



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

‘‘Dr. Antonio Núñez Jiménez’’

Facultad de Metalurgia Electromecánica

Departamento de Metalurgia - Química

Desarrollo de agromenas a partir de las arenas residuales del taller de fundición de la EMNi en Moa

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero
en Metalurgia y Materiales.

JOAQUIM JOSÉ CANJILA DALA

Moa

2019



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia Electromecánica

Departamento de Metalurgia - Química

Desarrollo de agromenas a partir de las arenas residuales del taller de fundición de la EMNi en Moa

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero
en Metalurgia y Materiales.

Autor:

Joaquim José Canjila Dala

Firma: _____

Tutores:

Dr. C. José Alberto Pons Herrera

Firma: _____

Dr. C. María Caridad Ramírez Pérez.

Firma: _____

Ing. Ernesto Mena Pérez

Firma: _____

Moa

2019



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Joaquim José Canjila Dala

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" y de la Empresa Mecánica de Níquel de Moa "EMNi" los cuales podrán hacer uso del mismo con la finalidad que estimen conveniente.

Autor:

Joaquim José Canjila Dala

Firma: _____

Tutores:

Dr. C. José Alberto Pons Herrera. Profesor Titular

Firma: _____

Dr. C. María Caridad Ramírez Pérez. Profesora Auxiliar

Firma: _____

Ing. Ernesto Mena Pérez

Firma: _____



PENSAMIENTO

“El que dice la verdad permanece para siempre; pero el mentiroso, solo un instante”.

JEHOVÁ (Proverbios 12:19)



DEDICATORIA

- A Jehová “EL DIOS TODOPODEROSO”
- A mi esposa: Dianelys Hernández Osorio
- A mi hijo: Joseph Derek Dala Hernández
- A mis padres: José Caenda Dala y Maria Teresa Canjila
- A mis suegros: Antonio Hernández y Maria Osorio
- A mis hermanos: Manuel José, Alberto José, Mateus José, Eurico José, Paulo Silva, Joaquim Silva, Marinela Sole y Rosa “Cleo”.
- A mi honorable amigo: El inanimado Edson Fernando Kavimbi Palaia
- A mis tíos: Ernesto Canjila, Eurico Canjila, José B. Cacuti y Armando B. Cacuti
- A mi tía: La inanimada Maria Manuela Dala
- A todos los amigos y los demás miembros de la familia que aunque no fueron citados- también son especiales para mí.



AGRADECIMIENTOS

Johann Wolfgang von Goethe, el más insigne de los escritores alemanes, tenía razón cuando escribió: "Si pudiera enumerar cuánto debo a mis grandes antecesores y contemporáneos, no me quedaría mucho en propiedad". No dispongo del espacio, ni del tiempo para mencionar a todos los que han contribuido significativamente en mi formación, tanto profesional como personal.

A Dios, por ser el principal y el mayor de todos los maestros, gracias por darme la fuerza espiritual para seguir adelante, en momentos difíciles y por hacerme lo que soy.

Mis agradecimientos se extienden a todos los que me han ayudado a llegar tan lejos en mi formación como ingeniero de metalurgia y materiales, y en el cumplimiento de mi trabajo de diploma:

Al Gobierno de mi país "Angola" por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de enseñanza superior en Cuba.

A la Revolución cubana, por la preparación tanto profesional como personal.

A mi querida familia, por el apoyo incondicional durante el periodo de formación.

A mis tutores Dr. C. Alberto José Pons Herrera, Dra. C. María Caridad Ramírez Pérez e Ing. Ernesto Mena Pérez, aquí tienen el fruto de la semilla que sembraron en cada encuentro referente a este trabajo de diploma.

A todos los profesionales (profesores y auxiliares) del Departamento de Metalurgia, de la facultad de Metalurgia y Electro-mecánica, así como a otros de los distintos departamentos por su contribución en mi formación académica y personal. Desde luego, no hay palabras para describir mi admiración y aprecio por todos ustedes.

A todos mis amigos, colegas y en especial, a los compatriotas y compañeros de carrera: Antonio J. Da Silva, Henrique M. S. Kangonjo, Fausto A. Ch. Pedro, Jessica D. L. Armando, Antonio D. Chivango, Hortencio Ricueno, Avelino Capingana, Joao N. Neto, Nicolau Bovonde, Celso A. G. Cuienga, y Gaspar D. Ferreira; por la maravillosa experiencia vivida durante el ciclo de formación en Cuba. A todos,

¡Muchas gracias!



RESUMEN

El taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel genera anualmente más de 50 toneladas de arena de rechazo, que son almacenadas en el vertedero municipal, provocando daños al medio ambiente en la ciudad de Moa. El insuficiente estudio de estos pasivos ambientales limita la toma de decisiones con respecto a su posible reutilización industrial, es por ello que en este trabajo se evalúan las características físicas y químicas de las arenas de retorno, con el propósito de reutilizarlas en la conformación de agromenas para la producción de alimentos. A través del diseño de mezcla Mc. Lean Anderson se definen las mejores proporciones para la conformación de las agromenas, obteniéndose la germinación y supervivencias de todas las especies de vegetales y frijoles experimentados. Los resultados demuestran que más del 90 % de las arenas de rechazo del taller de fundición pueden ser utilizados para la conformación exitosa de agromenas, empleando además residuales industriales generados por las industrias del Níquel (licor amoniacal residual) y la propia agricultura en Moa (materia orgánica). Estos residuos no afectan la calidad de las semillas utilizadas y constituyen una alternativa para la reducción de la contaminación ambiental y el desarrollo sostenible del municipio, sin llegar a representar un gasto financiero significativo.

Palabras clave: arena de rechazo, pasivos ambientales, agromenas, agricultura urbana.



ABSTRACT

The shop of foundry of the Mechanical Company of the Nickel, generates annually more than 50 tons of sand of rejection that are stored in the municipal drain, causing damages to the environment of the city of Moa; the insufficient study of these environmental passive, they limit the taking of decisions on its possible industrial reutilization, for that that this work the physical and chemical characteristics of the return sands are evaluated for its possible reutilization in the ore farms conformation for the production of allowances. Through the mixture design Mc. Lean Anderson, they are defined the best proportions for the conformation of the ore farms, being obtained the germination and survivals of all the species of vegetables and experienced beans. The results demonstrate that more than 90% of the sands of rejection of the foundry shop, they can be used for the successful conformation of ore farms, also using residual industrial, generated by the industries of the Nickel (ammoniac liquor residual) and of the own agriculture in Moa (organic matter); which don't affect the quality of the utilized seeds, and they constitute an alternative for the reduction of the environmental contamination and the sustainable development of the municipality, without ending up representing a significant financial expense.

Key words: sand of rejection, environmental passive, ore farms, urban agriculture.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CATEGORÍAS CIENTÍFICO-METODOLÓGICAS DE LA INVESTIGACIÓN	2
CAPÍTULO I.....	5
MARCO TEÓRICO	5
1.1. Introducción a la tecnología de fundición.....	5
1.2. Materiales empleados en el proceso de fundición	8
1.2.1. Arenas de fundición	8
1.2.1.1. Arenas naturales	11
1.2.1.2. Arenas sintéticas	11
1.2.1.2.1. Arena sílice	14
1.2.1.2.2. Arena de cromita.....	16
1.2.1.2.3. Arena de olivino.....	19
1.2.1.2.4. Arena de zirconio	20
1.2.2. Arcillas industriales.....	21
1.2.2.1. Bentonitas	22
1.2.3. Aglutinantes	22
1.2.3.1. Aglutinantes orgánicos con endurecimiento químico	23
1.2.3.2. Aglutinantes orgánicos que endurecen por secado.....	24
1.2.3.3. Aglutinantes orgánicos que endurecen al calor	25



1.2.3.4. Aglutinantes inorgánicos	25
1.2.4. Materiales auxiliares en el moldeo autofraguante.....	26
1.2.4.1. Pinturas refractarias	26
1.2.4.2. Colas refractarias	27
1.2.4.3. Aditivos	27
1.2.4.4. Separadores.....	27
1.2.4.5. Dikaflex	27
1.2.4.6. Cerilla plástica	27
1.3. Mezclas de moldeo	28
1.3.1. Moldeo en verde	28
1.3.2. Moldeo químico.....	29
1.3.3. Parámetros de control en las mezclas de moldeo	30
1.4. Identificación de residuos peligrosos en el taller de fundición de la EMNi	31
1.4.1. Protocolo de la EMNi para el manejo de la arena residual	32
1.5. Antecedentes investigativos del trabajo.....	33
1.6. Conclusiones del capítulo I.....	34
CAPÍTULO II.....	35
MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
2.1 Determinación del estado químico y físico de la arena residual.....	36
2.2 Procedimiento de ensayo a las arenas de fundición.....	36
2.3 Arenas residuales como sustrato en la conformación de agromena	38
2.3.1 Diseño de mezclas aplicando el método de Mc. Lean-Anderson	38
2.4 Selección de las semillas empleadas en los experimentos.....	46
2.5 Procesamiento de datos.....	46
2.6 Conclusiones del Capítulo II.....	47
CAPÍTULO III	48
ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS	48



3.1	Análisis y resultados de los ensayos granulométricos	48
3.2	Mezclas con la matriz de arena nueva y con la matriz de arena residual	49
3.3	Pruebas preliminares para la conformación de agromenas.....	52
3.3.1	Resultados de los experimentos con arena de rechazo y zeolita simples.....	53
3.4	Resultados de la aplicación de la arena residual como sustrato en la conformación de agromena	55
3.4.1	Resultados de las pruebas realizadas con frijol caballero.....	55
3.4.2	Resultados de las pruebas realizadas con lechuga, remolacha y habichuela	59
3.4.3	Valoración económica	61
3.5	Conclusiones del Capítulo III	62
CONCLUSIONES GENERALES		63
RECOMENDACIONES		64
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		65
ANEXOS.....		67



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de las arenas de fundición.	12
Tabla 2. Composición química promedio de la arena sílice empleada en el taller de fundición de la EMNi, en Moa.	16
Tabla 3. Composición química promedio de la arena de cromita, empleada en el taller de fundición de la EMNi en Moa.	18
Tabla 4. Composición química promedio de las zeolitas de San Andrés en Holguín. ..	40
Tabla 5. Composición química promedio del efluente amoniacal empleado en la investigación.	42
Tabla 6. Intervalos de variación de las variables independientes.	45
Tabla 7. Matriz experimental diseñada para el desarrollo de las mezclas de agromenas.	45
Tabla 8. Resultado promedio de los análisis granulométricos realizados.	48
Tabla 9: Proporción de materiales empleados en la conformación de las agromenas iniciales.	53
Tabla 10: Principales datos empleados para la valoración económica.	61



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas de los tipos de molde: (a) molde abierto, simplemente un recipiente con la forma de la parte de fundición; (b) molde cerrado, de forma más compleja pues requiere un sistema de vaciado (vía de paso) conectado con la cavidad; c) Sección transversal de un molde en tres partes.	6
Figura 2. Proceso productivo de una industria de fundición.	7
Figura 3. Diagrama de Krumbein	9
Figura 4. Formas de los granos de arena.	10
Figura 5. Comportamiento expansionario de las arenas respecto a la temperatura.....	13
Figura 6. Compactador empleado en los experimentos.....	37
Figura 7. Permeámetro empleado para los ensayos de permeabilidad.	37
Figura 8. Máquina de ensayos mecánicos universal para arenas.	37
Figura 9. Medidor de humedad empleado en la investigación.	38
Figura 10. Arena de moldeo en verde.	39
Figura 11. Arena de moldeo químico.	39
Figura 12. Zeolita antes del proceso de activación.....	41
Figura 13. Efluente residual amoniacal de la Empresa Che Guevara, empleado en la investigación.	41
Figura 15. Zeolita después de la activación.....	43
Figura 16. Materia orgánica (gallinaza) de la empresa avícola municipal, empleada en la investigación.	44
Figura 17. Análisis granulométrico de la arena residual estudiada.	49
Figura 18. Comportamiento de la resistencia a la tracción de las mezclas de moldeo químico (autofraguante).	50
Figura 19. Comportamiento de la permeabilidad de las mezclas de moldeo químico (autofraguante).....	50
Figura 20. Comportamiento de la humedad de las mezclas de moldeo en verde.....	51



Figura 21. Comportamiento de la permeabilidad en las mezclas de moldeo en verde con la arena nueva del 1 al 25 y el 26 con la arena residual.	52
Figura 22. Resultado de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo en verde y zeolita, según las proporciones que se muestran.	53
Figura 23 Resultado de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo químico y zeolita, según las proporciones que se muestran inicialmente.	54
Figura 24. Resultado de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo en verde, químico y zeolita, luego de 10 días de sembradas las semillas.	54
Figura 25. Etapas de desarrollo del cultivo del frijol.	55
Figura 26. Los experimentos con frijol caballero en el primer día de observación.	56
Figura 27. Los experimentos con frijol caballero en el cuarto día de observación.	57
Figura 28. Los experimentos con frijol caballero en el décimo día de observación.	58
Figura 29. Los experimentos con frijol en el décimo quinto día de observación.....	58
Figura 30. Los experimentos con frijol en el décimo octavo día de observación.	59
Figura 31. Los experimentos con lechuga, remolacha y habichuela en el primer día...	60
Figura 32. Los experimentos con lechuga (a), remolacha (b) y habichuela (c) en el cuarto día.	60
Figura 33. Los experimentos con lechuga (a), remolacha (b) y habichuela (c) en el octavo día.	60



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Taller de fundición de la EMNi.	68
Anexo 2. Moldeo en verde.	68
Anexo 3. Moldeo químico usando catalizador y resinas.	68
Anexo 4. Ensayos de la mezcla de moldeo químico (autofraguante) con la arena nueva.	69
Anexo 5. Ensayos de la mezcla de moldeo en verde con la arena nueva.	70
Anexo 6. Aval de la Empresa Agroforestal de Moa.	72



INTRODUCCIÓN

El Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa (ver anexo 1) 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 conformará la pieza cuando se vierta el metal líquido al molde en el proceso de colado.

Una vez insertado el metal líquido en el molde, posteriormente ocurre el proceso de solidificación, para el cual es necesario extraer la pieza que se ha replicado. Para ello, es preciso colapsar el molde de arenas 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 la tecnología empleada. En el caso de la empresa en referencia se genera alrededor de 5000 kg (5 t) mensual. Este importante volumen no es recuperado, sino que se vierte en cavas abandonadas, destinadas a almacenar estas arenas inutilizadas por la empresa. 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 y -en consecuencia- llegar a contaminarlo, provocando así daños ecológicos. Además de la contaminación acuífera, estas arenas están contaminadas con los restos de los aglomerantes utilizados para darles la cohesión necesaria en la fabricación de los moldes, según sea el tipo de moldeo.



CATEGORÍAS CIENTÍFICO-METODOLÓGICAS DE LA INVESTIGACIÓN

Planteamiento del Problema

El Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel genera anualmente alrededor de 50 toneladas de arena de retorno, utilizadas en los procesos de fundición de hierro y acero. Estas, luego de varios ciclos productivos son vertidas al medio ambiente, provocando contaminación a determinadas áreas del municipio de Moa. Hasta el momento no se han definido sus posibles usos, al no existir un estudio precedente que fundamente su utilización industrial.

Problema científico

Por esta cognición es que en este trabajo de diploma se define como **Problema científico**: el insuficiente estudio de las arenas residuales del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa limita la toma de decisiones sobre su posible reutilización industrial.

Objeto de estudio

El proceso del moldeo por vía arenosa del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", del municipio Moa, en la provincia de Holguín.

Campo de acción

Las arenas de residuales del taller de fundición de la EMNi.

Objetivo general

Evaluar las características físicas y químicas de las arenas de retorno de la EMNi, para su posible reutilización industrial.



Hipótesis de trabajo

Si se realiza un estudio de las características y propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arenas de retorno del Taller de Fundición de la EMNi, se podrá definir variantes de reutilización industrial, reducir el índice de contaminación ambiental y la generación de un aporte económico a la empresa.

Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación actual de las arenas de retorno que genera el Taller de Fundición de la EMNi en Moa.
- Caracterizar desde el punto de vista físico y químico las arenas de retorno de la EMNi.
- Evaluar la conformación de mezclas y compost con las arenas de retorno de la EMNi.
- Proponer variantes de utilización de las arenas de retorno generadas en la EMNi en Moa.

Tareas de investigación

- Caracterización físico química de las arenas de retorno del Taller de Fundición de la EMNi.
- Conformación de mezclas y compost a partir de las arenas de retorno y otros materiales locales.
- Obtención de productos de uso industrial a partir de las arenas de retorno de la EMNi.
- Reducción de los residuales que genera el Taller de Fundición de la EMNi.



Tributos de la Investigación

Como resultado de esta investigación, se prevé obtener los aportes que se resumen a continuación:

Ambiental: Reducción de los vertimientos de más de 50 toneladas anuales de arena sílice y otros componentes químicos que se vierten anualmente al vertedero municipal de Moa.

Social: Conformación de agromenas para la siembra de plantas y árboles que, en coordinación con el Ministerio de la Agricultura, hará posible la obtención de alimentos para la población y generar nuevas fuentes de empleo.

Metodológico: Desarrollo de una metodología para el tratamiento y uso de diferentes residuales industriales en la obtención de alimentos y la reducción de la contaminación ambiental.

Económico: La conversión de un residual industrial en un producto que generara ingresos económicos a la Empresa Mecánica del Níquel.

Estos resultados pueden ser extendidos a otros talleres de fundición del país.



CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1.Introducción a la tecnología de fundición

El presente trabajo está destinado al estudio de las arenas de retorno del Taller de Fundición de la EMNi, pero para llevar a cabo esta investigación específica, es necesario tener en cuenta algunos aspectos teórico-técnicos generales, vinculados al tema. Por ejemplo, el concepto de fundición y otros más que derivan de él. El objetivo de este capítulo es comprobar la posibilidad de reutilizar las arenas de relleno de los talleres de fundición y reducir la contaminación ambiental que estas ocasionan en la ciudad de Moa.

El concepto generalizado de fundición o esmelter (del inglés smelter, 'fundidor'), es el proceso de fabricación de piezas comúnmente metálicas también de plástico consistente en fundir un material e introducirlo en una cavidad (vaciado, moldeado) llamada molde, donde se solidifica. El proceso más común es la fundición en arena, por ser esta un material refractario muy abundante en la naturaleza y que, mezclada con arcilla, adquiere cohesión y moldeabilidad sin perder la permeabilidad; cualidad que posibilita evacuar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido. La fundición en arena consiste en colar un metal fundido, típicamente aleaciones de hierro, acero, bronce, latón y otros, en un molde de arena, dejarlo solidificar y posteriormente romper el molde para extraer la pieza fundida (Salcines Merino, 1985).

El proceso de fundición se realiza en una fundidora. Una fundidora es una fábrica equipada para hacer moldes, fundir y manejar el metal en estado líquido, desempeñar los procesos de fundición y limpieza de las piezas terminadas. Los trabajadores que realizan estas operaciones se llaman fundidores. En una operación de fundición, se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente en líquido. Después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto figura 1(a), el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta. En un molde cerrado figura 1(b) y 1(c) una vía de paso llamada sistema de vaciado permite el flujo del metal fundido desde fuera del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es la forma más importante de producción en operaciones de fundición (Esteban Miguel, 2014).

El sistema de vaciado en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior. Consiste típicamente en un bebedero de colada (también llamado simplemente bebedero) a través del cual entra el metal a un canal de alimentación o corredor que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero existe frecuentemente, una copa de vaciado para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero. En el diagrama aparece como un simple embudo en forma de cono. Algunas copas de vaciado se diseñan en forma de tazón, como en la figura 1(c), con un canal abierto que conduce al bebedero (Esteban Miguel, 2014).

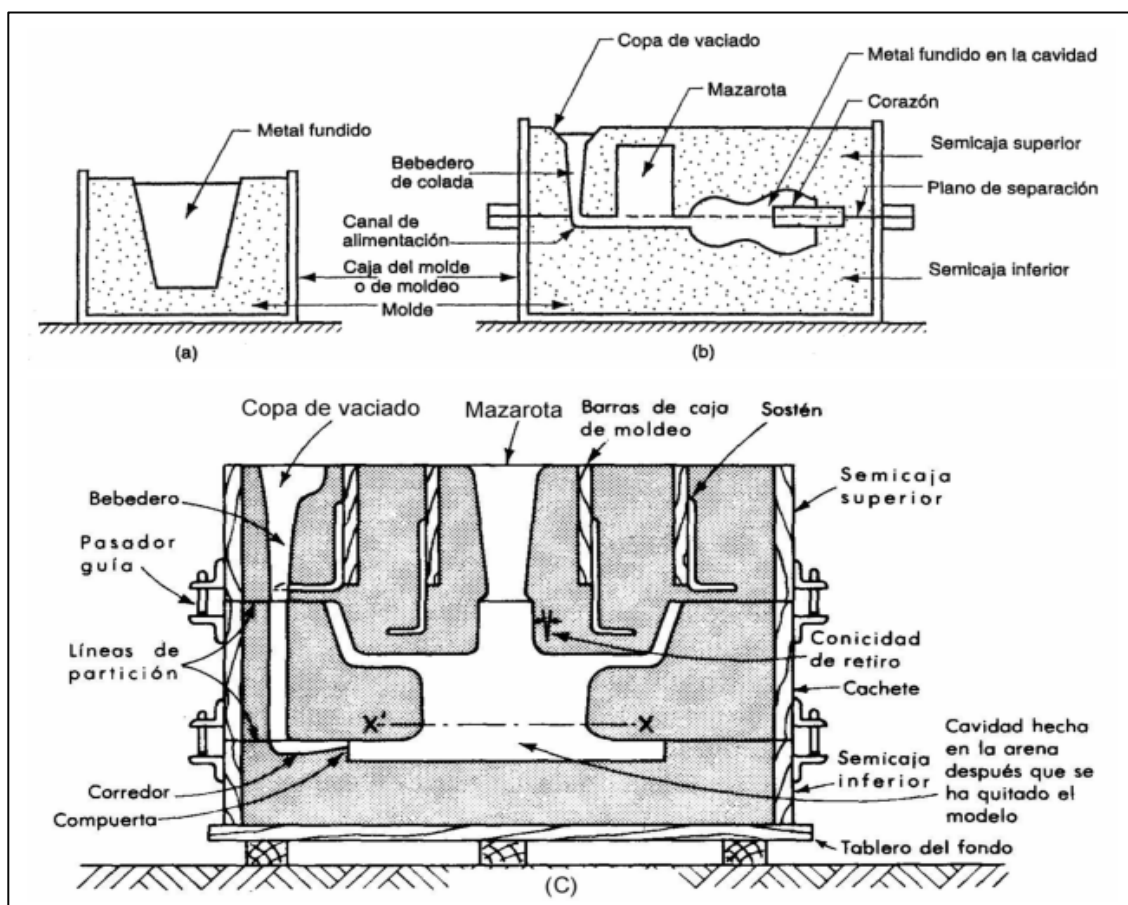


Figura 1. Formas de los tipos de molde: (a) molde abierto, simplemente un recipiente con la forma de la parte de fundición; (b) molde cerrado, de forma más compleja pues requiere un sistema de vaciado (vía de paso) conectado con la cavidad; c) Sección transversal de un molde en tres partes.

Fuente: (Esteban Miguel, 2014)

En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. La mazarota es una reserva en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción de la fundición durante la solidificación. A fin de que la mazarota cumpla adecuadamente su función, debe diseñarse de tal forma que solidifique después de la fundición principal. Una vez que la fundición se ha enfriado lo suficiente, se remueve del molde. Pueden necesitarse procesamientos posteriores, dependiendo del método de fundición y del metal que se usa.

Entre estos se encuentran: el desbaste del metal excedente de la fundición, la limpieza de la superficie, la inspección del producto y el tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, puede requerirse maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza y para remover la superficie fundida y microestructura metalúrgica asociada. Las fundiciones son procesos industriales que producen piezas a partir de la fusión de metales o aleaciones de metales para su incorporación a un molde que copia en su interior el negativo de un modelo de una pieza a replicar. El tipo de metal o aleación fundida y la tecnología utilizada para producir el molde son dos de las variables claves para caracterizar y comprender el funcionamiento de una empresa de fundición. En la figura 2 se representan las distintas instancias del proceso de fundición, las que a posterior son detalladas (Esteban Miguel, 2014).

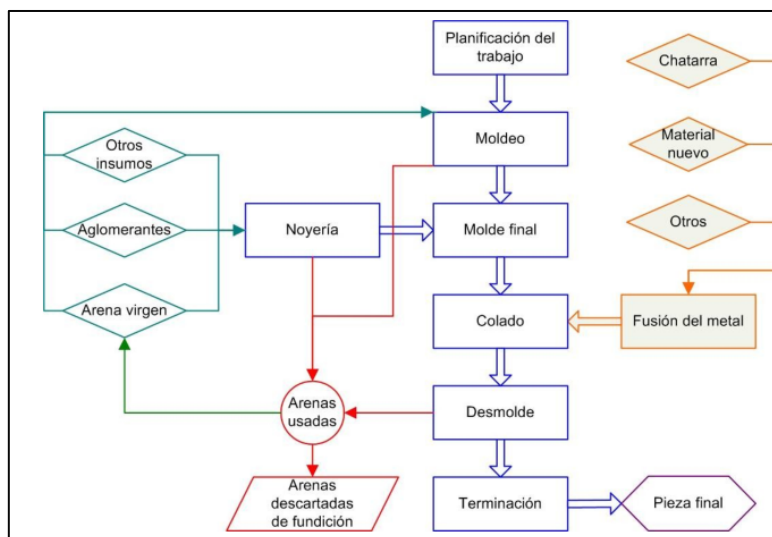


Figura 2. Proceso productivo de una industria de fundición.

Elaborado por: Joaquim José Canjila Dala



1.2. Materiales empleados en el proceso de fundición

1.2.1. Arenas de fundición

La arena es un conjunto de partículas de piedras disgregadas. En la siderurgia se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros. Una partícula individual dentro de este rango es llamada «grano de arena». La elaboración de moldes y machos es uno de los principales elementos dentro de proceso de fabricación de piezas fundidas y sus propiedades dependen, en gran medida, de las características de la arena utilizada en las operaciones de moldeo y posterior colada. Es importante mencionar que no se utiliza cualquier tipo de arena en las industrias de fundición, sino que deben cumplir una serie de requerimientos, entre los que se pueden destacar:

- Ser fácilmente moldeable, de manera que se adapte perfectamente a las formas del modelo y las reproduzca fielmente.
- Presentar una buena resistencia mecánica principalmente a la compresión y a la erosión producida por el desplazamiento y el impacto del metal líquido en el interior del molde.
- Resistencia a los ataques químicos que se puede producir entre el molde y el metal líquido.
- Refractariedad o un buen punto de fusión (elevado); es decir, una adecuada resistencia a las altas temperaturas.
- Poseer buena permeabilidad para permitir la evacuación de los gases que se generan durante la colada del molde y del aire que ocupa inicialmente la cavidad.
- Buena capacidad de disipar la energía térmica del metal líquido y favorecer así la correcta solidificación de las piezas.
- Ser colapsable, es decir, presentar una buena capacidad de disgregación.
- Generar buenos acabados superficiales en las piezas.
- Ser reutilizables, de manera que una vez regenerada puede moldearse nuevamente.

Uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta en las arenas de moldeo es su forma y tamaño granulométrico.

Características particulares de las arenas de fundición:

- a) **Tamaño:** El análisis de finura de grano da información acerca de la distribución de las partículas. El tamaño de los granos de arena tiene una importancia fundamental sobre el acabado de las piezas, la permeabilidad, la cohesión o resistencia de la arena y su refractariedad. La arena está constituida por partículas menores de 20 μm , que son en su mayoría arcillas de diferente naturaleza, polvos muy finos de la misma arena y de material orgánico, raíces, humus, etc.
- Para determinar el tamaño de grano promedio o finura AFS se realiza un ensayo, el cual consiste en colocar una muestra de arena en una serie de tamices de diferentes tamaños de malla y hacerlos vibrar por espacio de 15 minutos en un equipo conocido como Ro-Tap (ver figura 3) (Sáenz Valdez, 2010).
- b) **Forma:** Dependiendo del medio en que la arena es arrastrada y de la distancia que recorre, esta puede ser angular, sub-angular o redonda. El Diagrama de Krumbein (ver figura 4), indica el grado de redondez y esfericidad de una partícula (Sáenz Valdez, 2010).
- Angular:** Arena que presenta aristas y caras planas. Un grano angularo tiene una mayor superficie y tiene menos permeabilidad.
 - Sub-angular:** Arena que presenta bordes redondeados, picos vértices y caras planas.
 - Redonda:** Arena de bordes redondeados y con apariencia esférica. Este tipo de arena tiene la menor superficie y tiene mayor permeabilidad.

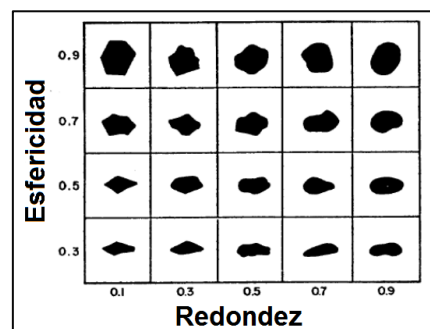


Figura 3. Diagrama de Krumbein

Fuente: (Sáenz Valdez, 2010)

Influencia de la forma del grano:

La forma, el tamaño y la repartición granulométrica de los granos, son factores muy importantes en la arena al constituir una de las principales condiciones por la cual esta es utilizada en las industrias de fundición.

La finura de la arena empleada en la confección de moldes y machos está relacionada con la calidad de la superficie de la pieza fundida, sobre todo, en los casos en que los moldes y machos no estén pintados. Sin embargo, cuanto más fina es la arena mayor es el consumo de aglomerantes si se desea obtener las mismas resistencias en moldes y machos. Esto es debido a que la superficie específica de la arena por unidad de peso ha aumentado (Empresa Mecánica de Níquel , 2006).

La forma de los granos de la arena permite establecer el probable comportamiento de la arena en las diferentes etapas del proceso de fundición. El examen lo realiza un microscopio. De hecho, no existe arena con todos los granos esferoidales y lo que se debe indicar es que forma es la que predomina. El redondeamiento es un fenómeno provocado por la acción abusiva de un grano sobre el otro. Los granos muy redondos son escasos. Se ha comprobado en los estudios científicos realizados, que una arena redonda se compacta más que una arena angular (ver figura 4).

La permeabilidad de la arena redonda será menor que la de la arena sub-angular, por tanto, el índice de finura de la pieza será mejor en la arena de tipo redonda. Por este motivo, el aspecto superficial de la pieza fundida también será más aceptable en la pieza realizada con la arena redonda.

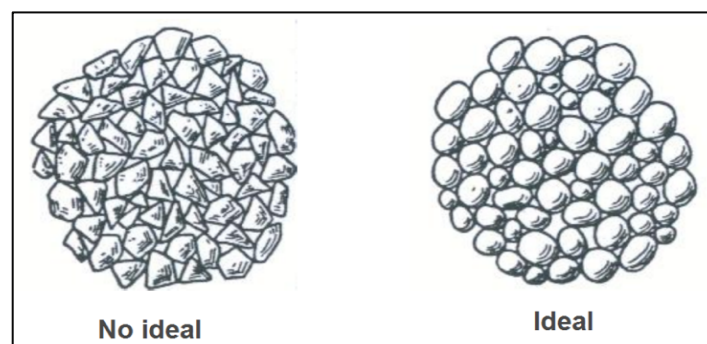


Figura 4. Formas de los granos de arena.

Fuente: (Sáenz Valdez, 2010)



En la fundición las arenas están clasificadas en dos grupos: arenas o tierras naturales y las arenas sintéticas.

1.2.1.1. Arenas naturales

Son aquellas que poseen de manera natural el aglomerante arcilloso que les da plasticidad y se emplean tal como vienen de origen de extracción. Contienen entre 5 a 20 % de material arcilloso y se las humedece hasta que desarrollen cierta plasticidad y resistencia adecuada para el moldeo.

El gran contenido de arcilla que posee proporciona a la mezcla un carácter negativo refractario y la cantidad de agua que requiere oscila entre 5 - 8 %. Además, tiene poca permeabilidad, es decir, poca capacidad de dejar escapar los gases que se producen durante la colada del molde. Sin embargo, tiene algunas ventajas, como la de no secarse rápidamente debido a los productos orgánicos que posee, lo cual permite retocar y reparar más fácilmente los moldes. Dada su pequeña granulometría las piezas fundidas en tierras muestran muy buena terminación superficial.

1.2.1.2. Arenas sintéticas

Son arenas tamizadas para obtener un tamaño de grano adecuado a las cuales se le agregan elementos necesarios para que sean moldeables. Se aglomeran, en general, con 3 a 5% de material arcilloso (generalmente bentonita) y agua de 3 a 4% es suficiente para tener buenas propiedades de moldeo. Es empleada en fundición de múltiples metales y debe evitarse que el molde tenga exceso de agua. Algunas de las ventajas que presenta este tipo de arena son: alta refractariedad, se trabaja con menor porcentaje de humedad y pueden utilizarse un gran número de veces, disminuyendo el problema de almacenamiento. Además, posee mayor plasticidad que las tierras siendo más maleable y las piezas fundidas se limpian más fácilmente. Se debe destacar que la calidad superficial de las piezas fundidas en arena es inferior a los modelos en arena natural, puesto que su granulometría es mayor.

Ya en el proceso de moldeo la arena se clasifica según su uso específico, como se plantea a continuación:



Arena de contacto: Es la que se utiliza para generar una primera capa para cubrir el modelo, siendo de granos finos para obtener una superficie lisa en la pieza colada.

Arena de relleno: Es la empleada para rellenar las cajas de moldeo y se utiliza arena de granos más gruesos sin tamizar.

Cabe destacar que las arenas sintéticas que más se emplean en los procesos de fundición son las siguientes: arenas sílices, arenas cromitas, arenas de olivino y las arenas zirconio. A continuación, se presentan las principales características y propiedades de las arenas de fundición empleadas a nivel industrial.

Tabla 1. Principales características de las arenas de fundición.

Características y propiedades	Tipos de arena			
	Sílice	Cromita	Olivino	Zirconio
Composición	SiO ₂	FeO·Cr ₂ O ₃	(Mg,Fe) ₂ ·SiO ₄	ZrSiO ₄
Color	Blanca o marrón amarillento	Negra	Verde	Blanca o marrón rojizo
Sistema cristalino	Hexagonal	Cúbico	Ortorrómbico	Hexagonal
Dureza Mohs	7	5,5	7 - 7,5	7,5
Forma del grano	Angular, subangular o redonda	Angular	Angular	Angular o redonda
Coste	Bajo	Medio	Medio	Alto
Expansión a 900 °C (%)	1,56	0,65	1,02	0,4
Difusividad térmica	Baja	Media - Elevada	Elevada	Elevada
Punto de fusión (°C)	1700	2100	1700	2500
Densidad (kg/litro)	2,65	4,4 - 5,2	3,25 - 4,8	4,6 - 4,7
Densidad relativa	1,5 - 1,6	2,5 - 2,7	1,9 - 2,0	2,7 - 2,9
Mojabilidad	Posible	No moja	Posible	Difícil
pH a alta temperatura	Ácido (6,6 - 7,2)	Básico (7,3 - 8,0)	Básico (8,2 - 8,8)	Poco ácido

Fuente: (Empresa Mecánica de Níquel , 2006)

Cada uno de estos tipos de arena se utiliza según la tecnología empleada y el tipo de moldeo a aplicar, ya que tienen características muy distintivas entre ellas, como se observa en la tabla anterior.

La arena sílicea, la más utilizada en Cuba, constituye más del 85 % de los moldes compactados por medios físicos y alrededor del 90 % de los moldes y machos químicos. La consecución, por tanto, de un buen molde o macho requiere en gran medida del empleo de una arena correcta. Además de las arenas sílices que son las más comunes en las industrias de fundición, también se utilizan otras arenas para el confeccionamiento de moldes y machos, tales como la arena olivino, la arena de zirconio y la arena cromita.

Las ventajas fundamentales de la utilización de la arena sílice son su bajo costo, la disposición de distintos tipos de granulometría y su compactibilidad con casi todos los químicos de aglomeración de arenas.

No obstante, la arena sílice presenta una gran limitación de uso con respecto a las demás arenas en trabajos a altas temperaturas. La forma natural de la arena sílice es el α -cuarzo que solo es estable a bajas temperaturas ya que a 573°C se transforma en β -cuarzo con un brusco aumento de volumen (ver figura 5). Si los granos están muy compactados, se ocasionan los defectos atribuibles a la arena: veining, darts, colas de rata. Otro inconveniente de la arena sílice es que puede reaccionar con algunos caldos oxidados, defecto muy típico en los aceros al manganeso (AENOR-Auxiliar Industrial, 2002).

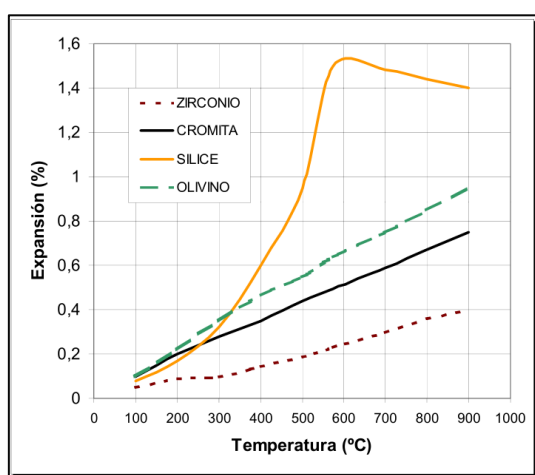


Figura 5. Comportamiento expansionario de las arenas respecto a la temperatura.

Fuente: (AENOR-Auxiliar Industrial, 2002)



1.2.1.2.1. Arena sílice

La arena sílice, también conocida como arena de cuarzo tiene como componente fundamental el bióxido de silicio SiO_2 . Además, según el yacimiento, la arena puede contener una cierta cantidad de sustancia arcillosa en forma de silicato hidratado de alúmina, de fórmula aproximada a $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ así como una serie de sustancias que se consideran impurezas, ya que, en general disminuyen la refractariedad de la arena (Salcines Merino, 1985). Las más importantes de estas impurezas son:

Feldespatos: Son silicatos dobles de alúmina en combinación con materiales alcalinos como potasio, sodio, calcio y bario. Las formas fundamentales son el potásico y el sódico calcáreo. La fórmula química de los feldespatos es $\text{Mo} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Posee menos dureza que el cuarzo, son menos refractarios (temperatura de fusión $1170 - 1550^\circ\text{C}$) y a 1000°C presentan una dilatación térmica de $2,75\%$ (Salcines Merino, 1985).

Micas: Son silicatos dobles hidratados de alúmina con más o menos cantidad de hierro, manganeso y litio, de fórmula química $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Las micas poseen alta densidad y un bajo punto de fusión ($2,7 - 3,2 \text{ g/cm}^3$ y $1500 - 1400^\circ\text{C}$). Las formas más difundidas son la potásica o muscovita y la mica de hierro-manganeso conocida por biotita o mica negra (Salcines Merino, 1985).

Óxidos de hierro: Los más frecuentes en las arenas sílices son la magnesita ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), la hematita (Fe_2O_3), la ilmenita ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) y los óxidos férricos hidratados ($n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Estos óxidos durante el calentamiento de la superficie del molde por el metal líquido pueden descomponerse, favoreciendo la formación de compuestos de fácil fusión que juegan un papel importante en la penetración metálica en la superficie del molde (Salcines Merino, 1985).

Carbonatos: Son los elementos más indeseables en las arenas sílice, ya que disminuyen la refractariedad y la descomposición que experimentan en el rango de $500 - 900^\circ\text{C}$, es causa de defectos en piezas fundidas. Los carbonatos más frecuentes en las arenas sílice son la calcita, la magnesita, la dolomita y siderita (Salcines Merino, 1985).

Todas las sustancias señaladas anteriormente constituyen lo que se denomina "componente arcilloso" del grano.



A pesar de la arena sílice poseer estos componentes arcillosos, sigue siendo el material más utilizado en la fundición, por las siguientes razones:

- Existe en abundancia en numerosos lugares.
- Es relativamente bajo el costo de producción.
- Está disponible en cualquier tamaño y distribución del grano.
- Posee alta dureza y suficiente resistencia a la abrasión.
- Posee alta compactación con todos los tipos de aglutinantes y aglomerantes empleados en la fundición.
- Consistencia en la pureza, propiedades y conducta en la fundición.
- Alta resistencia al calor y generalmente adecuada resistencia al acero fundido.
- Resultados satisfactorios cuando se producen piezas de hierro laminar, nodular e incluso muchos tipos de piezas fundidas de acero.

Otras características de la arena sílice

La arena sílice empleada en el Taller de Fundición de la EMNi proviene, principalmente, de los yacimientos existentes en la provincia de Pinar del Río. La misma, ha sido estudiada en la EMNi y posee las características siguientes: (Empresa Mecánica de Níquel, 2006)

Las formas del grano pueden ser angular, subangular y redonda.

- Con grano redondo – Bajo consumo de resina.
- Con grano subangular – Consumo normal.
- Con grano angular – Alto consumo.

Número AFS de 40 a 60 es preferible para este proceso.

- Con grano grueso – Buena resistencia, pero friable.
- Con grano mediano – Óptimo.
- Con grano fino y muy fino – Baja resistencia.

Se recomienda trabajar con una distribución de 3 a 4 mallas máximo.

- Arena media 50 – 70, según AFS, con granos entre 0,25 y 0,5 mm.
- Arena media grupo 02, según GOST, con granos entre 0,16 y 0,315 mm.

- Arena grande grupo 0315, según GOST, con granos entre 0,20; 0,315 y 0,4 mm.

Contenido de finos y arcilla.

- Finos 3% máximo en mallas 200, 240 y plato (0,063; 0,050 y fondo).
- Arcilla AFS – 0,5 máximo.

Composición química:

Con un contenido promedio de SiO_2 , de 98 %, esta arena es considerada de alta calidad para la industria metalúrgica, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Composición química promedio de la arena sílice empleada en el Taller de Fundición de la EMNi, en Moa.

Compuestos	Porcentaje (%)
SiO_2	97,3 – 99,5
Fe_2O_3	0,02 – 0,10*
Al_2O_3	0,10 – 0,40*
TiO_2	0,10 – 0,20
CaO	0,42 – 0,68*
MgO	0,09 – 0,30*
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	-

* Elementos considerados nocivos o no deseados.

1.2.1.2.2. Arena cromita

Se llama arena cromita debido a que está constituida básicamente por el mineral cromita, el cual tiene un elevado contenido de cromo y en ocasiones contiene magnesio, aluminio o titanio (entre otros). Su fórmula es $\text{FeO}_2\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ o $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$. Como material de molde, la arena cromita tiene cualidades similares a la arena de zirconio para la obtención de superficies de calidad en áreas críticas de molde, siendo más accesible y menos costosa que esta. En aleaciones fuertemente básicas, como los aceros al manganeso, su comportamiento es tan satisfactorio como lo de las arenas de olivino (Salcines Merino, 1985).



Características de las arenas de cromita empleadas en la EMNi.

Las arenas de cromitas son muy utilizadas en el Taller de Fundición de la EMNi, ya que con ellas se producen diversas piezas de acero que demanda la industria cubana del níquel. Anteriormente, esta arena provenía de los yacimientos de Moa y Baracoa; ahora son empleadas las de los yacimientos de Camagüey, las cuales se caracterizan por las cualidades siguientes (Empresa Mecánica de Níquel, 2006).

Es usada por su tendencia al templado y su resistencia a la penetración, con una pureza del 60 %.

Se puede mezclar con arena sílice para obtener mejores acabados y evitar deformación en los machos a altas temperaturas.

Presenta dificultades en su uso debido a la alta demanda de ácido ($\text{pH} = 7 - 9,5$).

Las formas del grano pueden ser angular y sub-angular.

- Con grano sub-angular – Consumo normal.
- Con grano angular – Alto consumo.

Número AFS de 50 a 80 es preferible para este proceso.

- Con grano grueso – Buena resistencia, pero friable.
- Con grano mediano – Óptimo.
- Con grano fino y muy fino – Baja resistencia.

Se recomienda trabajar con una distribución de 3 a 4 mallas máximo.

- Arena media 50 – 80, según AFS, con granos comprendidos entre 0,25 y 0,5 mm.
- Arena media grupo 02, según GOST, con granos comprendidos entre 0,16; 0,20 y 0,315 mm.

Contenido de finos y arcilla.

- Finos 3% máximo en mallas 200, 240 y plato (0,063; 0,050 y fondo).
- Arcilla AFS – 0,5 máximos.

Composición química:

En la tabla siguiente se presenta la composición química promedio de la arena de cromita, que proviene de los yacimientos existentes en la provincia de Camagüey, caracterizada por su alta refractariedad y relativamente altos contenidos de Cr_2O_3 .

Tabla 3. Composición química promedio de la arena de cromita empleada en el taller de fundición de la EMNi, en Moa.

Compuestos	Porcentaje (%)
Cr_2O_3	Mayor de 40
Fe_2O_3	14,0 – 15,0*
Al_2O_3	20,0 – 22,0*
CaO	0,30 – 0,50*
MgO	14,0 – 16,0*
SiO_2	0,80 – 0,10

* Elementos considerados nocivos o no deseados.

La arena de cromita se usa con frecuencia en la elaboración de mezclas de cara y de machos en la producción de piezas grandes de acero, por sus excelentes propiedades refractarias y basicidad.

La composición química de la arena de cromita es variable al igual que todas las demás arenas en dependencia del yacimiento de origen. Debido a la presencia de diferentes impurezas, el contenido de óxido de cromo, en los mayores yacimientos es mayor de 60 %. En la mayoría de los casos este valor está entre 35 – 45 %.

La impureza más nociva que puede contener una arena cromita es la presencia de carbonatos, en especial el carbonato de calcio (CaCO_3), los carbonatos pueden liberar CO_2 durante el calentamiento de la arena. Por ello se exige generalmente un contenido de óxido de calcio (CaO) menor de 1 % (Salcines Merino, 1985). La principal cualidad de la arena cromita es su baja actividad química respecto al metal líquido (con sus óxidos).



Posee una excelente resistencia a la penetración metálica y en sustitución del cuarzo, garantiza la producción de piezas limpias, sin costras de penetración, mejorando la calidad y disminuyendo los costos de producción (Salcines Merino, 1985).

1.2.1.2.3. Arena 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 la olivina $(MgO \cdot FeO) \cdot SiO_2$ 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, 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 & Aguirre Aguirre, 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, 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).

A continuación, se presentan algunas propiedades destacadas de la arena de olivino de las zonas mencionadas anteriormente en la región de Moa, según los trabajos de Pons Herrera (1999).

Mezclas para elaboración de molde

- Permeabilidad: 0,96 – 0,99
- Resistencia mecánica: 0,91 – 0,96
- Humedad: 0,88 - 0,98

Mezclas para elaboración de macho

- Permeabilidad: 0,79 – 0,99
- Resistencia mecánica: 0,68 – 0,83
- Humedad: 0,93 - 0,99

1.2.1.2.4. Arena de zirconio

La arena de zirconio tiene unas cualidades excepcionales como su alto punto de fusión, su dureza y su muy bajo coeficiente de expansión térmica (ver tabla 1). Gracias a estas propiedades se utiliza en muchas industrias. La que más consume es la cerámica, seguida por la de fabricación de productos refractarios y la fundición. Debido a su alta temperatura de fusión y su bajo coeficiente de expansión térmica, se emplea en la fabricación de machos y moldes para aceros caros u otras aleaciones de precio elevado. También se utiliza en la fabricación de machos de fundición, cuando estos están expuestos a una alta masividad y deben soportar altas temperaturas durante mucho tiempo hasta que se termina de enfriar la pieza.



La arena de zirconio no es mojada por el metal fundido, lo que le da una propiedad muy interesante para su utilización en la cara de trabajo de los moldes de fundición y en la fabricación de pinturas para moldes. Es de precio elevado, en comparación con otras arenas y escasa en la naturaleza (Sertucha & Suárez, 2006).

La arena de zirconio no presenta transformaciones de fase durante el calentamiento. La presencia de ciertas impurezas en especial óxidos de hierro puede reducir su punto de fusión a 1600 °C. Su conductividad térmica es dos veces superior a la de la arena sílice, su peso específico es alto, del orden de 4,7 g/cm³, por lo que el coeficiente de acumulación de calor de estas arenas alcanza valores tan altos como 50 kcal/m²·h·°C (Salcines Merino, 1985).

Gracias a su alta densidad y conductividad térmica, las mezclas con arena de zirconio favorecen el enfriamiento rápido de las piezas fundidas, obteniéndose así un producto de mayor calidad y resistencia. Por sus propiedades tan peculiares, es que estas arenas se emplean en situaciones especiales de alta penetración metálica, como mezclas de cara y en mezclas para machos en piezas de alta responsabilidad. También es frecuente la aplicación de una sustancia en forma concentrada con más de 90 % de zirconio como agente rellenedor de pinturas y pastas para moldes y machos, en piezas grandes de acero fundido u otras aleaciones ferrosas (Salcines Merino, 1985).

La arena de zirconio tiene un elevado costo en comparación otras arenas mencionadas. En la elaboración de mezclas para la fabricación de moldes y machos, la arena forma la matriz del material (molde o macho) pero se necesita de otros componentes para obtener las características requeridas en la fundición de acuerdo a las especificaciones del producto deseado. Se emplean aglomerantes (aglutinantes), adictivos, arcillas y en algunos casos, pinturas.

1.2.2. Arcillas industriales

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados: Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm) (Coello Porras, 1983).



En la conformación de molde para la fundición se utilizan las conocidas como arcillas especiales, en las que se destacan los caolines o arcillas caoliníferas, bentonitas y sepiolita o paligorskita (Coello Porras, 1983).

La EMNi utiliza frecuentemente en sus recetas la bentonita por esa razón, de entre las citadas en este epígrafe, es la única que a continuación se describe.

1.2.2.1. Bentonitas

Una bentonita es una roca compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, independientemente de cualquier connotación genética.

Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades físico-químicas; así la clasificación industrial más aceptada establece los siguientes tipos de bentonitas, en función de su capacidad de hinchamiento en agua:

- Bentonitas altamente hinchables o sódicas.
- Bentonitas poco hinchables o cálcicas.
- Bentonitas moderadamente hinchables o intermedias.

1.2.3. Aglutinantes

Son sustancias de origen orgánico e inorgánico, que tienen la función de unir los granos de arenas entre sí (generalmente, con mayor efectividad que la arcillas) para conferir resistencia mecánica a la mezcla, tanto en estado húmedo (en verde) como en seco.

Para que una sustancia se considere como un material aglutinante satisfactorio en una mezcla de moldeo, la misma debe cumplir una serie de exigencias tecnológicas, entre cuales se tienen en cuenta las siguientes (Salcines Merino, 1985):

- El aglutinante debe distribuirse uniformemente por toda la superficie de los granos de arena y adherirse fuertemente a los mismos.
- Debe ser capaz de conferir una alta resistencia mecánica a la mezcla de moldeo, bien sea en verde o en seco, según las características mediante las cuales obtenga resistencia.
- La mezcla preparada con el aglutinante debe poseer propiedades plásticas, sin las cuales no pueden moldearse adecuadamente todas las cavidades del molde o la

caja de machos. Además, la mezcla no debe adherirse a la plantilla o a la caja de machos durante el desmoldeo.

- Debe ser una sustancia de baja higroscopicidad, de manera que los moldes y machos no absorban humedad después de elaborados.
- Debe generar la menor cantidad posible de gases durante el vertido del metal líquido en el molde, de manera que no provoque defectos por gases en la pieza fundida. Además, durante la salificación de la pieza fundida, debe mostrar colapsabilidad de manera que no provoque tensiones internas en las piezas.
- Debe producir una mezcla de fácil desmoldeabilidad para no hacer muy laboriosa la operación de extracción de machos, después del enfriamiento de la pieza.
- La mezcla de moldeo debe producir piezas con superficies limpias, sin penetración. Además, la refractariedad debe ser satisfactoria.

Clasificación de los materiales aglutinantes

Los parámetros de clasificación son varios. En primer lugar, la clasificación más general los divide en orgánicos e inorgánicos.

A su vez, los aglutinantes orgánicos pueden ser solubles o insolubles en agua. Esta es una característica muy importante desde el punto de vista práctico, ya que estos no deben mezclarse entre sí, pues puede provocar una disminución de la resistencia de mezcla, tanto en verde como en seco (Salcines Merino, 1985).

1.2.3.1. Aglutinantes orgánicos con endurecimiento químico

A este grupo pertenecen los aglutinantes cuya acción se desarrolla mediante un proceso de secado, en la cual el aglutinante se oxida, polimeriza o experimenta procesos químicos más complejos. De este modo, se obtiene una película aglutinante muy resistente alrededor de los granos de arena (Salcines Merino, 1985).

En la mayoría de estos aglutinantes el endurecimiento es irreversible. Estos aglutinantes llegan a alcanzar una buena resistencia en moldeo en seco; sin embargo, su resistencia en verde es muy baja, por lo que en algunos casos se le añade arcillas dextrina u otros aglutinantes similares, capaces de conferir esta propiedad a la mezcla. La fluidez de las mezclas preparadas por estos aglutinantes es muy buena.



Los representantes principales de este grupo son los aceites para macho y las resinas sintéticas. Pueden ser solubles o insolubles a agua (Sáenz Valdez, 2010).

Los principales materiales aglutinantes, representantes del grupo de las resinas sintéticas, se exponen a continuación (Salcines Merino, 1985).

Baquelita en polvo: Tiene una amplia aplicación en el proceso de moldeo en cáscara. Está constituida por una resina fenol-formaldehído mezclado con 7-8 % de urotropina en calidad de endurecedor. Estas resinas, después de endurecidas, dan una resistencia del orden de 60-80 kg/cm² para contenidos de 4-6 % de resina en la mezcla de moldeo.

Resinas ureicas: Formadas por condensación de la urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y el formaldehído (CH_2O). Los machos elaborados con estas resinas tienen una alta desmoldeabilidad y no son higroscópicos.

Resinas furánicas: Se obtienen a partir de fenol-formaldehído o ureaformaldehído modificadas con alcohol furfurílico. Son resinas de altas propiedades tecnológicas, especialmente en los procesos de producción de machos en cajas caliente.

1.2.3.2. Aglutinantes orgánicos que endurecen por secado

Los materiales aglutinantes pertenecientes a este grupo poseen la característica de disolverse bien en agua y mezclarse con la arcilla.

En algunos casos no poseen buena resistencia en verde, lo cual se suple con la adición de arcilla a la mezcla. En cambio, ofrecen buena resistencia en seco. Dentro de este grupo, los aglutinantes más conocidos y empleados en fundición son los aglutinantes lignina, la dextrina y la melaza (Sáenz Valdez, 2010).

Ligninas: Son productos de color castaño que constituyen un residuo que se recupera al tratar pulpa de madera con sosa y sulfito. La lignina, de fórmula general $\text{C}_{41}\text{H}_{32}\text{O}_6$, funde entre 250-275 °C.

El producto de lignina que más utilización tiene en fundición es el lignosulfonato, sódico o cálcico, conocido también como licor de lignina.



Dextrina: Es el producto que se obtiene por tratamiento del almidón en un ácido a un calentamiento bajo. Su campo de aplicación es amplio, ya que confiere resistencia en verde y en seco, facilita el desmoldeo y puede emplearse como pegamento en la unión de dos machos. Se emplean generalmente en contenidos alrededor de 2 %, aunque en algunos casos se utiliza en contenidos más bajos (0,5 %). El almidón es insoluble en agua fría y solo se hincha en agua caliente, formando un pegamento. La dextrina es un aglutinante del tipo cereal. Se considera que da mayor resistencia en verde que el resto de los aglutinantes cereales.

Las mezclas de moldeo aglutinadas con bentonitas y dextrina alcanzan una resistencia en verde muy elevada.

Melaza: Es la representante de este grupo que más se utiliza en Cuba y –en conjunto con las arcillas de moldeo y el vidrio líquido (silicato)- constituye el grupo de los aglutinantes fundamentales que se emplean en la producción por fundición en Cuba. La melaza posee alta resistencia en seco, caracterizándose los moldes y machos por mantener los filos y contornos muy vivos. Además, la melaza garantiza buena resistencia superficial en los moldes y machos después del estufado.

1.2.3.3. Aglutinantes orgánicos que endurecen al calor

Estos aglutinantes basan su acción aglutinante sobre el proceso de derretido, experimentado durante el calentamiento de los moldes y machos. Al derretirse, forman una película alrededor de los granos de arena que se endurece con el enfriamiento, dándole resistencia a la mezcla (Salcines Merino, 1985).

El representante más característico de este grupo es la colofonía, una resina que se obtiene del pino natural.

1.2.3.4. Aglutinantes inorgánicos

Son los aglutinantes más empleados en las industrias de fundición. Son del grupo V en la tabla de la figura 4. Los representantes más característicos de este grupo son las arcillas de moldeo, el cemento y el vidrio líquido. Lo referente a las arcillas, ya fue expuesto en el sección anterior (Sáenz Valdez, 2010).



Silicato de sodio (vidrio líquido): tiene mucha aplicación en la fundición debido a tres razones básicas: son baratos, dan buena resistencia a la mezcla y no son tóxicos. En Cuba se utiliza mucho, principalmente en la producción de acero, la mezcla de moldeo con vidrio líquido endurecida mediante el soplo con CO_2 . El silicato de sodio o calcio (vidrio líquido) tiene una fórmula aproximada a $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, es decir, una solución acuosa de sodio y cuarzo.

Cemento: pertenece a la categoría de los aglutinantes que desarrollan su resistencia por hidratación, en los cuales -como es lógico- el agua constituye un componente esencial.

1.2.4. Materiales auxiliares en el moldeo autofraguante

1.2.4.1. Pinturas refractarias

Como pinturas para la industria de la fundición se conoce a una amplia gama de recubrimientos refractarios. Estos se aplican de diferentes maneras a las superficies de moldes y machos que están en contacto con el metal fundido. El propósito de utilizar estos recubrimientos es el de mejorar la calidad de las piezas fundidas.

En función del tipo de diluyente utilizado se pueden diferenciar dos grandes familias de pinturas: pinturas al agua (secado en estufa) y al alcohol (secado al aire o flameando los machos). Dentro de cada familia hay una gran cantidad de pinturas, en función - fundamentalmente- de los tipos de materiales refractarios y de la manera que la pintura vaya a ser aplicada (brocha, vertido, pistola, inmersión...).

- **Zircolite:** pinturas al agua y al alcohol de base zirconio (ZrSiO_4) para piezas de acero y piezas pesadas de fundición.
- **Koldur:** pinturas al alcohol de base grafito, para piezas de tamaño medio de fundición gris y esferoidal.
- **Arkopal:** pinturas al agua, de base silicato de alúmina.
- **Arkofix y koalid:** pinturas al alcohol que combinan alúmina, silicato de alúmina y zirconio.
- **Zircofluid:** pinturas al alcohol de color blanco y base zirconio para piezas de tamaño medio.
- **Disopast:** pinturas para pintar los modelos de poliestireno para la fabricación de troqueles.



1.2.4.2. Colas refractarias

- **Friocol:** colas refractarias de pegado en frío para la recuperación y montaje de machos.
- **Termocol:** colas de pegado en caliente para cáscaras y machos de arena prerevestida.

1.2.4.3. Aditivos

Son sustancias que se mezclan con la arena en el confeccionamiento de los machos y moldes con objeto de mejorar la calidad superficial de las piezas fundidas. Destacan el ferranex, la hulla granulada, magnetitas de distintas granulometrías, la harina de madera, entre otros.

1.2.4.4. Separadores

Se emplean para evitar el pegado de los moldes y machos al modelo o a la caja de machos, en el momento del desmodelado.

Los más utilizados son la silicona para caja caliente y los separadores de aluminio, tanto para modelos de madera como para caja de machos para cold box.

1.2.4.5. Dikaflex

Es un cordón plástico que se utiliza para evitar la fuga de metal en los moldes.

Ventajas:

- Cierre perfecto de los 2 partes del molde.
- Rapidez de colocación.
- Se reducen las rebabas ocasionadas por juntas falsas (ahorro de mano de obra en la limpieza de piezas).
- Aumento de la vida de las cajas de moldes.

1.2.4.6. Cerilla plástica

Alida de gases en machos y moldes.

Este producto está disponible en los diámetros de 2 a 30 mm.



1.3. Mezclas de moldeo

De forma general, existen unas series de métodos de moldeo industrial de acuerdo al tipo de producción que se lleve a cabo en las determinadas empresas. Tales métodos pueden clasificarse en (Salcines Merino, 1985):

- Moldeo por inyección
- Moldeo por soplado
- Moldeo a la cera perdida
- Moldeo en vacío
- Moldeo rotacional y/o Rotomoldeo
- Moldeo por compresión
- Moldeo en cáscara
- Moldeo en grafito
- Moldeo por transferencia
- Moldeo de metales en estado semisólido
- Moldeo por inyección asistida por gas
- Moldeo convencional o en verde
- Moldeo químico o autofraguante

Los tipos de moldeos o moldes normalmente se clasifican según los materiales que se usan. En el taller de fundición de la EMNi existen dos líneas de moldeo: una de moldeo en verde, donde se usan generalmente mezclas de arena con bentonita y miel (melaza) (ver anexo 2) y otra de moldeo químico, en la que se emplean mezclas autofraguantes usando resinas furánicas y catalizadores (ver anexo 3).

1.3.1. Moldeo en verde

Es el método más común que consiste en la formación del molde con arena húmeda, usada en ambos procedimientos. La llamada arena verde es simplemente arena que no se ha curado, es decir, que no se ha endurecido por horneado. El color natural de la arena va desde el blanco hasta el canela claro, pero con el uso se va ennegreciendo. La arena no tiene suficiente resistencia para conservar su forma, por ello se mezcla con un aglutinante para darle resistencia, luego se agrega un poco de agua para que se adhiera. Esta arena se



puede volver a emplear añadiendo una cantidad determinada de aglutinante cuando se considere necesario.

La receta más aplicada, de acuerdo a las exigencias tecnológicas, es la siguiente: 90 % arena, 6 % bentonita y 4 % mezcla melaza/agua (3,2 % melaza + 0,8 agua).

En el área de moldeo en verde existen dos líneas: una manual y otra mecanizada. En la primera, la compactación de la arena y extracción de la plantilla se realiza de forma manual, mediante el uso de pisones neumáticos manuales. Para ello es necesario auxiliarse de grúas. Por su parte, la mecanizada consta de cuatro máquinas neumáticas de sacudidas que realizan la compactación de la arena y extracción de la plantilla de forma automática.

1.3.2. Moldeo químico

El proceso es bueno para la fabricación de moldes, usando modelos y corazones desechables. La arena seca de grano agudo se mezcla con ácido fosfórico -el cual actúa como un catalizador- y la resina furánica. Se mezclan de forma continua el tiempo suficiente para distribuir la resina y el catalizador. El material de arena empieza a endurecerse casi de inmediato al aire, pero el tiempo demora lo suficiente para permitir el moldeo. El material se endurece usualmente de 1 a 3 horas, pero en algunos casos tarda hasta 24 horas, tiempo suficiente para permitir alojar los corazones y que puedan ser removidos en el molde.

En este tipo de moldeo normalmente se añade de 1,5 a 2 % de resina del peso de la arena, y del 25 a 30 % de catalizador del peso de la resina.

El área de moldeo químico cuenta con un mezclador continuo con productividad de 1500 t/año que realiza el mezclado de la arena con resina y el catalizador en las proporciones que indique la carta tecnológica. La mezcla se vierte en las cajas y se compacta, luego de esperar el tiempo necesario para el fraguado se extrae el modelo del molde y se envía para el área de fusión.



1.3.3. Parámetros de control en las mezclas de moldeo

La calidad de los moldes es un aspecto de elevado interés, ya que de ellos depende el éxito de la producción, una vez que sea verificada la composición química del metal líquido.

a) Vida de banco

Es el período de tiempo durante el cual una mezcla de arena/resina mantiene sus propiedades para ser usada. La especificación es mínimo 0.55 MPa (80 psi) de resistencia a una hora de almacenamiento de la mezcla.

b) Desarrollo de resistencia

Es la resistencia que se espera obtener en el corazón almacenado durante 2 horas. Es un indicador de la resistencia del corazón, desde su fabricación hasta su uso.

c) Resistencia en caliente

La resistencia en caliente es la resistencia de la mezcla de arena a altas temperaturas. Este tipo de pruebas permite evaluar la estabilidad térmica de las resinas ya reaccionadas y con ello poder prever los posibles problemas que puedan presentar los corazones en el momento del vaciado. Estos posibles problemas son: inclusiones no metálicas por presencia de arena suelta en el molde, suciedad en el molde, problemas de desarenado, etc.

d) Resistencia a la humedad

Se refiere a la habilidad de la arena del corazón de retener su forma y dimensiones a ciertas condiciones de humedad en el ambiente. Además, posibilita que el corazón tenga la suficiente resistencia para ser manejado, las resistencias en caliente y a la humedad; deben ayudar al corazón a resistir la presión del metal caliente durante el vaciado.

La arena del corazón debe emitir una limitada cantidad de gases en contacto con el metal fundido. Para ayudar a remover los gases del aglutinante de la arena, se utiliza una mezcla con alta permeabilidad.

e) pH y ADV



Altos valores de pH y demanda de ácido incrementan la velocidad de reacción de las resinas y neutralizan una porción de las mismas. Generan corazones débiles.

f) Evolución de gases

Se refiere a la cantidad de gas que la mezcla de arena resina ya reaccionada puede generar. Una vez que el metal es introducido al molde, existe el riesgo de que este gas no encuentre salida a través del corazón o metal y, una vez ya solidificado, este gas quede atrapado en la pieza como defectos por porosidad.

g) Permeabilidad

Esta prueba se realiza directamente en el corazón ya obtenido y permite conocer el grado de compactación de los granos de arena. Este parámetro permite saber la facilidad con la que los gases generados durante el vaciado pueden pasar a través del corazón y no quedar atrapados, generando o incrementando el defecto conocido como porosidad por gas.

h) Contenido de finos

Un alto contenido de finos (mayor a 10%) incrementa el área de superficie a recubrir, ocasionando menores resistencias y reduciendo la permeabilidad de los gases. Generan corazones débiles, rotos y esponjosos.

i) Colapsabilidad

Habilidad de la arena aglutinada de disgregarse después que el molde ha sido vaciado. Es la habilidad que presenta para el desmoldeo.

j) Fluidez

Capacidad de la mezcla de arena-resina para pasar con facilidad desde la tolva hasta las cavidades del molde.

1.4. Identificación de residuos peligrosos en el taller de fundición de la EMNi

Los residuos que más inciden en el Taller de Fundición de la EMNi son los siguientes:

1. Arenas y lodos de moldeo químico (aproximadamente 73 t/año)
2. Envases contaminados con resina (545 u/año)



3. Envases contaminados con pintura (840 u/año)
4. Chatarra electrónica (20 kg)

La presente investigación se centra en una parte del primer grupo de residuos señalados; las arenas residuales.

1.4.1. Protocolo de la EMNi para el manejo de la arena residual

Recolección y clasificación: La arena de retorno y el lodo generado como desecho durante el moldeo químico se recolectan en un recipiente separado del resto de los residuos. Este depósito se identifica con pintura llamativa y se usa solo para este fin.

Transporte: Para trasladar el depósito con la arena y el lodo dentro del taller o nave de producción se usa la grúa existente, evitando siempre el derrame del contenido dentro o en los límites de la UEB, de ocurrir se recoge inmediatamente. Luego la UEB Servicios Generales se encarga del transporte externo.

Almacenamiento temporal: El depósito usado para la recolección se mantiene dentro del taller bajo techo. Es colocado en un lugar que permita el traslado y salida de la UEB.

Valorización o reciclado: No procede. Según los especialistas de la empresa estas arenas no ofrecen ninguna característica o propiedad útil para la empresa.

Fuente: Todas las informaciones, desde el acápite 1.3.1 hasta el último párrafo presentado fueron extraídos del manual de producción del Taller de Fundición de la EMNi (Empresa Mecánica de Níquel, 2006).



1.5. Antecedentes investigativos del trabajo

Para la realización de este trabajo se ha hecho una penetrante búsqueda bibliográfica, consultas de artículos, revistas y otros materiales. Esta búsqueda estuvo enfocada en la adquisición de informaciones relacionadas, principalmente, con la reutilización de las arenas residuales de fundición; además, se incorporan trabajos realizados con la zeolita, todos ellos a nivel externo e interno del país.

(Miguel, Banda Noriega, Barreda, Monzón, & Sota, 2006): Realizaron una investigación que se centró en el estudio de un caso de una pequeña industria de fundición de aluminio en el partido de Tandil (Buenos Aires-Argentina). Durante un trimestre procedieron al seguimiento y toma de datos de la producción, consumo de arena y aglomerantes, porcentaje de arena recuperada y desechada. Establecieron que es factible una mayor recuperación de arenas dentro del circuito productivo, lo cual beneficia en términos económicos a la empresa y reduce el posible impacto ambiental. Con un porcentaje de la arena como residuo se elaboraron hormigones, determinando sus características comparándolos con un hormigón de referencia. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, incluyendo las determinaciones de los contaminantes identificados por lixiviación. Es importante mencionar que la industria analizada solo se dedica a la fundición de aluminio, a pequeña escala y que no tiene las condiciones estructurales y de trabajo similar a la EMNi.

Trabajos investigativos relacionados con el uso de las zeolitas tratadas con licor amoniacal, han demostrado que al tratar este tipo de mineral con este tipo de soluciones, posee alta concentración de NH_3 y no sufre cambios estructurales, por lo que puede ser nuevamente utilizada en otros ciclos de intercambio/desorción. Es por ello que resulta atractivo, desde el punto de vista económico, la aplicación de las zeolitas naturales en este proceso (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013).

El uso de zeolitas naturales como intercambiadores catiónicos para la protección ambiental fue estudiado por Pansini (1996, pág. 570), quien demostró las posibilidades de extracción de NH_4^+ de aguas municipales e industriales, de metales pesados de aguas residuales industriales y de cationes radiactivos de aguas de plantas nucleares, con el uso de zeolitas naturales.



1.6. Conclusiones del capítulo I

1. Las arenas empleadas en la conformación de los moldes de fundición, después de cumplir su ciclo de vida, generalmente no son utilizadas y se abandonan en los vertederos municipales; afectando al medio ambiente de las regiones donde existen estos tipos de empresas metalúrgicas.
2. No existen antecedentes del uso de las arenas de rechazo de los talleres de fundición, como material para la conformación de agromenas.
3. Las arenas de rechazo utilizadas en la conformación de agromenas, constituyen un material inerte, que puede ser mezclado con materia orgánica para potenciar su uso en la agricultura cubana.



CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se exponen los principales métodos, procedimientos y condiciones en las que se realizó el diseño de las mezclas experimentales y la gestión de los datos inherentes al tema tratado. Los principales objetivos estratégicos de la presente investigación consistieron en proponer, a partir de la revisión bibliográfica y las experiencias existentes en Cuba y el mundo, con el uso de materiales similares a los empleados en esta investigación, dos variantes de reutilización de las arenas residuales del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa, en caso de que los resultados sean satisfactorios.

- La conformación de mezclas agromenas nitrogenadas, aplicando las arenas residuales como sustituyente principal de la tierra natural.
- Demostrar las posibilidades que tiene el Municipio de Moa de emplear los Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos que generan las plantas y talleres, en función del desarrollo sostenible del territorio.

Para el logro de estos objetivos, se procedió al estudio de los materiales empleados en la investigación, principalmente de las arenas residuales del Taller de Fundición de la EMNi, así como del resto de los materiales empleados:

- ✓ Arenas de rechazo de los procesos de fundición
- ✓ Zeolita, de la planta de San Andrés en Holguín
- ✓ Materia orgánica (gallinaza), de la granja avícola de Moa
- ✓ Licor residual de la planta de recuperación de amoniaco de la Empresa Che Guevara, de Moa



2.1 Determinación del estado químico y físico de la arena residual

Con respecto a los aspectos químicos, según los especialistas expertos en laboratorio en fundición de la EMNi, estas arenas no sufren ningún cambio considerable en su estructura química al entrar en contacto con el metal líquido, manteniéndose prácticamente la mayoría de sus propiedades químicas fundamentales, como se explicó anteriormente (ver acápite 1.2.1.2.).

Los cambios físicos más notables se observan en la granulometría de las partículas, para ello se aplicó un tamizado de control, con el propósito de definir el tamaño nominal de la arena residual estudiada.

El método de análisis aplicado fue la caracterización de la arena por el método granulométrico y los equipos utilizados fueron, esencialmente, criba (tamizadora) y balanza analítica.

Para comprobar la ineptitud de la arena residual en el proceso de moldeo local se realizaron mezclas con la misma receta utilizada con la arena nueva, luego estas mezclas fueron sometidas a los mismos ensayos.

De acuerdo al tipo de moldeo empleado, las arenas fueron estudiadas de formas separadas, empleando el procedimiento de ensayo que se resume a continuación:

2.2 Procedimiento de ensayo a las arenas de fundición

Primero se efectuó la mezcla con la receta recomendada (ver acápite 1.3.), después del mezclado se compacta la mezcla en un compactador de mezclas (ver figura 6), la mezcla compactada es sometida al permeámetro (ver figura 7) para medir la permeabilidad de las mezclas, luego a una máquina de ensayos mecánicos universal para arenas (ver figura 8) para medir la resistencia a la tracción en moldeo químico y resistencia a la compresión, tracción y cizallamiento en el moldeo en verde.



Figura 6. Compactador empleado en los experimentos.



Figura 7. Permeámetro empleado para los ensayos de permeabilidad.



Figura 8. Máquina de ensayos mecánicos universal para arenas.

En el caso de la arena de moldeo en verde la muestra fue sometida también a un medidor de humedad (ver figura 9), para determinar su humedad relativa.



Figura 9. Medidor de humedad empleado en la investigación.

2.3 Arenas residuales como sustrato en la conformación de agromena

Para el diseño experimental de la formulación de la agromena se aplica el método de diseño de mezclas del tipo Mc. Lean-Anderson (Diseño de Mezclas, 2008). Este método consiste en determinar el número de experimentos de posibles resultados positivos, así como sus respectivas dosificaciones, de acuerdo con las variables involucradas en el proceso.

2.3.1 Diseño de mezclas aplicando el método de Mc. Lean-Anderson

1. Variables independientes

Las agromenas estarán conformadas por los siguientes elementos:

- X_1 – Arenas residuales
- X_2 – Zeolita activada
- X_3 – Materia orgánica

2. Variables Dependiente

- Y_1 – Grado de germinación de las semillas plantadas
- Y_2 – Supervivencia de las plantaciones germinadas

Justificación de los materiales agregados a emplear en las mezclas:

a. Arena residual

La arena residual debido a que constituye el problema ecológico más voluminoso de la empresa y posee propiedades no dañinas para los productos agrícolas y se encuentra en un estado físico aceptable para este sector, terreno arenoso con algunas partículas muy finas.

A las arenas residuales de moldeo en verde se le añade bentonita como aglomerante; componente arcilloso que puede facilitar la compactación de la mezcla y no es dañino para los alimentos. Estos aspectos han sido tomados en cuenta para el desarrollo de la presente investigación. En la figura siguiente se muestra una vista de la arena de moldeo en verde.



Figura 10. Arena de moldeo en verde.

Por su parte, la arena de moldeo químico posee pequeñas cantidades de ácido fosfórico, utilizado como catalizador en el moldeo y que constituye un ingrediente provechoso para las plantas. En la figura siguiente se muestra la arena de este tipo de moldeo.



Figura 11. Arena de moldeo químico.

b. Zeolita cargada

La zeolita es un mineral compuesto por aluminosilicatos, cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento, las cuales permiten el cambio iónico y la deshidratación reversible.

La zeolita presentada es naturalmente cubana, extraída del yacimiento de San Andrés (Holguín). La misma ha sido profesionalmente estudiada y muestra características químicas, físicas y mineralógicas adecuadas para su utilización en mezclas con los fertilizantes minerales nitrogenados según (Centro de Investigaciones para la industria Minero-Metalúrgica, 2013) y (Domínguez Palacio, Soca Núñez, & Velázquez, 2018).

La zeolita del yacimiento de San Andrés tiene un amplio uso en la industria debido a sus propiedades de intercambio catiónico, adsorción-desorción y sus características estructurales que le confieren gran porosidad; además de su composición química, como se describen en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química promedio de las zeolitas de San Andrés, en Holguín.

Compuestos	Por ciento (%)
SiO ₂	63,0 - 68,6
Al ₂ O ₃	11,6 - 12,7
TiO ₂	0,3 - 0,45
Fe ₂ O ₃	1,07 - 2,08
Na ₂ O	1,34 - 2,39
K ₂ O	1,09 - 1,50
CaO	2,78 - 5,78
MgO	0,07 - 0,92
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	8,61
H ₂ O	3,44

Fuente: (Centro de Investigaciones para la industria Minero-Metalúrgica, 2013), (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013).

Según la investigación realizada por Gerardo Antonio Orozco Melgar y Josefina Aguirre sobre (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013) la zeolita le proporciona mayores propiedades a las plantas cuando está enriquecida de nitrógeno.

Basándose en esa investigación, en la presente se activó la zeolita con el efluente amoniacal (rico en nitrógeno) (ver figura 13); un residual de la Empresa Che Guevara, con el objetivo de aumentar la efectividad de la agromenas a confeccionar. En la figura 12 se aprecia una imagen de las zeolitas empleadas en esta investigación.



Figura 12. Zeolita antes del proceso de activación.

Teniendo en cuenta las experiencias del tratamiento de zeolitas con licor amoniacal de la Empresa Ernesto Che Guevara, donde se demostró que al transcurrir cierto tiempo de tratadas o activadas, las zeolitas naturales quedan cargadas con amonio (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013), aplicamos en nuestro trabajo un procedimiento similar empleando una solución residual amoniacal de la Empresa Che Guevara, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 13. Efluente residual amoniacal de la Empresa Che Guevara, empleado en la investigación.

La composición química de este efluente se caracteriza por el relativamente alto contenido de iones de amonio y sulfatos, los cuales poseen un aporte significativo para la activación de las zeolitas empleadas en la investigación. En la tabla siguiente se muestra la composición química promedio de estos efluentes, que constituyen un pasivo ambiental líquido que normalmente se vierte al medio ambiente de la zona.



Tabla 5. Composición química promedio del efluente amoniacal empleado en la investigación.

Características	Unidad de medida	Valores
pH	-	8,72
NH ₃	ppm	1724
CO ₃	ppm	22,58
Cl ⁻	ppm	489,92
S ²⁻	ppm	414,92
SO ₄	ppm	1741,81
Ni	ppm	21,60
Co	ppm	0,08
Fe	ppm	3,24
Mn	ppm	3,88
Mg	ppm	47,42
Cr	ppm	0,61
Si	ppm	2,21

Ca	ppm	9,25
Na	ppm	245,50
K	ppm	7,30
Cu	ppm	0,31

El proceso de activación de las zeolitas con el efluente residual se realizó empleando probetas de laboratorio de 1 litro de capacidad, por espacio de 1 hora, tomando en cuenta las experiencias de diferentes investigadores (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013), (de Campos Bernardi, Peronti Anchão Oliviera, De Melo Monte, & al, 2010), donde se aplicaron métodos de activación con zeolitas naturales para diversos usos, incluyendo la agricultura. A continuación, se presentan las figuras 14 y 15 visualizando el proceso de activación de la zeolita y la misma después de activada, respectivamente.



Figura 14. Proceso de activación de las zeolitas naturales de San Andrés, Holguín.



Figura 15. Zeolita después de la activación.

c. Materia orgánica

En la agricultura se utiliza la materia orgánica porque favorece la presencia de microorganismos del suelo, responsables de la fertilidad de la tierra. Una de las variedades de materia orgánica más aplicada actualmente en la agricultura ecológica, es la llamada gallinaza. La misma fue empleada en la presente investigación, obtenida de la granja avícola del municipio, mostrada en la figura siguiente.

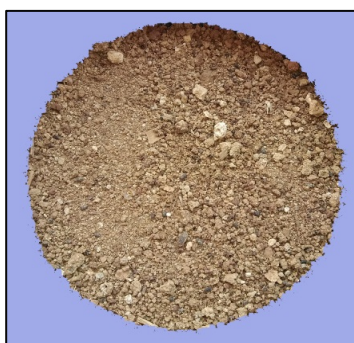


Figura 16. Materia orgánica (gallinaza) de la empresa avícola municipal, empleada en la investigación.

Las materias primas empleadas en la conformación de las agromenas -excepto las zeolitas- constituyen rechazos de procesos industriales, que pueden ser utilizados para la obtención de alimentos en el municipio y la provincia, a través de la preparación de este tipo de producto agrícola.

3. Intervalos de variación de las variables independientes

Primeramente, se realizaron experimentos con mezclas de arena de rechazo y zeolitas, según las experiencias de investigaciones precedentes (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013). A partir de estos resultados, se procedió al desarrollo de las agromenas con la incorporación de residuales de las industrias del níquel y de la agricultura. Según el (Centro de Investigaciones para la industria Minero-Metalúrgica, 2013) la dosificación de la zeolita para fertilizantes nitrogenados es de 10 a 15 %. La materia orgánica se debe añadir de 0,5 a 1 %, aunque en algunos casos especiales se puede aumentar un poco más, según la (Empresa Agropecuaria Organopónico "El Nin"). La dosis de la matriz de una mezcla, en este caso la arena residual, se toma a conveniencia profesional, de acuerdo con la composición de los demás componentes.

La cantidad de la matriz generalmente es superior al 50 %. De una forma más explícita, en la tabla 6 se presentan los intervalos de variación de las variables independientes, empleadas en los experimentos.

Tabla 6. Intervalos de variación de las variables independientes.

Códigos	NIVELES (%)		
	Inferior (-)	Medio (±)	Superior (+)
X ₁	80,0	85,0	90,0
X ₂	5,0	7,5	10,0
X ₃	0,5	1,0	1,5

4. Matriz experimental

A partir de la dosificación de los componentes de las variables de investigación se conformó la matriz experimental de investigación, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 7. Matriz experimental diseñada para el desarrollo de las mezclas de agromenas.

Nº de Experimentos	Códigos			$\sum X_i$	Criterio
	X ₁	X ₂	X ₃		
1	-	-	-	85,5	NO
2	+	+	+	101,5	SÍ
3	±	±	±	93,5	NO
4	-	-	+	86,5	NO
5	-	+	+	91,5	NO
6	+	+	-	100,5	SÍ
7	+	-	-	95,5	SÍ
8	±	±	-	93,0	NO
9	±	-	-	90,5	NO
10	±	±	+	94,0	NO
11	±	+	+	96,5	SÍ

El método de diseño de mezcla de Mc. Lean-Anderson afirma que para que un experimento (n) sea aceptable, debe cumplirse la condición de normalidad; o sea, que la sumatoria de todos los elementos (X_i) debe ser algebraicamente igual a cien:

$$n = \sum X_i = 100$$

Este método de diseño experimental brinda la posibilidad de además de los experimentos que cumplen la condición de normalidad desarrollar los ensayos de contorno, los cuales consisten en desarrollar los que estén en el rango de contornos exteriores e interiores al 100. En este caso, para este tipo de prueba se tomaron todos los experimentos cuyos valores sumatorios son 4 unidades inferiores o superiores a 100, o sea, entre 96 y 104. Estos resultados permitieron en total, ejecutar los experimentos 2, 6, 7 y 11, declarados con un SI en la tabla 6.

2.4 Selección de las semillas empleadas en los experimentos

En coordinación con la Dirección Municipal de la Agricultura y el organológico el NIP, se seleccionaron las semillas que se utilizarían para evaluar la calidad de las agromenas conformadas. Las semillas fueron seleccionadas, según el criterio de expertos, por la complejidad de sus germinaciones, desde una de fácil germinación hasta las más difíciles y complejas. Para ello, se seleccionaron semillas de frijol caballero, habichuela, lechugas y remolacha. Para el desarrollo de los experimentos se contó en todo momento con el apoyo de las instituciones de la agricultura mencionados, quienes colaboraron con la realización de este trabajo con los recursos mínimos necesarios, principalmente, bolsas de polietileno, semillas y sobre todo, el asesoramiento técnico.

2.5 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos obtenidos durante 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



2.6 Conclusiones del Capítulo II

1. La metodología de investigación empleada permitió seleccionar y caracterizar los materiales utilizados, con la calidad requerida para garantizar el éxito de este trabajo.
2. La aplicación del diseño de mezclas permitió definir los principales experimentos, según el criterio de normalidad que se establece; así como desarrollar otros experimentos de contorno que facilitaron la optimización de los resultados obtenidos.
3. Los intervalos de variación de las variables de investigación empleados se corresponden con experiencias existentes en Cuba y el mundo, con el uso de estos tipos de residuales y minerales industriales.
4. El apoyo y el trabajo coordinado de las empresas del níquel, la delegación de la agricultura en Moa y el ISMM, permitieron cumplir los objetivos trazados para el desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación, se exponen los principales resultados derivados del trabajo experimental y, a partir de los mismos, se describe la viabilidad o no de la variante de uso propuesto.

3.1 Análisis y resultados de los ensayos granulométricos

La arena residual estudiada se caracteriza por poseer tamaños de partículas, donde más del 90 % se concentra entre la fracción granulométrica $-0,32 + 0,07$ mm, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 8. Resultado promedio de los análisis granulométricos realizados.

No. Tamiz (mm)	Mesh	% Ret.	% Acum.	Factor	Fact*%	Valor Grafico
0,80	20	0,876	0,876	10	8,763	0,88
0,63	30	1,338	2,214	20	26,760	1,34
0,40	40	6,665	8,879	30	199,950	6,67
0,32	50	10,645	19,524	40	425,800	10,65
0,20	70	22,996	42,520	50	1149,800	23,00
0,16	100	24,646	67,166	70	1725,220	75,35
0,13	150	16,073	83,239	100	1607,300	83,93
0,07	200	15,295	98,534	140	2141,300	84,71
0,06	0	0,806	99,340	200	161,200	99,19
fondo	fondo	0,660	100,000	300	198,000	99,34
Total					7644,093	

Estos resultados permiten clasificar a este material como una arena fina, según Salcines Merino, (1985), pues el 100 % es menor de 1,0 mm. Esta es además, una de las razones por la cual se utilizan estos materiales mezclándolos con la arena nueva o se rechazan completamente. Para una mejor observación de estos resultados se representa la figura siguiente.

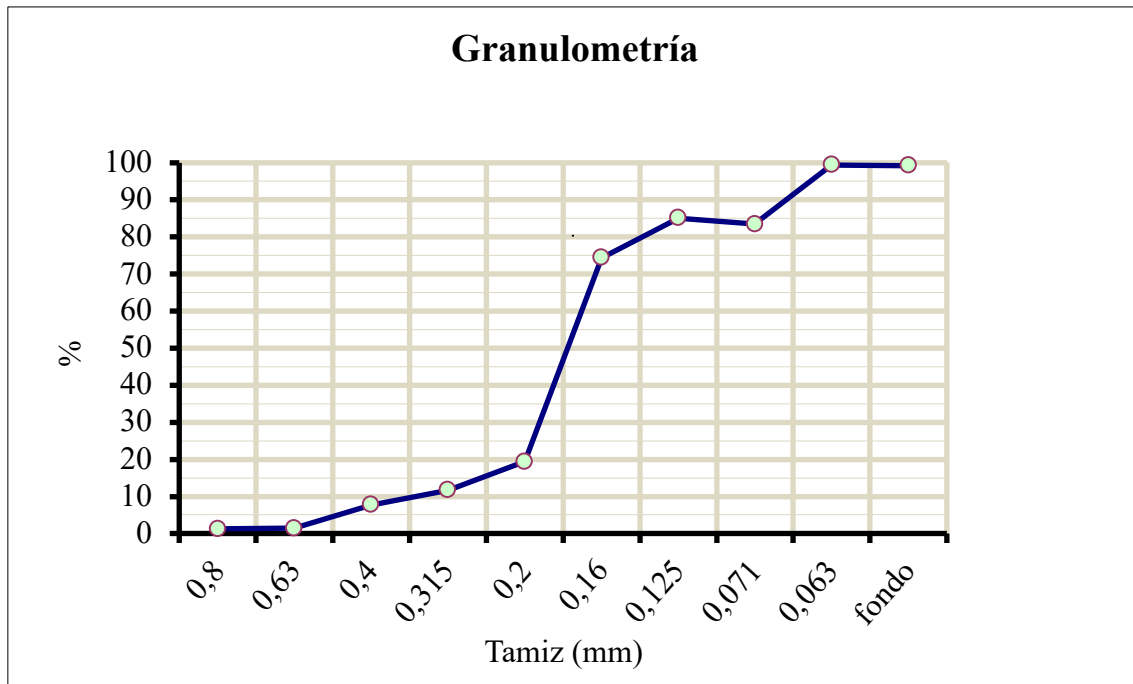


Figura 17. Análisis granulométrico de la arena residual estudiada.

Estos resultados confirman que las arenas de rechazo del Taller de Fundición de la EMNi son muy finas. Este elemento ha sido tomado en cuenta durante la conformación de las agromenas, ya que necesitan de otro componente de un mayor tamaño de partículas que garantice el flujo de agua y la entrada de aire a través de ella; lo cual favorece el proceso de germinación de las semillas que se pretendan cultivar.

3.2 Mezclas con la matriz de arena nueva y con la matriz de arena residual

Las figuras 18 y 19 muestran los resultados de los análisis de resistencia a la tracción y de permeabilidad de las mezclas estudiadas, las cuales han sido construidas a partir de los valores que aparecen en el anexo 4.

Todas las muestras del 1 al 15, presentadas a continuación, son referentes a las pruebas realizadas a las mezclas de moldeo con arena nueva, mientras que la muestra 16 es la de arenas residuales, esto en el caso de los moldeos químicos. De igual modo, para el moldeo en verde, las del 1 al 25 se refieren a las arenas nuevas y el 26 describe la arena residual.

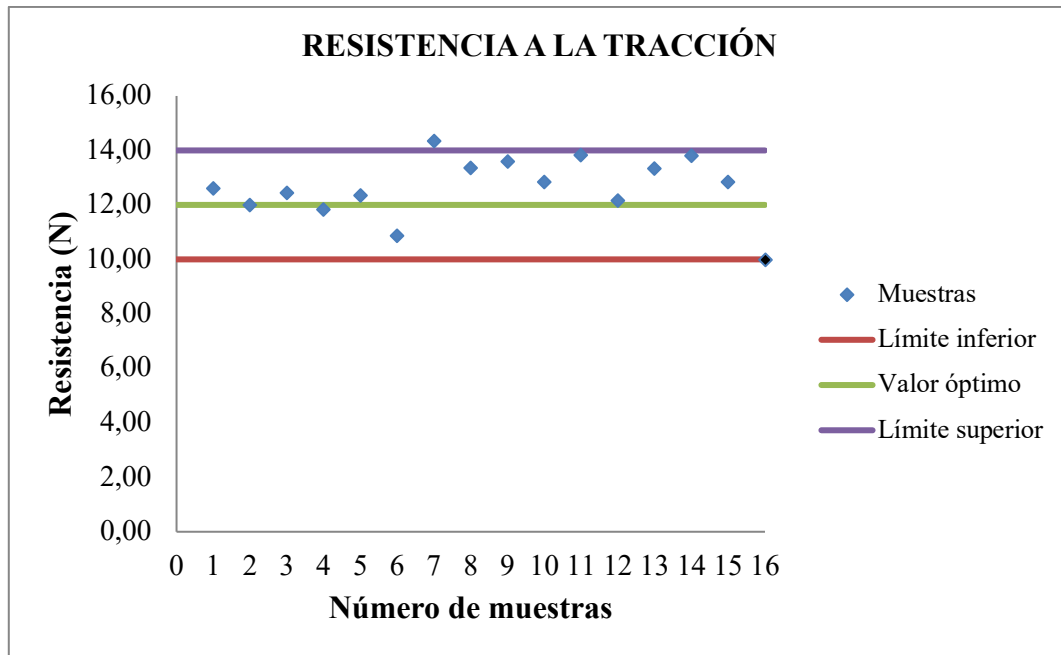


Figura 18. Comportamiento de la resistencia a la tracción de las mezclas de moldeo químico (autofraguante).

Como se observa en ambas figuras, la mayoría de las mezclas están dentro de los límites establecidos (10 – 14 Newton), aunque no sea una condición suficiente, ya se puede deducir que la arena usada está apta para la realización de este tipo de mezcla.

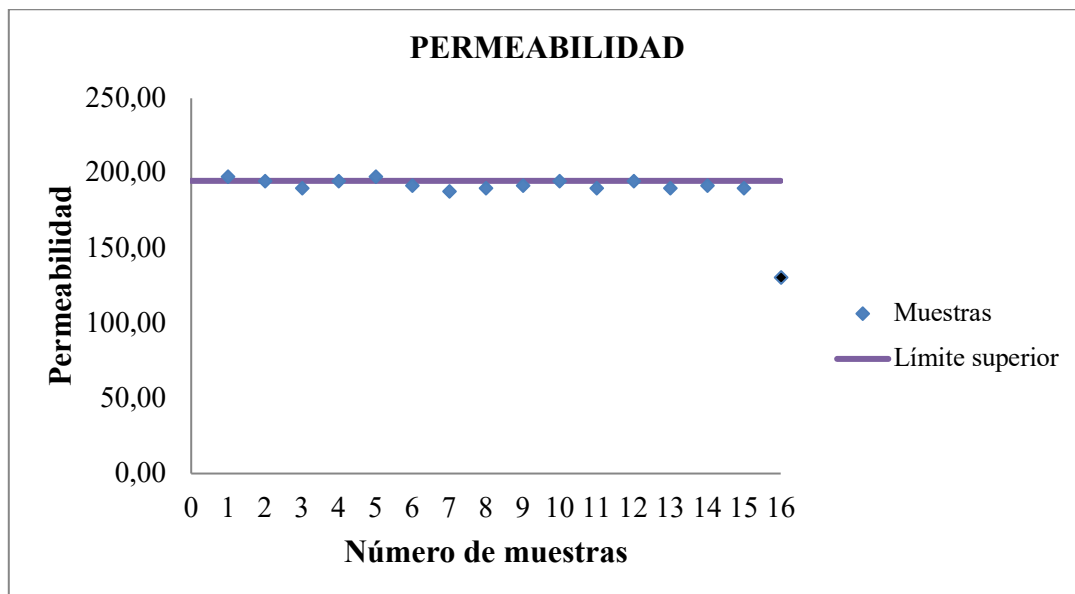


Figura 19. Comportamiento de la permeabilidad de las mezclas de moldeo químico (autofraguante).

En el caso de la permeabilidad se consideran aceptables las muestras que están por debajo del valor máximo admisible (195). Es preciso resaltar que, en todos los casos de mezclas de moldeo, cuanto menor sea la permeabilidad mayor será su influencia en la eficiencia positiva al proceso.

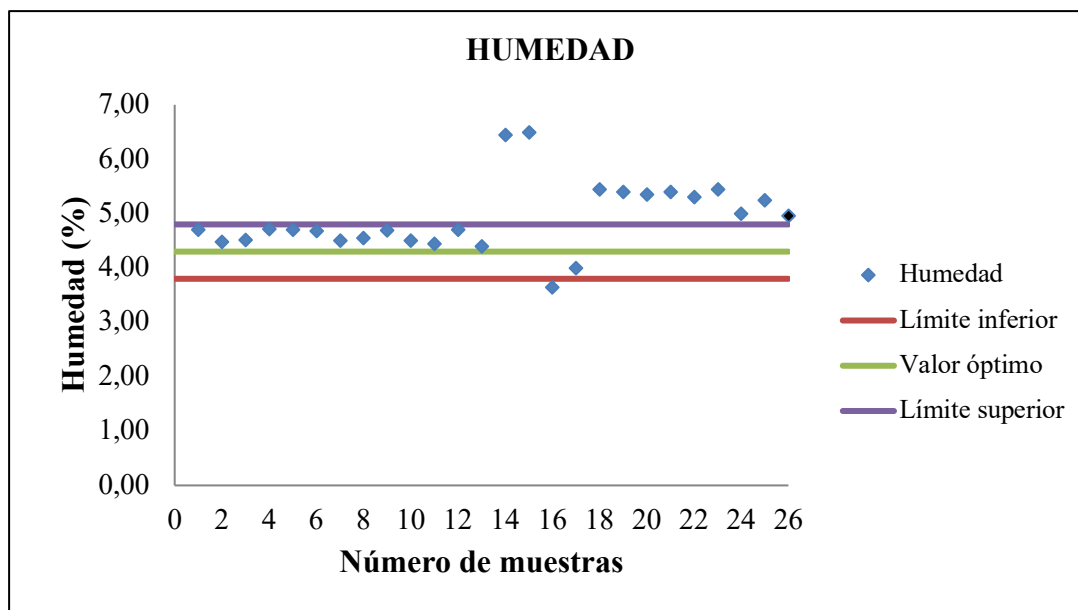


Figura 20. Comportamiento de la humedad de las mezclas de moldeo en verde.

La humedad es uno de los parámetros que se controla rigurosamente para las muestras que sobrepasan los límites (las que no están entre 3,8 a 4,8 %). El tecnólogo responsable debe actuar orientando los ajustes necesarios para no afectar el resultado deseado.

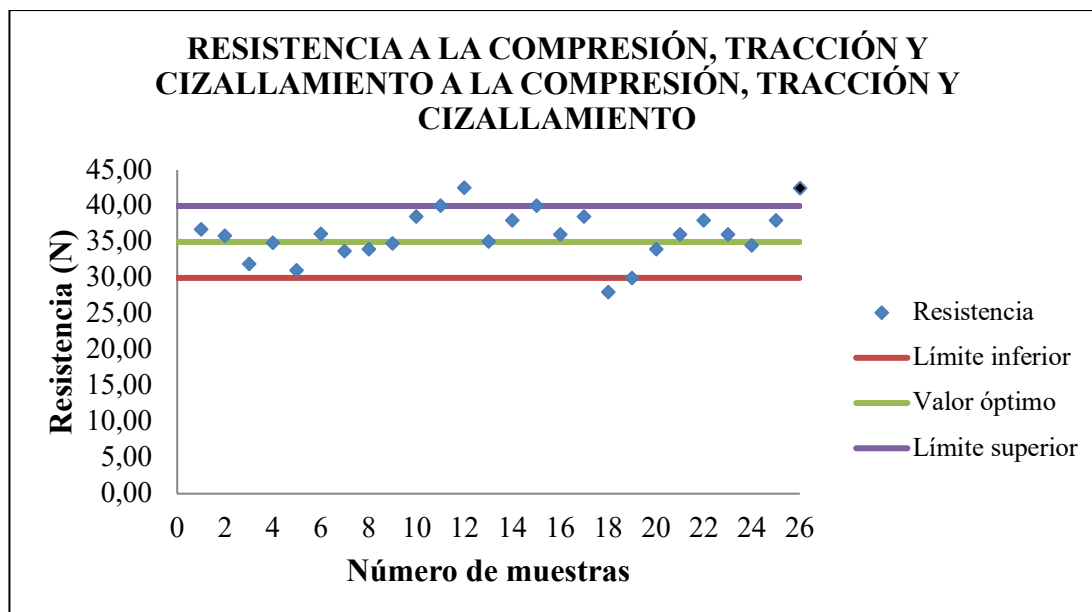


Figura 21. Comportamiento de la resistencia a la compresión, tracción y cizallamiento de las mezclas de moldeo en verde.

La resistencia a la compresión, tracción y cizallamiento en las mezclas de moldeo en verde también es un factor a controlar con atención, de modo que esté en el rango definido (entre 30 a 40 N).

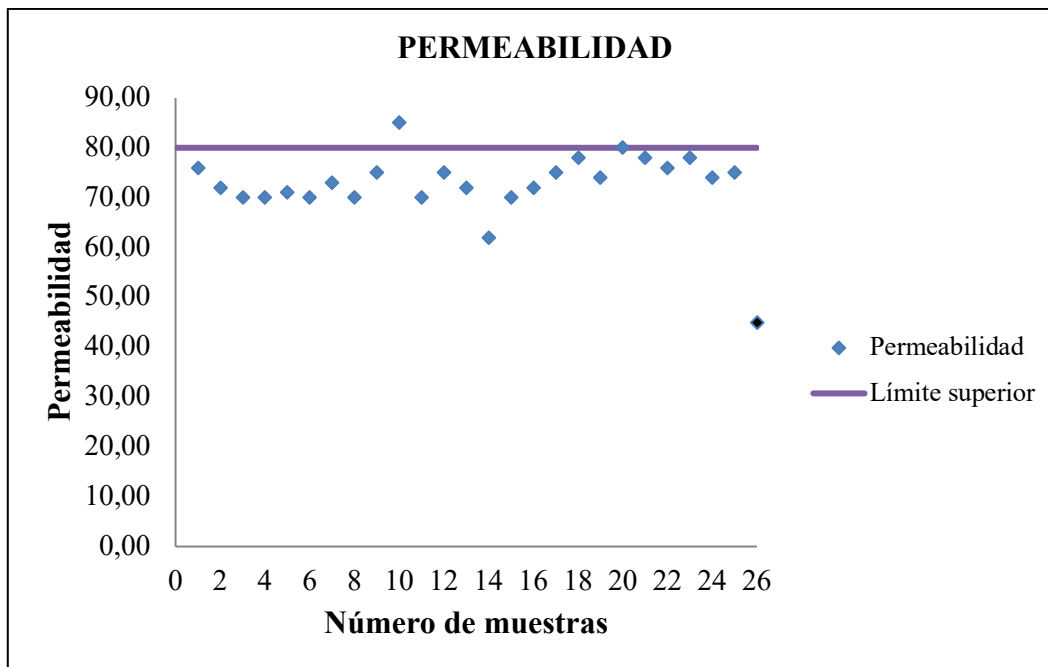


Figura 21. Comportamiento de la permeabilidad en las mezclas de moldeo en verde con la arena nueva del 1 al 25 y el 26 con la arena residual.

En el caso de la permeabilidad sucede lo mismo que en las mezclas autofraguantes, a diferencia que, en las presentes mezclas, el parámetro es muy inferior debido a las condiciones técnicas en las que son elaboradas. El control se realiza teniendo en cuenta en valor máximo admisible (0,8).

Las figuras presentadas anteriormente (20, 21 y 22), fueron construidas a partir de los datos oficiales de la EMNi, presentados en el anexo 5.

3.3 Pruebas preliminares para la conformación de agromenas

Primeramente, se evaluó el comportamiento de las arenas de rechazo estudiadas mezcladas con zeolitas de San Andrés, tomando en cuenta la experiencia de los especialistas de la agricultura de Moa y de los trabajos investigativos preliminares (Centro de Investigaciones para la industria Minero-Metalúrgica, 2013); (Orozco Melgar & Aguirre Aguirre, 2013). Los principales resultados de estas pruebas se resumen a continuación.

3.3.1 Resultados de los experimentos con arena de rechazo y zeolita simples

Las mezclas conformadas, tanto con arenas de moldeo en verde como de moldeo químico, tenían las proporciones que se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 9: Proporción de materiales empleados en la conformación de las agromenas iniciales.

Materiales	Proporciones (%)		
	Mínimo	Medio	Máximo
Arena de moldeo en verde	25	50	75
Arena de moldeo químico	25	50	75
Zeolita	25	50	75

Los resultados a partir del primer día de la siembra de las semillas de ocuje demostraron la ineffectividad de los experimentos, al emplear solamente arena de rechazo y zeolita, como puede apreciarse en las figuras siguientes.

Primer día

Arena residual de moldeo en verde

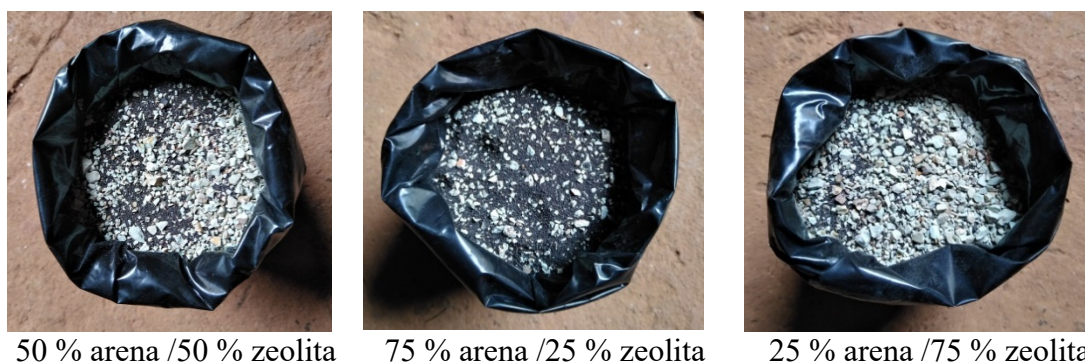


Figura 22. Resultado de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo en verde y zeolita, según las proporciones que se muestran.

Igualmente, los resultados de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo químico y zeolita, no fueron satisfactorios como se aprecia en la figura siguiente.



50 % arena /50 % zeolita



75 % arena /25 % zeolita



25 % arena /75 % zeolita

Figura 23 Resultado de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo químico y zeolita, según las proporciones que se muestran inicialmente.

Según el criterio de los especialistas de la agricultura en Moa, las especies empleadas constituyen una planta medicinal, que tiene un período de germinación entre 10 y 20 días; sin embargo, luego de transcurrido 10 días de la siembra, aún no se apreciaba germinación ni desarrollo de las semillas, para todas las mezclas conformadas. Ello comprobó la necesidad de realizar nuevas modificaciones a las agromenas deseadas.

Décimo quinto día



Figura 24. Resultado de las agromenas conformadas con arena residual de moldeo en verde, químico y zeolita, luego de 10 días de sembradas las semillas.

Los resultados de estos experimentos llevados a cabo con la especie *Calophyllum antillanum* “ocuje”, recomendada por los especialistas de la Empresa Agroforestal de Moa, demostraron que las agromenas necesitaban de la adición de otros materiales que aportaran nutrientes para poder lograr las germinaciones deseadas.

3.4 Resultados de la aplicación de la arena residual como sustrato en la conformación de agromena

Una vez diseñados los experimentos se llevó a cabo la aplicación práctica de los mismos, obteniendo los siguientes resultados:

3.4.1 Resultados de las pruebas realizadas con frijol caballero

Antes de presentar los resultados y poder analizarlos es necesario saber el comportamiento de los frijoles. Los frijoles presentan dos fases de desarrollo y cada una de las fases tiene sus etapas (Empresa Agropecuaria Organopónico "El Nin").

La primera es la fase vegetativa, está compuesta por las siguientes etapas:

- V1– Germinación y emergencia (0 – 7 días);
- V2 – Hojas primarias (7 – 11 días);
- V3 – Primeras hojas trifoliada (11 – 16 días);
- V4 – Segunda y tercera hoja trifoliada (16 – 23 días).

La segunda fase es reproductiva, en esta fase ocurre lo siguiente:

- R5 – Pre floración (23 – 32 días);
- R6 – Floración (32 – 36 días);
- R7 – Formación de vainas (36 – 44 días);
- R8 – Llenado de las vainas (44 – 62 días).
- R9 – Maduración (62 – 77 días).

Para una mayor comprensión se esquematiza todo lo descrito en la siguiente figura.

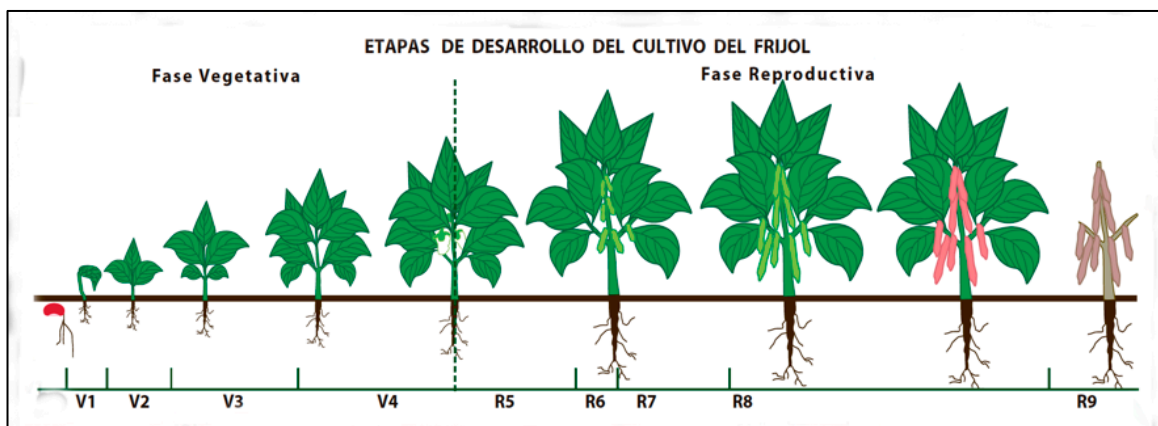


Figura 25. Etapas de desarrollo del cultivo del frijol.

Elaborado por: Joaquim José Canjila Dala

Los resultados que a continuación se presentan se realizaron a cuatro (4) réplicas para cada tipo de arena, de acuerdo al moldeo al que fue sometida. Las figuras que se muestran a continuación muestran los resultados siguientes: la primera fila corresponde a los ensayos realizados con la arena residual de moldeo en verde, mientras que la segunda fila son referentes a los del moldeo químico.

Como se aprecia en estos experimentos, a partir del cuarto día de efectuada la siembra de las semillas de frijol caballero, comienza el crecimiento apreciable de las plantaciones de este producto, el cual se va desarrollando con el paso del tiempo, alcanzando un 100 % de germinación y supervivencia.





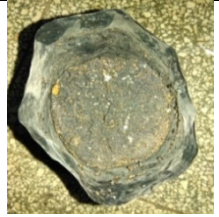
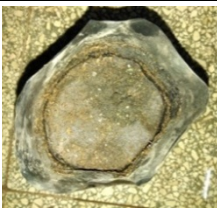

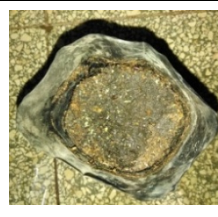
Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
<ul style="list-style-type: none"> • 90 % de X_1 • 10 % de X_2 • 1,5 % de X_3 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 % de X_1 • 10 % de X_2 • 0,5 % de X_3 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 % de X_1 • 5 % de X_2 • 0,5 % de X_3 	<ul style="list-style-type: none"> • 85 % de X_1 • 10 % de X_2 • 1,5 % de X_3
			
			

Figura 26. Los experimentos con frijol caballero en el primer día de observación.

En el primer día como es lógico no se nota ningún indicio de evolución en la superficie, pero es importante mencionar la semilla de frijol una vez en contacto con agua comienza su proceso de absorción de humedad, el ovulo se excita y automáticamente empieza a cambiar su estructura interna preparándose desde luego para una posible germinación.

A continuación, se observará el comportamiento de las muestras 4 días después de su sembrado.



Figura 27. Los experimentos con frijol caballero en el cuarto día de observación.

Como se observa en la figura 27 al cuarto día todos los experimentos muestran una germinación natural ya que de acuerdo a los especialistas agrónomos esta especie de frijol empieza su germinación en un periodo de 3 a 7 días. Esto demuestra preliminarmente la aptitud de los experimentos en la prueba de germinación.

Las dos figuras presentadas a continuación, esto es las figuras 28 y 29 donde todos los experimentos están ordenados en una sola fila, las de moldeo en verde son los primeros y secuencialmente siguen los referentes a las de moldeo químico.

En estas figuras y en las demás que se presentan existen algunas diferencias entre las plantas, pero es prematuro y un poco desatinado concluir que esta diferencia se debe a la eficiencia de algunas o ineficiencia de otras muestras ya que las semillas aplicadas no fueron sometidas a un ensayo preliminar de potencial de germinación. Según los especialistas agrónomos el proceso de desarrollo de las plantas no está definido solamente por el suelo, también cuentan otros aspectos específicos de las semillas principalmente su potencial de germinación y la dureza de los tegumentos.



Figura 28. Los experimentos con frijol caballero en el décimo día de observación.

Se observa en la figura 28 el cumplimiento de la segunda etapa en todas las muestras, la aparición de las hojas primarias.



Figura 29. Los experimentos con frijol en el décimo quinto día de observación.

Aquí empieza a nacer las primeras hojas trifoliada cumpliéndose así la tercera etapa de la fase de vegetación de la planta.

Después del cumplimiento de tercera etapa como es lógico sigue la cuarta etapa y la última de esta fase de vegetación, empiezan a nacer las segundas y terceras hojas trifoliada de forma consecutiva.

Tras finalizar todas las etapas de la primera fase la planta entra en el proceso de la segunda fase que es la reproductiva. Debido al tiempo limitado que se posee infelizmente no se podrá seguir presentando resultados. A pesar de esta limitante los especialistas agrónomos opinan con seguridad que las plantas una vez que cumplen con la primera fase de desarrollo de forma satisfactoria sigue hasta el final al menos que son sorprendidas por una plaga o por falta de cuidados de parte de la persona encargada.

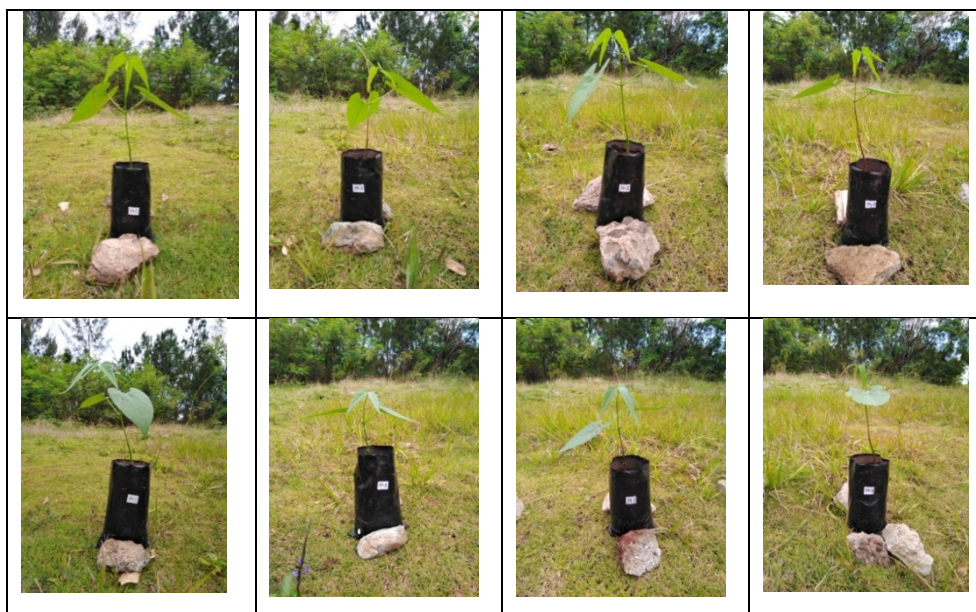


Figura 30. Los experimentos con frijol en el décimo octavo día de observación.

Como se pudo observar en las figuras presentadas anteriormente, las plantaciones de semillas han respondido de forma satisfactoria, ya que han germinado y han presentado un comportamiento normal, de acuerdo con los criterios de los especialistas de la agricultura del municipio.

3.4.2 Resultados de las pruebas realizadas con lechuga, remolacha y habichuela

Luego de los resultados obtenidos con los ensayos realizados a los frijoles, a recomendación de los especialistas de la Empresa Agropecuaria de Moa y del organológico “El Nim”, se efectuaron varias pruebas con semillas de lechuga, remolacha y habichuela, empleando las mismas dosificaciones de los anteriores experimentos con frijoles.

En estos casos los resultados fueron muy positivos, según el criterio de los especialistas de la agricultura, ya que a partir del cuarto día la germinación de las semillas es evidente, con un crecimiento y supervivencia elevados para todas las especies sembradas. Esto demuestra la efectividad de los experimentos realizados, como se aprecia en las figuras siguientes.

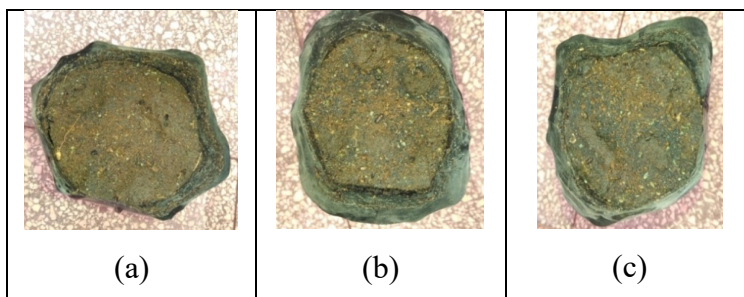


Figura 31. Los experimentos con lechuga, remolacha y habichuela en el primer día.

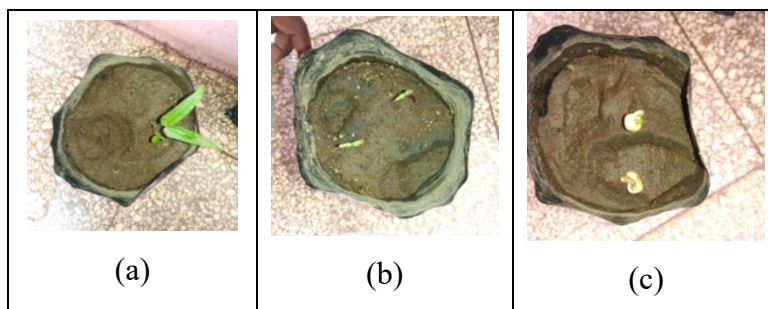


Figura 32. Los experimentos con lechuga (a), remolacha (b) y habichuela (c) en el cuarto día.

Ya a partir del octavo día se apreciaba un crecimiento sostenido y constante de las plantaciones de las verduras mencionadas, como se muestra en la figura siguiente.

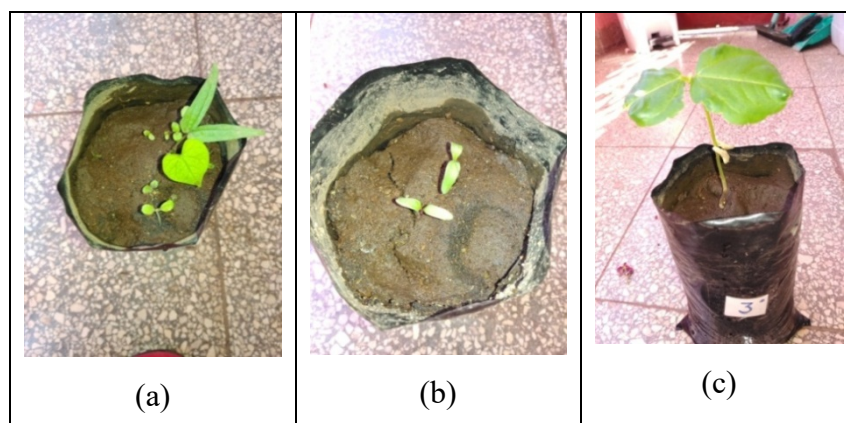


Figura 33. Los experimentos con lechuga (a), remolacha (b) y habichuela (c) en el octavo día.

Todos los resultados obtenidos con las semillas de frijol, lechuga, remolacha y habichuela demuestran claramente que la arena residual, tanto del moldeo en verde como la del moldeo químico, pueden ser utilizadas como sustrato total o parcial de las agromenas o en la agricultura general. Esto constituye una posibilidad real de convertir en un activo de utilidad para la sociedad a uno de los residuales más importantes que tiene la Empresa Mecánica del Níquel, en Moa.

3.4.3 Valoración económica

El precio de la arena sílice según el Departamento de Economía de la empresa (Departamento de Economía, 2019), es 361,41 CUP/tonelada. proveniente de las instalaciones suministradoras, ubicadas en la provincia de Pinar del Río. El costo total, que incluye la transportación hasta Moa, es muy variable y oscila entre 1000 – 2000 Monedas Totales, con un costo estimado promedio de 400 CUC. El costo total depende de varios factores, como son: la entidad transportista (Empresa Puerto Moa, la propia empresa EMNi u otra empresa de transportación de carga).

El precio del sustrato (tierra) según la Empresa Agroforestal de Moa oscila entre 22,5, y 800 CUP/tonelada, según la entidad transportista que se emplee, la cual podrá ser sustituida en un 90 % por la arena de rechazo de la EMNi.

Basado en los resultados de esta investigación y considerando además el uso de las zeolitas de la zona de Caimanes, cercanas a Moa, cuyo costo estimado es de 500 MT, se realizó una valoración económica preliminar para un área de cultivo de 100 m², para la cual se emplearon los datos que se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 10: Principales datos empleados para la valoración económica.

Materiales	Cantidad de material (ton/mes)	Costo Unitario (MT/ton)	Costo Total (MT/ton)
Arena Sílice, (*)	5	1,50	50,5
Sustrato vegetal, (*)	0,05	5,0	0,25
Zeolita, (**)	0,05	5,0	0,25
Licor amoniacal, (*)	0,01	1,0	0,01
Materia orgánica, (**)	0,05	5,0	0,25
Total	5,16	17,5	51,26

(*) Valores estimados, suministrados por las empresas del Níquel y la Agricultura en Moa.

(**) Valores estimados, según criterios de las empresas productoras.

A partir de estos cálculos preliminares y los resultados prácticos de esta investigación es posible la conformación de agromenas para la producción de alimentos en Moa, empleando residuales industriales y con un bajo costo de materiales y de implementación.



3.5 Conclusiones del Capítulo III

1. Las arenas de rechazo del Taller de Fundición de la EMNi son clasificadas como muy finas, ya que el 100 % de ellas es menor de 1,0 mm. Por esta razón son mezcladas con arena nueva o son rechazadas completamente, yendo a parar al vertedero municipal alrededor de 5 toneladas mensualmente, lo cual afecta al medio ambiente de la región.
2. Más del 90 % de las arenas de rechazo del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel pueden ser empleadas para la conformación de agromenas y la producción de alimentos en Moa, con bajos costos financieros.
3. Se demostró la posibilidad de obtener productos alimenticios a partir del uso de residuales de la industria del Níquel en Moa, resultado que contribuye a la reducción de la contaminación ambiental y al desarrollo integral del municipio.



CONCLUSIONES GENERALES

1. Más del 90 % de las arenas residuales del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa pueden ser utilizadas para la conformación de agromenas, con resultados satisfactorios en la germinación y desarrollo de frijoles y verduras, lo que demuestra la posibilidad de producir alimentos en Moa sin un elevado costo financiero.
2. Es posible la conformación exitosa de agromenas a partir de residuales industriales, generados por las industrias del Níquel (arenas rechazadas, licor amoniacal residual) y la propia agricultura en Moa (materia orgánica), con bajos costos de materiales y de implementación.
3. Los materiales empleados para la conformación de las agromenas no afectan la calidad de las semillas utilizadas y constituyen una alternativa para la reducción de la contaminación ambiental en el municipio.
4. Las principales proporciones de los materiales empleados están compuestos por arenas de rechazo (90 %), zeolitas activadas (5 %) y materia orgánica del propio territorio, lo que constituye un aporte de esta investigación a la reducción del medio ambiente y al desarrollo sostenible del municipio.
5. Los resultados de esta investigación incrementan el conocimiento sobre los Pasivos Ambientales generados por las industrias del Níquel en Cuba y brindan la posibilidad de tomar decisiones sobre sus posibles usos en la producción de alimentos y el mejoramiento de la agricultura urbana en Moa.



RECOMENDACIONES

1. Presentar los resultados de esta investigación a la dirección de la agricultura y al grupo empresarial Cubaníquel, para su conocimiento e implementación en Moa y el desarrollo de pruebas de mayor escalado.
2. Generalizar los resultados de esta investigación a través de la coordinación del grupo Cubaníquel y la delegación de la agricultura en Moa.
3. Evaluar el uso de las zeolitas de la zona de Caimanes en Farallones en la conformación de agromenas, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo con las zeolitas de San Andrés en Holguín.
4. Extender el uso de las agromenas obtenidas a otros tipos de cultivos, siempre bajo la supervisión y asesoría de la dirección de la agricultura en Moa.
5. Evaluar el uso de otras materias orgánicas que se generan en el municipio para la conformación de agromenas.
6. Calcular la factibilidad económica de la conformación de agromenas a escala industrial en Moa.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AENOR-Auxiliar Industrial, S. (12 de Septiembre de 2002). Arenas para la fundición. *Información Técnica*, 1-5.
- Centro de Investigaciones para la industria Minero-Metalúrgica. (2013). Zeolitas, una alternativa para la producción sostenible de alimentos. Habana, La Habana, Cuba.
- Coello Porras, G. (1983). *Ensayos de arenas y arcillas para la fundición; Tesis Ingenieril*. Guayaquil-Ecuador.
- de Campos Bernardi, A., Peronti Anchão Oliviera, P., De Melo Monte, P., & al, e. (2010). *Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture*. Rio de Janeiro: 19 th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World.
- Departamento de Economía. (2019). *Costo de los materiales de Fundición*. Moa: Empresa Mecanica del Níquel.
- Diseño de Mezclas. (2008). *Diseño de mezclas Mc.Lean-Anderson*. Whashington: McGill Hill.
- Domínguez Palacio, M. D., Soca Núñez, D. M., & Velázquez, D. M. (2018). *Incremento en la eficiencia de uso del fertilizante mineral nitrogenado empleando nitrato de amonio y zeolita natural cubana*. Forum MINEMETAL2018, Ministerio de la Agricultura, Instituto de Suelos (IS).
- Empresa Agropecuaria Organopónico "El Nin". (s.f.). *Ficha de Producción*. Moa.
- Empresa Mecánica de Níquel . (2006). *Manual de Operaciones "Taller de Fundición"*. Moa, Holguín, Cuba: EMNi.
- Esteban Miguel, R. (2014). *Estrategias de gestión para arenas descartadas de fundición en función de sus características químicas y ambientales; Tesis Doctoral*. Universidad Nacional de la Plata, Química, Buenos Aires.
- Miguel, R., Banda Noriega, R. B., Barreda, M. F., Monzón, J. D., & Sota, J. (2006). *Hormigones de cemento portland con arenas de fundición. Base para la gestión sustentable*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires;

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata. Holguín:
Universidad de Holguín.

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/>

Pansini, M. (1996). Natural zeolites as cation exchangers for enviromental protection, . 31(2).

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.

Sáenz Valdez, A. A. (2010). *Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industrial automotriz; Tesis de Maestria*. Universidad Autonoma de Nuevo león, Mecánica y electrica, Mexico.

Salcines Merino, C. M. (1985). *Tenologia de Fundición* (Vol. I). Habana, La Habana, Cuba: Pueblo y Educación.

Sertucha, J., & Suárez, R. (2006). *Materiales inorgánicos aplicados en la fabricación de piezas de fundición*. Habana: Pueblo y Educacion.

ANEXOS

Anexo 1. Taller de fundición de la EMNi.



Anexo 2. Moldeo en verde.



Anexo 3. Moldeo químico usando catalizador y resinas.



Anexo 4. Ensayos de la mezcla de moldeo químico (autofraguante) con la arena nueva.



EMPRESA MECÁNICA DEL NÍQUEL
"Comandante Gustavo Machín Hdez de Beche"

R-025/L-P-016

"RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS A LAS MEZCLAS DE MOLDEO AUTOFRAGUANTE".

Fecha	Turno	Técnico	Código	No de muestras	Resistencia a la tracción			Permeabilidad U	Vida de banco, min.
					1 hora	3 horas	24 horas		
18/1/19	530 600 pm	Ela (0013)	0013	1	11.2	13.7	15.1	190	Aleman
				2	11.2	13.7	15.1		
				3	11.2	13.7	15.1		
				Σ	11.2	13.7	15.1		
19/1/19	530 600 pm	Ela	0014	1	10.8	14.6	16.0	192	Aleman
				2	10.8	14.6	16.0		
				3	10.8	14.6	16.0		
				Σ	10.8	14.6	16.0		
21/1/19	530 600 pm	Ela	0015	1	11.1	13.0	14.4	190	Aleman
				2	11.1	13.0	14.4		
				3	11.1	13.0	14.4		
				Σ	11.1	13.0	14.4		
				1					
				2					
				3					
				Σ					
				1					
				2					
				3					
				Σ					
				1					
				2					
				3					
				Σ					

Página 5 de 40

Revisión: 3.0
Revisión: 5.0

Dirección Técnica
Dirección Técnica

Fuente: Datos extraídos del registro oficial de control de mezclas de moldeo autofraguante de la EMNi referentes al mes de Enero de 2019.

Anexo 5. Ensayos de la mezcla de moldeo en verde con la arena nueva.

CONTROL DE MEZCLAS DE MOLDEO

Fecha	Técnico	Tipo de mezcla	Código de la mezcla	Humedad				Resistencia				Permeabilidad				Observaciones
				H ₁	H ₂	H ₃	H Total	R ₁	R ₂	R ₃	R Total	P ₁	P ₂	P ₃	P Total	
19/1/19	Edu	MU-2	0001	4.71	4.71	4.71	4.71	36.7	36.7	36.7	36.7	0.74	0.76	0.76	0.76	OK
19/1/19	Edu	MU-2	0002	4.48	4.48	4.48	4.48	35.8	35.8	35.8	35.8	0.72	0.72	0.72	0.72	OK
19/1/19	Edu	MU-2	0003	4.52	4.52	4.52	4.52	31.9	31.9	31.9	31.9	0.70	0.70	0.70	0.70	OK
21/1/19	Edu	MU-2	0004	5.32	5.32	5.32	5.35	34.9	34.9	34.9	34.9	0.70	0.70	0.70	0.70	HP
21/1/19	Edu	MU-2	0005	5.30	5.30	5.30	5.30	35.0	35.0	35.0	35.0	0.71	0.71	0.71	0.71	HP
21/1/19	Edu	MU-2	0006	5.68	5.68	5.68	5.68	36.1	36.1	36.1	36.1	0.70	0.70	0.70	0.70	HP
21/1/19	Edu	MU-2	0007	5.50	5.50	5.50	5.50	33.7	33.7	33.7	33.7	0.73	0.73	0.73	0.73	HP
21/1/19	Edu	MU-2	0008	5.55	5.55	5.55	5.55	34.0	34.0	34.0	34.0	0.70	0.70	0.70	0.70	HP
21/1/19	Edu	MU-2	0009	5.69	5.69	5.69	5.69	34.8	34.8	34.8	34.8	0.75	0.75	0.75	0.75	HP
22/1/19	Mayde	MU-2	0010	6.5	6.5	6.5	6.5	38.5	38.5	38.5	38.5	0.85	0.85	0.85	0.85	HP
22/1/19	Mayde	MU-2	0011	6.45	6.45	6.45	6.45	40.0	40.0	40.0	40.0	0.70	0.70	0.70	0.70	HP
22/1/19	Mayde	MU-2	0012	6.70	6.70	6.70	6.70	42.5	42.5	42.5	42.5	0.75	0.75	0.75	0.75	HP
22/1/19	Mayde	MU-2	0013	6.4	6.4	6.4	6.4	35.0	35.0	35.0	35.0	0.72	0.72	0.72	0.72	HP

CONTROL DE MEZCLAS DE MOLDEO

Fecha	Técnico	Tipo de mezcla	Código de la mezcla	Humedad				Resistencia				Permeabilidad				Observaciones
				H ₁	H ₂	H ₃	H Total	R ₁	R ₂	R ₃	R Total	P ₁	P ₂	P ₃	P Total	
23/1/19	Mayde	MU-2	0014	6.45	6.45	6.45	6.45	38.0	38.0	38.0	38.0	062	062	062	062	HA
23/1/19	Mayde	MU-2	0015	6.50	6.50	6.50	6.50	40.0	40.0	40.0	40.0	070	070	070	070	HA
23/1/19	Mayde	MU-2	0016	3.65	3.65	3.65	3.65	36.0	36.0	36.0	36.0	072	072	072	072	OK
23/1/19	Mayde	MU-2	0017	4.0	4.0	4.0	4.0	38.5	38.5	38.5	38.5	075	075	075	075	O/C
24/1/19	Mayde	MU-2	0018	5.45	5.45	5.45	5.45	28.5	28.5	28.5	28.5	078	078	078	078	HA
24/1/19	Mayde	MU-2	0019	5.40	5.40	5.40	5.40	30.0	30.0	30.0	30.0	074	074	074	074	HA
24/1/19	Mayde	MU-2	0020	5.35	5.35	5.35	5.35	34.0	34.0	34.0	34.0	080	080	080	080	HA
24/1/19	Mayde	MU-2	0021	5.40	5.40	5.40	5.40	36.0	36.0	36.0	36.0	078	078	078	078	HA
25/1/19	Mayde	MU-2	0022	5.3	5.3	5.3	5.3	38.0	38.0	38.0	38.0	076	076	076	076	HA
25/1/19	Mayde	MU-2	0023	5.45	5.45	5.45	5.45	36.0	36.0	36.0	36.0	078	078	078	078	HA
25/1/19	Mayde	MU-2	0024	5.0	5.0	5.0	5.0	34.5	34.5	34.5	34.5	074	074	074	074	HA
25/1/19	Mayde	MU-2	0025	5.25	5.25	5.25	5.25	38.0	38.0	38.0	38.0	075	075	075	075	HA
25/1/19	Mayde	MU-2	0026	5.0	5.0	5.0	5.0	34.0	34.0	34.0	34.0	078	078	078	078	HA

Pág. 9 de 20

Revisión: 3.0

Laboratorio de Ensayos

Carretera Moa-Sagua km 1½ Moa- Holguin- Cuba 83300 Tel: (53) 2460-6691; 60-6011 Ext. 459 Fax: (53) 2460-2241

Continúa en la página anterior... Fuente: Datos extraídos del registro oficial de control de mezclas de moldeo de la EMNi referente al mes de enero de 2019.

Anexo 6. Aval de la Empresa Agroforestal de Moa

Ministerio de la Agricultura

Empresa Agroforestal de Moa

Los Especialistas de la Granja Urbana, una vez revisada la propuesta de investigación del diplomante **Joaquim José Canjila Dala** candidato al grado científico de Ingeniero en Metalurgia y Materiales, aprobamos y vemos como interesante el estudio realizado por el mismo, evaluando que no presenta ningún tipo de perjuicio para la agricultura con la aplicación del **Desarrollo de agromenas a partir de las arenas residuales del taller de fundición de la EMNi en Moa**, ya que los productos utilizados están a una muy baja proporción, por lo que consideramos apta esta investigación.

Evaluated por: Ing. Irelvis Góngora Bients.

Firma:

