



**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR**  
**UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez**  
**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**  
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA-QUIMICA**

**Trabajo en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

### **Título**

Evaluación del uso de los residuos sólidos de industrias del Níquel en la UEB  
de Fundición de la EMNI

**Autor:** Yosvel Lores Matos

**Moa, 2022**



**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR**  
**UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez**  
**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**  
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA-QUIMICA**

**Trabajo en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

**Título**

Evaluación del uso de los residuos sólidos de industrias del Níquel en la UEB  
de Fundición de la EMNI

**Autor:** Yosvel Lores Matos

**Tutor:** Dr.C José Alberto Pons Herrera. Profesor Titular

**Moa, 2022**

## **DEDICATORIA**

El esfuerzo realizado durante los últimos meses en la realización de mi tesis de grado y durante toda mi carrera lo dedico:

- A Dios.
- A mis padres que son mi ejemplo a seguir.
- A mi esposa Elianis Reyes Suarez.
- A mi hija Eimy Sthefany Lores Reyes por ser mi motor impulsor.

## AGRADECIMIENTO

Esta tesis es la culminación de mi esfuerzo estudiantil y el inicio de un desafío profesional, por lo que agradezco infinitamente:

- ✚ A Dios por darme la fuerza suficiente para seguir adelante cuando me he encontrado solo en momentos difíciles.
- ✚ A mi querida esposa, por estar presente en todo momento en el desarrollo de este trabajo y darme su mano cuando más la necesitaba.
- ✚ A mis padres, quien con su ejemplo, paciencia y perseverancia han formado en mí un profesional de principios y valores, de los cual espero se sientan orgullosos.
- ✚ A mi director de tesis, Dr.C José Alberto Pons Herrera. por la valiosa dirección y aporte de conocimientos en el desarrollo de esta tesis.

A ellos gracias....

Yosvel

## RESUMEN

La Empresa Mecánica del Níquel en Moa genera gran cantidad de residuos sólidos como resultado de los procesos de fundición e igualmente necesita de nuevos materiales para la reducción de sus costos operacionales, por tanto, constituye un problema de esta investigación, evaluar las características de estos pasivos ambientales para su utilización en la UEB de Fundición de la EMNI. Se realiza un diagnóstico del estado actual de los residuales sólidos generados por el taller de fundición, se identifican y caracterizan granulométricamente materiales serpentiniticos y duniticos de la región de Moa, con propiedades refractarias y se evalúa la posibilidad de su procesamiento en el futuro polígono de materiales de construcción, aprovechando sus propiedades refractarias y para la conformación de elementos constructivos. Se demuestra que los volúmenes de escorias (32ton/año) y las arenas residuales (60 ton/año) pueden ser reaprovechadas, extrayendo los contenidos de hierro para la producción de piezas fundidas, así como para la fabricación de materiales de construcción. Se comprobó además que, el 64,54 % de los rechazos de las Minas de la Empresa Pedro Soto Alba y de la antigua Mina de Cayo Guam, se caracterizan por el predominio de las partículas  $- 4 +1,98$  y  $- 1,98 +0,35$  mm, utilizables en Fundición y como Material de Construcción.

**Palabras Claves:** Escorias, Materiales de Fundición, Empresa Mecánica del Níquel

## ABSTRACT

The Nickel Mechanical Company in Moa generates a large amount of solid waste as a result of the smelting processes and also needs new materials to reduce its operational costs, therefore, it is a problem of this investigation, to evaluate the characteristics of these liabilities. for its use in the EMNI Foundry UEB. A diagnosis of the current state of the solid residuals generated by the foundry workshop is carried out, serpentinitic and dunitic materials from the Moa region, with refractory properties, are identified and characterized granulometrically and the possibility of their processing in the future polygon of materials is evaluated. of construction, taking advantage of its refractory properties and for the conformation of constructive elements. It is shown that the volumes of slag (32 tons/year) and residual sands (60 tons/year) can be reused, extracting the iron content for the production of castings, as well as for the manufacture of construction materials. It was also found that 64.54% of the rejects from the Pedro Soto Alba Company Mines and the old Cayo Guam Mine are characterized by the predominance of particles of  $- 4 +1.98$  and  $- 1, 98 +0.35$  mm, usable in Foundry and as Construction Material.

**Keywords:** Slag, Foundry Materials, Nickel Mechanical Company

## INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
INDICE DE CONTENIDO .....	VII
INDICE DE TABLAS.....	X
INDICE DE GRAFICO.....	XI
INDICE DE FIGURAS .....	XII
INDICE DE ANEXOS .....	XIV
GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
Situación Problémica .....	2
Planteamiento del problema.....	6
Objetivos.....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos .....	7
Resultados esperados .....	7
Aportes de investigación.....	8
Estructura del Trabajo .....	8
Justificativa y motivación de la investigación .....	9
CAPÍTULO I. MARCO TEORICO REFERENCIAL.....	11

1.1	Clasificación de las arenas de fundición.....	11
1.2	Tipos de arena de fundición.....	13
1.3	Características de la arena sílice .....	14
1.4	Características de las arenas de cromita.....	17
1.5	Características de las arenas de olivino .....	18
1.5.1	Caracterización de las dunitas serpentinizadas de los yacimientos de cromitas refractarias de la región de Moa.....	19
1.5.1.1	Características del complejo ofiolítico Moa - Baracoa .....	19
1.5.1.3	Características térmicas y mineralógicas de las dunitas serpentinizadas de las zonas Merceditas y Amores .....	22
1.6	Clasificación de mezclas de moldeo .....	27
1.7	Propiedades de las mezclas de moldeo .....	28
1.8	Características de las arenas utilizadas en el taller de fundición de la EMNI .	30
1.9	Escorias siderúrgicas.....	33
1.10	Clasificación de las escorias siderúrgicas .....	34
1.11	Evaluación de los impactos en el caso de envío de la escoria a vertedero .....	36
1.12	Aprovechamiento y valorización de los residuos metalúrgicos.....	36
1.13	Criterios medioambientales para la utilización de las escorias siderúrgicas ...	38
1.13.1	Incorporación de las escorias a la composición del suelo .....	38
1.13.2	Usos de las escorias como material de construcción .....	39
1.14	Conclusiones del capítulo I.....	42
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....		43
2.1	Breves características del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel	43
2.2	Técnicas analíticas empleadas .....	44
2.2.1	Selección y toma de muestras.....	44
2.2.2	Análisis granulométrico.....	46

2.2.3	Análisis Químicos .....	47
2.2.4	Equipos auxiliares utilizados en la investigación .....	48
2.3	Obtención y procesamiento de las informaciones de la investigación .....	49
	Conclusiones del Capítulo II.....	50
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....		51
3.1	Características de los principales residuales sólidos de la UEB fundición.....	51
3.1.1	Resultados obtenidos con las escorias de fundición .....	51
3.1.2	Arenas residuales del taller de Fundición .....	54
3.2	Identificación de los principales materiales utilizados y a usar en el taller .....	58
3.3	Nuevos materiales para el uso en el taller de Fundición.....	58
3.4	Resultados de los análisis granulométricos realizados a las muestras de Cayo Guam y Moa Nickel.....	59
3.5	Valoración Económica.....	62
	Conclusiones Capitulo III .....	64
	Conclusiones.....	65
	Recomendaciones .....	66
	Referencias Bibliográficas.....	67
	ANEXOS .....	70

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química promedio (%) de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas Merceditas y Amores. ....	21
Tabla 2. Resultados promedio (%) de los análisis de microsonda electrónica realizados a cristales de olivino presentes en las dunitas serpentinizadas de la región de .....	22
Tabla 3. Pérdida de masa en las diferentes etapas del proceso de descomposición térmica de la dunitas serpentinizadas de la región de Moa. ....	26
Tabla 4. Análisis comparativo de los ensayos de refractariedad realizados a.....	27
diferentes muestras de serpentinas y dunitas.....	27
Tabla 5. Composición química (%) de la escoria granulada de fundición. ....	34
Tabla 6. Composición química (%) de la escoria de refinación (Blancas).....	35
Tabla 7. Composición química de las escorias obtenidas en el taller de Fundición de la Empresa Mecánica Del Níquel.....	52

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Características granulométricas promedio de los rechazos duniticos de la antigua mina de Cayo Guam. ....	60
Gráfico 2. Características granulométricas promedio de los rechazos serpentínicos...	62

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura tetraédrica de la sílice. ....	17
Figura 2. Estructura Cristalina de la Cristobalita. ....	17
Figura 3. Curva de TG de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa. (1. Merceditas 2. Amores). ....	24
Figura 4. Curva de ATD de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa. (1. Merceditas 2. Amores). ....	25
Figura 5. Esquema de las diferentes partes de una carretera .....	39
Figura 6. UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel.....	44
Figura 7. Proceso de toma de muestras en la antigua mina de cromitas de Cayo Guam.....	45
Figura 8. Proceso de toma de muestras en la Mina de la Empresa Moa Nickel PSA (Moa Occidental). ....	45
Figura 9. Proceso de toma de muestras en la Mina Moa Oriental de la Empresa Moa Nickel PSA.....	45
Figura 10. Proceso de preparación mecánica de las muestras seleccionadas.....	46
Figura 11. Juego de tamices empleados durante la caracterización física de las muestras seleccionadas. ....	47
Figura 12. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos. ....	47
Figura 13. Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.....	48
Figura 14. Residuales sólidos recolectados en el taller oara su posterior traslado a los vertederos localizados detrás de la Universidad de Moa.....	51
Figura 15. Electroimán de la UEB de Fundición de la EMNI.....	53
Figura 16. Escoria de la UEB de Fundición de la EMNI. ....	53
Figura 17. Arena residual del proceso de moldeo recolectada para enviar a los vertederos de Moa.....	54

Figura 18. Terreno donde se construye el polígono en la EMNI. ....	55
Figura 19. Recipientes utilizados para la recolección de escorias, arenas residuales y otros desechos.....	57

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Selección y toma de muestras en áreas de la región de Moa.....	70
ANEXO 2. Envase donde se recogen los residuos sólidos en la UEB Fundición.....	71
ANEXO 3. Tolva de rechazo para almacenaje de arena residual de la UEB de Fundición. .....	72

## **GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**

**EMNI:** Empresa Mecánica del Níquel

**UEB:** Unidad Empresarial de Base

**UMoa:** Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez

**PSA:** Pedro Soto Alba

## INTRODUCCIÓN

Las actividades productivas realizadas por el hombre generan residuos que, por su inadecuado manejo e insuficiente control, han originado problemas de degradación ambiental como la destrucción de la capa de ozono, el calentamiento global, la lluvia ácida, el smog, la contaminación de suelos y cuerpos de agua y el aumento de enfermedades en los seres humanos. La industria metalúrgica es una actividad económicamente importante, sin embargo, el proceso productivo es altamente contaminante porque se genera un elevado volumen de residuos atmosféricos, líquidos y sólidos que deben ser tratados adecuadamente para evitar que causen la contaminación del lugar utilizado para su almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y disposición final, (Jaramillo Hurtado, 2007, pág. 22).

Según (Canjila Dala, 2019, pág. 16), el Taller de Fundición de la Empresa Mecánica de Níquel de Moa tiene las arenas calcinadas como el principal residuo generado. Estas arenas calcinadas provienen de una vasta utilización en la elaboración de moldes que copian la figura de un modelo o pieza a replicar en el metal que se requiera en el taller; los moldes en arena son elaborados generalmente en dos mitades que reproducen el modelo a replicar, después de conformar el molde se extrae el modelo quedando un vacío en el molde. Este vacío conformara la pieza cuando se vierta el metal líquido al molde en el proceso de colado.

Una vez insertado el metal líquido al molde ocurre posteriormente el proceso de solidificación y es necesario extraer la pieza que se ha replicado. Para ello, es necesario colapsar el molde de arena de fundición etapa conocida como el desmoldeo; después de varios ciclos de utilización estas arenas se convierten en residuos, debido a que pierde algunas de sus características útiles para su aplicación en el moldeo.

Los volúmenes de generación de arenas usadas de moldeo son diferentes dependiendo de la capacidad de producción y tecnología empleada, en el caso de la empresa en referencia se genera alrededor de 5000 kg (5 t) mensual; este importante volumen de las arenas usadas de moldeo no es recuperado y es finalmente dispuesto en cavas abandonadas destinadas a almacenar estas arenas que para la empresa ya no cumple ninguna función. Las arenas

usadas de moldeo son residuos sólidos con muy bajos contenidos de humedad; no obstante, la actual disposición favorece el contacto de estos residuos con el agua de lluvia con una posible consecuente formación de lixiviados.

La infiltración de los lixiviados formados a partir de las arenas usadas de moldeo en los actuales sitios de disposición final podría poner en contacto los elementos químicos presentes en ellas con el acuífero, en consecuencia, llegar a contaminarlo y por consiguiente provocar daños ecológicos.

Además de la contaminación acuífera, estas arenas están contaminadas con los restos de los aglomerantes utilizados para darle la cohesión necesaria para fabricar los moldes, según sea el tipo de moldeo.

### **Situación Problémica**

El presente trabajo se desarrolló con la finalidad de describir la situación actual del uso que se les da a los residuos sólidos en la UEB de Fundición. Dado a la gran cantidad de residuos que se generan en el taller los cuales se les pudiera dar un mejor uso, lo que conllevaría a la solución de otros problemas sociales.

Las fundiciones que utilizan en su proceso arenas para la fabricación de moldes, disponen de un círculo cerrado de arena que se va renovando permanentemente mediante adiciones de arena nueva y eliminación de las más deterioradas. Un sistema utilizado con frecuencia es aprovechar la arena de los machos para la renovación, ya que éstos se suelen fabricar con arena nueva. De esta forma se mantienen dentro de unos límites prefijados los elementos que puedan hacer variar algunos parámetros de la arena, tales como finos, etc., que se encuentren presentes en el circuito, (Salcines Merino C. M., 1985, p. 42).

Cuando los programas de fabricación se orientan a piezas con poco macho, este sistema de renovación de la arena resulta totalmente insuficiente, por lo que se requieren adiciones de arena nueva. Habitualmente las fundiciones retiran del circuito entre 0.2 y 0.3 Kg de arena/Kg de fundición buena, siendo muy poco el porcentaje de arena usada que se valoriza, prácticamente la totalidad se deposita en vertederos, (Botasso, Fensel, & Monzón, 2005, pág. 196).

En la denominación genérica de arenas usadas se encierran residuos de diversa constitución que es de interés tener en cuenta. Los más frecuentes son las clases de residuo siguiente:

- Arena de moldeo usada y residual
- Arenas para machos
- Arena para machos usada
- Finos
- Lodos
- Residuos de arena de granalladora

Para describir las arenas de fundición usadas se recurre a un gran número de parámetros que presentan gran interés:

- Composición mineral
- Propiedades químicas
- Propiedades físicas
- Propiedades granulométricas
- Contenido metálico (p. Ej. Cromo, Níquel, Hierro).

A lo largo del circuito de arena, y en los procesos de regeneración de las arenas usadas de fundición, se genera una cierta cantidad de compuestos de granulometría fina que reciben diferentes denominaciones, Polvos y Finos, que son aquellas partículas que al aspirar y separar mediante filtros secos se encuentran en cualquiera de las fases del circuito: preparación del material de moldeo, transporte de la arena y desmoldeo, (Salcines Merino C. M., 1985, p. 48).

Los finos procedentes de la regeneración mecánica de la arena usada contienen los mismos componentes que la arena de fundición usada, aunque en otras concentraciones, durante la correspondiente extracción de estas sustancias de grano inferior (impuesta por las exigencias al regenerado). Esto se debe a una insuficiente eficacia de separación de las técnicas disponibles. Los finos de arenas usadas que han sido sometidos previamente a un

tratamiento térmico están exentos de componentes orgánicos, (Botasso, Fensel, & Monzón, 2005, pág. 196).

En un proceso de fundición, la escoria puede ser definida como una fase que contiene sustancias inútiles de un mineral y que inevitablemente estará en cualquier operación pirometalúrgica que involucre sistemas fundidos.

Todas las escorias poseen, en alguna medida, bondades para la purificación del efluente metálico y van adquiriendo mayor importancia cuando se encuentran más cerca del lecho metálico. En particular, en el caso del cobre, estas escorias tienen un rol fundamental durante la pirorefinación, en la disolución de impurezas de la fase metálica.

De acuerdo a Mackey, seis son las características más importantes que deben poseer las escorias de extracción de cobre para asegurar la máxima eficiencia durante la operación pirometalúrgica: (Lovera Dávila, Arias, & Coronado Falcón, 2004, pág. 2).

- a) La escoria debe encontrarse completamente líquida a la temperatura de fusión del metal o de la mata.
- b) La escoria debe ser fácilmente manejable durante el proceso; esto es, debe existir un compromiso entre baja viscosidad.
- c) Las escorias que van a descarte deben contener mínimas cantidades del metal, disuelto o en suspensión.
- d) El rango de operación de la escoria debe ser tal, que admita variaciones tanto en la composición de la escoria misma como en la alimentación al reactor sin producir trastornos de funcionamiento.
- e) La escoria debe asegurar una buena eliminación de los elementos menores no deseados.
- f) Las escorias, como en cualquier sistema metalúrgico, suelen representarse por diagramas de equilibrio, conocidos también como diagramas de fases.

Con el propósito de modelar el comportamiento de minerales y concentrados durante las etapas pirometalúrgicas, se han estudiado los sistemas que mejor pudieran representarlo,

llegándose a la conclusión, por parte de muchos autores, que el quinario Cu-Fe-S-O-SiO<sub>2</sub> cumple en buena medida lo requerido.

Tal como expresara Eliot, el quinario Cu-Fe-S-O-SiO<sub>2</sub> contiene prácticamente todas las fases presentes durante los procesos pirometalúrgicos de extracción de cobre en los rangos de temperatura, 1100-1350°C, y presión de oxígeno, 10-16-1 atm; escorias de fusión, conversión y pirorefinación, matas pobres, matas cercanas al metal blanco, fase metálica durante la piro-refinación y fase gaseosa involucrada en cualquiera de las etapas del proceso, (Lovera Dávila, Arias, & Coronado Falcón, 2004, pág. 2).

A través de la historia de la metalurgia, la escoria ha sido normalmente considerada como el desecho resultante de las operaciones de fusión y conversión; sin embargo, ya los primeros metalurgistas pudieron darse cuenta que algunas de sus propiedades químicas y/o físicas podían modificarse mediante la adición de fundentes adecuados, específicos al proceso que se lleva a cabo.

Las escorias industriales se han ido formando en los diversos procesos pirometalúrgicos. En la actualidad hay bastante conocimiento con respecto a la influencia del reciclaje de la escoria de conversión en las pérdidas de cobre en el horno reverbero. Es claro que durante el reciclaje de esta escoria ocurre una reducción de los óxidos de hierro y cobre mediante los sulfuros contenidos en el mate del horno del reverbero. Existe una tendencia, en algunas partes, de tratar a las escorias de conversión separadamente, lo que ha significado una reacción importante de las pérdidas de cobre y mayores tonelajes de producción, (Pons Herrera J. , 2022, p. 19).

Cuando se emplea un tratamiento separado de la escoria que generalmente es necesario cuando el grado de las matas es del orden del 60-65 % de cobre, no se necesita un control tan riguroso de las escorias extraídas del reactor de fusión. Cuando el cobre se produce directamente a partir del concentrado en una sola etapa, las escorias contienen desde 9-12 % de cobre. Cerca de la mitad del cobre, en este caso, está disuelto como óxido y el resto atrapado como mata o cobre metálico. Se considera que los costos de tratamiento para

recuperar el cobre de las escorias vía molienda, seguida de flotación, son más altos que la pirometalúrgica o electrometalúrgica, ellos sin tomar en cuenta la posibilidad de emplear molienda autógena, (Charchabal Mendoza, 2017). Durante el enfriamiento lento de una escoria, la mayoría del cobre disuelto como óxido se reduce a cobre metálico de acuerdo a la reacción:



Y aparentemente, para un mismo consumo, la molienda autógena debería entregar colas más bajas, debido a la fragilidad favorable del material obtenido.

Tal como en el caso de la fusión, las escorias de conversión tienen cobre disuelto como sulfuros y óxidos (mayormente óxidos), mata y cobre atrapados mecánicamente. En algunas fundiciones se practica, hoy en día, el tratamiento de escorias por flotación y se comienza en otras a practicar la limpieza en horno eléctrico. En la operación de convertidores, para asegurar una buena escoria, es importante considerar una adición apropiada de fundentes relativas al flujo de aire utilizado. Esta operación cambia de una planta a otra, en algunas se estila agregar el fundente unos minutos después de comenzado el soplado, en otras se agrega inmediatamente comenzando. También la forma de controlar el proceso está aún muy ligada a un operador, mediante el catálogo visual de la escoria y las llamas del reactor, (Lovera Dávila, Arias, & Coronado Falcón, 2004, pág. 2).

### **Planteamiento del problema**

La Empresa Mecánica del Níquel en Moa genera gran cantidad de residuos sólidos como resultado de los procesos de fundición. Estos constituyen pasivos ambientales al no existir un adecuado control de la cantidad, clasificación y destino final de los mismos.

Teniendo en cuenta estos elementos se define a continuación la estructura metodológica de trabajo de investigación, definiéndose como **problema científico** “el insuficiente tratamiento y uso de los residuos sólidos generados en el taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel y de otras empresas del grupo Cuba níquel, provocan un incremento sostenido de la contaminación ambiental en Moa”.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar la posibilidad de utilizar los residuos sólidos generados por la UEB Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa, así como nuevos materiales con propiedades refractarias existentes en la región.

### **Objetivos específicos**

1. Diagnosticar el estado actual de los residuales sólidos generados por la UEB Fundición, de la Empresa Mecánica del Níquel.
2. Identificar y caracterizar granulométricamente los materiales con propiedades refractarias existentes en la región de Moa para su uso en la UEB de Fundición.
3. Evaluar la posibilidad de procesar los residuales sólidos de taller de fundición y de las empresas del Níquel para su utilización como material de construcción y materiales refractarios.

**Objeto de investigación:** Residuos sólidos generados por las empresas PSA y EMNI.

**Campo de acción:** Tratamiento de los residuos sólidos generados por Empresas del Níquel (PSA y EMNI).

**Hipótesis:** Con la organización y tratamiento de los residuales sólidos generados por Empresas del Níquel (PSA y EMNI), será posible proporcionarles un uso más eficiente y reducir la contaminación ambiental que actualmente estos provocan en Moa.

### **Resultados esperados**

1. Identificación y clasificación de los principales residuos sólidos generados por Empresas del Níquel (PSA y EMNI) en Moa.
2. Propuesta de uso de los residuos sólidos generados por la UEB Fundición.
3. Propuesta de uso de los residuales sólidos generados por las empresas del Níquel (PSA y UEB Fundición).

## **Aportes de investigación**

**Social:** La educación ambiental de los trabajadores del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa, que garantice el reciclaje y tratamiento adecuado de los residuales que genera esta UEB, que provocan daños al medio ambiente y a la cultura empresarial de las entidades que forman este grupo empresarial.

**Ambiental:** Reducción de la contaminación ambiental que actualmente provocan los residuales sólidos generados por el taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa, a través de un adecuado tratamiento y uso de estos pasivos ambientales.

**Económico:** Incremento de las utilidades económicas de la Empresa Mecánica del Níquel, como resultado del aprovechamiento adecuado de los residuales sólidos generados por la UEB Fundición y la propuesta de una metodología para su uso por las industrias del territorio.

**Metalúrgico:** Propuesta de uso de los residuales sólidos generados por el taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, principalmente, escorias, arenas residuales del proceso de fundición, entre otros.

## **Estructura del Trabajo**

El trabajo será elaborado según las normas de redacción establecidos en el Ministerio de Educación Superior de Cuba, siguiendo la Norma ISO 690, y contará básicamente con la siguiente estructura.

**Introducción:** Contiene el diseño metodológico de la investigación, definiéndose el problema de investigación, los objetivos, hipótesis, objeto y campo de acción.

**Capítulo I:** Constituye la fundamentación teórica de la investigación, donde se analizan los principales trabajos realizados en los últimos años a nivel mundial, nacional y local con respecto al tratamiento y uso de los residuales sólidos generados por las empresas comercializadoras de productos de primera necesidad de la sociedad.

**Capítulo II:** Representa los materiales y métodos empleados durante la investigación, para la toma de los datos e informaciones necesarias para la solución del problema planteado y dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación.

**Capítulo III:** Se exponen y analizan los principales resultados de la investigación, dando cumplimiento a los objetivos generales y específicos de la tesis. Como resultado del diagnóstico y las experiencias nacionales e internacionales existente en esta temática se propone una metodología para el tratamiento y uso sostenible de los residuales sólidos generados por la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa. Se evalúan además las posibilidades de utilización de los principales residuales sólidos en la sociedad de Moa.

**Conclusiones y Recomendaciones:** Resumen los principales resultados de la investigación, confirmando la validez de la hipótesis y dando cumplimientos a los objetivos trazados.

### **Justificativa y motivación de la investigación**

El método de producción de piezas fundidas en moldes de arena mantiene sobre los demás, ventajas tan importantes como: ser la forma más rápida y económica de obtener la cavidad del molde; obtener piezas de una calidad adecuada para la mayoría de los usos corrientes en construcción de maquinaria; ser el único método conocido hasta el momento para la obtención de piezas fundidas grandes y otras, (Moya Rodríguez L. , 2019, pág. 11).

La producción de piezas fundidas utilizando este método en un país desarrollado aún es superior al 80-85 % y en países subdesarrollados esta cifra en ocasiones es del 100 %. Por lo tanto, el papel que debe desempeñar los materiales para la producción de moldes y machos de arena es aún considerable y se conocen con el nombre genérico de materiales de moldeo, teniendo una particular importancia las arenas de moldeo y los materiales de tipo arcilloso, (Salcines Merino M. , 1985, pág. 11).

Este método de obtención de piezas fundidas también trae consigo en algunos casos, defectos en el resultado final. Estos defectos suelen aparecer con frecuencia en las piezas fundidas y tienen en general su origen en que alguna parte del proceso no ha sido debidamente controlada. La fusión, colada y solidificación comprenden muchas operaciones complicadas, siendo un control perfecto imposible. No es sorprendente que en el proceso de fundición se encuentren mayor variedad y número de defectos, que en cualquier otro proceso de fabricación, (Aguirre Rodriguez, 2015, pág. 17).

## **CAPÍTULO I. MARCO TEORICO REFERENCIAL**

En este capítulo se exponen los resultados de las principales investigaciones publicadas en el mundo y en Cuba sobre el tratamiento de los residuales generados por los talleres de Fundición y minas de la producción de níquel y cromitas refractarias en Moa. Los objetivos son demostrar las posibilidades de utilizar las arenas de fundición después de varios ciclos de utilización, las escorias de los procesos de fusión, así como emplear nuevos materiales a partir del tratamiento de materias primas localizadas en la región de Moa-Baracoa.

### **1.1 Clasificación de las arenas de fundición**

La mayor producción de piezas fundidas se realiza en moldes de arena. Los moldes utilizados en fundición están constituidos esencialmente por un material granular, la arena propiamente dicha y de un aglomerante que confiere a la arena la cohesión suficiente para la ejecución del molde, (Salcines Merino M. , 1985, pág. 33).

Las arenas de fundición están compuestas por arena y arcilla. Esta arcilla generalmente es Bentonita entre otras, proporcionando cohesión y plasticidad a la mezcla. Por las cualidades que posee la arena, ésta facilita su moldeo y la arcilla contribuye dándole resistencia suficiente para mantener la forma requerida de la pieza que se desea moldear mientras se vierte el material fundido. Dentro de los materiales de moldeo tienen gran importancia las arenas de fundición y los materiales de tipo arcilloso. La arena más empleada es la de sílice fundamentalmente debido a que cumple muy bien su función y tiene un precio muy asequible, (Moya Rodríguez L. , 2019, pág. 23).

El consumo de otros tipos de arenas tales como la de olivino, cromita, zirconio no representa más de un 5 % y únicamente tienen sentido en aplicaciones donde sea necesario afrontar problemáticas de altas temperaturas, dilataciones muy concretas. Las propiedades granulométricas y térmicas de la arena juegan un papel importante en la calidad de las piezas a fabricar puesto que inciden de manera directa en el proceso de enfriamiento del caldo, por lo tanto, en las estructuras del metal una vez solidificado.

La precisión dimensional depende básicamente del coeficiente de dilatación que está en función del nivel térmico en el que se esté trabajando. Finalmente, las características granulométricas tales como la distribución del tamaño de los granos, su grado de redondez y la naturaleza de su superficie están incidiendo directamente sobre la respuesta que el molde ofrezca en el desarrollo de su función. La arena sílice es un compuesto resultante de la combinación de la sílice con el oxígeno. Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, formando una molécula muy estable:  $\text{SiO}_2$ . Esta molécula es insoluble en agua y en la naturaleza se encuentra en forma de cuarzo. Si el cuarzo está cristalizado se denomina cristal de roa.

Pertenece a la clase de los silicatos y al sistema cristalino trigonal. Este mineral es muy rico en variedades, los que se pueden agrupar en macro cristalinas, con cristales bien visibles a simple vista, y criptocristalinas, formada por cristales microscópicos.

Las arenas silíceas están compuestas de minerales de cuarzo, feldespatos, minerales arcillosos, minerales micáceos, elementos de carbón y de carbonato y minerales pesados que tienen influencia en las propiedades de la arena; así por ejemplo altos contenidos de feldespato favorecen la caída de la dilatación térmica de la arena y su punto de sinterización. De todas formas, los elementos presentes en las arenas silíceas diferentes del cuarzo representan un porcentaje muy pequeño. La utilización de las arenas una vez extraídas de las canteras requiere un lavado previo y una clasificación en función de su granulometría. Las arenas para moldeo en las plantas de fundición necesitan de amplitud y versatilidad para su transporte debido a que son muy utilizadas en este proceso, por lo que el transporte neumático es una de las opciones más frecuentemente utilizado para su traslado desde los tanques de almacenamiento hasta las áreas de fundición.

## 1.2 Tipos de arena de fundición

Según, Salcines Merino, (1985), las arenas de fundición se caracterizan por los aspectos siguientes:

### Arenas de cuarzo

Las arenas de cuarzo son las mejores porque constituyen un material barato, abundante y de tan buenas propiedades técnicas como los demás tipos de arenas de fundición. El componente fundamental de las arenas de cuarzo es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Además, en el yacimiento la arena contiene una cierta cantidad de sustancias arcillosas en forma de silicato hidratado de alúmina, de fórmula aproximada  $(2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$  así como una serie de sustancias que se consideran como impurezas ya que la mayoría disminuye la refractariedad de la arena.

### Arenas de zirconio

Las arenas de zirconio presentan un material de bajo coeficiente de expansión, por ejemplo, por debajo de  $500\text{ }^\circ\text{C}$  expansiona dos veces menos que el cuarzo y tres veces menos a temperaturas de entre  $500\text{ }^\circ\text{C}$ - $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Su conductividad térmica es dos veces superior al cuarzo. Su peso específico es alto, del orden de  $4,7\text{ g/cm}^3$  por lo que el coeficiente de acumulación de calor alcanza valores tan altos como  $50\text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ .

### Arenas de cromita

La arena de cromita tiene cualidades equivalentes a la arena de zirconio para la obtención de superficies de calidad en áreas críticas del molde, siendo más sensible y menos costosa que esta. Esta se emplea frecuentemente para la fabricación de mezclas de cara y de machos en la producción de piezas fundidas grandes de acero. Su composición química es variable y depende del yacimiento de origen.

### Arenas de olivino

Las olivitas forman un grupo de silicatos de fórmula general  $2\text{RO} \cdot \text{SiO}_2$  donde R puede ser un óxido de Mg, Fe, Mn, Ni, Co, Zn o Ca, o combinaciones de estos. Los silicatos más conocidos de este grupo son el olivino  $(\text{MgO} \cdot \text{FeO}) \cdot \text{SiO}_2$  y la serpentina  $(3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ . Las arenas de olivita que se emplean en la fundición deben tener un

contenido mínimo de  $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$  de 80 %, pérdidas por ignición no mayores de 1,35% y la humedad inferior de 1 %. Estas arenas dan buenos resultados empleadas en mezclas de cara y en machos porque no reaccionan con los óxidos de hierro. Su temperatura de fusión es alta y evitan la penetración metálica en los moldes de arena, (Pons Herrera, 2000, pág. 31).

#### Magnesita y cromo-magnesita

La magnesita es un mineral refractario de fórmula química  $\text{MgCO}_3$  con impurezas en formas de óxidos de calcio, hierro y silicio. Una composición química de magnesita es la siguiente:  $\text{MgO}=85\%$ ,  $\text{CaO}=1-2\%$ ,  $\text{SiO}_2=0,5-2\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3=0,5-2\%$ . Las pérdidas de calcinación en esta son muy altas, del orden de 50-25 % por eso se emplea como producto industrial después de calcinada a temperatura de 1500- 1650°C liberando  $\text{CO}_2$  y reteniendo  $\text{MgO}$ . Este tipo de arena solo se utiliza en piezas fundidas de aceros especiales, con alto grado de penetración metálica.

#### Chamota

La Chamota, arcilla refractaria calcinada, se usa ocasionalmente en las fundiciones ferrosas como material de cara para evitar los defectos de expansión y penetración metálica. La pieza fundida grande hecha con arena de Chamota tiene apariencia externa muy buena, la Chamota es notable por su resistencia a la alta erosión del acero fundido, estando su mayor aplicación en mezclas para machos y en elementos del sistema de alimentación.

### **1.3 Características de la arena sílice**

Según (Hernando Mendoza, 2007), las arenas de sílice se caracterizan por los aspectos siguientes:

Las arenas de Sílice provienen de la desintegración paulatina de las rocas de granito. Estas son formaciones cristalinas de Cuarzo o Sílice, junto con los minerales mica y feldespato, porción esta que conforma la llamada arcilla. El feldespato es un aluminio – silicato, el cual aparece en ocasiones con porciones de hierro y su fórmula química es  $\text{Fe}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_3$ .

Esta diversidad de constituyentes es la que imparte a la arena su coloración, la cual puede ser roja, marrón, amarilla, blanca, etcétera. La explotación de los depósitos de arena y arcilla se realiza a cielo abierto.

Es un compuesto de silicio y oxígeno, los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre, los cuales se combinan con diversos elementos metálicos para producir silicatos, cada silicio está rodeado de cuatro oxígenos. Existen más de 900 silicatos diferentes. El silicio posee en principio dos electrones de valencia y se podría pensar en la formación de un compuesto molecular de SiO. Sin embargo, la molécula más estable en condiciones normales es SiO<sub>2</sub> (Sílice).

### Formas

La sílice se encuentra sin combinar con otros materiales en varias formas cristalinas de las cuales el cuarzo, es uno de los minerales más comunes en la naturaleza, otra forma de sílice incluye la tridimita de alta temperatura. La estructura del cuarzo es el tetraedro de silicio y oxígeno. Está constituido de una armazón tridimensional en la que cada oxígeno es compartido con dos silicios, no hay sustitución de otros iones en las posiciones del silicio. Se presentan en muchas variedades coloreadas debido a trazas de impurezas como el cuarzo rosado, cuarzo ahumado y cuarzo lechoso. Muchas arenas y areniscas tienen al cuarzo como principal constituyente; los granos tienen alta resistencia a la abrasión y transporte.

Las arenas de sílice y cuarzo que contienen más de un 98% de bióxido de silicio, son las de mayor uso comercial, así como las más abundantes. La arena de sílice, es fuerte, dura, baja conductora de electricidad y químicamente inerte. Las fases cristalinas predominantes del SiO<sub>2</sub>: cuarzo, tridimita y cristobalita, no son muy apropiadas para usar como la fase principal en los cerámicos refractarios; debido a sus bajas temperaturas relativas, pueden sufrir modificaciones de fase que están acompañadas por un cambio violento en el volumen.

### Estructura

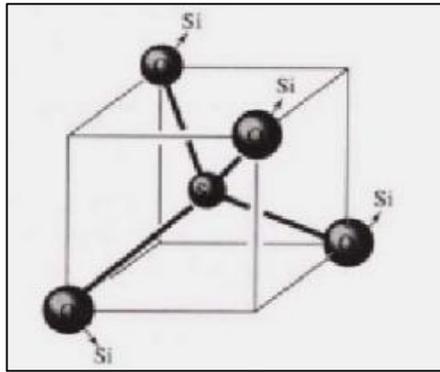
En la sílice, la unidad estructural fundamental es un tetraedro de SiO<sub>4</sub>, es decir, un átomo de silicio rodeado siempre por cuatro átomos de oxígeno (ver Figura 1).

Las fuerzas que mantienen unidos a estos átomos comprenden enlaces iónicos y covalentes, lo cual provoca que la fuerza del enlace sea muy grande. La distancia de separación entre los átomos de Si y O no es homogénea, las unidades tetraédricas no se repiten con regularidad y el compuesto está desordenado. A esta última se le conoce como sílice amorfa, mientras que a la ordenada se le conoce como sílice cristalina, ambas se utilizan en la fabricación del vidrio.

Las variedades de arenisca cuarzosa se reconocen sobre la base de los minerales característicos asociados con el cuarzo dominante. La arenisca típica de este grupo, es la arenita o arenisca de cuarzo puro, la cual contiene 95% o más, de granos de cuarzo.

El armazón  $\text{SiO}_2$ , en su forma más simple, es eléctricamente neutro y no contiene ninguna otra unidad estructural. Sin embargo, existen por lo menos nueve maneras diferentes, según las cuales puede constituirse este armazón.

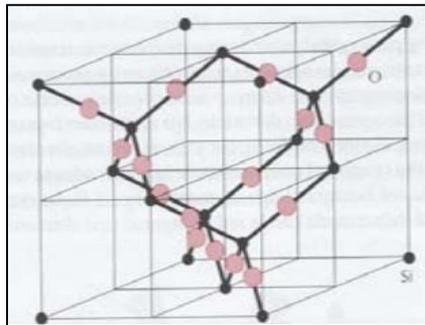
Estos modos de distribución geométrica corresponden a polimorfos conocidos del  $\text{SiO}_2$ , cada uno de estos polimorfos tienen su propio grupo espacial, sus dimensiones de celda, su morfología característica, y su energía reticular. Las condiciones energéticas son las que determinan principalmente cuál de los polimorfos es estable, siendo las formas de temperatura más elevadas y con mayor energía reticular, las que poseen estructuras más dilatadas (ver Figura 1).



**Figura 1.** Estructura tetraédrica de la sílice.

**Fuente:** (Hernando Mendoza, 2007, pág. 2).

En la estructura tetraédrica de la sílice, la razón de radios de  $\text{Si}^{4+}$  a  $\text{O}^{2-}$  es de  $0,29\text{\AA}$  indica que el catión  $\text{Si}^{4+}$  requiere una coordinación tetraédrica con cuatro iones en torno a un catión  $\text{Si}^{4+}$  central. Los tetraedros de  $\text{SiO}_4$  pueden estar ligados de tal manera que se compartan los vértices de varias maneras para formar diversos vidrios de silicato. (ver Figura 2).



**Figura 2.** Estructura Cristalina de la Cristobalita.

**Fuente:** (Hernando Mendoza, 2007, pág. 2).

#### 1.4 Características de las arenas de cromita

Las arenas de Cromita tienen como componente principal Cromo, Hierro, Aluminio y Silicio y su fórmula química es  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  con una densidad de  $4.35 - 4.45 \text{ g/cm}^3$ , la temperatura de fusión de la cromita, para un contenido de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  alrededor de 40% es próxima a  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Además de Cromo como componente principal puede contener cuarzo, arcilla, entre otras, como impurezas las cuales empeoran sus propiedades y disminuyen la temperatura de fusión. Entre las arenas de moldeo, la Cromita ocupa un lugar principal en la producción por fundición, los principales productores son: Zimbabue, Sudáfrica,

Filipinas, Finlandia y la ex URSS que poseen los principales yacimientos de Cromita del mundo.

La Cromita es un mineral oscuro grisáceo, a menudo en tonalidades negras parduzcas, acompañado de un brillo metálico que es complicado de observar, su raya es de color marrón oscuro. Posee una dureza media de 5.5, la tenacidad es frágil y su densidad es de media a alta casi  $4.6 \text{ g/cm}^3$ , esta propiedad en especial la diferencia de otros compuestos similares como la ilmenita y la magnetita.

### **1.5 Características de las arenas de olivino**

La arena de Olivino es una arena especial para la fabricación de moldes y machos en la industria de la fundición. Su carácter básico la hace adecuada en la fabricación de piezas fundidas de acero al manganeso, comparativamente con la arena de sílice es menos reactiva con el óxido de manganeso.

La dilatación térmica de la arena de olivino es menor que la de la arena de sílice (ver tabla 1) y tiene una alta resistencia al choque térmico, con lo que se reducen también los problemas derivados de la expansión de la arena, (Empresa Mecánica de Níquel , 2006).

La arena olivino forman parte de grupo de silicatos de fórmula general  $2RO \cdot SiO_2$  donde R puede ser un óxido de Mg, Fe, Mn, Ni, Co, Zn, o Ca, o combinaciones de estos. Los silicatos más conocidos de este grupo son olivino  $(MgO \cdot FeO) \cdot SiO_2$  y la serpentina  $3MgO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Cuando la arena olivino no contiene FeO se denomina Forsterita y si no contiene MgO, se conoce como Fayalita. La Forsterita puede formar con la Fayalita soluciones sólidas que disminuyen la temperatura de fusión sobre todo en la medida que se aumente el contenido de Fayalita, (Salcines Merino C. M., 1985).

Las arenas de olivino que se emplean en fundición deben tener un contenido mínimo de  $2MgO \cdot SiO_2$  de 80 %, pérdidas por ignición no mayores de 1,35 % y humedad inferior al 1 %, (Orozco Melgar, y otros, 2013).

Las arenas de olivino dan buenos resultados empleadas en mezclas de cara y en machos, ya que no reaccionan con los óxidos de hierro. Su temperatura de fusión es alta y evita la

penetración metálica en los moldes de arena. Las arenas de olivino no deben mezclarse con la arena sílice, debido a que en presencia del metal líquido puede favorecerse la presencia de Fayalita. (Salcines Merino C. M., 1985).

En el municipio local, Moa, en las zonas “Merceditas” y “Amores” existen reservas de arenas de olivinos, también conocidas como “dunitas serpentinizadas”. La arena olivino de Moa, le puede brindar al molde una elevada resistencia capaz de soportar la presencia de metal líquido durante el proceso de colado, lo que les permite responder a las exigencias tecnológicas del proceso de fundición, (Pons Herrera, 1999).

Las mezclas de moldeo preparadas con la arena de olivino fueron evaluadas durante el desarrollo de la tecnología de elaboración de aceros, hierro de fundición para piezas de aleaciones ferrosas y no ferrosas, comprobándose las propiedades refractarias y factibilidad térmica, considerándose aptos para la industrial de fundición. (Pons Herrera, 1999).

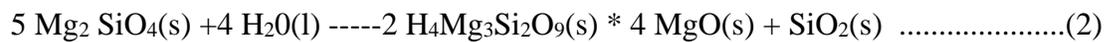
### **1.5.1 Caracterización de las dunitas serpentinizadas de los yacimientos de cromitas refractarias de la región de Moa**

Las rocas duniticas existentes en la región de Moa-Baracoa, han sido “evaluadas en los procesos de fundición como arenas de moldeo y rellenos para pinturas refractarias”, (Pons Herrera J. A., 1999). A continuación, se resumen las principales características de esta materia prima.

#### **1.5.1.1 Características del complejo ofiolítico Moa - Baracoa**

Según (Pons Herrera J. A., 1999), el complejo ofiolítico Moa - Baracoa representa un gran desarrollo de los complejos ultramáficas y de gabros, con espesores estimados de aproximadamente 1000 y 500 m respectivamente, asociados a diferentes rocas y minerales, con muy poco conocimiento geólogo tecnológico como para recomendar su utilización industrial, a pesar de que se conoce, su variado uso en diferentes esferas económicas, (Pons Herrera J. , 2011).

Los principales estudios geológicos realizados sobre las características petrográficas del complejo ofiolítico Moa - Baracoa, señalan que una de las etapas primarias que marcan el proceso de alteración de las rocas que lo conforman, están relacionados, precisamente, con el fenómeno de serpentinización, donde se produce el reemplazamiento parcial del olivino por minerales del grupo de la serpentina. De forma general el fenómeno de serpentinización de las dunitas de la región de Moa, puede explicarse mediante la siguiente ecuación de reacción química:



Las principales fases minerales desarrolladas durante la serpentinización son: serpentina y magnetita, con diversas aleaciones de Hierro y Níquel, primordialmente. Mientras que los fundamentales minerales del grupo de la serpentina, identificados en las zonas de Merceditas y Amores.

## **DUNITAS**

En el yacimiento Merceditas se destacan dos variedades fundamentales de dunitas: verde oscuro y pardo rojizo. Estas últimas se encuentran ampliamente distribuidas, envolviendo los cuerpos de cromitas con una potencia aproximada de 0-6 m. Se caracterizan además por ser rocas compactas, de grano fino y agrietadas, con un agrietamiento secundario debido, al uso de explosivos en los trabajos mineros. En la zona de contacto con la cromita y con el gabro se acentúa el color rojizo y a medida que se aleja se torna más pardo. Se presentan, además, pequeñas cantidades de serpentinitas de color verde amarillento, que acompañan al resto de las rocas encajantes en la mineralización cromífera. Macroscópicamente, estas rocas están compuestas por olivino (90-100 %) con escasos granos de enstatita de pequeños tamaños, serpentina y granos escasos de cromo espinelas (hasta 3 %), de color pardo rojizo a negruzco, (Pons Herrera J. A., 1999, p. 31).

La composición química promedio de las dunitas serpentinizadas presentes en las zonas de Merceditas y Amores se presentan en la tabla No.1, donde se aprecia la gran similitud entre ambas, y el alto contenido de óxido de magnesio y silicio. La relación  $\text{MgO}/\text{SiO}_2 > 1$ , se encuentra dentro de los rangos exigidos, para su utilización como material refractario, Griffiths, J., 1989; mientras que los valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}=1,2 - 1.9$ , demuestran las

características refractarias de estas rocas, comparadas con las de otras regiones del mundo, (Pons Herrera, Ramírez Pérez, & Leyva Rodrigues, 2011)

**Tabla 1.** Composición química promedio (%) de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa.

Composición (%)	Dunitas serpentinizadas de la zona Mercedesitas	Dunitas serpentinizadas de la zona Amores.
SiO <sub>2</sub>	38,86	36,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,81	0,85
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,025
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,32	5,27
FeO	3,60	2,67
CaO	0,17	0,11
MgO	40,50	39,46
NiO	0,29	0,30
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,05
K <sub>2</sub> O	0,05	0,05
CoO	0,010	0,010
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,02
P.P.I	12,30	14,40
Total	101,35	100,04
MgO/SiO <sub>2</sub>	1,04	1,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO.	1,20	1,97

**Fuente:** (Pons Herrera, Ramírez Pérez, & Leyva Rodrigues, 2011).

La composición química del olivino en las dunitas, al igual que en las harzburgitas, presentan un estrecho intervalo de variación. La principal diferencia con respecto a estas rocas radica en el hecho de que el olivino de las dunitas manifiesta mayores valores de Forsterita, donde se destaca, además, que las dunitas tipo II muestran mayor contenido de Forsterita (valor promedio Fo:92,1%;  $\sigma = 0,30$ ), que las de tipo I (valor promedio Fo: 91,5 %;  $\sigma = 0,27$ ). Por su parte los contenidos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en las dunitas oscilan entre 4,84 - 8,24 % en masa para las de tipo II y entre 4,6 -8,99 % en masa para las de tipo I como se aprecia en la tabla siguiente.

**Tabla 2.** Resultados promedio (%) de los análisis de microsonda electrónica realizados a cristales de olivino presentes en las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas Merceditas y Amores.

Composición (%)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Total
Merceditas	40,89	0,001	0,020	0,015	53,19	0,000	0,097	5 157	0430	100
Amores	41,65	0,015	0,023	0,013	52,84	0,009	0,055	4,945	0,478	100

**Fuente:** (Pons Herrera J. , 2000).

Las dunitas de la zona de Amores son de grano fino, de color verde grisáceo y verde negruzco, fuertemente serpentinizadas; poseen textura bandeada y una estructura variada (nodular, reticular, laminar y fibrosa bandeada) en dependencia del tipo de dunita. Compuestas mayormente por olivino (30-90%) y en menor proporción por ortopiroxenos (5 %), cromitas (1 %), (Pons Herrera, Ramírez Pérez, & Leyva Rodrigues, 2011, p. 41).

En sentido general, las dunitas de la región de Moa poseen un alto grado de serpentización, fenómeno que se encuentra más acentuado en la zona de Amores que en Merceditas, pero que no limita su aplicación industrial. Sin embargo, sobresalen en ellas otras regularidades, como son: la ausencia prácticamente total de piroxenos (menor de 1 %), el alto contenido de Forsterita (91 – 94 %), pequeños contenidos de impurezas como el hierro, que en conjunto favorecen su utilización como material refractario, en los procesos de fundición.

### **1.5.1.3 Características térmicas y mineralógicas de las dunitas serpentinizadas de las zonas Merceditas y Amores**

A partir de los resultados de los análisis térmicos, específicamente, de la forma de los efectos endotérmicos y exotérmicos, la posición de los mismos y las temperaturas a las cuales se producen, principalmente entre 670 - 850 °C, se estableció la diferencia entre los

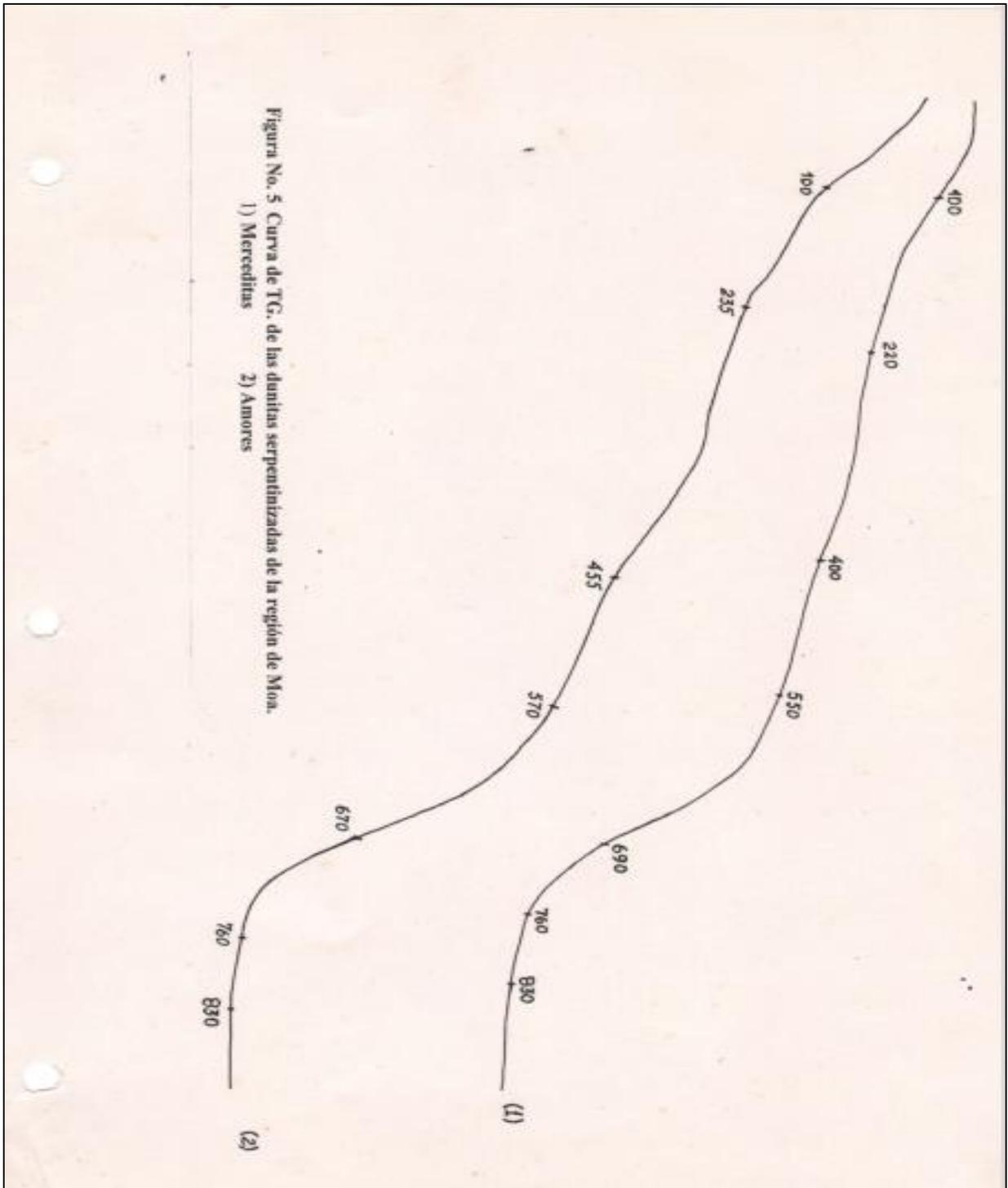
subgrupos de la serpentina, comprobándose que se trata del grupo antigorita de fórmula química ideal:  $Mg_3 Si_2 O_5(OH)_4$ . La presencia de esta fase mineral se detectó a través de los análisis de difracción de rayos - X (DRX), en todos los tipos litológicos de dunitas estudiadas.

En los registros gráficos de estos ensayos, se destaca el comportamiento uniforme de las dunitas naturales de ambas zonas, con pequeñas diferencias en las temperaturas a las cuales se producen los efectos endotérmicos y exotérmicos, así como en las variaciones de masa que experimentan estos materiales durante su calentamiento, (Pons Herrera J. , 2000).

De forma general como resultado de estos análisis se destacan las siguientes regularidades en cada una de las muestras estudiadas, reflejado en las figuras 3 y 4.

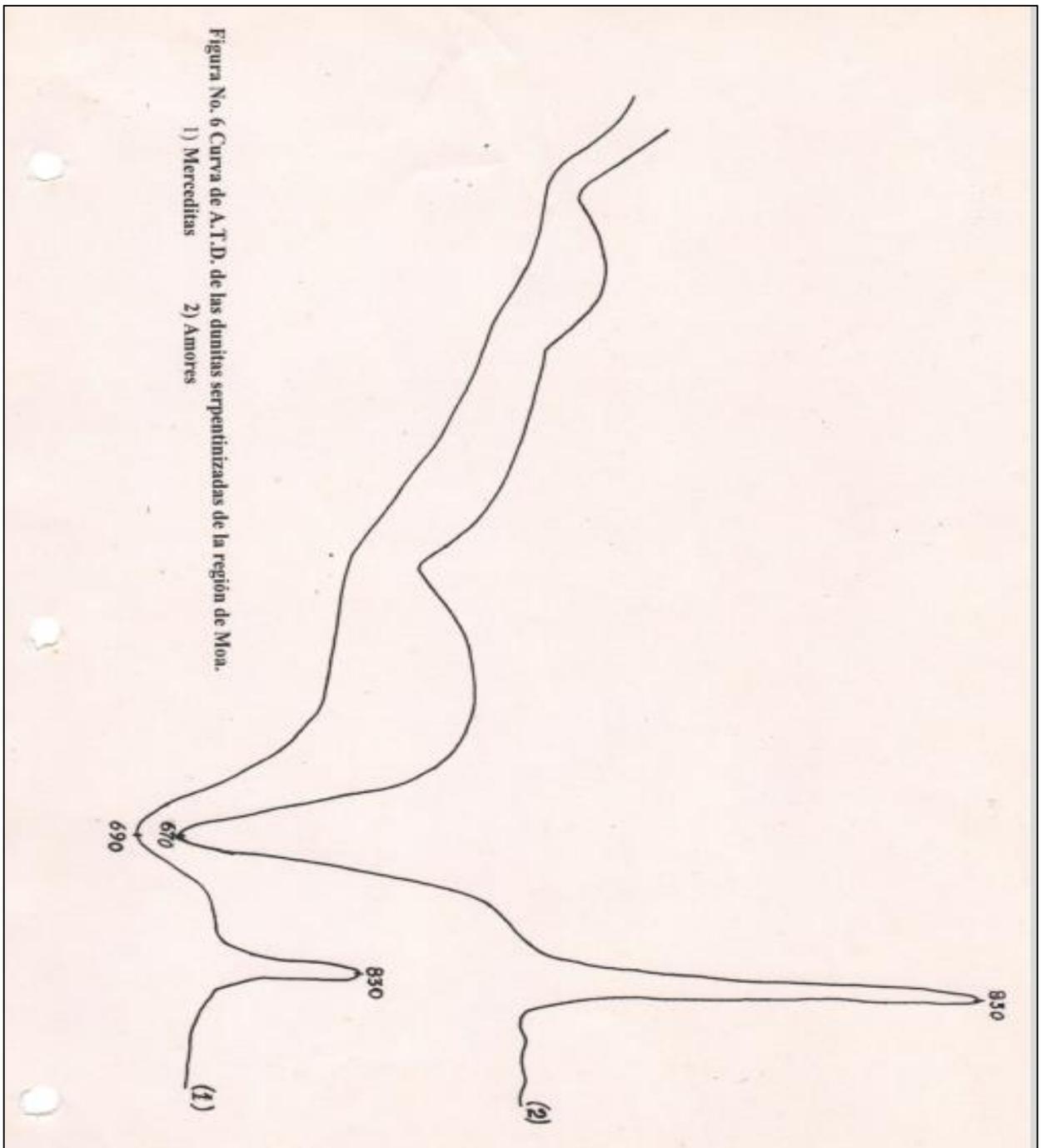
#### **Merceditas**

A partir de 220°C se observa un continuo efecto endotérmico que se prolonga hasta los 550 °C, con pérdidas de masa de 2,58 %, seguido del principal efecto endotérmico, caracterizado por un pico agudo a 690 °C. Este efecto va acompañado en la curva A.T.G. (ver figura 3), por una importante disminución de masa (5,10 % con respecto a su masa inicial), correspondiente al desprendimiento de los grupos oxidrilos, que en el caso del crisolito se produce entre 600 y 700 °C, con un máximo aproximadamente a 650 °C, es decir, 40 °C por debajo del mismo efecto producido, en este caso, por la antigorita. Formoso, y otros, 1988; Gervilla, F,1996. En total las pérdidas de masa en las dunitas de la zona de Merceditas oscilan entre. 10.6 - 12.



**Figura 3.** Curva de TG de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa. (1. Merceditas 2. Amores).

**Fuente:** (Pons Herrera J. A., 1999).



**Figura 4.** Curva de ATD de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa. (1. Merceditas  
2. Amores).

**Fuente:** (Pons Herrera J. A., 1999).

## Amores

Como resultado de los análisis térmicos, se produce un pequeño efecto endotérmico entre 100 - 235 °C, en la curva A.T.D., al que acompaña una pequeña disminución de masa, de alrededor del 3,71 %, En el A.T.G. (ver tabla No. 3) producto de la eliminación de la humedad higroscópica que posee la muestra.

**Tabla 3.** Pérdida de masa en las diferentes etapas del proceso de descomposición térmica de la dunitas serpentinizadas de la región de Moa.

Muestras	$\Delta T$ (°C)	Pérdida de masa		Fases principales
		mg	%	
Merceditas	25-220	8.24	2.16	An
	220-550	9.8	2.58	An
	550-760	19.4	5.10	An y Fo
	760-900	2.8	0.74	Fo
<b>Total</b>		<b>4.24</b>	<b>10.6</b>	<b>An y Fo</b>
Amores	25-235	18.2	3.71	An
	235-570	21.8	4.44	An
	570-760	27.04	5.51	An y Fo
	760-900	2.16	0.44	Fo
<b>Total</b>		<b>69.2</b>	<b>14.1</b>	<b>An y Fo</b>

An: Antigorita.

Fo: Forsterita.

**Fuente:** (Pons Herrera J. A., 1999).

De forma general el comportamiento térmico de las dunitas de las zonas Merceditas y Amores es típico de minerales del grupo de la serpentina, específicamente antigorita. Los difracto grammas obtenidos para las dunitas serpentinizadas de la zona de Amores confirman, la presencia de la antigorita como fase principal. Sin embargo, de forma general se pudo comprobar, a través de los análisis de rayos X y petrográficos realizados Pons, H., y otros 1998, el mayor grado de serpentización que poseen estas rocas, con respecto a las de la zona de Merceditas.

La refractariedad de las muestras de serpentinas cubanas y dunitas españolas (poco serpentinizadas) es bastante similar e inferior a las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas Merceditas y Amores, como se aprecia en la tabla No. 4. Estas últimas poseen una refractariedad mayor de 1650 °C, asumiéndose, a partir de los resultados de los análisis químicos y mineralógicos, una temperatura de fusión entre 1750 y 1800 °C, aproximadamente 1790 °C, según el diagrama de Bowen y Shairer lo que garantiza su utilización como material refractario en los procesos de fundición (arenas de olivino y componente refractario), ya que la temperatura del metal líquido al verterse en los moldes de arena no superan, generalmente, los 1650 °C.

**Tabla 4.** Análisis comparativo de los ensayos de refractariedad realizados a diferentes muestras de serpentinas y dunitas.

Muestras	I.T (°C)	S.T (°C)	H.T (°C)	F.T (°C)	F.T-S.T (°C)
Dunitas	1396	1486	1541	1570	84
Españolas					
Serpentinas	1445	1501	1549	1577	76
Cubanas					
Serpentinas	1469	1479	1504	1527	48
Miraflores*					
Dunitas	-----	-----	-----	(Mayor	?
Merceditas				de 1650)	
Dunitas	-----	-----	-----	(Mayor	?
Amores				de 1650)	

Investigaciones de la zona perspectiva de Miraflores, realizadas por Pons y otros, 1999

I.T - Temperatura de inicio de la deformación.

S.T - Temperatura de reblandecimiento.

H.T - Temperatura hemisférica.

**Fuente:** (Pons Herrera J. A., 1999).

### 1.6 Clasificación de mezclas de moldeo

La clasificación de las mezclas de moldeo, según Salcines (1985), puede resumirse de la manera siguiente:

- Según su utilización.

Mezclas únicas.

Mezclas de cara

Mezclas de relleno.

- Según el estado del molde.

Mezclas para moldes húmedos.

Mezclas para moldes secos.

- Según el tipo de arena empleada.

Mezclas naturales.

Mezclas sintéticas.

- Según el tipo de moldeo empleado.

Mezclas para moldeo manual.

Mezclas para moldeo mecanizado.

- Según el tipo de aleación de la pieza.

Mezclas para acero.

Mezclas para hierro fundido.

Mezclas para no ferrosos.

## **1.7 Propiedades de las mezclas de moldeo**

Para la fabricación de moldes permanentes para fundición por gravedad, se utilizan generalmente fundiciones o aceros aleados, o aceros de herramientas para trabajo en caliente; las propiedades de este tipo de materiales se analizan en el apartado que hace referencia a los materiales para moldes de fundición a presión.

En cuanto a la fundición por gravedad en moldes desechables, el material más utilizado, con diferencia, para construir estos moldes es la arena. Es imprescindible controlar ciertos parámetros o propiedades de las arenas si se quieren obtener buenos resultados. Para determinar la calidad de las arenas de fundición, se someten a pruebas periódicas, ya que sus propiedades pueden variar por contaminación de materiales extraños, por la acción de los recocidos, por la exposición a altas temperaturas, por el cambio de los tamaños de

grano, etc. Estas pruebas suelen estar diseñadas para determinar este tipo de propiedades de las arenas, (Salcines Merino C. M., 1985):

**Refractariedad.** Es la aptitud para soportar altas temperaturas sin fundirse. En las pruebas, se mide la temperatura a la que comienza a reblandecer la arena (cuyo valor adecuado dependerá del material a fundir).

**Cohesión.** Mide la capacidad de las arenas para mantener la forma moldeada, y depende tanto del contenido de agua como del de arcilla. Para medir esta propiedad se somete una probeta cilíndrica de 2" de altura y 2" de diámetro, a ensayos de compresión, cortadura, tracción y flexión.

**Permeabilidad.** Mide la aptitud de la arena a permitir la salida o escape de gases y vapores formados en el molde, es decir, la porosidad. Las pruebas consisten en medir el volumen de aire que atraviesa una probeta de arena en unas condiciones de presión determinadas.

**Fluencia.** Es la aptitud que presenta la arena para transmitir a través de su masa las presiones recibidas en su superficie. Para obtener el valor de la fluencia, se deja caer un peso sobre una probeta y se calcula la relación entre la dureza de la superficie impactada y de la superficie inferior.

**Moldeabilidad.** Es la aptitud que presenta la arena para variar de forma. Para medirla, se somete una probeta de arena a compresión hasta rotura y se mide la disminución de la longitud.

- **Tamaño y forma del grano (granulometría).** El tamaño de grano que debe tener la arena dependerá de la superficie que haya que producir, y los granos deben ser independientes entre sí hasta el punto que mantenga una cohesión suficiente.

Se utilizan diferentes índices para medir el tamaño de los granos. Por ejemplo, en el índice AFS, uno de los más utilizados, se mide el tamaño medio de los granos de arena,

haciéndolos pasar por varios tamices de diferente finura y analizando el porcentaje en peso que se queda en cada tamiz.

- **Desprendimiento.** Es la facilidad para sacudir la arena y sacarla después de que la pieza haya solidificado. Si la arena lleva mucho aglutinante se endurece mucho al secarla, y es más difícil separarla de la pieza fundida.
- **Resistencia en seco.** Se mide la resistencia de la arena para mantener la forma de la cavidad del molde en seco.
- **Resistencia en verde.** Se mide la capacidad de la arena para formar grumos y retener la forma necesaria, (Moya Rodríguez, 2019).

### **1.8 Características de las arenas utilizadas en el taller de fundición de la EMNI**

Las arenas de fundición son residuos procedentes de fabricación de elementos de fundición en los que se utilizan moldes para conformar la morfología de las diferentes piezas. Más concretamente se obtienen cuando se utilizan moldes perdidos o transitorios, como también se les puede llamar, (Empresa Mecánica de Níquel , 2006).

En este caso el molde se hace comprimiendo arena de fundición alrededor del modelo, colocando en el interior un bastidor adecuado llamado caja. Después de la colada se levanta la caja y se rompe el molde para extraer la pieza. Para crear otra pieza es necesario rehacer el molde. Para los moldes transitorios es necesario preparar la arena, añadiéndoles las materias adecuadas para que adquieran las propiedades convenientes para el éxito de la colada, (Canjila Dala, 2019).

Los moldes perdidos de arenas de fundición destinados a recibir la colada deben poseer las siguientes características:

- Ser plásticos.
- Tener cohesión y resistencia, al objeto de poder producir y conservar la reproducción del modelo.
- Resistir la acción de las temperaturas elevadas, es decir, ser refractarios.

- Permitir la evacuación rápida del aire contenido en el molde y de los gases que se producen en el acto de la colada por la acción del calor sobre el mismo molde (tener permeabilidad).
- Disgregarse fácilmente para permitir la extracción y el pulimento de la pieza.

No siempre puede usarse la arena tal como llega de los depósitos, sino que se somete a algunos procesos de modificación como por ejemplo el de secado que se le realiza aplicándole de 200 °C a 400 °C aproximadamente, para eliminar la humedad. Tanto este, como los restantes que se le puedan practicar, se efectúan después de una serie de pruebas adecuadas que conforman lo que se llama comprobación de la arena.

Las arenas de moldeo empleadas en la fundición se componen de material base (los granos de sílice  $\text{SiO}_2$ ) y de unos aditivos que dotan de cohesión a la mezcla. También pueden aparecer algunas impurezas como la ilmenita ( $\text{FeO-TiO}_2$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) o el olivino [ $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ ], (Salcines Merino M. , 1985).

Para el moldeo de las piezas de fundición, se pueden distinguir tres grupos fundamentalmente:

- Arenas de moldeo verde.
- Arenas de moldeo químico orgánico.
- Arenas de moldeo químico inorgánico.

Las arenas de moldeo verde consisten, mayoritariamente, en arenas de sílice aglomeradas con una mezcla de bentonita y agua. El término “en verde” expresa que el molde permanece con cierto grado de humedad. Las arenas de moldeo en verde utilizan arcillas (entre 6-8 % en peso respecto a la arena) para proporcionar cohesión y tenacidad a la mezcla. El tipo de arcilla más habitual es la bentonita, que consiste en una variedad de montmorillonita o silicato de aluminio hidratado, (Hernando Mendoza, 2007).

Las arenas de moldeo químico inorgánico utilizan como aditivos una resina y un catalizador que endurecen la mezcla por medio de una reacción química. A su vez utilizan como aglomerante base el silicato sódico, (Charchabal Mendoza, 2017).

Las arenas de moldeo químico orgánico presentan una gran variedad de sistemas, en función del tipo de aglomerante empleado. La elección de un tipo particular de aglomerante depende del tipo de metal fundido, el tiempo de curado deseado, la complejidad y el espesor de las piezas, etc. Las cantidades óptimas de resina pueden variar entre el 0.8 y el 1.5 %, en peso respecto a la arena, y dependerán del tipo de arena utilizada, de la resistencia necesaria y de la forma de fabricación de los moldes y los machos. Los aglomerantes comúnmente utilizados son las resinas furánicas, resinas fenólicas y resina uretano (resina fenólica e isocianato), (Botasso, Fensel, & Monzón, 2005).

Según la Empresa Mecánica Enrique Varona González de La Habana, (Especificaciones técnicas de las arenas para preparar mezclas usando resinas orgánicas, 2009) las arenas de moldeo químico orgánico deben cumplir los siguientes requisitos, (Moya Rodríguez L. , 2019):

- 95 % SiO<sub>2</sub> (silicio)
- 0.9 a 0.2 % de aluminio.
- 0.018 a 0.020 % de hierro.
- 0 % de arcilla.
- Tamaño, forma y distribución del grano.
- Promedio: 0.22 mm
- Tipo de grano: debe procurar ser redondo
- Granulometría: Según norma internacional 45 a 55 AFS (2010).
- Humedad: 0 %
- Temperatura: 20 a 25 °C.
- % de polvo por debajo del tamiz:  $0.125 \leq 3\%$  a 4 % la suma.
- Alcalis  $\leq 0.05$  %
- Impalpables: máximo 0.20 %.
- Partículas menores de 0.71: máximo 0.1%.

- pH: máximo de 3 a 7, mínimo de 8 a 4.

Las arenas de moldeo deben ser puras, lavadas y secas y la granulometría debe estar como promedio en 0.22 mm para lograr tiempos aceptables de curado, valores de resistencia mecánica buenos y los finos que es el factor fundamental que influye en las arenas negativamente, de no existir, mejor, ya que las hace más puras. Además de estas propiedades, existen otras fundamentales que son la permeabilidad, la refractariedad y la superficie específica, (Salcines Merino M. , 1985, p. 14).

La permeabilidad es la más importante de las propiedades de las arenas, porque garantiza la salida de los gases y el vapor de agua del molde que se elabora depende de la distribución, forma y tamaño del grano. Por otra parte, la refractariedad es la resistencia de las arenas a las altas temperaturas, soportar cambios bruscos y el impacto del metal caliente. En cambio, la superficie específica garantiza la resistencia mecánica de la mezcla al contacto con el metal y las acciones de fuerza a elevadas temperaturas, esta además depende del tamaño, forma, distribución y composición química de la arena, (Charchabal Mendoza, 2017, pág. 21).

### **1.9 Escorias siderúrgicas**

La escoria granulada de fundición es un residuo generado en el proceso de fusión de chatarras de hierro fundido en horno cubilote. Presenta estructura amorfa, resultante del enfriamiento brusco (también llamado granulación) que sufre durante su vaciamiento a un canal con flujo de agua, (Lovera Dávila, Arias, & Coronado Falcón, 2004, p. 13).

La muestra de EGF fue el resultado de distintas cargas del horno cubilote y realizada en diferentes días, para garantizar la mayor representatividad. Este material, durante la colecta se presenta sobre la forma de pequeñas partículas con dimensiones próximas a las de la arena gruesa. Para adquirir características apropiadas como sustituto de parte del cemento, esta escoria fue beneficiada (molida) en molino de aros cilíndricos, hasta alcanzar un tamaño promedio de los granos de 26,4  $\mu\text{m}$ , cumpliendo así uno de los criterios físicos establecidos por la NBR 12653/1992, que clasifica los materiales con propiedades piroclásticas (de tipo puzolana). Esta norma también exige como índice de actividad puzolánica

el valor mínimo de 75 %. La escoria granulada de fundición beneficiada presentó un índice de actividad puzolánica igual a 88,5 %, alcanzando así las condiciones de la norma, (Ceccato, Masuero, Moraes, & al, 2009, pág. 747).

La escoria granulada de fundición beneficiada presenta masa específica igual a 2,83 g/cm<sup>3</sup> y grado de vitrificación igual a 97 % (determinado por el método Mac Máster), con microscopía óptica de luz transmitida. La composición química de la EGF, obtenida vía fluorescencia de Rayos X se encuentra en la tabla siguiente.

**Tabla 5.** Composición química (%) de la escoria granulada de fundición.

Principales Compuestos	Escoria Granulada de Fundición (%)
SiO <sub>2</sub>	49,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,68
FeO	2,97
MnO	2,81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
S	0,64
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,67
TiO <sub>2</sub>	0,67
CaO	21,78
MgO	11,00
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO (%)	62,85
(%CaO) / (%SiO <sub>2</sub> )	0,4427

**Fuente:** (Ceccato, Masuero, Moraes, & al, 2009).

### 1.10 Clasificación de las escorias siderúrgicas

La producción de acero genera grandes volúmenes de escoria. Entre las Acerías españolas se generaron cerca de 500.000 t en el año 2007. Estas cantidades y el hecho de que en la actualidad su único destino sea el vertido provocan la imperiosa necesidad de actuar, estudiando las distintas posibilidades de valorización y las exigencias en cuanto a

composición necesarias para cada una de ellas, (Vizán Sara & Huerta Martínez, 2010, pág. 3).

La escoria de acería, también llamada escoria LD o escoria BOF (Basic Oxygen Furnace) se produce en el convertidor: el arrabio procedente de los Hornos Altos se carga junto con la chatarra y otros aditivos en el convertidor de acero, oxidando el carbono, el silicio y el fósforo presentes mediante la inyección de oxígeno. El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO<sub>2</sub>) y el resto de impurezas en forma de escoria semipastosa que sobrenada por encima del acero, lo que permite separarla de este y enviarla a un foso donde se riega hasta alcanzar las temperaturas inferiores a 50 °C. (Vizán Sara & Huerta Martínez, 2010, pág. 3).

Una vez que alcanza la temperatura adecuada para el transporte, se conduce a la planta de procesado de escorias. En esta parte de la gestión de la escoria, se procede en primer lugar a la separación de la chatarra contenida en la escoria mediante electroimanes, recirculándose esta parte de nuevo al convertidor como aporte de chatarra y clasificándose la escoria en distintas granulometrías que pueden ser del orden de 0/3, 3/7 y mayor de 7mm. La composición química que presenta la muestra está representada en la Tabla siguiente.

**Tabla 6.** Composición química (%) de la escoria de refinación (Blancas).

Principales Compuestos	Escoria Blancas (%)
SiO <sub>2</sub>	16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.2
Fe Total	16.04
MnO	5.90
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.50
B	0,17
Mo	0,08
K <sub>2</sub> O	0,20
Cu	0,03
CaO	48.00
MgO	5.20

**Fuente:** (Vizán Sara & Huerta Martínez, 2010, pág. 4).

### **1.11 Evaluación de los impactos en el caso de envío de la escoria a vertedero**

En la actualidad la mayor parte de la escoria producida se envía a un vertedero autorizado. Esto origina una serie de impactos medioambientales que van a ser la referencia de los impactos generados por el resto de aplicaciones potenciales. En las bases de datos correspondientes a IMPACT 2002 se registra que los principales impactos de la escoria de arco eléctrico (que se puede considerar que produce unos impactos similares a la escoria de convertidor), (Vizán, Martínez, Traviesa, & Fernández, 2010, pág. 8).

- Sustancias peligrosas para la salud asociadas a sustancias no-cancerígenas.
- El uso de energías no-renovables. Luego hay otros impactos, aunque en menor medida que los anteriores como pueden ser la eco toxicidad, partículas que originan problemas respiratorios, etc. Otro punto importante es el transporte de la propia escoria al vertedero. En la mayoría de los casos los vertederos van a estar situados cerca de la propia producción de acero para minimizar este impacto, aun así, es un impacto que es necesario contabilizar, ya que lleva asociado una serie de acciones: gasto de combustible, emisión de partículas en el desplazamiento y desgaste del transporte en la carretera.

Una vez que se ha definido este marco de referencia será necesario definir los impactos asociados en los grupos de escoria definidos asociados a una serie de aplicaciones potenciales.

### **1.12 Aprovechamiento y valorización de los residuos metalúrgicos**

Aprovechar los residuos resultantes de los procesos productivos reciclándolos y utilizándolos nuevamente como materia prima permite la disminución de la cantidad de residuos que se vierten al medio.

Entre las acciones de reúso y recuperación, señalamos la utilización de los residuos sólidos que contienen derivados del carbón que sobran en la producción del coque (proceso integrado), como materia prima en la industria química; el empleo de la escoria en la fertilización de suelos áridos, en la fabricación de grava para carreteras o en la industria metalúrgica como materia prima en la planta de sinterización (proceso integrado); con relación a las arenas usadas de moldeo, este residuo dependiendo de la evaluación del

contenido de contaminantes se pueden utilizar en la construcción de carreteras, como material de rellenos y nivelación de superficies, la fabricación de ladrillos, cementos y asfalto, (Jaramillo Hurtado, 2007, pág. 70).

Por su parte los polvos pueden reciclarse mediante técnicas de concentración para elaborar un producto con características carbono reductoras con un alto valor añadido que puede usarse nuevamente como materia prima en el proceso; los residuos de refractario se pueden emplear por su elevada resistencia a las altas temperaturas para la protección de las paredes del horno de arco eléctrico contra la acción del líquido fundido o como materia prima en la fabricación de un nuevo refractario, con respecto a los residuos metálicos que se originan durante el proceso metalúrgico, estos se reintegran ampliamente en la fundición, aunque la chatarra utilizada como materia prima proviene básicamente de la industria metalmeccánica, el desguace de automóviles, maquinaria, herramientas, electrodomésticos obsoletos, desmantelamiento de plantas industriales y talleres metalmeccánicos, (Jaramillo Hurtado, 2007, pág. 71).

Un caso particular que demuestra el aprovechamiento de los residuos metalúrgicos se presenta en España, donde esta industria reutiliza como materia prima para alimentar los hornos eléctricos unos 8.5 millones de toneladas de residuos, la escoria generada durante la producción del arrabio y el acero se emplea como material mineral de alto valor para la construcción de carreteras, como lastre o en la fabricación de cemento, evitando la extracción cada año de 4.5 millones de toneladas de caliza, ahorrando 350.000 toneladas de carbón y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en dos millones de toneladas y se ha reducido el consumo energético por la utilización de gas natural y sustitución de la ruta integral por acerías eléctricas en la fabricación del acero, (Jaramillo Hurtado, 2007, pág. 71).

Por su parte en el departamento del Valle del Cauca, recientemente la Corporación Construir consiente de los problemas del medio ambiente y la necesidad de infraestructuras de viviendas, carreteras entre otras, ha trabajado en el diseño de materiales de construcción a base de cemento Portland, (Ceccato, Masuero, Moraes, & al, 2009).

### **1.13 Criterios medioambientales para la utilización de las escorias siderúrgicas**

La ausencia de criterios técnicos-medioambientales de calidad para las escorias de acerías, junto con la existencia de experiencias anteriores, relacionadas con el tema de reutilización de residuos en materiales de construcción, llevadas a cabo sin un control previo de la calidad del residuo, y que en algunos casos ha llegado a plantear serios problemas para la seguridad de la obra y/o el medio ambiente, ponen de manifiesto la necesidad de realizar una investigación que muestre la calidad técnico-medioambiental de las escorias, para su uso en materiales de construcción, (Pons Herrera J. , 2022, p. 11).

En la descripción de los criterios medioambientales se van a distinguir dos supuestos:

- Incorporación de las escorias a la composición del suelo.
- Usos permitidos de las escorias (evitando que lleguen a formar parte del suelo).

#### **1.13.1 Incorporación de las escorias a la composición del suelo**

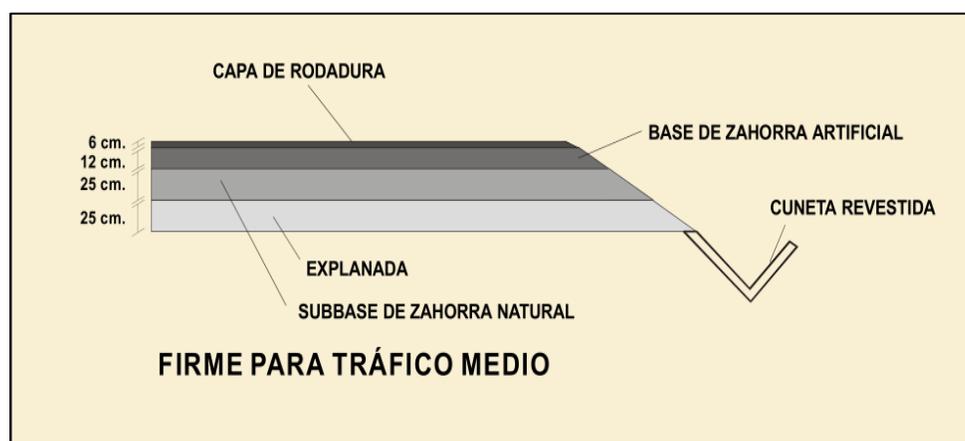
Si la utilización de las escorias de acería se realiza de tal forma que con el tiempo dicho residuo va a ser considerado como si de un suelo se tratase, será preciso determinar su composición química y compararla con los valores de referencia para los suelos en la CAPV (composición natural de los suelos), valores descritos en la Propuesta del Plan Director para la protección del suelo en la CAPV. Este análisis comparativo se realiza siguiendo la metodología analítica descrita en dicha propuesta (extracción en agua regia según la norma (ISO/DIS 11466), de tal forma que, si los resultados muestran que la composición de las escorias no sobrepasa estos valores de referencia, se considera que el residuo puede ser utilizado como si de un suelo se tratase, y por consiguiente no sería preciso ahondar en el estudio del comportamiento del residuo a largo plazo, (Ormazabal & Larrañaga, 1997, pág. 61).

Sin embargo, si se compara la composición de las escorias de las acerías analizadas con los valores de referencia de los suelos de la CAPV, y se observa que esta es superior a los valores de referencia para la mayor parte de los elementos, por lo que la utilización de las escorias en aquellos casos en los que se constituya en el suelo (pistas, forestales, caminos

rurales, rellenos), no cumplen con el nivel de exigencia establecido y por consiguiente debe descartarse como una de las posibilidades de las escorias.

### 1.13.2 Usos de las escorias como material de construcción

En este caso, las escorias no van a formar parte de la composición del suelo, por lo que el análisis del riesgo que su utilización como material granular (los principales usos van a ser como explanada, bases y sub-bases de carretera y como capa de rodadura) supone para el medio ambiente se realizara atendiendo al efecto que produce sobre el suelo el contacto existente con las escorias, (Ormazabal & Larrañaga, 1997, pág. 61). En la figura siguiente se esquematiza este uso de las escorias siderúrgicas.



**Figura 5.** Esquema de las diferentes partes de una carretera.

**Fuente:** (Ormazabal & Larrañaga, 1997, pág. 62).

Por ello, se determina para cada elemento de interés el aporte al suelo, en un período de tiempo de 100 años, de los contaminantes presentes en las escorias, y se compara con el aporte que produciría un cambio en la composición del primer metro de un suelo de referencia al igual a un 1%, (Jaramillo Hurtado, 2007, p. 17).

Si los resultados de dicha comparación muestran que no se alcanza el valor límite, es decir, que el uso de las escorias en contacto con el suelo no supone un aporte de contaminantes tal que produzca un cambio en la composición del primer metro de un suelo de referencia superior a un 1 % en 100 años, se considera que la utilización de escorias en contacto con el suelo supone un riesgo aceptable para el medio ambiente. Por otro lado, si los resultados

sobrepasan los valores límite, es preciso establecer un estudio exhaustivo del cambio que provoca en la composición del suelo la utilización de las escorias, y del riego que dicho cambio supone para el medio ambiente, (Ormazabal & Larrañaga, 1997, pág. 62).

No obstante, la utilización de estos materiales en aplicaciones en contacto con el suelo implica la reiterada y posterior gestión de los mismos una vez que finalice el uso al que han sido destinados.

Para estimar la liberación de contaminantes de las escorias se ha puesto un espesor de capa de 0.7 m, espesor que engloba las diferentes alturas de material granular utilizadas en una carretera, y la utilización de capas granulares constituidas exclusivamente por escorias.

Sin embargo, en el caso de que las escorias vayan a utilizarse como material granular en mezclas bituminosas (fundamentalmente capa de rodadura) y debido a las propias características impermeabilizantes del betún, aunque se sigue la misma metodología utilizada en el caso de la utilización de las escorias como material granular en bases y sub-bases de carretera, con el fin de obtener una mejor aproximación a la realidad, se considera que el espesor de cada capa que está en contacto con el agua de lluvia es de 1 cm (zona superficial de la capa de rodadura) y que la utilización de escorias se lleva a cabo reemplazando el 100% de los áridos utilizados en las mezclas, (Ormazabal & Larrañaga, 1997, pág. 62).

En lo referente a la utilización de escorias en la fabricación de cemento, se hace un control y comparación de las emisiones durante la cocción del crudo, con o sin adición de escorias, frente a los niveles de emisión permitidos por la normativa vigente.

Por otra parte, y dado que el fraguado del cemento supone la inmovilización de la composición del mismo, es esperable que no se produzca una liberación apreciable de estos elementos una vez se proceda al uso de un cemento elaborado con escorias.

Debido a la inexistencia de criterios medioambientales se ha seguido la misma metodología a la hora de valorar los riesgos ambientales que para el caso de la utilización de escorias en la construcción de carreteras, considerando también que el espesor de la capa que está en contacto con el agua de lluvia es de 1 cm, y que la utilización de escorias se lleva a cabo reemplazando el 100% de los áridos utilizados. En lo que respecta a las escorias blancas, debido a imposibilidades de tipo técnico, solo va a ser posible su utilización en la fabricación de cemento, con las mismas consideraciones que las escorias negras, (Ormazabal & Larrañaga, 1997).

### **1.14 Conclusiones del capítulo I**

1. Se demostró que en la región de Moa-Baracoa, existen suficientes materiales con propiedad refractarias y capaces de ser utilizadas en el taller de Fundición de la Empresa Mecánica de Níquel, como arenas de fundición, relleno para pintura antiadherentes, entre otros.
2. De los estudios realizados con anterioridad en la Universidad de Moa y en la propia UEB de Fundición, las arenas de olivino y las cromitas refractarias han sido utilizadas con éxito en la obtención de aceros, hierros fundidos y aleaciones no ferrosas, por tanto, pueden ser utilizadas nuevamente a partir de la creación en la EMNI, de un polígono de materiales de la construcción.
3. Los principales residuales sólidos, que se generan en la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, arena de rechazo, escoria, materiales refractarios, etc. pueden ser utilizados nuevamente en el taller, teniendo en cuenta que existe experiencia internacional y en el mismo taller con el uso de esos materiales.
4. Existe suficiente información que permite conformar un material de consulta para las jóvenes generaciones y ponerla en función del desarrollo del taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

El trabajo de investigación se realizó en la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Cmdte. Gustavo Machín Hoed de Beche”, como parte de un proyecto para el desarrollo de nuevos materiales para este taller, que se ejecuta entre la Universidad de Moa y la EMNI.

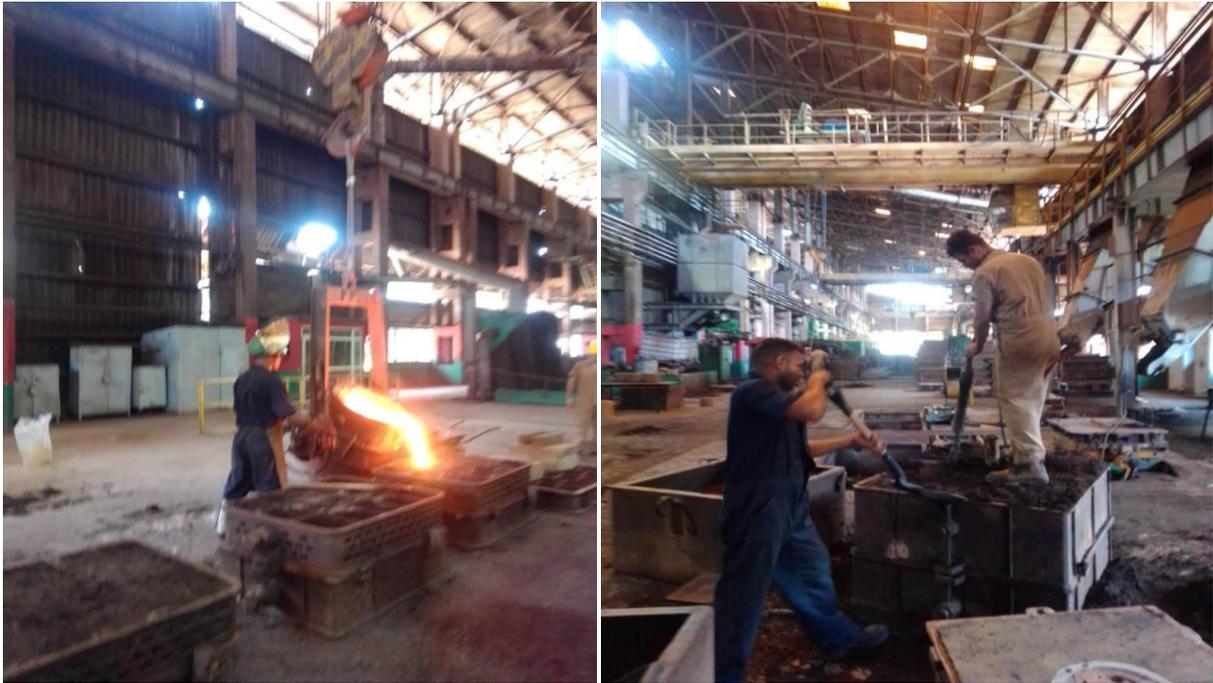
A partir de los trabajos desarrollados con anterioridad con el uso de materiales de la región Moa-Baracoa en el taller de fundición de la EMNI, arenas de olivino, cromitas refractarias, escombros lateráticos, entre otros; así como el reaprovechamiento de los residuales sólidos del propio taller, arenas residuales de fundición, escorias; se identificaron y se evaluaron las posibilidades de utilizar estas materias primas respetando los resultados de otros investigadores y adecuándolos a las condiciones actuales del taller.

También fueron analizados nuevos materiales existentes en esta región del país que, por sus características físico-químicas, pueden igualmente ser utilizados en los procesos de fundición, entre ellos están, los rechazos serpentínicos y las dunitas serpentinizadas remanentes de la antigua mina de cromitas refractarias de Cayo Guam.

A continuación, se describen los principales materiales y métodos de investigación empleados para el cumplimiento de los objetivos trazados.

### **2.1 Breves características del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel**

La UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Cmdte Gustavo Machín Hoed de Beche” fue diseñado para la producción de acero, hierros fundidos y metales no ferrosos, para cubrir las necesidades de reparación y mantenimiento de las empresas productoras de níquel y otros sectores, para un volumen de producción de 2,330.00 ton. de piezas fundidas al año. El proceso de producción está basado en un sistema de producción para piezas unitarias y en pequeñas series, contando con el mecanizado de algunas operaciones teniendo en cuenta el volumen de piezas, distribución por peso y la naturaleza de la fundición.



**Figura 6.** UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel.

## **2.2 Técnicas analíticas empleadas**

### **2.2.1 Selección y toma de muestras**

Muestras de material residual de la antigua Mina de cromitas refractarias en Cayo Guam y de las Minas de la Empresa Moa Nickel S.A Pedro Soto Alba de Moa, (Moa Oriental y Moa Occidental), fueron seleccionadas y analizadas para su futura utilización en el taller de fundición como arenas, pinturas de fundición, y como material de construcción.

En las imágenes que siguen a continuación se muestran momentos de estas operaciones.



**Figura 7.** Proceso de toma de muestras en la antigua mina de cromitas de Cayo Guam.



**Figura 8.** Proceso de toma de muestras en la Mina de la Empresa Moa Nickel PSA (Moa Occidental).



**Figura 9.** Proceso de toma de muestras en la Mina Moa Oriental de la Empresa Moa Nickel PSA.

### 2.2.2 Análisis granulométrico

Las muestras seleccionadas fueron trasladadas hasta el laboratorio de preparación de Minerales de la Universidad de Moa, donde se desarrollan los trabajos preliminares para su caracterización física.

Las muestras de mineral serpentinitico fueron sometidas a un proceso de trituración y clasificación granulométrica, con el objetivo de conocer sus características físico-químicas por fracciones, lo que permitirá definir que clases pueden ser empleadas en el taller y cuales pueden aun ser aprovechadas por la Empresa Moa Nickel, según sus contenidos de Ni, Co, Fe, principalmente.

En las figuras que siguen a continuación se aprecian el equipo de trituración empleado y los tamices utilizados para la caracterización granulométrica.



**Figura 10.** Proceso de preparación mecánica de las muestras seleccionadas.



**Figura 11.** Juego de tamices empleados durante la caracterización física de las muestras seleccionadas.

### 2.2.3 Análisis Químicos

La composición química de las muestras de escorias estudiadas, fueron analizadas utilizando un Espectrómetro de absorción atómica, del Centro de Investigaciones y Desarrollo del Níquel (CEDINIQ). El equipo empleado es un modelo UNICAM SOLAR 929 (Simple Rayo de Luz), que se muestra en la figura siguiente.



**Figura 12.** Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.

**Fuente:** (Cortesías CEDINIQ).

El procedimiento técnico de ensayo empleado para la determinación de los principales elementos químicos Si, Al, Mg, Ni, Co, Mn, Cr, Fe, Cu y Zn, fue el UPL - PT – A-26, mientras que para la determinación de hierro (II), se empleó el método volumétrico, según el siguiente procedimiento técnico de ensayo: UPL-PT-V-03. Por su parte, las pérdidas por ignición (PPI) se determinaron por el método gravimétrico, siguiendo el procedimiento UPL-PT-G-01, (CEDINIQ, 2022).

#### **2.2.4 Equipos auxiliares utilizados en la investigación**

A continuación, se describen los equipos auxiliares empleados para el desarrollo de la investigación.

##### **Balanza**

Como técnica para contabilizar la cantidad de material inicial y los productos obtenidos, se utilizó una balanza digital modelo Sartorius BS 124S, con una capacidad máxima de 120 g y una desviación de 1 mg. Una imagen de este equipo se muestra a continuación.



**Figura 13.** Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

**Fuente:** (Cortesías CEDINIQ).

La balanza analítica fue utilizada para medir muestras pequeñas, con una precisión de 0,1 mg, teniendo en cuenta que es calibrada correctamente, la misma puede compensar las diferencias gravitacionales durante del desarrollo del pesaje.

### **2.3 Obtención y procesamiento de las informaciones de la investigación**

Para el procesamiento de los datos e informaciones obtenidas durante el desarrollo de la investigación, se emplearon los programas que se muestran a continuación:

- Microsoft Office Word 2010.
- Microsoft Office Excel 2010.
- Microsoft Office Picture Manager 2010.
- Adobe Photoshop CC 2018.

Los materiales que constituyen residuales del taller de fundición de la EMNI, como escorias y arenas de rechazo de los procesos de fundición, han sido evaluados teniendo en cuenta las investigaciones anteriores y los resultados internacionales obtenidos con estos tipos de materiales, con el objetivo de propiciar la toma de decisiones sobre su futuro uso en Moa.

## **Conclusiones del Capítulo II**

1. La metodología de investigación empleada, permitió seleccionar y caracterizar a los materiales utilizados y a utilizar en la EMNI, con la calidad requerida para garantizar el éxito de los resultados.
2. Los métodos y técnicas de caracterización de los materiales se realizaron según las normas nacionales e internacionales y tomando en cuenta los trabajos pretéritos desarrollados en la Universidad de Moa.
3. Los materiales que constituyen rechazos o residuales de la UEB de Fundición de la EMNI, han sido evaluados teniendo en cuenta las investigaciones anteriores y los resultados internacionales obtenidos con estos tipos de materiales.
4. Fueron identificadas y seleccionadas las muestras de material serpentínico residual de los procesos de producción de Níquel en Moa (Moa Nickel S.A) y de las antiguas Minas de cromitas de esta región para su caracterización.

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 3.1 Características de los principales residuales sólidos de la UEB fundición

Los principales residuales sólidos que genera actualmente la UEB fundición de la EMNI lo constituyen las escorias y las arenas residuales del proceso de moldeo, que actualmente no reciben ningún tipo de utilidad y continúan provocando contaminación ambiental a la región de Moa. En la figura siguiente se aprecian volúmenes de estos residuales recolectados en diferentes recipientes, listos para ser trasladados a vertederos localizados detrás de la universidad de Moa.



**Figura 14.** Residuales sólidos recolectados en el taller para su posterior traslado a los vertederos localizados detrás de la Universidad de Moa.

#### 3.1.1 Resultados obtenidos con las escorias de fundición

Las escorias obtenidas en el taller de Fundición de la EMNI se caracterizan de forma general por poseer relativamente alto contenido de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{CaO}$ , que son los principales componentes del cemento. En la tabla siguiente se muestran los principales componentes de esta escoria.

**Tabla 7.** Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas en el taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel

No.	Código	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	FeO	MnO	NiO	CoO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	E-1	25.52	8.10	10.48	28.51	1.39	0.296	0.032	1.59
2	E-2	16.45	6.45	10.97	38.75	1.04	0.340	0.036	2.48
3	E-3	22.63	1.78	12.56	50.80	0.25	0.138	0.015	1.43

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

**Leyenda:**

E-1 Escoria de acero inoxidable (HK-40)

E-2 Escoria de acero al carbono (Fe-24)

E-3 Escoria obtenidas de aceros aleados (NI-HARD 4)

Como se observa en la tabla anterior las escorias de los aceros inoxidables (E-1) poseen contenido de SiO<sub>2</sub> de 25.52%, CaO posee 10.48 % y de FeO contiene 28.51 %, estos compuestos constituyen la base fundamental de las mezclas para la producción de cemento y materiales de construcción, lo que demuestra que estas escorias pueden ser utilizadas con estos fines.

Las escorias de los hierros fundidos poseen mayor contenido de FeO (38.75 %) que las anteriores. Este contenido de metal es conveniente recuperar y volver a alimentar a los hornos, con lo cual se reducirá los gastos de materia prima base hierro, e igualmente pueden ser utilizadas como materiales de construcción.

Por su parte, las escorias de los aceros aleados se caracterizan por mayor contenido de FeO, lo cual es necesario recuperar para reaprovecharlo como carga de retorno teniendo en cuenta que el mismo se encuentra en forma mecánica y no química en las escorias.

El uso de electroimanes permitirá al taller recuperar el hierro contenido en las escorias y reutilizarlos en la producción de diferentes tipos de piezas, lo cual significará una reducción de los costos de producción de la empresa. Este elemento constituye un aspecto a continuar investigando como parte de las mejoras tecnológicas previstas para esta UEB.



**Figura 15.** Electroimán de la UEB de Fundición de la EMNI.

**Fuente:** (Elaboración Propia)



**Figura 16.** Escoria de la UEB de Fundición de la EMNI.

**Fuente:** (Elaboración Propia)

Teniendo en cuenta las experiencias internacionales con el tratamiento y uso de las escorias, es recomendable implementar un sistema de granulación de escorias en el taller que garantice una mayor recuperación del hierro contenido en ellas y su uso posterior como material de construcción.

### 3.1.2 Arenas residuales del taller de Fundición

Mensualmente se generan en el taller más de 5 ton. de arenas residuales, fundamentalmente amorfas y con contenido promedio de 70 % de  $\text{SiO}_2$ . Los trabajos relacionados con anterioridad por (Canjila Dala, 2019), demostraron la posibilidad de reutilizarlas para la conformación de agromenas, sin embargo, existe la posibilidad de emplearlas en la mezcla para la producción de cementos, teniendo en cuenta que las empresas de construcción de Santiago de Cuba utilizan este tipo de residual para la conformación de cemento de bajas prestaciones, lo cual será objeto de investigación próximamente en la UEB de Fundición.

En la figura siguiente se muestra que aún se continua la recolección de estos residuales sin reaprovecharse.



**Figura 17.** Arena residual del proceso de moldeo recolectada para enviar a los vertederos de Moa.

En la tabla siguiente se pueden apreciar los intervalos de variación de las arenas residuales del taller de fundición, caracterizadas por la presencia mayoritaria de  $\text{SiO}_2$ , las cuales pueden ser utilizadas para la conformación de materiales de construcción y agromenas.

**Tabla 8.** Intervalo de variación de los principales compuestos químicos de las arenas residuales del taller de Fundición.

<b>Compuestos</b>	<b>Por ciento (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	97,3 – 99,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02 – 0,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10 – 0,40
TiO <sub>2</sub>	0,10 – 0,20
CaO	0,42 – 0,68
MgO	0,09 – 0,30
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.01 – 0.02

**Fuente:** (Canjila Dala, 2019)

La EMNI se encuentra en estos momentos en la conformación de un polígono de materiales de la construcción y como resultado de esta investigación hemos evaluado la posibilidad de la utilización de este residual en este tipo de instalaciones, formando parte de mezclas para la elaboración de granitos, lozas para pisos entre otros posibles usos. A continuación, imágenes del área de localización del polígono de materiales de construcción.



**Figura 18.** Terreno donde se construye el polígono en la EMNI.

**Fuente:** (Elaboración Propia).

Los volúmenes de escoria y arenas residuales que se generan en el taller de fundición mensualmente superan las 5 ton y las 2.6 ton, respectivamente, como se muestra en la tabla siguiente las secciones A y C.

**Tabla 9.** Cantidad de escoria y arenas residuales promedio generadas en la UEB de Fundición.

kg	Hornos	Coladas al Mes	Escorias por colada (Kg)	Escorias generadas al Mes (kg)
1000	1	18	20	900
1000	2	16	20	800
2500	3	20	50	1000
<b>Total</b>				<b>2700</b>

**B**

kg	Hornos	Coladas al Año	Escorias por colada (Kg)	Escorias generadas al Año (kg)
1000	1	212	20	10600
1000	2	187	20	9350
2500	3	242	50	12100
<b>Total</b>				<b>32050</b>

**A**

**C**

---

Mes	5
Año	60

Anualmente los valores acumulados de estos residuales superan las 60 ton de arenas residuales y 32 ton de escoria aproximadamente los cuales son vertidos en áreas cercanas a la universidad de Moa provocando contaminación ambiental y dejando de aportar recursos económicos a la empresa en caso de ser reutilizados. Las arenas residuales ya han sido evaluadas con anterioridad para su uso en la conformación de agromenas. En el caso de las escorias son conocidos sus usos como material de construcción, como fertilizante, sandblasting, materiales refractarios entre otros usos lo que demuestra la posibilidad de reutilizar estas cantidades en el taller de fundición, primeramente, recuperando el hierro contenido en ellas y luego utilizando el resto del material en las aplicaciones mencionadas anteriormente.

Actualmente en el taller no existe una estrategia para la recuperación de estos residuales los cuales son mezclados junto con otros rechazos sin una utilización definida y provocando contaminación al medio ambiente de la región de Moa, al ser depositadas en el vertedero municipal. En la figura siguiente se muestra los recipientes que colectan tanto escoria como arenas residuales.



**Figura 19.** Recipientes utilizados para la recolección de escorias, arenas residuales y otros desechos.

Las escorias generadas en el taller antes de su utilización deben ser estudiadas para comprobar sus características y poder definir el equipamiento a utilizar para su granulación y procesamiento mecánico, operaciones que normalmente se utilizan para el tratamiento de este tipo de residuales. A manera de resumen proponemos reutilizar tanto las arenas residuales como las escorias para reducir o disminuir la contaminación ambiental que actualmente provocan al medio ambiente y aportar utilidades a la Empresa Mecánica del Níquel.

### **3.2 Identificación de los principales materiales utilizados y a usar en el taller**

Como resultado del levantamiento realizado en el taller y en la universidad de Moa, a partir de los trabajos desarrollados con anterioridad en estas entidades, pueden ser utilizados los materiales siguientes:

- ✓ **Arena sílice:** Los volúmenes que utiliza el taller pueden ser sustituidos por **arenas de olivino y cromitas refractarias** existentes en la región de Moa, los cuales han sido utilizados con anterioridad en el propio taller.
- ✓ **Pinturas antiadherentes:** Han sido probadas con anterioridad en el taller, pinturas a base de olivino y cromitas, con materias existentes en la región de Moa, las cuales pueden ser utilizadas, para los tipos de piezas que se producen actualmente en la UEB.
- ✓ **Arenas residuales del proceso de moldeo:** Estos residuales son vertidos actualmente en áreas fuera de la empresa y pueden ser utilizadas en la conformación de agrómenas para la producción de alimentos. Los resultados de las pruebas experimentales realizadas con anterioridad en conjunto con la dirección de agricultura del municipio Moa, están en poder de la dirección del proyecto.
- ✓ **Escorias de fundición:** Se trabaja con un estudiante de la Universidad de Moa y trabajador de la UEB Fundición (Yosvel Lores Matos), en la caracterización de este residual y su posible reutilización en el municipio Moa.

### **3.3 Nuevos materiales para el uso en el taller de Fundición**

A partir de las experiencias en el uso de las arenas de olivino existentes en la región de Moa - Baracoa, en esta investigación se evaluaron las posibilidades de utilizar materiales similares que constituyen residuales de los procesos mineros de producción de níquel y

cromitas refractarias en Moa. Para ello, se evaluaron las características granulométricas de los pasivos ambientales mineros (rechazos serpentínicos) de la empresa Pedro Soto Alba de Moa Occidental y Moa Oriental. También fueron identificados y caracterizados rechazos de la mina abandonada de cromo en Cayo Guam. A continuación, se analizan los resultados de esta evaluación.

### **3.4 Resultados de los análisis granulométricos realizados a las muestras de Cayo Guam y Moa Nickel**

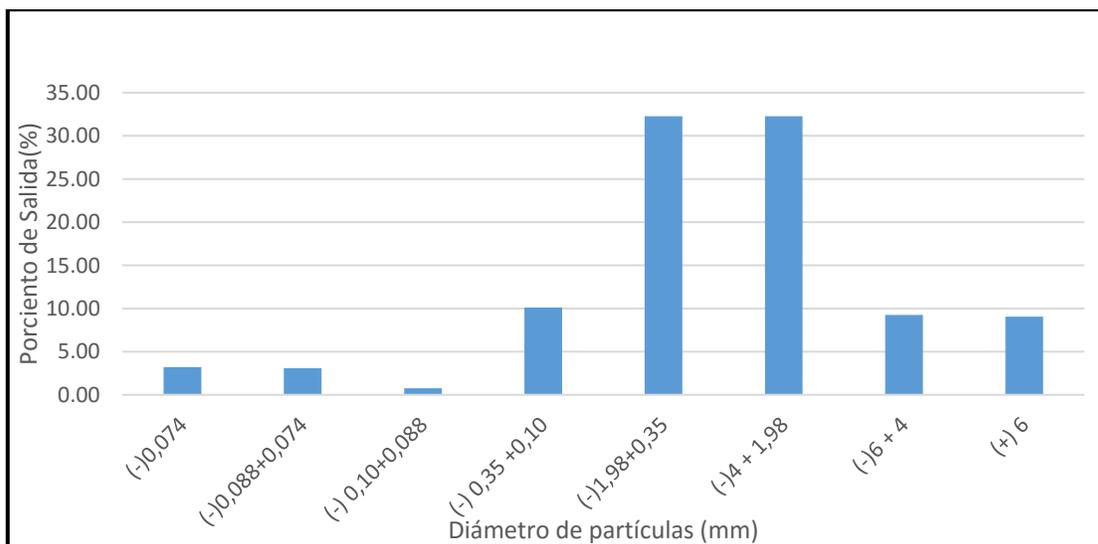
Los ensayos de trituración y clasificación granulométrica realizados a las muestras de serpentinas y rechazos duniticos de las antiguas minas de cromo de Cayo Guam, tomadas de las zonas de estudio arrojaron los resultados siguientes:

Para un espectro de diámetro de partículas entre 6 y 0,074 mm, se comprobó 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. Por su parte, las fracciones  $- 1,98 + 0,35$  mm, son las que normalmente se emplean como áridos para la conformación de morteros para la construcción y su promedio representa alrededor del 50 % del retenido, lo cual es un elemento importante para el desarrollo de esta investigación. En la tabla siguiente, se aprecian los resultados de la caracterización física de estos materiales.

**Tabla 10.** Características granulométricas promedio, retenido y cernido, de los rechazos serpentinitico de los yacimientos Moa Oriental y Cayo Guam.

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

En el gráfico siguiente, se muestran las características granulométricas del rechazo serpentinitico, según el porcentaje de salida de cada clase con respecto al diámetro de las partículas.



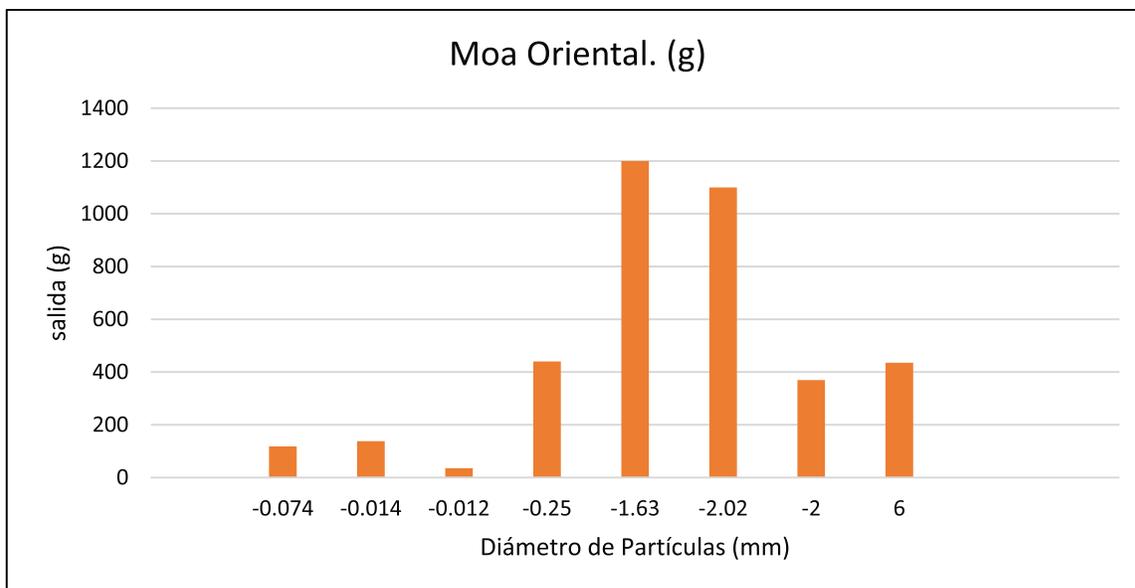
**Grafico 1.** Características granulométricas promedio de los rechazos duniticos de la antigua mina de Cayo Guam.

La composición granulométrica de las muestras, representada anteriormente, evidencian un predominio de las partículas - 4 +1,98 y - 1,98 +0,35 mm, que agrupan el 64,54 % del peso de los materiales serpentínicos estudiados, los cuales pueden ser empleados como arenas de moldeo en la UEB Fundición de la EMNI.

Como resultado de este estudio preliminar, se distinguen tres grupos granulométricos, fundamentales, 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 1.98 mm y menores de 4 mm, que representan el 32,27 % y un tercer grupo de fracciones más gruesa, mayores de 4mm, que representan el 9,26 % en peso de la muestra.

Es importante destacar, que 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 de estos materiales, abundantes en la región de Moa-Baracoa.

Por su parte el material residual de la Empresa Pedro Soto Alba, principalmente, Moa Oriental donde existe una planta de preparación de pulpa y se generan este tipo de materiales se comprobó que las fracciones entre -2mm y +0.25mm, representan más del 60% de toda la muestra, como se muestra en el gráfico siguiente.



**Grafico 2.** Características granulométricas promedio de los rechazos serpentiniticos.

Los resultados de la evaluación de estos nuevos materiales (rechazos serpentinitico y duniticos), demuestran que las fracciones utilizadas como arenas de fundición y rellenos para pinturas pueden ser obtenidas en unos casos aplicando trituración y en otros utilizando el proceso de clasificación; pero lo importante de este resultado es la posibilidad de utilizar ambos materiales tanto en el taller de Fundición como en el polígono de materiales de construcción, ya que ellos poseen las características físico-químicas necesarias para su utilización en estos usos.

### 3.5 Valoración Económica

Actualmente el taller de Fundición utiliza arena sílice procedente de Pinar del Rio, para la conformación de mezclas de moldeo, así como pinturas refractarias importadas. Con el uso de materiales localizados en la región de Moa se reducen significativamente los costos de transportación y adquisición de estos recursos al utilizar los rechazos serpentiniticos y duniticos localizados a menos de 15 km de la EMNI.

Para la obtención de arenas de olivinos y rellenos para pinturas refractarias a partir de las materias primas locales es posible utilizar de momento las instalaciones existentes en CEDINIQ de Moa hasta tanto se materialice la construcción del Polígono de Materiales.

Las arenas residuales tienen un costo de adquisición de 2 277.42 CUP/ton cuando son adquiridas inicialmente y luego de su utilización en el taller se convierten en desechos y su costo de reutilización es mínimo por lo que pueden generar utilidades con bajos costos de preparación; mientras que en el caso de las escorias teniendo en cuenta su contenido de FeO anualmente cercanos a las 16ton su reutilización como material de carga reportaría un ahorro de 1 558 939.52 CUP/año para la empresa teniendo en cuenta que el costo de una ton de este tipo de material es de 97 433.72 CUP/ton.

### **Conclusiones Capítulo III**

1. Las escorias generadas en los procesos de fundición de la EMNI poseen alto contenido de hierro, los cuales pueden ser reaprovechados como carga para la producción de piezas fundidas.
2. La conformación de un polígono de materiales de la construcción en la EMNI posibilitará la utilización de las arenas residuales, formando parte de mezclas para la elaboración de granitos, lozas para pisos entre otros posibles usos, luego de realizar los ensayos experimentales correspondientes.
3. El rechazo serpentínico de la empresa Moa Níquel se caracteriza por un 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. Por su parte, las fracciones  $- 1,98 + 0,35$  mm, son las que normalmente se emplean como áridos para la conformación de morteros para la construcción y su promedio representa alrededor del 50 % del retenido, lo cual es un elemento importante para el desarrollo de esta investigación.
4. El rechazo dunítico de la antigua Mina de Cayo Guam, posee características físicas similares a los existentes en las zonas de Merceditas y Amores, elementos que motivan a la continuación de los trabajos investigativos para el uso de este material en la EMNI.

## Conclusiones

1. Las escorias (32ton/año) y las arenas residuales (60ton/año) del taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa pueden ser reaprovechadas, extrayendo los contenidos de hierro para la producción de piezas fundidas, así como para la fabricación de materiales de construcción, como parte del nuevo Polígono que se constituye en la propia empresa.
2. Los rechazos serpentinitico y duniticos, existentes en las minas de la Empresa Pedro Soto Alba y de la antigua mina de Cayo Guam, se caracterizan por el predominio de las partículas  $- 4 +1,98$  y  $- 1,98 +0,35$  mm, que agrupan el 64,54 %, pueden ser utilizadas como arenas de fundición y rellenos para pinturas refractarias en el taller de Fundición.
3. Las características de los residuales del taller de fundición (escorias y arenas de moldeo), y los rechazos serpentiniticos y duniticos de Empresas del Níquel en Moa poseen características físicas que pueden ser procesadas en el futuro polígono de materiales de construcción y utilizadas en el taller aprovechando sus propiedades refractarias y para la conformación de elementos constructivos.

## **Recomendaciones**

1. Evaluar la recuperación del hierro contenido en las escorias del taller de Fundición y su reutilización en la producción de piezas fundidas, así como el impacto económico en el costo de operación de la empresa.
2. Evaluar el uso de las arenas residuales de Fundición para la conformación de materiales de construcción principalmente cementos de baja prestaciones, tomando en cuenta las experiencias existentes en Santiago de Cuba.
3. Contabilizar la cantidad de residuales sólidos, escoria y arenas residuales que se generan en el taller anualmente, conociendo sus características físico-químicas.
4. Evaluar la posibilidad de implementar un sistema de granulación de escorias en el taller, para la recuperación del hierro contenido en ellas y su uso como material de construcción.
5. Continuar las investigaciones con el tratamiento y uso del rechazo dunítico de la antigua Mina de Cayo Guam, como material refractario y de construcción en la EMNI.

## Referencias Bibliográficas

- Aguirre Rodriguez, E. (2015). *Defectos en las Piezas Fundidas*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Botasso, G., Fensel, E., & Monzón, D. (2005). *Uso de Arenas Contaminadas en Mezclas con Ligantes Calcicos e Hidrocarbonados*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Candila Dala, J. (2019). *Desarrollo de Agromenas a partir de las Arenas Residuales del Taller de Fundición de la EMNI en Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico.
- Ceccato, D., Masuero, A., Moraes, C., & al, e. (2009). Reciclaje de Escoria Granulada de Fundición (EGF) como Sustitución de parte del Cemento en Hormigón. *Revista Matéria*, v. 14, n. 1, 737 – 748.
- CEDINIQ. (2022). *Reporte de análisis Químico a Muestras de Escoria de la Empresa EMNI*. Moa: Centro de Investigación y Desarrollo del Níquel.
- Charchabal Mendoza, S. (2017). *Valoración del Residuo de la Arena de Fundición para el Diseño de Mezclas Asfálticas*. Holguín: Univercidad de Holguín.
- Empresa Mecánica de Níquel . (2006). *Manual de Operaciones "Taller de Fundición"*. Moa, Holguín, Cuba: EMNi.
- Hernando Mendoza, H. (2007). *Caracterización Composicional de Sílice de Ramiriquí Bocayá*. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Jaramillo Hurtado, S. (2007). *Diagnostico de la Gestion de los Residuos Industriales y Peligrosos de la Industria Metalurgica en Acopi-Yumbo*. Santiago de Cali: Univercidad Autonoma de Occidente.
- Lovera Dávila, D., Arias, V., & Coronado Falcón, R. (2004). *La Valoracion de las Escorias Metalúrgicas como Recursos Industriales*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Moya Rodríguez, L. (2019). *Caracterización de una Mezcla de Moldeo tipo Única con Elementos Refractarios*. Santa Clara: Universidad Central de las Villas.

- Moya Rodríguez, L. A. (2019). *Caracterización de una mezcla de moldeo tipo única con elementos*. Santa Clara: Universidad Central Marta Abreu De las Villas.
- Ormazabal, F., & Larrañaga, E. (1997). *Escorias de Acería*. Gobierno Vasco: (IHOBE) Sociedad Pública Gestión Ambiental.
- Orozco Melgar, G. A., & Aguirre Aguirre, J. (2013). *Tratamiento de efluentes con tobas zeolitizadas del Yacimiento Caimanes, para la descontaminación de residuales de la industria del níquel*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Obtenido de Wikcionario: <https://www.wiktionary.org/>
- Pons Herrera, J. (2000). *Obtención de Material Refractario para la Fundición a partir de Dunitas Serpentinizadas de la Región de Moa-Baracoa. Zonas Merceditas y Amores*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Pons Herrera, J. (2022). *Tratamiento y Uso de las Escorias Siderúrgicas en Cuba*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons Herrera, J. A. (1999). *Obtención de productos refractarios para la fundición, a partir de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas "Merceditas" y "Amores"*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico.
- Pons Herrera, J. A. (1999). Tesis Doctoral: Obtención de productos refractarios para la fundición, a partir de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas "Merceditas" y "Amores". En M. I. Herrera, *Tesis Doctoral: Obtención de productos refractarios para la fundición, a partir de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas "Merceditas" y "Amores"* (págs. 58-69). Moa, Holguín, Cuba.
- Pons Herrera, J., Ramírez Pérez, M., & Leyva Rodrigues, C. (2011). *Fundamentos Científicos Para la Utilizacion de las Dunitas Serpentinizadas de la Región de Moa*. Habana: IX Congreso Cubano de Geología.
- S, C. J. (2007). *Manual de Mineralogía de Dana*. Colombia: Ed. Reverte S.A, pp 506 – 508.
- Salcines Merino, C. M. (1985). *Tenologia de Fundición. Tomo I (Vol. I)*. Habana, La Habana, Cuba: Pueblo y Educación.
- Salcines Merino, M. (1985). *Tecnologia de Fundición. Tomoa II*. La Habana: Pueblo y Educación.

- Vizán Sara, A., & Huerta Martínez, G. L. (2010). *Valoración Tecno-Ambiental de las Escorias de Acería LD Mediante Análisis Dinámico de Ciclo de Vida*. Madrid: Área de Proyectos de Ingeniería – Universidad de Oviedo.
- Vizán, S. A., Martínez, G. H., Traviesa, R. L., & Fernández, R. L. (2010). *Valoración Tecno-Ambientalde las Escorias de Acería LD Mediante Análisis Dinámico de Ciclo de Vida*. Madrid: XIV Internacional Congress on Project Engineering.

## ANEXOS

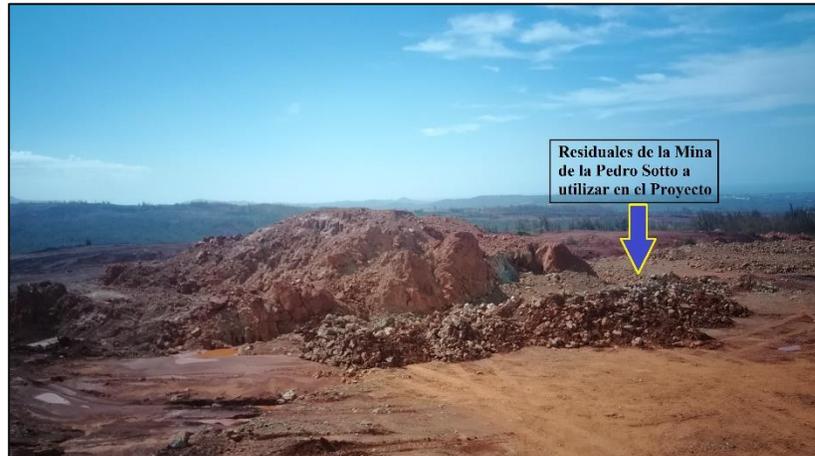
### ANEXO 1. Selección y toma de muestras en áreas de la región de Moa.



a)

b)

Imágenes de los depósitos de dunitas serpentinizadas a utilizar durante el desarrollo del proyecto: a) Presa de colas existentes en áreas de cayo Guam; b) acceso a los antiguos depósitos de cromitas. Cayo Guam.



Residuales de los procesos mineros de la Empresa Pedro Sotto Alba (Mina Moa Oriental).

**ANEXO 2.** Envase donde se recogen los residuos sólidos en la UEB Fundición.



**ANEXO 3.** Tolva de rechazo para almacenaje de arena residual de la UEB de Fundición.

