32).

Según Ramírez y otros (2010) en su trabajo “Una alternativa para utilizar las concreciones ferruginosas, del yacimiento Moa occidental”, plantea que el hierro presente en estos depósitos está en forma de óxidos, como se demostró al realizar el estudio de DRX que arrojó como resultado la presencia de goethita (α-FeO.OH) y maghemita (γ-Fe_2O_3), con

discretos grados de cristalinidad, lo cual nos confirma la presencia de forma discreta de estos componentes en el rechazo serpentinítico de la Empresa Pedro Soto Alba.

Vijaya Kattel (2010) en su trabajo de diploma "Valoración técnica de los desechos serpentiníticos de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa-Nickel SA., como material de construcción alternativo", demuestra que el empleo de estos desechos es factible en la fabricación de bloques huecos y morteros para la construcción, para ello se realizaron varios ensayos que comparando los resultados con las normas técnicas para cada uno de los elementos elaborados con 100 % de rechazo, validaron la propuesta del autor al cumplir con las exigencias técnicas.

Alíen Céspedes, (2010) en su trabajo "Caracterización y perspectivas de uso de los desechos sólidos de la planta de pulpa de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A. como árido para la construcción", manifiesta que los desechos sólidos de esta industria pueden ser empleados como áridos para la construcción, ejemplo: fabricación de bloques huecos de hormigón, (pág. 33). Este resultado se fundamenta en el uso de técnicas y materiales constructivos de mayor racionalidad económica, que se están utilizando en la construcción de viviendas y obras sociales.

Resumiendo, las informaciones obtenidas, nos indican que es posible recomendar el uso integral de los residuos mineros, aplicando las nuevas tendencias en el tratamiento y uso sostenible de estas materias primas, como es el caso del rechazo estudiado en esta investigación, que luego de su caracterización, será posible la toma de decisiones sobre sus posibles usos industriales.

1.3 Conclusiones del Capítulo I

1. La serpentina se caracteriza por presentar un color verde oscuro y negro, con una textura laminar, con frecuentes manchas, denominadas zonaciones formadas por la presencia de mayor cantidad de otros elementos, especialmente piroxenos.
2. Los rechazos serpentiníticos están constituidos mayoritariamente por minerales de serpentina; principalmente antigorita, lizardita y magnetita; de forma accesoria, aparece serpentina en vetas crisotilo, y a menudo también se encuentra amianto, talco, garnierita, brucita y clorita, en menor medida, magnesita, dolomita o calcita.
3. Las investigaciones desarrolladas sobre el tratamiento y uso de los rechazos serpentiníticos, facilitaron la caracterización técnica y la validación de los desechos

serpentiníticos como materiales de construcción alternativos, tanto en la fabricación de obras hidráulicas, como en morteros para la construcción, bloques de hormigón, pavimentos, entre otros usos en Cuba y el mundo.

4. A pesar de que se han realizado diferentes investigaciones con los rechazos serpentiníticos en Cuba, y específicamente en Moa, aún se desconocen las principales características químicas, mineralógicas, y térmicas, que presenta estos pasivos ambientales, que permitan tomar decisiones sobre sus posibles usos industriales.
5. No existen antecedentes de estudios investigativos realizados con el rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental, lo que limita la toma de decisiones sobre sus posibles usos industriales.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presentan los materiales y la metodología seguida para realizar la caracterización de los desechos serpentiníticos, generados en la planta de preparación de mineral de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A. y se realiza una caracterización geológica del yacimiento Moa Oriental, además se realiza un estudio de las principales propiedades físicas, químicas, térmicas y mineralógicas de estos desechos serpentiníticos, lo que permitirá tomar decisiones respecto a este pasivo ambiental y sus posibles usos, principalmente, como material alternativo para la construcción.

2.1 Características geológicas del yacimiento de Moa Oriental

Este yacimiento por su naturaleza es un depósito de carácter residual, producto a la meteorización de las rocas del basamento, según Montero (2007), en este proceso de transformación han desempeñado un papel fundamental los agentes atmosféricos, hídricos y biogenéticos, los que dieron lugar al surgimiento de nuevas rocas (perfil de corteza de intemperismo) con textura, estructura y composición mineral y química propia; el basamento de las áreas ocupadas por el yacimiento anteriormente mencionado, está compuesto mayormente por harzburgitas serpentinizadas, las cuales representan prácticamente más del 95 %.

La superficie de las rocas, objeto de esta investigación, está ampliamente desarrollada por la corteza de intemperismo laterítico, por lo que a continuación se resumen las principales características de este pasivo ambiental, que contribuyen a explicar sus características físico-químicas, que posteriormente contribuirán a la propuesta de sus posibles usos industriales.

Características Tectónicas

Según López Peña (2006), los yacimientos Moa - Oriental y Camarioca - Norte se encuentran bajo la influencia directa de una gran falla de primer orden, que sigue la dirección del Río Moa, a partir de ella, se desarrolla otra estructura de segundo orden que sigue la dirección del arroyo los Lirios; ambas estructuras constituyen los límites del yacimiento por el Oeste y el Este respectivamente. A partir de estas dos grandes estructuras se desarrollan una red de fracturas en toda el área en forma de plumaje, las cuales tienen dirección predominante Noreste-Suroeste y Noroeste-Sureste.

Las características antes mencionadas según Gámez (2011), fueron determinadas sobre la base de la interpretación de las fotos aéreas, que a partir de las estructuras de primero y segundo orden, se desarrolla en toda el área una red de estructuras en forma de plumaje, las cuales tienen dirección predominante Noreste-Noroeste, donde los elementos tectónicos tienen carácter pre- mineral, concluyéndose que, tomando como base el grado de conservación de los cuerpos minerales, estos se hubieran desmembrado y destruido por los agentes erosivos. Estas características confirman el estado de alteración que poseen los desechos serpentiníticos del yacimiento Moa Oriental, y dentro de ellos los rechazos de la planta de preparación de mineral, estudiados en esta investigación.

Características Geomorfológicas

El yacimiento Moa Oriental, se encuentra ubicado dentro del bloque morfotectónico El Toldo, según Montero (2007), siendo este el de máxima extensión en la región y correspondiéndole también los máximos valores de levantamiento relativo. Dicho bloque litológicamente está conformado en superficie por las rocas máficas y ultramáficas de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas, específicamente el área ocupada por el yacimiento Moa Oriental, presenta una serie de características geomorfológicas que han permitido el desarrollo y conservación de una potente corteza de meteorización, representada por un manto esencialmente laterítico ligeramente continuo, que cubre una superficie de aproximadamente 8,2 km^2, área que enmarca la zona donde fueron tomadas las muestras de este pasivo, para el desarrollo de la investigación.

Características rocosas del substrato

Las litologías a partir de las cuales se formaron las potentes cortezas de intemperismo que hoy aparecen, están constituidas, fundamentalmente, por harzburgitas serpentinizadas y subordinadamente gabros y dunita según Alberto Gámez (2011), las primeras aparecen prácticamente en toda el área de estudio y microscópicamente se caracteriza por ser rocas densas y masivas de granos finos a medios, encontrándose por lo general agrietadas en diferentes grados. El color de la roca fresca es de gris verdoso a gris oscuro, en ocasiones hasta negro, la masa volumétrica de esta oscila entre 2,40 y 2,60 g/cm^3, en su composición mineral se encuentran los del grupo de la serpentinita (Crisotilo, Lizardita, Antigorita, etc.), cuyo contenido anteriormente alcanza el 60 %.

Los minerales serpentiníticos de los yacimientos Moa Oriental y Occidental, están compuestos, principalmente, por harzburgitas serpentinizadas, en gran parte del basamento de estos yacimientos, como se muestra en la tabla 2.

Los minerales primaros a veces representan entre el 5 y 30 %, en raros casos pueden alcanzar hasta 50 %. En pequeñas cantidades aparecen en su composición cromo espinelas y magnetita en forma de granos independientes y pequeños agregados, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 2. Composición química (%) de las harzburgitas serpentinizadas del basamento de los yacimientos de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa.

Sector	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**FeO**	**CaO**	**MgO**	**MnO**	**Cr_2O_3**	**NiO**	**Otros**
Norte	36,93	0,81	9,05	1,92	0,45	33,56	0,15	0,20	0,32	16,61
Centro	41,07	0,40	6,95	1,20	0,31	36,15	0,09	0,26	0,28	13,29
Sur	39,22	0,68	7,20	1,41	0,39	35,48	0,10	0,31	0,38	14,83

Fuente: Tomado de (Gámez, 2011)

De acuerdo con el informe de Gámez, (2011), los gabroides que se encontraron en el basamento del yacimiento macroscópicamente se caracterizan por presentar una estructura masiva, siendo rocas densas y compactas. El color de la roca fresca es jaspeado y gris verdoso, con tonalidades claras y oscuras en relación directa con su composición mineralógica.

Las tonalidades de color de los rechazos serpentiníticos del yacimiento de Moa Oriental también son rocas densas y compactas, sus tonalidades varían de claras a más fuertes de acuerdo al grado de humedad y la composición mineralógica que posean.

Según Gámez (2011), en su informe plantea que en estos yacimientos predominan las cortezas de intemperismo bien desarrolladas (in situ) con horizontes bastante estables y con una variabilidad relativamente alta de los horizontes serpentiníticos y en zonas de pendientes más fuertes y de más rápido intercambio de las aguas, donde se observa una reducción en el perfil litológico de intemperismo, apareciendo perfiles de estructuras reducidas.

Todos estos elementos bibliográficos, permiten confirmar que los rechazos serpentiníticos del yacimiento Moa Oriental, son rocas que pertenecen a la corteza de intemperismo, con un elevado grado de alteración geológica, que provoca que sus mayores contenidos sean de

silicio y magnesio, con menores valores de níquel y cobalto, lo que las convierte en un pasivo ambiental, no admitido por el proceso metalúrgico de la Empresa Pedro Sotto Alba. De ahí la necesidad de estudiar sus principales características, con vistas a tomar decisiones sobre sus posibles usos industriales.

2.2 Preparación de las muestras

Para el desarrollo de esta investigación, se tomaron muestras de rechazos serpentiníticos del yacimiento de Moa Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A., almacenadas en áreas de la planta de preparación de mineral del yacimiento Moa Oriental, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3. Muestras del rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental

Se extrajeron del área de estudio las muestras necesarias para su posterior análisis, conformándose así una muestra compósito representativa de los rechazos serpentiníticos de Moa Oriental, con una masa total de 23 kg.

Luego la muestra fue trasladada al laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, donde se realizaron los análisis a las muestras con una primera etapa de trituración manual (ver figura 4), una vez reducido el tamaño de las muestras se pasó a una segunda etapa de trituración, donde se utilizó un triturador de mandíbulas (ver figura 5) con un diámetro de entrada de 20 mm y uno de salida de 6 mm. Posteriormente la muestra fue homogeneizada y cuarteada por los métodos de cono y anillo con el objetivo

de que fuera lo más representativa posible y los análisis posteriores de caracterización las muestras de trabajo arrojaran los resultados lo más exacto posible.

Figura 4. Maso utilizado en la primera etapa de reducción de tamaño de la muestra

Una vez realizado el método de homogenización y cuarteo, se tomó una muestra testigo con una masa de 12 kg, para que en caso necesario usarla, por cualquier problema que surgiera con la muestra de trabajo. Con este última, se realizaron tres réplicas experimentales, con el pesaje a estas, que resultaron identificadas como, réplica (R) = 3,8 kg; R_2= 3,7 kg y R_3= 3,6 kg.

Figura 5. Trituradora de mandíbulas utilizada en la segunda etapa de trituración

2.3 Análisis granulométrico

Luego de homogenizada y cuarteada la muestra, por los métodos de cono y anillo, se logró una buena homogeneización de la misma, comprobada posteriormente durante el desarrollo de los análisis granulométricos y químicos.

El procedimiento empleado para la caracterización granulométrica consistió en el desarrollo de un movimiento lateral y vertical del tamiz, acompañado de una acción de sacudida, de manera que la muestra se moviera continuamente sobre la superficie de los tamices, con un tiempo de tamizado de 15 minutos. Para realizar el análisis granulométrico se utilizó la tamizadora eléctrica mostrada en la figura 6.

Figura 6. Tamizadora eléctrica empleada en los análisis granulométricos.

Para determinar la composición granulométrica del material se realizó el tamizado por vía seca, para un espectro de diámetro de partículas entre 6 y 0,074 mm. Los tamices fueron escogidos según la serie de Taylor $\sqrt{2}$, la muestra de material se separó por tamaños, usando para ello la siguiente serie de tamices (6 mm; 4 mm; 1,98 mm; 0,35 mm; 0,10 mm; 0,088 mm; 0,074 mm), de acuerdo con las experiencias de trabajos anteriores.

2.4 Equipamiento y técnicas utilizadas durante la caracterización química, mineralógica y térmica del pasivo ambiental estudiado

Se conformó una muestra entera o de cabeza para el análisis químico, térmico y mineralógico, con un diámetro menor a los 0,074 mm. A continuación, se detallan las características de los equipos y técnicas empleadas, en los diferentes laboratorios que trabajaron en este proceso de caracterización.

2.4.1 Análisis químicos

Para realizar el análisis químico se envió una muestra representativa a los laboratorios de análisis químico del Centro de Investigaciones y Desarrollo del Níquel (CEDINIQ), en Moa, con el objetivo de determinar los principales elementos químicos que conforman al rechazo estudiado. Para ello se utilizaron los métodos de Espectrofotometría de Absorción Atómica y Volumetría, empleando el equipo: ATI UNICAM SOLAR 929 (DOBLE RAYO DE LUZ) como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.

El procedimiento técnico de ensayo empleado en el CEDINIQ, para la determinación de la composición química de la muestra fue el: UPL - PT – A-26.

2.4.2 Análisis mineralógicos

El análisis mineralógico se realizó en el laboratorio de Metalurgia y Materiales del Instituto Politécnico Nacional de México (IPN) empleando un Difractómetro de rayos-X Bruker AXS D8 Focus (ver figura 8) con las características técnicas que se muestran más abajo.

Figura 8. Difractómetro de Rayos-X Bruker AXS D8 Focus, empleado para los análisis mineralógicos.

Características técnicas del equipo de DRx

Óptica primaria:

- Voltaje: 35 kV
- Corriente: 25 mA
- Tubo Cu Kα
- Slit: 0.6 mm.

Óptica secundaria:

- Detector: Lynxeye
- Scan type: Continous.
- Slit: 2.5 mm.
- Cu-Absorber: 0.05 mm

2.4.3 Análisis térmicos

Los análisis térmicos se realizaron en el Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), con el objetivo de determinar el comportamiento térmico del pasivo ambiental estudiado. Los termogramas, se obtuvieron en un equipo de la firma alemana *NETZSCH*, modelo *STA 449 F3*, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Equipo *NETZSCH*, utilizado para realizar el análisis térmico.

Los parámetros de operación de este equipo se pueden apreciar en la tabla siguiente.

Tabla 3. Datos técnicos del equipo de análisis térmico, *STA 449 F3*.

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 ºC)
Gas utilizado en la cámara de calentamiento	Ar
Flujo del gas protector de la termo balanza	20,0 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10,0 ºC /min
Sensibilidad de la termo balanza	0,001 mg – 35.0 g
Sensibilidad de las curvas	-0,001 - 5000 µV/mg
Tiempo total de medición	1h:37 min
Rango de temperatura de trabajo	27-1000 ºC

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

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 termograma**s** DTG de las velocidades de cambio de masa (dm/dt), que se verifican en el material.

2.5 Métodos de investigación empleados

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron diferentes métodos tanto teóricos como empíricos, los cuales se relacionan a continuación:

Métodos teóricos:

Análisis y síntesis: se utiliza, durante todo el proceso investigativo, para el estudio y procesamiento de la información contenida en las fuentes bibliográficas, para caracterizar los desechos serpentiníticos de la industria y llegar a conclusiones.

Histórico-lógico: para determinar las tendencias que se manifiestan en el uso de los minerales serpentiníticos como materiales de construcción en Cuba y el mundo.

Inducción-deducción: para determinar las causas que provocan el problema científico y su posible solución.

Hipotético – deductivo: para enfocar el problema científico, la verificación de la hipótesis y el establecimiento de predicciones teóricas-prácticas.

Métodos prácticos:

Fotografía laboral: clasificación granulométrica del material en la planta de beneficio.

Experimental: método para valorar, preliminarmente, la composición química, física, mineralógica y térmica de los desechos serpentiníticos, y la factibilidad práctica de su uso como material alternativo de construcción.

2.6 Conclusiones del Capítulo II

1. La caracterización geológica del yacimiento Moa Oriental, realizada a través de las características estratigráficas, geomorfológicas y rocosas del terreno, demuestran que los rechazos serpentiníticos de esta zona, están vinculados a los grados de intemperismo o meteorización que poseen los minerales de la región de Moa-Baracoa.
2. Las vías de selección y preparación de la muestra estuvieron acordes con la metodología existente, garantizando la selección adecuada de las fracciones granulométricas y la confiabilidad de los resultados de la caracterización realizada.
3. Los métodos y técnicas aplicados en la determinación de las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del material, se corresponden con las utilizadas para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Este capítulo está destinado al análisis y discusión de los resultados de la caracterización física, química, térmica y mineralógica del rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A., así como la comparación de los resultados obtenidos con resultados de trabajos anteriormente realizados, con el objetivo de tomar decisiones sobre los posibles usos de este material a escala industrial.

3.1 Resultados de los análisis granulométricos

La composición granulométrica del pasivo ambiental Rechazo Serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A, se muestra en la tabla 4, donde se aprecia la caracterización física del material, para un espectro de diámetro de partículas entre 6 y 0,074 mm, arrojó como principales resultados, el predominio de las fracciones – 4 + 0,35 mm, luego del proceso de trituración, sin embargo, de forma natural sus tamaños superan los 15 mm, como promedio.

Las fracciones de – 1,98 +0,35 mm, son las que normalmente se emplean como áridos para la conformación de morteros utilizados en la construcción.

Tabla 4. Características granulométricas, retenido y cernido, del pasivo ambiental, rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental.

Tamices (mm)	**Replica1 (g)**	**Replica 2 (g)**	**Replica 3 (g)**	**Promedio (%)**	**Salida (%)**	**Retenido (%)**	**Cernido (%)**
- 0,074	120	118	119,6	119,2	3,21	3,21	100
- 0,088 +0,074	136,5	137,8	68,4	114,2	3,072	6,282	96,79
- 0,10 +0,088	31,8	35,6	16,5	27,97	0,752	7,034	93,72
- 0,35 +0,10	368,7	439,8	320	376,2	10,12	17,15	92,97
- 1,98 +0,35	1200	1200	1200	1200	32,27	49,42	82,85
- 4 +1,98	1400	1100	1200	1200	32,27	81,7	50,58
- 6 +4	333,6	369,4	329,8	344,3	9,259	90,95	18,31
+ 6	235,4	435,1	339,1	336,5	9,051	100	9,05
Total (g)	**3826**	**3736**	**3593**	**3718**	**100**	**-**	**0,00**
Total (kg)	**3,8**	**3,7**	**3,6**	**3,7**	**-**	**-**	**-**

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

En la figura 10, se muestran las características granulométricas del rechazo serpentinítico, según el porciento de salida de cada clase con respecto al diámetro de las partículas, en mm.

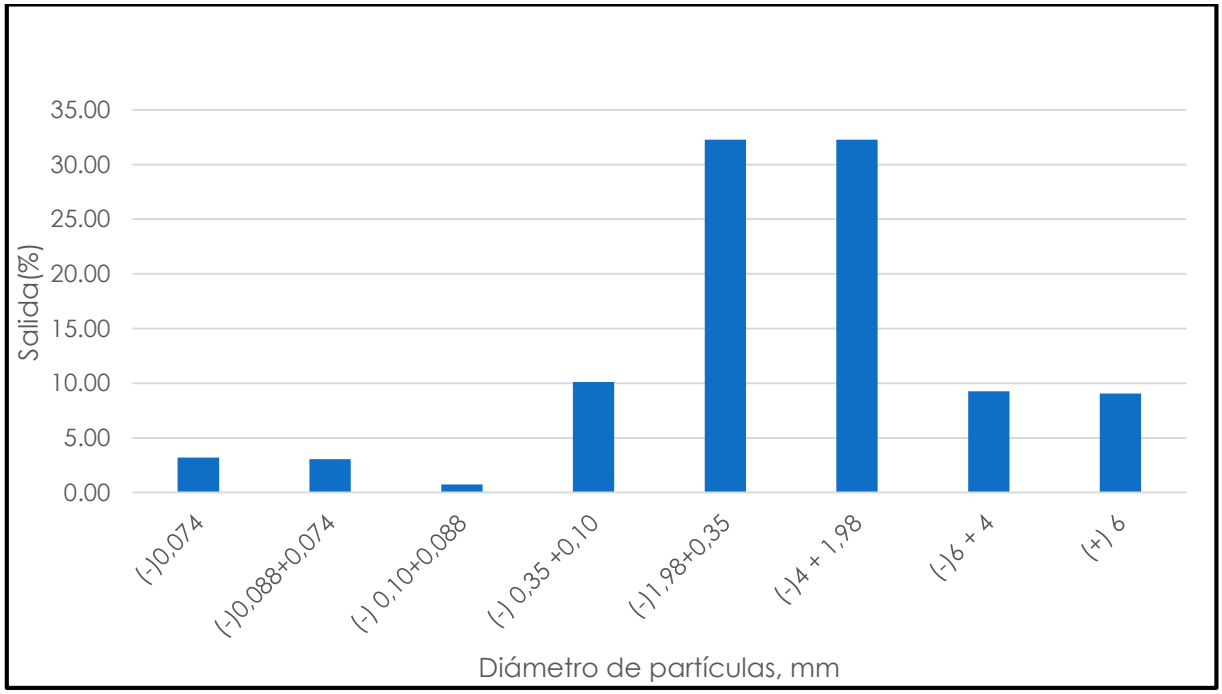


Figura 10. Características granulométricas del rechazo serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental.

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

La composición granulométrica de las muestras, representada en la figura 10, evidencia un predominio de las partículas de - 4 +1,98 y - 1,98 +0,35 mm, cada uno ocupando un 32,27 % del peso de la muestra, lo que significa que estas partículas agrupan el 64,54 % del peso de la muestra de este pasivo ambiental.

Como resultado de este estudio se distinguen tres grupos granulométricos, fundamentales, una granulometría fina, menor de 0,088 mm, que representa el 3,072 % en peso de la muestra y es utilizada como fertilizante según experiencias internacionales; un segundo grupo granulométrico intermedio, constituido por las fracciones mayores de 0,084 mm y menores de 4 mm, que representan el 32,27 % , las cuales son utilizadas como árido en la construcción de morteros para la construcción, y un tercer grupo de fracciones más gruesa, mayores de 4mm, que representan el 9,25 % en peso de la muestra.

Las fracciones gruesas se utilizan como áridos para la construcción de hormigones y pavimentos, así como para balastro en los ferrocarriles, que unido a los usos de las fracciones finas, constituyen una alternativa de uso del Pasivo Ambiental estudiado.

3.2 Resultados de los análisis químicos

En la tabla 5 se muestra la composición química promedio, en %, del rechazo serpentinítico estudiado, caracterizado por el predominio de SiO_2 y MgO, que indican la presencia de minerales de serpentina en este tipo de residual.

Tabla 5. Composición química promedio (%) del rechazo serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental.

Muestra	**NiO**	**CoO**	**MnO**	**Al_2O_3**	**Cr_2O_3**	**SiO_2**	**MgO**	**Fe 2+**	**Fe 3+**
Rechazo serpentinítico	0,574	0,02	1,64	0,86	0,621	29,16	33,201	2,02	3,34

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas.

Los rechazos serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental en su composición química, presentan, fundamentalmente, óxido de magnesio con 33,2 % de contenido, coincidiendo con otros trabajos anteriores realizados con los rechazos serpentiníticos del Yacimiento de Moa Occidental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A, tales como Eduardo Montero (2007) y Alberto Gámez (2011), que emplearon este rechazo como material de construcción alternativo.

Como segundo elemento mayoritario se encuentra el óxido de silicio, con un contenido promedio de 29,16 %, este forma parte de los minerales arcillosos junto a los óxidos de magnesio. Se demostró también la presencia de óxido hierro (Fe) en la muestra con un contenido de 5,36 % y por consiguiente de goethita, fase mineralógica donde se encuentran los minerales de hierro.

De forma discreta, se presentan en la composición química del rechazo serpentinítico, óxido de níquel con un 0,57 % de contenido, óxido de cobalto con un 0,02 %, siendo este el compuesto con menor presencia en el mineral serpentina, así como óxido de cromo y aluminio, con contenidos respectivos de 0,621 y 0,86 %.

Podemos concluir a partir del resultado del análisis químico que los rechazos serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba

Moa Nickel SA, están constituidos en su mayoría por dióxido de silicio y óxido de magnesio(II), los cuales forman parte de los minerales arcillosos, que son muy utilizados en la industria de la construcción; y con un menor contenido los demás elementos en forma de óxidos que componen este rechazo son: los óxidos de hierro(II y III), el óxido de níquel(II), el óxido de cobalto(II), óxido de aluminio y cromo(III), coincidiendo estos resultados, con los de trabajos anteriormente realizados con rechazos de la mina de Moa Occidental.

3.3 Resultados de los análisis mineralógicos

El análisis mineralógico permitió determinar las fases mineralógicas presentes en este pasivo ambiental, donde sobresale la presencia de minerales de serpentina y arcillas, principalmente, característicos de las rocas y minerales de la región de Moa-Baracoa, como se aprecia en la figura siguiente.

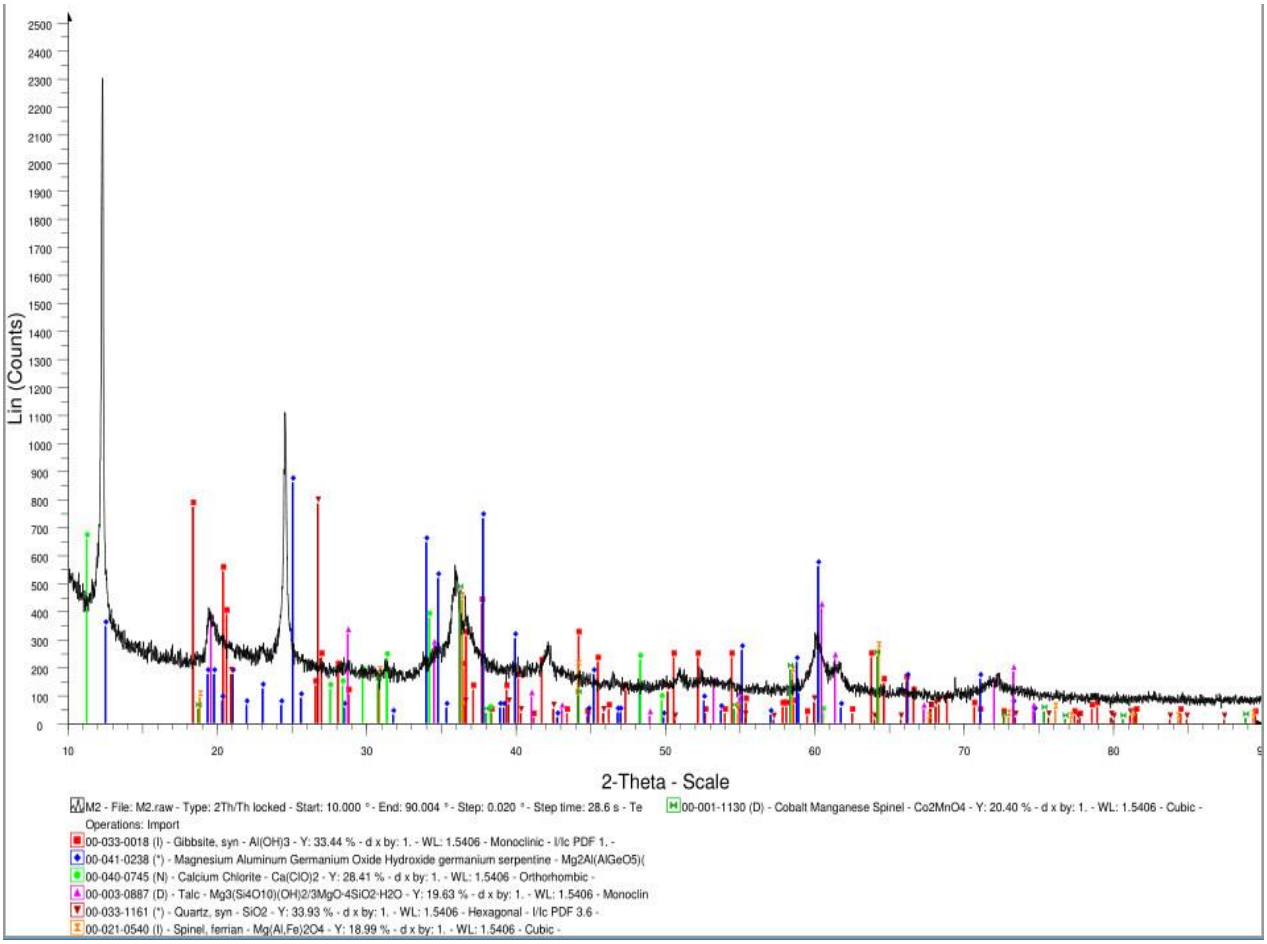


Figura 11. Difractograma de los Rechazos Serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental

Como se observa en el difractograma anterior, las fases mineralógicas presentes en la muestra de los rechazos serpentiníticos, son: gibbsita (■) ($Al(OH)_3$), cuarzo (▼) (SiO_2), clorito de calcio (●) ($Ca(ClO)_2$), talco (▲) ($Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2/3MgO{\cdot}4SiO_2{\cdot}H_2O$), espinelas de hierro (⧗) ($Mg(Al,Fe)_2O_4$) y espinelas de manganeso y cobalto (⋈) (Co_2MnO_4).

En la tabla 6 se muestra la composición mineralógica semicuantitativa del Rechazo Serpentinítico, expresada en porciento (%).

Tabla 6. Composición mineralógica semicuantitativa del Rechazo Serpentinítico del Yacimiento Moa Oriental

Fases mineralógicas	**Fórmula química**	**Contenido de las fases mineralógicas (%)**
Gibbsita	$Al(OH)_3$	33,44
Clorito de calcio	$Ca(ClO)_2$	28.41
Talco	$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2/3MgO{\cdot}4SiO_2{\cdot}H_2O$	19.63
Cuarzo	SiO_2	33.93
Espinela de Hierro	$Mg(Al,Fe)_2O_4$	18.99
Espinelas de Cobalto y Manganeso	Co_2MnO_4	20.40

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

Como resultado de los estudios mineralógicos, se pudo resumir que las principales fases mineralógicas presentes en los Rechazos Serpentiníticos, corresponden a los minerales de serpentina con más del 48 %, seguido del cuarzo con 33.93 % y a la gibbsita con un contenido de 33,44 %. Mientras que las espinelas de hierro representan el 19 %, en tanto las espinelas de cobalto y manganeso poseen el 20,4 %.

3.4 Resultados de los análisis térmicos

El comportamiento térmico de este pasivo ambiental, permitió la determinación del mecanismo de descomposición de este material, así como las pérdidas de masa y los

principales efectos que se verifican con el incremento de la temperatura, como se observa en la siguiente figura

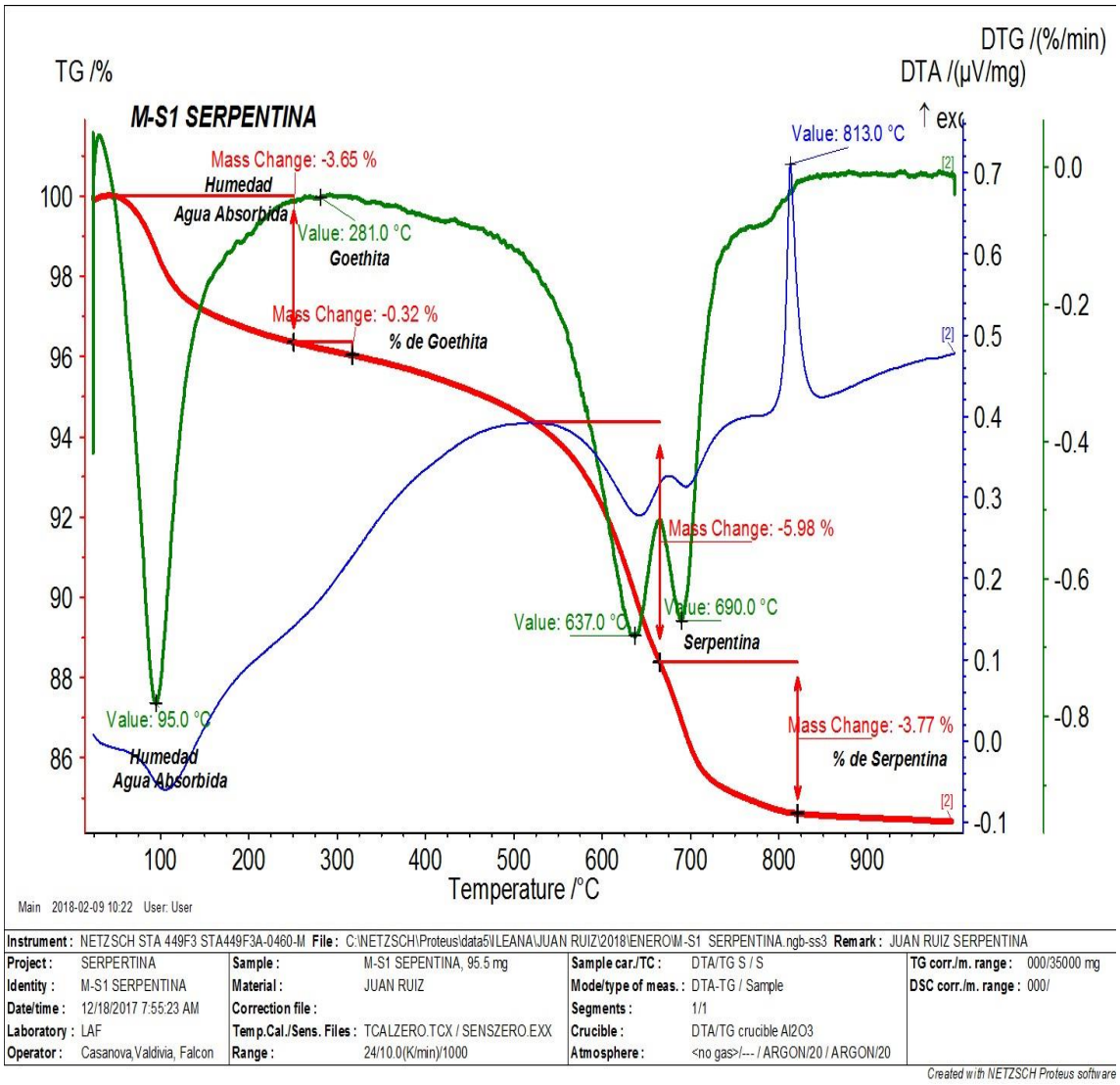


Figura 12. Termograma del rechazo serpentinítico estudiado.

El mecanismo de descomposición térmica de los minerales de serpentina o de los rechazos, de la planta de preparación de mineral de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A., está asociado fundamentalmente a muestras de serpentina, definiéndose las etapas de este mecanismo como las siguientes:

Primer etapa o escalón: En el intervalo, 50 – 240 ºC, ocurre el primer efecto endotérmico, con una pérdida de masa de 3,65 %, que alcanza su mayor rapidez a los 95 ºC, valor máximo del efecto ocurrido, lo cual está asociado a la eliminación del agua higroscópica presente en este material, y donde la goethita es la más involucrada en este proceso, y

confirma la presencia de mineral de hierro en este pasivo, cuya presencia es de 3 %, como se muestra en la tabla 7.

Segunda etapa, que es el más importante y prolongado, se subdivide en dos escalones fundamentales:

- Primeramente, tiene lugar en el intervalo de temperatura entre 510 ºC – 650 ºC, donde se verifica un efecto endotérmico, con un pico máximo a los 637 ºC, con una pérdida de masa total equivalente a 5,98 %, todo lo cual está asociado a la eliminación del agua interna o estructural que tienen los minerales de serpentina, en este caso la lizardita; y el crisotilo,
- El segundo escalón ocurre entre 650 y 840 ºC, con dos efectos importantes, uno endotérmico que tiene un pico máximo a los 690 ºC, y otro exotérmico con un efecto máximo a los 813 ºC, que en conjunto tienen una pérdida de masa de 3,77 %, todo lo cual está asociado al inicio y culminación del proceso de recristalización de los minerales de serpentina, que representan un total de 75 % dentro de este rechazo.

En conjunto esta segunda etapa, está vinculada a la reestructuración o recristalización de los minerales de serpentina, con una pérdida de masa total de 9,65 %, proceso muy característico de los minerales de la región de Moa-Baracoa, asociados al olivino presente en las rocas madres que conforman a estos yacimientos, lo que confirma los resultados de Pons Herrera y otros, (2018).

En la siguiente tabla se reportan los valores de la caracterización de las fases semicuantitativa, presentes en este pasivo ambiental.

Tabla 7. Principales fases semicuantitativas de los rechazos serpentiníticos del Yacimiento de Moa Oriental.

MUESTRA	**GOETHITA (%)**	***SERPENTINA LIZARDITA (%)***	***SERPENTINA CRISOTILO (%)***	**TOTAL, DE SERPENTINA (%)**
RECHAZO SERPENTINITICO	**3**	**46**	**29**	**75**

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas.

3.5 Análisis comparativo entre los resultados obtenidos en el presente proyecto investigativo con respecto a otros anteriormente realizados

Partiendo de los resultados obtenidos en trabajos investigativos anteriormente realizados acerca de los rechazos serpentiníticos del Yacimiento Moa Occidental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A, tales como los de Gámez (2011) y Eduardo Montero (2007), se procede a realizar un análisis comparativo entre estos trabajos y el presente, en cuanto a las principales características químicas, mineralógicas y térmicas.

3.5.1 Comparación de las características químicas de los rechazos serpentiníticos

Según los resultados obtenidos en los trabajos investigativos anteriormente citados, acerca de los rechazos serpentiníticos del Yacimiento Moa Occidental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A, el análisis comparativo con respecto a los resultados del análisis químico se muestra de manera resumida en la tabla 8.

Tabla 8. Composición química (en %), de los rechazos serpentiníticos

Pasivos	**Contenido promedio de los compuesto químicos, (%)**							
Muestras de Rechazos Serpentiníticos	**NiO**	**CoO**	**Fe_2O_3**	**Al_2O_3**	**Cr_2O_3**	**SiO_2**	**MgO**	**Fuentes**
Yacimiento Moa Occidental	0,40	0,02	8,05	0,58	0,25	38,08	21,75	Eduardo Montero (2007)
Yacimientos de la Empresa Ernesto Che Guevara	0,32	0,03	8,9	0,9	0,53	39,4	36,6	Anthony Ganesh (2014)
Yacimiento Moa Oriental	0,574	0,02	5,36	0,86	0,621	29,16	33,201	Serguey Herrera (2018)

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

Como se puede observar en esta tabla, el contenido de óxido de silicio varía de 29,16 a 39 % siendo este el componente de mayor contenido presente en los rechazos serpentiníticos de la región de Moa-Baracoa; de acuerdo con la tabla anterior, el contenido de silicio no posee una gran variación entre los yacimientos Moa Occidental y Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A y los Yacimientos de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Con respecto al óxido de magnesio el cual es el elemento mayoritario en el analizado tampoco se observa una variación considerable entre los yacimientos comparados, puesto que en el trabajo realizado por Anthony Ganesh el elemento presenta un contenido de 36,6 % en el rechazo analizado de los Yacimientos de la Empresa Ernesto Che Guevara, con los que se han hecho ensayos en la construcción de morteros y hormigones, mientras que en los Yacimientos Moa Occidental y Moa Oriental, los contenidos de este elemento en el rechazo varían muy poco, teniendo mayor contenido con un 33 %, el yacimiento Moa Oriental.

El hierro, como tercer elemento de mayor contenido en el rechazo serpentinítico de Moa Oriental, está presente de forma minoritaria con un 5,36 % con respecto a los Yacimientos de la Empresa Ernesto Che Guevara y al Yacimiento Moa Occidental, de la Empresa Pedro Soto Alba los cuales presentan contenidos de 8,5 y 8,9 %, respectivamente, con poca variación como se puede observar en la tabla. Otros elementos presentes en este rechazo, pero con contenidos bastante discretos y variaciones muy leves entre ellos son el níquel, el cobalto, el aluminio y el cromo.

A modo de resumen se puede concluir, que los rechazos serpentiníticos de Moa Occidental y Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A., tienen una composición química bastante similar, lo que significa que la variación en el contenido promedio de los componentes de un yacimiento a otro, es bastante discreta.

3.5.2 Comparación de las características mineralógicas de los rechazos serpentiníticos

En la tabla 9, se muestran los resultados comparativos de la caracterización mineralógica de los trabajos investigativos realizados acerca de los rechazos serpentiníticos del Yacimiento Moa Occidental, con respecto los rechazos serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental.

Tabla 9. Comparación de las fases mineralógicas de los rechazos serpentiníticos

Yacimiento/ Fuente	**Gibbsita (%)**	**Minerales de serpentina(%)**	**Minerales arcillosos(%)**	**Goethita (%)**
Moa Occidental (Montero,2007)	11,11	73,94	19,57	7,80
Moa Oriental(Herrera,2018)	33,44	75	19,63	3

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

Como se puede observar en la tabla 9, las fases mineralógicas presentes en los rechazos serpentiníticos de los Yacimientos de Moa Occidental y Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A, tienen un predominio en cuanto a los minerales de serpentina, los cuales representan de un 73 a un 75 % de contenido de fase en el rechazo con un predominio en el Yacimiento de Moa Oriental como se puede apreciar en la tabla. Mientras que en los minerales arcillosos casi no hay variación alguna de un yacimiento a otro, entre los contenidos de fases, puesto a que estos oscilan entre 19,57 y 19,63 %, respectivamente, observándose una diferencia muy discreta de 0,6 % de contenido de fase.

Por otra parte, la diferencia entre estos yacimientos se observa en cuanto al contenido de gibbsita, la cual varía de un yacimiento a otro con una diferencia de contenido de 22,33 %, la cual es bastante significativa. Mientras el contenido de minerales de hierro presentes en la fase goethita en ambos yacimientos varía de 3 a 7,8 % con predominio en el Yacimiento Moa Occidental.

A modo de resumen, la fase mineralógica predominante en ambos yasimientos son los minerales de serpentina, con muy poca variación de un yacimiento a otro, con posibles usos como áridos para la construcción. Por otra parte también se presenta una variación muy leve de un yacimiento a otro, en cuanto a los minerales arcillosos, los cuales forman parte importante a la hora de utilizar el rechazo estudiado como material de construcción. La variación de la goethita es leve, y aunque en la gibbsita se encuentra la diferencia entre estos yacimientos, esto no afecta de forma significativa el gran parecido existente en cuanto a las fases presentes en el rechazo estudiado de ambos yacimientos.

3.5.3 Comparación de las características térmicas de los rechazos serpentiníticos

En la tabla 10, se muestran las comparaciones entre el comportamiento térmico de los Rechazos Serpentiníticos del Yacimiento Yagrumaje, los basamentos del Yacimiento Moa Oriental, y el Yacimiento Moa Oriental.

En la figura 13 se muestran los termogramas de los basamentos de Moa Oriental; Yacimiento Moa Oriental y del Yacimiento Yagrumaje a partir de los cuales se realizó la tabla comparativa 10.

Como se puede apreciar en la tabla comparativa las características térmicas de los rechazos serpentiníticos, no presentan gran variación a pesar de ser minerales de distintos yacimientos. Los picos endotérmicos oscilan entre los 50 y 300 ºC para los minerales de serpentina de los tres yacimientos y todos están relacionados con la perdida de humedad hidroscópica a temperaturas similares, mostrando también la presencia de minerales de hierro en la fase mineralógica de goethita.

Para el segundo efecto endotérmico se observa como este oscila entre los 510 y 840 ºC para los tres termogramas analizados están relacionados con la pérdida del agua estructural de los minerales de serpentina, con predominio de la lizardita y el crisotilo presentes en este rechazo.

Como última fase resultante de los termogramas ocurre un efecto exotérmico, el cual oscila entre los 510 y 850 ºC, común en los resultados obtenidos al analizarse los termogramas de los yacimientos en comparación; este efecto exotérmico está relacionado con la reestructuración de los minerales de serpentina presentes en el rechazo analizado común para los tres yacimientos en cuestión.

Tabla 10. Comparación de las características térmicas de los rechazos serpentiníticos de diferentes yacimientos de la región de Moa

Yacimiento/fuente	**Curva**	**Efectos**	**Temperatura**	**Pérdida de masa asociada a:**
Yacimiento Yagrumaje, perteneciente a la Empresa Ernesto Guevara (Anthony Ganesh 2014)	ATD/TG	Endotérmico	100 – 200 ºC	Eliminación del agua hidroscópica y presencia de goethita
		Endotérmico	570 ºC – 760 ºC	Eliminación del agua interna (mayor pérdida de masa del material)
		Exotérmico	760 ºC – 850 ºC	Ocurre la menor pérdida de masa y la transformación de la fase Antigorita en Fosterita, que origina un reordenamiento estructural del olivino.
Basamento de los yacimientos de Moa Oriental de la Empresa Pedro Sotto Alba (Anthony Ganesh 2014)	ATD/TG	Endotérmico	100 ºC – 300 ºC	Eliminación del agua hidroscópica y presencia de goethita
		Endotérmico	630 ºC	Eliminación del agua estructural
		Exotérmico	780 ºC	Restructuración del olivino, con la formación de Fosterita
Moa Oriental (Serguey Herrera, 2018)	ATD/TG DTA	Endotérmico	50 – 240 ºC con un máximo a los 95 ºC	Eliminación de la humedad hidroscópica y presencia de goethita
		Endotérmico	510 ºC – 840 ºC con máximos en 637 ºC y 690 ºC	Eliminación del agua estructural de los minerales de serpentina(crisotilo y lizardita)
		Exotérmico	650 ºC – 840 ºC con un máximo en 813 ºC	Reestructuración de los minerales de serpentina presentes.

Elaborado por: Serguey S. Herrera Casas

Al someter un material a un aumento de temperatura, este arroja resultados sorprendentes y muy necesarios a la hora de tomar decisiones acerca del uso que se le puede dar al mismo en pos del beneficio social que este aportará.

Termogramas

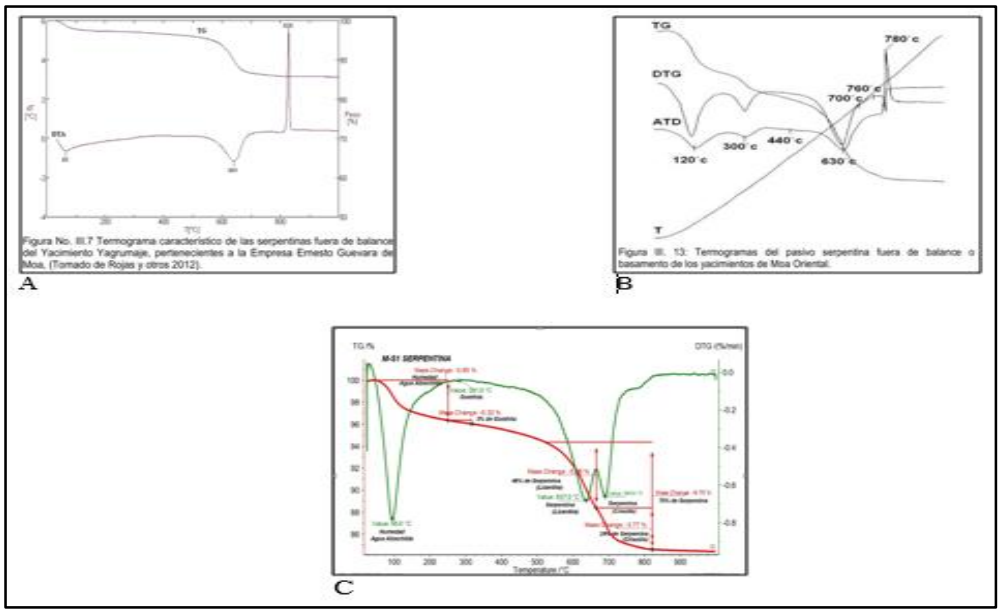


Figura 13. Comparación entre los termogramas de los rechazos serpentiníticos de A-) Basamentos de Moa Oriental; B-) Yacimiento Yagrumaje y C-) Yacimientos de Moa Oriental.

3.6 Propuestas de usos a partir de los resultados obtenidos

Los resultados de caracterización y comparación con otros PAMM similares, permiten tomar decisiones preliminares sobre el posible uso de estos, como material de construcción específicamente en su utilización para morteros, bloques de hormigón, pavimentos, balastro para el ferrocarril y fundentes, etc., luego de cumplir con los requisitos exigidos a estos tipos de productos y su certificación, por las instituciones autorizadas en Cuba.

Los rechazos analizados poseen predominio de minerales de serpentina, los cuales han sido utilizado como materiales de construcción en Cuba y el mundo, razón por la cual se recomienda su utilización en las propuestas mencionadas.

Adicionalmente estos pasivos se acumulan en grandes cantidades día a día en las zonas mineras, afectando al ecosistema de la región, sin tener definido actualmente un uso

específico. Por tanto, los resultados de esta investigación contribuirán a la toma de decisiones sobre su futuro uso industrial.

3.7 Conclusiones del capítulo III

1. En los Rechazos Serpentiníticos del Yacimiento de Moa Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A., se distinguen tres grupos granulométricos: de una parte, una granulometría fina, menor de 0,088 mm que representa el 3,072 % en peso de la muestra; un segundo grupo granulométrico intermedio constituido por las fracciones mayores de 0,084 mm y menores de 4 mm, las que representan el 32,27 % y un tercer grupo de granulometría más gruesa, mayores de 4 mm, que representa el 9,25 % en peso de la muestra.
2. Los Rechazos Serpentiníticos del Yacimiento Moa Oriental en su composición química presentan, fundamentalmente, dióxido de silicio y óxido magnesio(II) con un contenido de 29,16 % y 33,2 %, respectivamente, se demostró también la presencia de hierro en la muestra con un contenido de 4,95 %, así como de níquel, cromo, cobalto y aluminio.
3. Las fases mineralógicas presentes en de los Rechazos Serpentiníticos, corresponden a la gibbsita, cuarzo, clorito de calcio, talco, espinelas de hierro, manganeso y cobalto.
4. Se comprobó que el proceso de descomposición térmica del rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental ocurre en tres etapas fundamentales:

- En el intervalo, 50 – 240 ºC, ocurre un efecto endotérmico, con una pérdida de masa de 3,65 %, que alcanza su mayor rapidez a los 95 ºC, asociado a la eliminación del agua higroscópica.
- En el intervalo de temperatura entre 510 ºC – 650 ºC, donde se verifica un efecto endotérmico, con un pico máximo a los 637 ºC, con una pérdida de masa de 5,98 %, está asociado a la eliminación del agua interna o estructural de los minerales de serpentina, lizardita; y el crisotilo, mayoritarios en este pasivo ambiental.
- Entre 650 y 840 ºC, se verifican dos efectos importantes, uno endotérmico con un pico máximo a los 690 ºC, y otro exotérmico a los 813 ºC, que tienen una pérdida de masa de 3,77 %, asociado al inicio y culminación del proceso de recristalización de los minerales de serpentina, que representan el 75 % de los minerales dentro de este rechazo.

5 Los resultados de caracterización y comparación con otros PAMM similares, permiten tomar decisiones preliminares sobre el posible uso de estos, como material de construcción y fundentes, luego de cumplir con los requisitos exigidos a estos tipos de productos.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El Pasivo Ambiental “Rechazos de la planta de preparación de mineral” del yacimiento de Moa Oriental de la Empresa Moa Nickel Pedro Sotto Alba” se caracteriza por:

   - Químicamente están constituidos por óxidos de silicio y magnesio, los cuales forman parte de minerales serpentiníticos y arcillosos, con un menor contenido de, hierro, níquel, cobalto, aluminio y cromo, características muy similares a los rechazos del yacimiento Moa Occidental.
   - La composición granulométrica evidencia un predominio de las fracciones granulométricas - 4 +1,98 mm y - 1,98 + 0,35, que en conjunto agrupan el 64,54 % de este pasivo ambiental.
   - Las principales fases mineralógicas, de manera semicuantitativa lo constituyen los minerales de serpentina con más del 40 %, cuarzo con 33.93 % y gibbsita con 33,44 %.

2. El proceso de descomposición térmica del rechazo serpentinítico del yacimiento Moa Oriental se verifica en las etapas siguientes:

   - Intervalo de temperatura, 50 – 240 ºC, con la ocurrencia de un efecto endotérmico, con la mayor rapidez de transformación a los 95 ºC y una pérdida de masa de 3,65 %, asociado a la eliminación del agua higroscópica del material.
   - Intervalo entre 510 ºC – 650 ºC, se verifica un efecto endotérmico, con un máximo a 637 ºC, y una pérdida de masa de 5,98 %, asociado a la eliminación del agua interna de los minerales de serpentina, lizardita; y el crisotilo, mayoritarios en este pasivo ambiental.
   - Intervalo entre 650 y 840 ºC, con un efecto endotérmico y un máximo a los 690 ºC, y otro exotérmico a los 813 ºC, con una pérdida de masa conjunta de 3,77 %, asociados al inicio y culminación del proceso de recristalización de los minerales de serpentina, que representan el 75 % dentro de este rechazo.

3. Las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas de estos PAMMs, comparados con otros similares, proponer su utilización preliminar como material de construcción, hormigones, pavimentos, balastro para ferrocarriles y fundentes, luego de su certificación, por las instituciones autorizadas en Cuba.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar pruebas experimentales con los rechazos serpentiníticos de Moa Oriental, evaluando las propiedades físico-mecánicas, exigidas como material de construcción y fundentes.
2. Conformar materiales de construcción, a partir de los rechazos serpentiníticos del yacimiento Moa Oriental y que sean certificados por el Centro de Investigaciones de Materiales de Construcción (CIMC), antes de su utilización industrial.

BIBLIOGRAFÍA

Ánidos, S. (2007). *Valoración geólogo – técnica de las perspectivas de empleo de los desechos serpentiníticos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara como materiales de construcción alternativos.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Casals Corella, C. (1986). *Las Serpentinitas en la Construcción de Obras Hidráulicas.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Cedrón, L. M. (2013). *"ELABORACIÓN DE CRITERIOS PARA LA TRANSFORMACIÓN.* Lima - Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Céspedes Rivera, A. (2007). *Caracterización y perspectivas de uso del rechazo serpentiníticos de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Céspedes, A. (2010). *Caracterización y perspectivas de uso de los desechos sólidos de la planta de pulpa de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A. como árido para la construcción.* Moa: Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

El Universal de Caracas. (24 de 3 de 2007). Uso de serpentian como material de construcción. *El Universal*, págs. 2-5.

Empresa Ferroníquel Minera. (2009). *Evaluación de Materiales de Construcción en el área de la Planta de Ferroníquel de Moa.* Moa: Empresa Mixta Ferroníquel S.A.

Gámez, A. (2011). *Cracterizacion de los desechos serpentiniticos de la Mina de la Empresa Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A. para su empleo como material de construccion alternativo.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Ganesh Persaud, A. (2014). *Metodología para el inventario de los Pacivos Ambientales Minero-Metalúrgicos generados por la industria del niquel en Moa.* Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2001). *Estadística Minera de España.* Madrid: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Jiménes H, S. (2008). *Caracterización química, física y mecánica del material de rechazo de la Empresa Ernesto Guevara.* Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Lavaut Copa, W. (2001). *Caracterización del mineral de rechazo por el proceso de Planta de Preparación de Pulpa.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

León. (2007). *"Propiedades de la Menas Niquelíferas del yacimiento Punta Gorda".* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

López Peña, L. M. (2006). *Caracterización geológica de las materias primas de los municipios de Moa-Sagua de Tánamo y su empleo como áridos para la construcción.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Montero Gil, E. (2007). *Caracterización y perspectivas de uso del rechazo serpentinítico de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A. como árido.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Pérez Stest, J. L. (2009). *Caracterización y evaluación del desecho serpentinítico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara como áridos para la obtención de hormigones hidráulicos.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Pons Herrera, J. A. (17 de noviembre de 2010). "Contenido de minerales útiles presentes en los residuos acumulados en el campo de mina". (A. Gámez Matos, Entrevistador)

Pons Herrera, J., Puchol Quintana, R., Ramírez Pérez, M., & Salazar Moreno, A. (2018). Comportamiento mineralógico de las dunitas serpentinizadas de la región Moa-Baracoa bajo temperaturas de hasta 1600 o C. *Minería y Geología*, No.3, Vol. 34.

Ramírez Cordero, A. (2007). *"Estudio del proyecto de una planta procesadora de grava y arena para el municipio de Moa".* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Ramírez, M. y. (2010). *"Una alternativa para utilizar las concreciones ferruginosas, del yacimiento Moa occidental".* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Rodríguez Pacheco, R. (1985). *Materiales serpentiníticos en la construcción de presas de materiales locales.* Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.

Ruiz, M. (2016). *Contexto y Evolución del Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos.* Ciudad de México, México: Universidad Iberoamericana Ciudad de México.

Vijaya, K. (2010). *Valoración técnica de los desechos serpentiníticos de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa-Nickel SA. como material de construcción alternativo.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

Wilson Masó, R. (2008). *Caracterización de las serpentinitas del municipio de Holguín como áridos para la construcción.* Moa: Instituto Superiror Minero Metalùrgico de Moa.

ANEXOS

Anexo 1: Secuencia fotográfica del área de estudio donde se tomaron las muestras de del yacimiento de Moa Oriental constituidas por el rechazo de la planta de preparación mineral de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A.

Planta de preparación mineral de Moa Oriental

Criba estacionaria utilizada en la Planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental

Rechazo de Moa Oriental

Anexo 2: Secuencia fotográfica durante la realización del análisis físico realizado a la muestra.

Primera etapa de trituración

Maso utilizado en la primera etapa de reducción de tamaño (trituración manual)

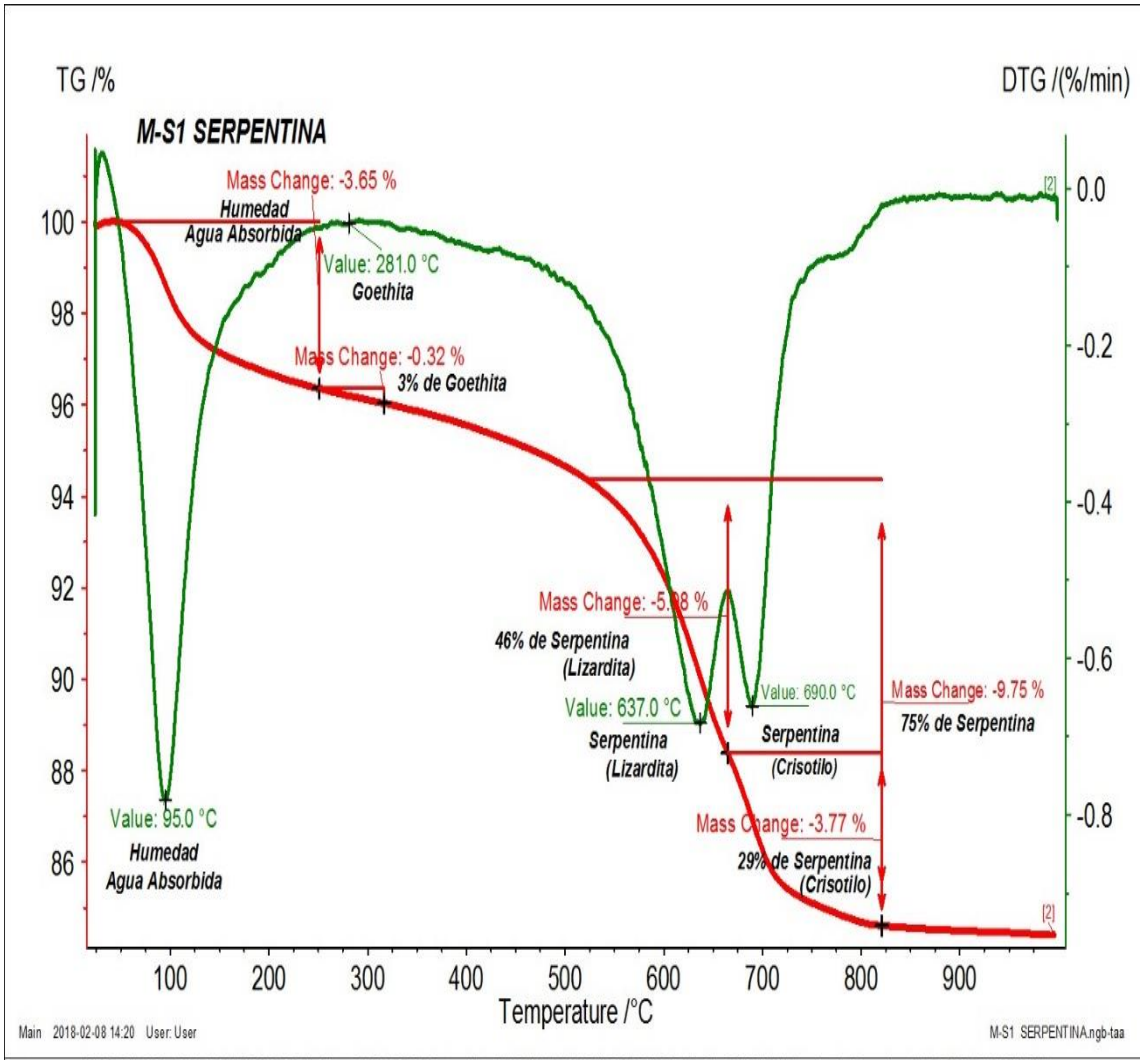
Segunda etapa de trituración

Trituradora de mandíbulas utilizada en la segunda etapa de trituración

Juego de tamices utilizado para el análisis granulométrico

Juego de tamices y tamizadora eléctrica utilizada para el análisis granulométrico

Anexo 3: Figura resultante del análisis térmico



Termograma de la muestra M-S1, presencia del efecto exotérmico Serpentina variedad Crisotilo.