Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia
Especialidad: Metalurgia y Materiales

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

Evaluación de la arena sílice de Casilda, Trinidad, como material refractario monolítico para un horno de inducción

Roibert Juan Cardoso Acosta

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia
Especialidad: Metalurgia y Materiales

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

Título: Evaluación de la arena sílice de Casilda, Trinidad, como material refractario monolítico para un horno de inducción.

Autor: Roibert Juan Cardoso Acosta

Tutores: M.Sc. José Luis González Santana

Ing. Yumaiby Galindo Medina

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución

Pensamiento

"Ser culto es el único modo de ser libre"

José Martí

Dedicatoria

Madre querida;

Discúlpame si por estos días,

he sido poco sincero contigo,

pero verte llorar me da melancolía,

cuando cambiarias tu vida por darme abrigo.

Madre solo tú, lo demás es filosofía,

eres el límite de mis pecados,

mi orgullo, la musa de mis poesías,

el motivo que me ha inspirado,

a seguir dando pasos en esta vida

dejando plasmadas tus huellas,

porque madres como tu son merecidas,

a poner en el cielo estrellas.

Ayer cumplí dos semanas,

hoy estoy aquí,

aquí, pisando el mañana

que luchaste para mí.

Tu hijo

Agradecimientos

Les agradezco a de todo corazón a mis tutores JOSÉ LUIS GONZÁLEZ SANTANA y YUMAIBY GALINDO MEDINA, a todos los profesores, familiares y amigos que de una forma u otra han contribuido con mi formación profesional, a los trabajadores de la Planta Mecánica de Camagüey, en especial a FRANMACIO, RICARDO, CAMILO y REINIER, y un agradecimiento muy especial para MI PATRIA.

FAMILIARES: MARIELA, ROBERT, JUAN, AMÉRICA, MILADY, RISELDA, WALFRIDO, JIUVER, JUAN ANTONIO, YOANIA, YENISEL, DANNY, RAYNER, ALIANDY, FRANSISCO, RENAY, Y A MI TATA, ETC.

PROFESORES: TERESA, LEONEL, AROLDIS, NADIELZA, PALACIOS, ORLEIDY, YUNIOR, EVA, SALDER, ROGER, BIATRIZ, OTERO, MARIA, YOSBEL, BEYRIS, FOLCONERYS, LORELIS, COELLO, YURISLEY, LIZANDRA, ETC.

AMIGOS: JAVIER, FELIPE, YURI, ANYELL, LAZARO, HECTOR, CARLOS, LUIS ANGEL, RULO, ADRIEL, ERNESTO, MARTIN, NIUBEL, ARNEL, CANELO, ROLY, CHILLÓN, FIDE, ALEIXIS, PABLI, SERGO, JULIO, TANIA, ROSSANNA, YENISEL, DAILIN, DAY, NETO, NICOLAU, WALTER, ADRIANA, MARLIS, LEIDYS, LIANET, ETC.

Declaración de Autoridad

Yo, Roibert Juan Cardoso Acosta, autor del presente Trabajo de Diploma, por medio de este escrito certifico su propiedad intelectual en favor de la Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" y la Planta Mecánica de Camagüey "Ignacio Agramonte" para el uso que las mismas estimen conveniente.

Roibert Juan Cardoso Acosta

Autor

Ing. Yumaiby Galindo Medina

Tutor

M.Sc. José Luis González Santana

Tutor

RESUMEN

El objetivo fundamental de esta investigación fue evaluar la arena sílice de Casilda, Trinidad para conformar una masa monolítica refractaria para el revestimiento de un horno de inducción, de amplia utilización en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte. A la arena sílice se le realizó una separación de clases por tamizado con el objetivo de obtener tres muestras con diferentes granulometría gruesa, media y fina. Se prepararon tres mezclas variando los porcientos de granulometría de la arena sílice para conformar probetas de ensayo. Se sinterizaron a 1100 °C en un horno de calcinación las probetas de ensayo para aumentar su resistencia mecánica. Se calculó la porosidad de las probetas de ensayo para conocer la relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total de la mezcla influyendo la misma en las propiedades de resistencia mecánica. Se le realizaron pruebas de resistencia a la compresión a las probetas de ensayo para saber con mayor exactitud cuál mezcla es la más conveniente usar como material refractario monolítico en el horno de inducción. Se analizaron los resultados de esta investigación en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte y se elaboró un material refractario nacional a partir de la mezcla que presentó mejores propiedades físico-mecánicas, contribuyendo con la política económica del país de sustitución de importaciones.

Palabras clave: material refractario, arena sílice, probetas de ensayo.

SUMMARY

The fundamental objective of this investigation was to evaluate the silica sand of Casilda, Trinidad to form a refractory monolithic mass for the coating of an induction furnace, widely used in the Mechanical Plant of Camagüey Ignacio Agramonte. The silica sand was subjected to a separation of classes by sieving in order to obtain three samples with different coarse, medium and fine granulometry. Three mixtures were prepared by varying the granulometry percents of the silica sand to form test specimens. The test specimens were sintered at 1100 ° C in a calcination furnace to increase their mechanical strength. The porosity of the test specimens was calculated to know the relation between the volume of empty spaces and the total volume of the mixture, influencing the same in the properties of mechanical resistance. Tests of compressive strength were made to the test specimens to know more exactly which mixture is the most convenient to use as a monolithic refractory material in the induction furnace. The results of this investigation were analyzed in the Camagüey Ignacio Agramonte Mechanical Plant and a national refractory material was elaborated from the mixture that presented the best physical-mechanical properties, contributing with the economic policy of the country of import substitution.

Keywords: refractory material, silica sand, test specimens.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL 5

1.1 Generalidades del proceso de fundición a la cera perdida 5

1.2 Horno de inducción magnética, descripción del equipo 6

1.2.1 Principales medidas de seguridad durante el trabajo del horno de inducción..... 8

1.2.2 Ventajas y desventajas del horno de inducción 8

1.2.3 Acciones de mantenimiento por parte del operario del horno de inducción..... 9

1.3 Clasificación y propiedades de los materiales refractarios..... 9

1.3.1 Definición de material refractario 9

1.3.2 Clasificación de los materiales refractarios..... 10

1.3.3 Propiedades de los materiales refractarios..... 10

1.4 Refractarios de uso frecuente en hornos de inducción para la fusión de metales y aleaciones..... 12

1.5 Condiciones que deben de resistir los materiales refractarios 13

1.6 Fallas de los materiales refractarios..... 13

1.7 Reparaciones del material refractario 14

1.8 Instalación del revestimiento del horno de inducción 15

1.9 Sinterización y formación de zonas de los materiales refractarios monolíticos..... 15

1.9.1 Formación de zonas en el material refractario..... 16

1.10 Trabajos precedentes 18

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS 21

2.1 Principales métodos de análisis en las arenas de sílice 21

2.2 Caracterización de la arena sílice de Casilda, Trinidad 22

2.3 Selección y preparación de la muestra 23

2.4 Clasificación de las clases de la arena sílice por tamizado..... 25

2.4.1 Equipos utilizados para realizar la clasificación de clases de la arena sílice..... 27

2.5 Aglutinante y aditivo utilizados para complementar la masa monolítica refractaria..... 27

2.6 Análisis de la resistencia al choque térmico de las probetas de ensayo. 29

2.7 Cálculo de la porosidad de las probetas 29

2.8 Resistencia de la compresión en frio de las probetas 30

2.8.1 Técnica operatoria del ensayo resistencia de la compresión en frio. 31
2.8.2 Equipos utilizados para realizar el ensayo de compresión en frio 31
2.8.3 Cálculo del ensayo del ensayo de compresión en frio 32
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... 34
3.1 Resultados de la clasificación de clases de la arena sílice por tamizado 34
3.2 Análisis del proceso de sinterización de las probetas 35
3.3 Resultado de la resistencia al choque térmico de las probetas de ensayo 36
3.4 Resultados del cálculo de la porosidad de las probetas. 37
3.5 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión en frio..... 39
3.5.1 Cálculo de los resultados de la compresión en frio 40
3.6 Valoración preliminar del impacto económico 41
CONCLUSIONES 43
RECOMENDACIONES 44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45

INTRODUCCIÓN

Los materiales refractarios constituyen un conjunto de productos intermedios indispensables para un país, ya que sin ellos se detendría toda la actividad industrial en la que se dan condiciones de operaciones donde se requiere la utilización de altas temperaturas, procesos como la cocción, la fusión, afinado de cualquier tipo de material, la calcinación, etc. Estos procesos se desarrollan con equipos metalúrgicos que en la mayoría de los casos son hornos, los cuales para su correcto funcionamiento requieren la utilización de un material refractario. El revestimiento refractario hace que las pérdidas de calor a través de las paredes de los hornos sean menores, lo que contribuye de ese modo al ahorro energético, debido a un menor consumo de calor. La industria de los materiales refractarios ha experimentado una extraordinaria evolución en los últimos años, como consecuencia de las nuevas y cada vez más exigentes especificaciones impuestas por las industrias consumidoras. Los óxidos potencialmente utilizados actualmente como refractarios por su elevado punto de fusión son; (Al_2O_3, CaO, SiO_2, MgO, ZrO_2, etc.).

Historia

La historia primitiva de los materiales refractarios está relacionada con la historia de la alfarería (cerámica), sin embargo, la historia de los refractarios durante el siglo pasado está íntimamente ligada con el crecimiento de las industrias metalúrgicas, puesto que su avance necesitaba de los refractarios adecuados para la construcción de los hornos. Inicialmente, la producción de materiales refractarios se limitó a unos pocos tipos de ladrillos de todo propósito, siendo sus principales consumidores las industrias cerámicas, del hierro, de los metales no ferrosos y del vidrio. A finales del siglo XIX el aumento de la aplicación de los metales no ferrosos, específicamente el cobre, y la llegada de la industria masiva del acero provocaron grandes cambios en la industria refractaria, el aumento de la demanda de producción dio lugar al aumento del tamaño de los hornos con el consiguiente aumento de las tensiones y esfuerzos sobre los materiales refractarios de su revestimiento, acentuado por los grandes tonelajes procesados y por las mayores temperaturas de operación. Para hacer frente a las condiciones anteriores fue necesario desarrollar nuevos materiales refractarios especiales, lo cual fue posible gracias a una estrecha colaboración

entre los fabricantes de refractarios y los consumidores. El modo más eficaz de seguir la historia de los materiales refractarios ha sido estudiar los antiguos hornos, fundiciones y plantas metalúrgicas, pues en ellos se han encontrado muestras de los antiguos refractarios utilizados. Sin duda los refractarios más antiguos que utilizaron los primitivos fundidores fueron piedras naturales (granitos, areniscas, cuarcitas, esquistos de mica, piedra pómez, etc.), las cuales eran cortadas en bloques de las dimensiones apropiadas. Con dichos bloques, con un acabado un tanto grosero, se construía el revestimiento del horno. Robert Hewes, de la Temple Glass Company, Temple, New Hampshire (E.E.U.U.), dice en una carta fechada en 1781 ‘‘Tendré que enviar a buscar piedra para mi horno de fusión a 60 millas de distancia, lo que me obliga a mandar 8 yuntas”.

Hasta mediados del siglo XVIII las piedras naturales fueron los materiales refractarios más utilizados en los revestimientos de los hornos. Hacia esas fechas aparecieron en el mercado los ladrillos de arcilla cocida (ladrillos sílice-aluminosos de bajo contenido en alúmina), que debido a su amplia adaptabilidad los hornos rápidamente experimentaron un gran desarrollo.

Hay que señalar que las piedras naturales siguieron utilizándose para la construcción de hornos hasta finales del siglo XIX debido al mayor coste de estos primeros ladrillos sílice-aluminosos y a su pobre resistencia a las temperaturas altas.

Como los ladrillos sílice-aluminosos ordinarios no soportaban las condiciones más extremas surgió la necesidad de buscar nuevos materiales refractarios, así la atención se centró en el carácter refractario del caolín y otros materiales arcillosos con un contenido en Al_2O_3 del 50 % o más. Estos materiales poseen alta refractariedad y buena resistencia al choque térmico y fueron usados, en primer lugar, en la zona caliente de los hornos rotatorios de cemento y posteriormente su uso se extendió a la industria siderúrgica.

Estado actual

La industria de los materiales refractarios ha experimentado una extraordinaria evolución en los últimos 20 años, como consecuencia de las nuevas y cada vez más exigentes especificaciones impuestas por la industria consumidora. Esto se ha traducido, no solo en un más estricto control de las materias primas y en una mejora en los procesos de fabricación, sino también en el aporte científico de

técnicas que, utilizadas tanto en la metalografía como en la físico-química de materiales. La industria de la fundición es la segunda mayor consumidora de refractarios y requiere una gran variedad de productos refractarios. Es cierto que los materiales refractarios monolíticos tienen poco tiempo de vida útil, y demandan más tiempo de instalación en relación a los crisoles prefabricados para hornos de inducción pero actualmente siguen siendo bastante utilizados por su bajo costo.

Situación problémica: el material refractario monolítico del horno de inducción de la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte es importado por lo que sería más económico producir un material refractario monolítico nacional a partir de la arena sílice de Casilda, Trinidad.

Problema: insuficiente conocimiento de las propiedades físicas-mecánicas de la arena de Casilda, Trinidad como material refractario en el horno de inducción.

Objeto de estudio: arena sílice de Casilda, Trinidad.

Campo de acción: comportamiento de las propiedades físicas-mecánicas de la arena sílice de Casilda, Trinidad.

Hipótesis: si se evalúan las propiedades físico-mecánicas de la arena sílice de Casilda, Trinidad se podrá usar como material refractario monolítico en el horno de inducción.

Objetivo general: evaluar las propiedades físico-mecánicas de la arena sílice de Casilda, Trinidad para su uso como material refractario en el horno de inducción.

Objetivos específicos

- Caracterizar la arena sílice de Casilda, Trinidad como material refractario en el horno de inducción.
- Realizar el ensayo de compresión en frío, resistencia al choque térmico y el cálculo de la porosidad total de las probetas de ensayo.
- Realizar una valoración preliminar del impacto económico para la implementación de la arena sílice de Casilda, Trinidad como material refractario en un horno de inducción.

Diseño metodológico:

- Histórico-lógico: en el análisis histórico del desarrollo relacionado con las teorías de revestimiento monolítico, actualmente usadas en hornos de inducción.
- Sistémico-estructural: para determinar la teoría básica de los procesos de revestimiento monolítico que resulta de interés para obtener un material refractario.
- Inductivo-deductivo: para la determinación de las limitaciones de las investigaciones consultadas, al ser aplicadas al material refractario.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Este capítulo tiene como objetivo fundamental realizar una búsqueda bibliográfica que permita establecer el estado del arte en relación con el material refractario, y teorías relacionadas con el proceso de fundición a la cera perdida que se lleva a cabo en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte. En esta se funde el metal en un horno de inducción magnética, el cual requiere de un material refractario monolítico para su funcionamiento. Las masas monolíticas refractarias para hornos de inducción no han sido desarrolladas hasta la fecha por la industria nacional, aun existiendo materias primas para su elaboración, como es el caso de la arena sílice en Casilda, Trinidad. Si se conforma un material refractario con una vida útil aceptable se estarían aportando ahorros a la economía de nuestro país. La política económica cubana se ha enfocado en buscar soluciones para disminuir las importaciones, como consecuencia del bloqueo económico impuesto por los Estados Unidos desde el año 1962, el cual limita realizar negociaciones con otros países, ya que corren el riesgo de ser sancionados por un período de tiempo determinado, el cual obliga realizar las comprar por terceros países a un precio significativamente más alto. El precio de la arena sílice de Casilda, Trinidad es de 0,030 CUC/kg y el costo del material refractario importado desde Italia es de 9 euros/kg, sin incluir otros gastos como transportación, combustible, alquiler del barco entre otros. El material refractario importado tiene una vida útil de aproximadamente 32 coladas, es decir que no es rentable para la empresa. Por lo cual es de suma importancia fabricar un material refractario monolítico nacional que reúna las condiciones para ser explotado en el horno de inducción, para ello fue necesario analizar los requisitos que plantean las normas de refractarios para que el material tenga calidad y eficiencia en el horno de inducción.

1.1 Generalidades del proceso de fundición a la cera perdida

La fundición a la cera perdida es un proceso de fabricación de piezas metálicas que consiste en fundir un material e introducirlo en un molde cerámico. Esta técnica de fundición a la cera perdida, o también llamado microfusión consiste en revestir un molde de cera, con varias capas constituidas por una mezcla de elementos cerámicos refractarios y un aglomerante, aplicado de manera alterna con material de relleno de diferente granulometría (aumenta el tamaño de grano

a medida que se incrementan el número de capas aplicadas para garantizar la permeabilidad del molde) hasta lograr un molde de espesor adecuado. El aglomerante reacciona químicamente durante el secado para formar una red de gel, que sostiene el material cerámico. Posteriormente, el modelo es removido y la cerámica calcinada para formar una estructura rígida donde se vierte el metal que se funde en el horno de inducción, conformando así una réplica exacta del modelo original, según TECAL (2010) este proceso de obtención de piezas se lleva a cabo en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte.

1.2 Horno de inducción magnética, descripción del equipo

El horno de inducción representa una excelente opción como unidad productiva para las fundiciones nacionales, es un horno versátil que permite preparar una amplia gama de aleaciones sin grandes dificultades para pasar de un material a otro. No se considera una unidad agresiva contra el ambiente, ya que trabaja con corrientes eléctricas inducidas, ajuste químico bastante exacto por lo que genera muy poca escoria, ajuste rápido y preciso de la temperatura durante las operaciones de refino y moldeo, lo que permite reducir los defectos de moldeo con aleaciones exactas (Cooper, 2003).

Se usan dos tipos de hornos de inducción para fundir toda clase de metales, hornos de frecuencia media y hornos de alta frecuencia. En la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte el horno de inducción que se utiliza es de frecuencia alta, estos hornos han reemplazado a los de frecuencia media en los últimos 15 años. Las razones para esto fueron el desarrollo de hornos de alta potencia con propiedades de fusión rápida y elevado rendimiento térmico y eléctrico. Pueden contener cargas que van desde 1 hasta 16 toneladas, con una potencia de hasta 1000 kW. El horno de inducción que se utiliza en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte (ver figura 1.1) tiene una capacidad de carga de 120 kg. Estos hornos presentan el triple de velocidad de fusión que los hornos de frecuencia media y producen grandes cantidades de metal fundido en muy corto tiempo. Con esta potencia de alimentación el horno debe ser controlado mediante programas computacionales, ya que se puede producir un sobrecalentamiento de 100°C en 1 a 2 minutos (TECAL, 2010).

Figura 1.1 Horno de inducción de la Planta Mecánica de Camagüey

La figura 1.1 muestra el horno de inducción que se utiliza en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte, marca **INDUCTHOTHERM,** el mismo se basa en el principio de un transformador monofásico, cuyo circuito primario es una bobina a la que se le suministra un voltaje alterno. Esta bobina genera un campo magnético, que a su vez induce una corriente en el circuito secundario que es formado por el material fundido o a fundirse (TECAL, 2010).

Especificaciones técnicas del horno de inducción:

- Fundición hasta una temperatura de 1650 º C.
- Potencias nominales de los generadores 75 y 175 kW.
- Frecuencia de 3000 Hz.
- Unidad hidráulica y panel eléctrico de arranque.

La figura 1.2 muestra las partes interiores del horno de inducción donde se puede apreciar que el aislamiento o revestimiento es el encargado de proteger las bobinas del horno del material fundido.

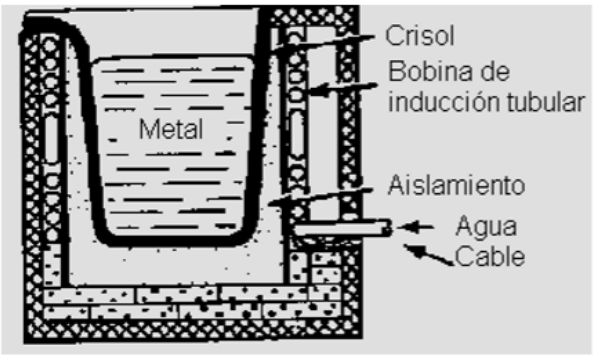


Figura 1.2 Horno de inducción con crisol (Gonzalo, 2006)

1.2.1 Principales medidas de seguridad durante el trabajo del horno de inducción

A continuación se mencionan algunas medidas de seguridad que deben conocer todos los trabajadores de la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte a la hora de operar con el horno de inducción (Inductotherm, Corp, 2011).

- ✓ No operar los hornos con personal no capacitado y no instruido en el manejo de los mismos.
- ✓ Durante la explotación de los hornos solo estar en el área de trabajo las personas que se encuentre operando los equipos.
- ✓ No cambiar los parámetros de trabajo introducido por el técnico del proceso.
- ✓ En caso de alarma desconocida interrumpir inmediatamente el proceso accionado el botón de emergencia ubicado debajo del panel.
- ✓ Los equipos de controles (manómetro, amperímetros etc.) deben estar apto para el uso y verificados.
- ✓ En el caso de una emergencia accionar el botón para este caso ubicado en la pizarra de control (Ver figura 1.3).

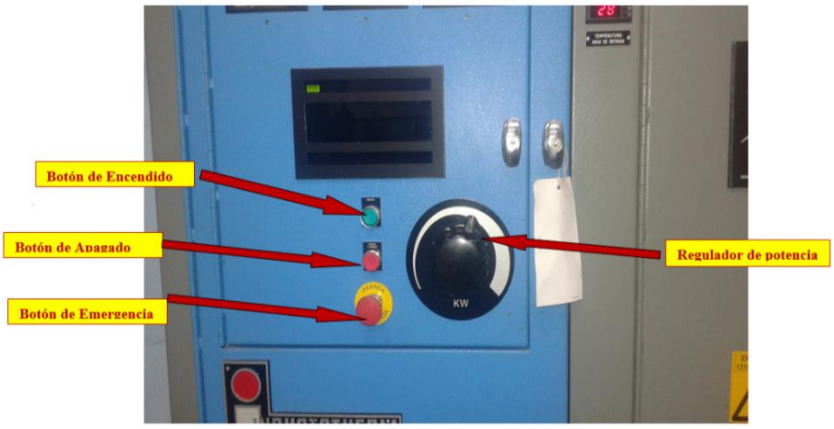


Figura 1.3 Pizarra de control del horno de inducción (INDUCTHOTHERM)

La figura 1.3 muestra la pizarra de control del horno de inducción INDUCTHOTHERM utilizado en la Planta Mecánica de Camagüey.

1.2.2 Ventajas y desventajas del horno de inducción

Según Valery (2003) los hornos de inducción magnética tienen varias ventajas respecto a otros hornos como por ejemplo:

- Ofrece los mejores resultados en condiciones duras de trabajo

- Niveles de ruido muy bajos
- Fácil de reparar y mantener si el metal penetra en la bobina
- Fácil desmontaje de la bobina con pieza superior de hormigón modular
- Mediante el dispositivo de “Extracción del revestimiento”, este puede retirarse fácilmente en 15 minutos
- Menor contaminación al medio ambiente
- Mejor control de la temperatura del metal fundido
- Facilidad de producción a menor escala
- Ahorros de consumo de combustible
- Facilidad de operación

Desventajas del horno de inducción

- Elevado gasto de instalación del horno de inducción.
- No son construidos en el país por lo que la garantía, equipamiento y guía técnica implican realizar ingeniería de detalle para su mantenimiento.
- Alto consumidor de energía eléctrica.

1.2.3 Acciones de mantenimiento por parte del operario del horno de inducción

Los trabajadores que operan con el horno de inducción tienen que conocer cuales sus deberes para contribuir con el mantenimiento del equipo (TECAL, 2010).

- Revisión periódica del nivel de agua de refrigeración del circuito interno.
- Verificar cada seis meses que el circuito de refrigeración de la bobina no esté embozado. En caso de que así sea, limpiarlo con desincrustante.
- Si se producen agujeros donde se pueda ver las bobinas, debemos taparlos con la misma mezcla de refractario de este.
- Chequear que no exista salidero de agua.
- Verificar las condiciones del material refractario antes y después de cada jornada de trabajo (TECAL, 2010).

1.3 Clasificación y propiedades de los materiales refractarios

1.3.1 Definición de material refractario

Según Materiales Refractarios (2017) pueden existir diversas maneras de definir lo que se entiende por un material refractario. Así, según la Real Academia de la

Lengua define que material refractario es aquel cuerpo que resiste la acción del fuego sin cambiar de estado ni descomponerse. Por tanto, se considera como material refractario a todo aquel compuesto o elemento que sea capaz de conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a elevadas temperaturas. Pero según materiales refractarios se denominan aquellos materiales que pueden conservar durante un largo período de tiempo su forma y resistencia mecánica a elevadas temperaturas. Los materiales refractarios son tan importante en la economía de un país, que sin ellos se detendría toda su actividad industrial de cabecera: con ellos se revisten los hornos en que se obtienen los metales a partir de sus menas, y en los que se transforma el metal en productos acabados o semi-acabados; con materiales refractario se construyen los hornos en los que se fabrica el vidrio, el cemento, el gas de ciudad, los materiales cerámicos de construcción y el coque siderúrgico (Materiales Refractarios, 2017).

1.3.2 Clasificación de los materiales refractarios

Según Materiales Refractarios (2017) debido a la gran diversidad de tipos de materiales refractarios que se han desarrollado para los más disímiles propósitos y a la gran cantidad de propiedades que son controladas, existen numerosas clasificaciones de los materiales refractarios que harían interminable este acápite. A continuación se hace referencia a las clasificaciones más importantes utilizadas aunque existen otras clasificaciones de acuerdo a distintas características, por lo que se pueden resumir de la siguiente forma:

_ Composición químico - Mineralógica
_ Refractariedad
_ Porosidad
_ Método de conformación
_ Tratamiento térmico
_ Formas de las piezas
_ Capacidad de reaccionar químicamente

1.3.3 Propiedades de los materiales refractarios

Para que un material refractario pueda ser utilizado como revestimiento monolítico de un horno de inducción debe cumplir con varias propiedades físico-químicas-mecánicas (Materiales Refractarios, 2017).

Refractariedad: es la propiedad de los materiales de resistir altas temperaturas durante largo tiempo sin deformarse. Se mide en °C la temperatura máxima que soporta el material antes de deformarse. La refractariedad de la sílice depende del grado de pureza.

Resistencia a los choques térmicos: es la capacidad de los materiales refractarios de soportar cambios bruscos de temperatura sin agrietarse, soltar lascas o romperse, se mide en ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Porosidad y densidad: es la parte del volumen de la pieza refractaria que es ocupada por los poros, en lugar del material refractario o la relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total de la mezcla.

Conductividad térmica: es un parámetro de suma importancia para el trabajo y la selección de los materiales refractarios, influye grandemente en la capacidad del material de resistir a los cambios bruscos de temperatura y en su capacidad para servir como aislante. La conductividad térmica de los materiales refractarios depende de varios factores, entre ellos la composición química y mineralógica, la porosidad y la temperatura.

Conductividad eléctrica: los materiales refractarios son electro-aislantes a bajas temperaturas, sin embargo cuando se calientan hasta la temperatura en que es posible la formación de fases líquidas se convierten en conductores, la excepción son los refractarios con contenido de carbono, que son conductores en cualquier circunstancia. La conductividad eléctrica es una propiedad que ha adquirido importancia con el desarrollo de los hornos de arco eléctrico, donde la misma es de suma importancia para el trabajo estable de los mismos.

Permeabilidad: es la propiedad que tiene un cuerpo sólido poroso de permitir el paso de un gas en presencia de un gradiente de presión.

Propiedades mecánicas: las principales propiedades que se controlan en los refractarios son la resistencia a la compresión, la resistencia a la abrasión y la resistencia a la flexión, cuyos ensayos se realizan a temperatura ambiente ("en frío"). La resistencia a la compresión de una pieza refractaria depende de la porosidad y la temperatura de sinterización. Los refractarios en los hornos no solo se someten a cargas de compresión, sino también al desgaste abrasivo

producido en algunos casos por el roce de la carga del horno y en otros casos por la acción de los gases que arrastran partículas de sólidos.

Resistencia a la acción de las escorias y gases: durante el proceso de trabajo los materiales refractarios entran en contacto con las escorias, gases, polvos, metal y otros elementos, los cuales entran en reacción química y atacan al refractario desgastándolo y finalmente destruyéndolo. La resistencia a la acción de las escorias depende de las composiciones químicas del refractario y la escoria, de la porosidad total del refractario, de la temperatura y la viscosidad de la escoria (Materiales Refractarios, 2017).

1.4 Refractarios de uso frecuente en hornos de inducción para la fusión de metales y aleaciones

Muchos son los tipos de materiales refractarios utilizados en hornos metalúrgicos como se muestra en la tabla 1.1. La arena sílice es un material refractario ácido el cual sería adecuado utilizar en el horno ya que no se produciría una reacción ácido-base con el material fundido. En aplicaciones específicas, el revestimiento debe ser estable respecto al metal y cualquier escoria que se genere en la fusión.

Tabla 1.1 Refractarios de uso frecuente para metales y aleaciones

Metal / Aleación	Revestimiento típico
Hierro	Ácido, masa seca
Bronce	Ácido, masa seca, neutro, alta alúmina masa semiplástica 80% Al_2O_3
Níquel	Ácido, masa seca, neutro, alta alúmina masa semiplástica 80 % Al_2O_3
Aluminio	Neutras, mezclas silicio-aluminosas de 40 a 50 % de Al_2O_3
Acero	Neutras, alta alúmina masa semiplástica 80 % Al_2O_3

Según los datos mostrados en esta tabla 1.1 se puede apreciar que la masa semiplástica refractaria de alta alúmina tiene grandes aplicaciones en la industria al igual que los refractarios ácidos y neutros. Aunque la tabla no refleje la arena sílice como un material típico usado es de gran demanda en el mercado por su bajo costo, tener buenas propiedades, entre ellas alto punto de fusión, ser un material ácido, que como indica la tabla son muy típicos para fundiciones de

hierro y bronce, fundiciones que se realizan en la Planta Mecánica Camagüey Ignacio Agramonte y también poseen una vida útil aceptable.

1.5 Condiciones que deben de resistir los materiales refractarios

El material refractario está expuesto a condiciones de trabajo fuertes ya que son utilizados para proteger el cuerpo del horno sin descomponerse manteniéndose su resistencia a altas temperaturas, deben resistir ciertas condiciones las cuales se reflejan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Condiciones que deben de resistir los materiales refractarios

Técnicas	Mecánicas	Químicas
Temperaturas elevadas	Compresión, flexión y tracción	Escorias
Cambios bruscos de temperatura (Choque térmico)	Vibración	Productos fundidos
-	Presión	Gases y vapores

Según las condiciones que muestra la tabla 1.2 la arena sílice deberá de cumplir varios requisitos para ser utilizada como material refractario en el horno de inducción.

La finalidad del material refractario en el horno de inducción es:

- ✓ Contener la colada
- ✓ Proteger la bobina de inducción en su interior
- ✓ Cortar la penetración del material fundido
- ✓ Soportar la temperatura máxima de operación
- ✓ Resistir choques térmicos

1.6 Fallas de los materiales refractarios

En el interior del horno de inducción el material refractario está expuesto a un desgaste como resultado del desprendimiento dado por el metal sobre las superficies de las paredes del crisol, esto se debe a la acción de la agitación inductiva causado por el campo de inducción electro-magnético del horno. En teoría, el desgaste del refractario debería ser uniforme en todas las partes del

crisol, en la práctica ocurre el desgaste en tres lugares bien definidos (Gonzalo, 2006).

- En la interfase del metal y la escoria
- En la unión del piso con las paredes a su alrededor
- En las áreas más pobres del revestimiento generadas en su instalación

Otras de las señales de alarma que nos indica que el revestimiento debe ser remplazado es el aumento de kilogramos de metal fundido, ya que si aumenta la colada quiere decir que aumentó su superficie por lo que el refractario debió de disminuir su espesor. Aunque debe de tomarse en cuenta la cantidad de escoria adherida por las paredes del horno. También obtener la máxima potencia con el voltaje más bajo de lo normal es indicio que el revestimiento esta delgado. En el choque térmico también puede dañar el revestimiento lo cual se hace notar por medio de grietas y el mismo desprendimiento del refractario que llega a perforar a la bobina. La escoria es un producto que se genera de dos formas, la fusión de la sílice y por el aporte de productos de oxidación de los metales en fusión y se encuentran en la superficie de la colada las cuales incrementan las fallas en el refractario (Gonzalo, 2006).

1.7 Reparaciones del material refractario

En la instalación del material refractario es esencial que todas las partes del horno estén limpias, ya que algunos materiales extraños pueden causar serios problemas durante la instalación y operación del horno. En la práctica se requiere utilizar una bandeja de acero para mezclar el material refractario necesario para la instalación. Para controlar el desgaste del revestimiento se debe controlar la temperatura del mismo, la temperatura de la bobina no debe pasar los 45 ºC, ya que a los 60 ºC se forman incrustaciones que tienden a obstaculizar el flujo refrigerante. En la instalación del material refractario es esencial que todas las partes del horno estén limpias ya que algunos materiales extraños pueden causar serios problemas durante la instalación y subsecuentemente en la operación del horno. Se debe poseer una bandeja de acero para mezclar el material refractario necesario para la instalación. Todas las herramientas, bandeja de mezclar y pala deben ser limpiadas antes de su uso para evitar la contaminación del material refractario (Salazar, 1989).

1.8 Instalación del revestimiento del horno de inducción

La correcta instalación del material refractario monolítico es de suma importancia para la vida útil del revestimiento en el horno por lo que es necesario cumplir cada indicación que se le oriente a un trabajador ya que podrían ocurrir fallas que lo limitarían. Existen tres métodos para la instalación del revestimiento del horno de inducción (Gonzalo, 2006).

- Apisonado manual
- Apisonado con vibrador
- Inmersión de vibrador eléctrico

El de Inmersión de vibrador eléctrico se usa para capas de revestimiento de 255 mm de espesor y en hornos de capacidad de 1 a 10 toneladas,

Por medio del vibrador es usado para hornos con capacidades mayores a 10 toneladas y también para hornos con capacidades de 6 a 10 toneladas.

En la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte el horno de inducción instalado tiene con una capacidad de 120 kg, esto implica que la instalación del material refractario monolítico sea por el método de apisonado manual.

1.9 Sinterización y formación de zonas de los materiales refractarios monolíticos

Existen tres métodos de quemado o sinterizados para formar el crisol a partir de la masa refractaria monolítica según Gonzalo (2006). Unos de los métodos más usados es quemar lentamente el revestimiento con carga metálica formada por acero, utilizando la potencia inductiva. El segundo método, el crisol alcanza una elevada temperatura y luego se vierte el metal aproximadamente a los 1350 ºC. El tercer método consiste en realizar un precalentamiento de la chapa de acero con gas o algún quemador sin carga en el horno hasta una temperatura de 1000 ºC, y luego se completa con metal fundido hasta los 1350 ºC. En la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte se usó el primer método de quemando del revestimiento con una carga metálica formada por acero. Los refractarios monolítico apisonables son materiales refractarios acondicionados usualmente con ligante químico pero tienen la plasticidad adecuada para ser apisonados y formar una estructura monolítica.

El ligamento o agente de sinterizado para la sílice es el ácido bórico. Este se utiliza en la proporción del 1,0 al 3,0 % según las temperaturas de trabajo, de 1 a 1,5 % temperaturas por debajo de 1700 °C y de 1,5 a 3 % a temperaturas superiores a los 1700 °C, en el caso el horno de inducción INDUCTOTHERM la máxima temperatura de trabajo es de 1650 °C, es decir que solo se utilizará 1,5 % de ácido bórico para las mezclas preparadas. Durante la sinterización el ácido bórico reacciona con los granos finos de la sílice con lo que se produce una fase vidriosa en la cual se rellenan los huecos intersticiales entre los granos de cuarzo y liga la capa de fritada dentro de una masa monolítica. Este sinterizado debe de ser muy lento para evitar grietas y fisuras las cuales pueden dar paso a una falla por penetración. La presencia de una pequeña fase líquida acelera el proceso de sinterización y puede ocurrir a temperaturas más bajas, pero una cantidad excesiva de fase liquida puede modificar la forma y resistencia del material. Este proceso de sinterización proporciona una liga cerámica de los granos de arena, donde se produce la fusión parcial de los granos de sílice actuando la presencia de fase líquida. Según Gonzalo (2006) al sinterizar el material refractario se produce un incremento de las áreas de contacto inter partículas ‘‘cuellos’’ que crecen en espesor (Ver figura 1.4). Mediante este proceso los poros pierden conectividad y se reducen hasta ser en gran porciento eliminados de la superficie.

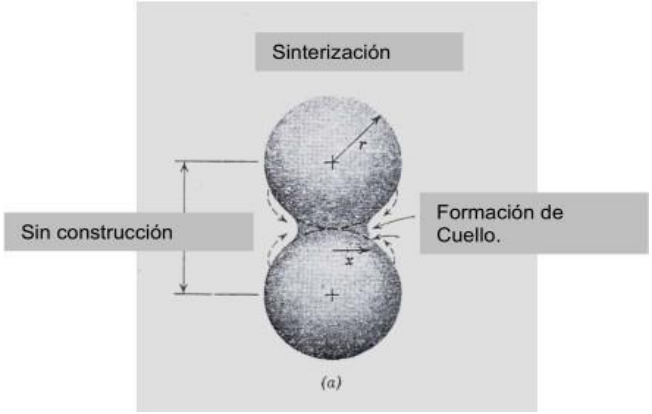


Figura 1.4 Formación de cuellos en las partículas durante el proceso de sinterización (Gonzalo, 2006)

1.9.1 Formación de zonas en el material refractario

Después del proceso de sinterización en el cual la temperatura del revestimiento ha variado considerablemente desde la cara caliente la cual está en contacto con

el metal a la cara fría próxima a la bobina refrigerada, en la figura 1.5 se distinguen tres zonas en el revestimiento que son creadas en el quemado o proceso de sinterizado.

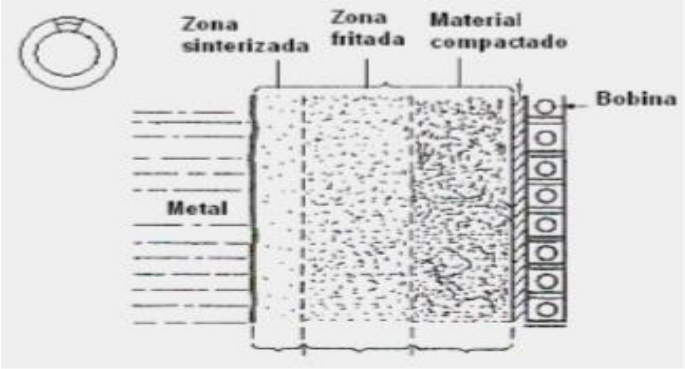


Figura 1.5 Formación de zonas en el revestimiento después de la sinterización (Gonzalo, 2006)

Una zona sinterizada es formada en la cara caliente, con un relativo esfuerzo mecánico alto y una baja porosidad en su estructura. Esta es aproximadamente un quinto del espesor del revestimiento y generalmente está expuesta a temperatura por encima de los 1300 ºC. La siguiente zona formada es conocida como zona fritada que se forma detrás de la cara sinterizada y está expuesta a una temperatura entre los 900-1300 ºC el desarrollo del ligante no se completa y naturalmente los esfuerzos mecánicos de esta zona se reducen a un tercio de la zona de sinterizado así también la porosidad es alta, esta zona ocupa dos quintos del espesor del revestimiento.

La zona del material compactado está ubicada junto a la bobina y nunca alcanza los 900 ºC pues generalmente es mucho más baja que esta. Como consecuencia de no haberse unido al ligante esta zona retiene la forma original del aglomerado granular del revestimiento. Es muy importante porque sirve como una protección de la bobina cuando se produce una grieta en la zona sinterizada y ha atravesado la zona de la fritada, pues esta capa no permite que el metal fundido penetre hasta la bobina de poder y es conocida como granos aglomerados. Para mayor protección de la bobina se coloca un barniz aislante entre la bobina y el revestimiento (Gonzalo, 2006).

1.10 Trabajos precedentes

Numerosas son las investigaciones y trabajos realizados alrededor de este proceso, sobre todo con la finalidad de optimizar la eficiencia del material refractario monolítico e incrementar la eficiencia operativa y energética de los hornos de inducción. Luego de una intensa y profunda revisión bibliográfica acerca del tema en cuestión, que es la construcción de un material refractario monolítico para un horno de inducción, se recogieron los siguientes resultados.

Salazar (1989) realizó una tesis de ‘‘Montaje de revestimiento con refractarios para hornos de inducción magnética’’, en la Escuela superior técnica del litoral de Ecuador en la cual obtuvo un resultado favorable para la economía mediante la instalación de un material refractario nacional de arena sílice ya que el mismo pudo resistir 50 coladas con menor precio de compra, al contrario del material importado que resistió 100 coladas por un precio que triplica el costo del material refractario nacional.

Cooper (2003) realizó un proyecto de ‘‘Desarrollo de masas refractarias para hornos de inducción’’ en el cual se diseñaron mezclas del tipo acidas, básicas y neutras para su posteriores ensayos para evaluar las características físicas de cada una de las mezclas en función de su aplicación en revestimiento de hornos de inducción teniendo un resultado factible para su aplicación en estos tipos de hornos. La masa ácida aplicada tuvo un resultado bastante satisfactorio en la Empresa del Rubro, Fundición Jofré en España y se hicieron planes para una aplicación a mayor escala.

Santander (1999) realizó un proyecto ‘‘Refractarios empleados en los hornos de inducción’’ en el cual expone los materiales refractarios que son más eficientes para el revestimiento de este tipo de horno como son la arena sílice ligada con ácido bórico ya que el mismo le proporciona varias propiedades mecánicas a la mezcla refractaria como son aumentar la dureza y sirve para compactar la mezcla elaborada.

Gonzalo (2006) realizó una tesis de ‘‘Prolongación de la vida útil del revestimiento refractario en un horno de inducción INTRAMET’’, teniendo como resultados una prolongación de la vida útil del refractario en 100 % luego de seleccionar la granulometría correcta con sus respectivos porcentajes, y se aumentó el número de coladas del horno ya que se duplicaron, también que se

disminuyeron los tiempos de paradas del horno de inducción por problemas del material refractario, brindando una mayor seguridad en su entorno poniendo un límite mínimo de espesor.

Grey (2010) realizó una tesis acerca de la Influencia de la granulometría de la Arena Sílice en el consumo de Resina y Catalizador en la Mezcla de Moldeo autofraguante en la Unidad Estatal Básica Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel. En la cual evaluó la influencia de la granulometría de la arena sílice de Casilda Trinidad en la calidad de las mezclas de moldeo de dicha empresa, preparando mezclas de moldeo con la granulometría más adecuada para disminuir el consumo de resinas y catalizadores.

Oliveros (2002) realizó un estudio donde caracteriza desde el punto de vista físico-mecánico las arenas sílice, olivino y cromita, se determinan los parámetros y propiedades de las mezclas autofraguantes y se evalúa la factibilidad económica del uso de las mezclas autofraguantes con la utilización de las arenas cubanas.

Guzmán (2001) realizó una tesis acerca de la Sinterización de Materiales refractarios base alúmina-zirconio-sílice (AZS) donde logró obtener en el laboratorio una formulación AZS de composición diferente a la comercial (43-37-20) manteniendo con esta nueva composición (43-20-37) la formación de fases refractarias como mullita y zircón, la nueva formulación AZS consiguió soportar condiciones agresivas como es el vidrio fundido, posibilitando su uso dentro de la industria donde se involucren procesos de fusión.

Portilla (2012) realizó una tesis en la cual desarrolló un procedimiento para fundir acero de medio carbono en el horno de inducción donde incluye una teoría acerca del funcionamiento del horno de inducción y parámetros principales para su desempeño, como la influencia del material refractario en el horno de inducción.

Conclusiones parciales

A través de este capítulo se logró realizar una búsqueda bibliografía que permite conocer el estado del arte de los materiales refractarios monolíticos para hornos de inducción. Se analizó las condiciones que deben resistir los materiales refractarios para ser instalados en un horno, como son la resistencia a altas temperaturas y al choque térmico. Se realizó un estudio en el cual se explican la formación de zonas en el material refractario monolítico después del proceso de sinterización.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se plantean los materiales y métodos utilizados para el análisis de la arena sílice de Casilda, Trinidad, como material refractario para el horno de inducción. En el análisis granulométrico se determinó el tamaño de las partículas mediante el método ordinario, es decir clasificando las muestras según el tamaño de los orificios de la maya de los tamices, se utilizaron tres tipos de tamices con diferentes medidas, 5,0 mm, 1,0 mm y 0,2 mm. Para el cálculo de la porosidad total de las probetas se aplicó una ecuación de cálculo de porosidad según (Salcines, 1985) y para el análisis de la compresión en frio se realizó mediante un equipo mecánico Tenson universal para pruebas de compresión que ejerce una presión sobre la probeta provocando su fractura, esta máquina diseñada para el ensayo marca el resultado que resistió la probeta en un reloj, en valores de Newton. Aunque las mezclas refractarias a desarrollar se utilizan en seco, en la fabricación de probetas de ensayo fue necesario utilizar un ligante líquido para poder moldear dichas probetas (primcote), para su fabricación no se consideraron parámetros tales como la presión aplicada, número de prensados, etc. Con la optimización de estos factores se pudo formar una probeta monolítica que pudo ser moldeada sin que sufriera una disgregación en su distribución granulométrica, ni que se rompiera por falta de líquido o presión de moldeado, luego de ser sinterizada a 1110°C.

2.1 Principales métodos de análisis en las arenas de sílice

Para realizar el análisis granulométrico en seco, se utilizó un juego de matices y una maquina tamizadora. Fueron tres tamices con diferente tamaño de orificio de mayas, se obtuvieron tres muestras gruesa, media y fina. Este método de clasificación de partículas se llevó a cabo después de calcinada la materia prima (arena sílice) en un horno de calcinación a una temperatura de 500 ºC, cumpliendo con la (NC, 2014)

Para el cálculo de la porosidad, se aplicó una fórmula que plantea el libro Salcines (1985), cumpliendo la norma ASTM (2012), la cual define un tamaño específico de probeta de ensayo 50 x 50 mm. Para el análisis de la compresión en frio se tomaron las probetas y se le aplicó una carga de fuerza mediante un equipo, diseñado para este tipo de análisis. El cuerpo de la probeta se fractura con la presión aplicada y la aguja que marca el valor disminuye, es decir, que

mientras una persona le aplica la presión a la probeta otra debe de estar pendiente a la aguja del reloj para obtener el valor máximo que resistió la probeta de ensayo, el mismo se realizó cumpliendo la norma ASTM (2010).

2.2 Caracterización de la arena sílice de Casilda, Trinidad

La arena sílice de formula química SiO_2 es una materia prima que existe en nuestro territorio nacional, como por ejemplo en Casilda, Trinidad y en Pinar del Rio. La arena sílice tiene una temperatura de fusión de 1713 °C, es clasificado según su valor de pH como un material ácido y posee una densidad de 2,65 g/cm^3, tiene un contenido de 97 % SiO_2, según datos de la compra realizada (ver tabla 2.1) en la empresa productora de refractarios de Casilda subordinada de la Empresa Geominera del Centro, la cual está dispuesta a prestar el servicio de venta de arena sílice a la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte mediante un contrato económico de compraventa por un tiempo determinado de un año a un precio de 12, 85 CUC la tonelada (Centro, 2019).

Tabla 2.1 Composición química (%) de la arena sílice de Casilda, Trinidad

Composición química	**(%)**
SiO_2	97,00
CaO	0,10
MgO	0,10
Fe_2O_3	0,80
Arcilla	2,00

Según los resultados que se muestran en la tabla 2.1 se puede analizar que la pureza de la arena sílice es alta teniendo esto una influencia positiva para la conformación del material refractario para el horno de inducción INDUCTHOTHERM de la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte, ya que mientras mayor sea la pureza mayor será su propiedad de refractariedad la cual permite resistir altas temperaturas sin deformarse.

A continuación la tabla 2.2 muestra la granulometría de la arena sílice de Casilda, Trinidad, la cual es vendida en sacos de nylon con un peso neto de 25 kg, según datos del Centro (2019).

Tabla 2.2 Granulometría de la arena sílice de Casilda, Trinidad

Tamaño de partícula (mm)	(%)	Peso (kg)
+ 1	25	6,25
- 1 + 0,1	55	13,75
- 0,1	20	5
TOTAL	**100**	**25**

2.3 Selección y preparación de la muestra

Primeramente se tomaron 25 kg de arena sílice, es decir, un saco de la materia prima, luego se calcinó la muestra de la arena sílice en el horno de calcinación (Ver figura 2.1) a 500 ºC por un tiempo de seis horas, con el objetivo de eliminar la humedad y descomponer las partículas que no resistan altas temperaturas o no tengan propiedades de refractariedad, ya que dichas partículas pueden causar un deterioro temprano en el refractario del horno de inducción.

Figura 2.1 Horno de Calcinación de la Planta Mecánica de Camagüey

Luego de calcinada la muestra se tamizaron con tres tipos de tamices, de 5,0 mm, 1,0 mm y 0,2 mm, hasta obtener 1,0 kg de cada una de las muestras que se analizaran, gruesa, media y fina. Para obtener la muestra gruesa se realizó un tamizado previo inicial con el tamiz de 5,0 mm y todo el material cernido fue nuevamente cribado con el tamiz de 1,0 mm y la materia prima que se quedó en el retenido del tamiz de 1,0 mm es la muestra que se clasifica como gruesa, es decir que la granulometría de esta muestra no será mayor que 5,0 mm ni menor que 1,0 mm estará en el rango de 5,0 a 1,0 mm. Para obtener la muestra media

se utilizó la materia prima cernida del tamiz de 1,0 mm la cual fue nuevamente tamizada pero con el tamiz de 0,2 mm, y la materia prima que se quedó en el retenido fue clasificado como la muestra media, teniendo la misma un tamaño de partícula que oscila entre los 1,0 y 0,2 mm. Para obtener la muestra fina se tomó la materia prima que pasó por el tamiz de 0,2 mm, es decir que la misma tendrá un tamaño menor que 0,2 mm. Luego del proceso de tamizado se procede a homogenizar las muestras y tomar una parte representativa de las mismas. Para homogenizar las muestras, las mismas se mezclaron con una pala (Ver figura 2.2), y para obtener una muestra representativa se tomó en pequeñas porciones de diferentes partes de la masa de las muestras, dichas porciones se pesaron hasta obtener 1 kg de cada una de ellas, a las muestras homogéneas y representativa se realizó una limpieza de partículas ferromagnéticas pasándoles un imán.

Figura 2.2 Pesa y pala utilizadas en la preparación de las muestras

Después de tener las muestras listas, se procede a la preparación de las mezclas con los diferentes porcentajes de granulometría requeridos por la norma ISO (2012), (Ver tabla 2.3).

Tabla 2.3 Porcentajes de las muestras para preparar las probetas de ensayo

Muestras	**Mezcla 1**	**Mezcla 2**	**Mezcla 3**
Arena gruesa (%)	0,300	**0,250**	0,200
Arena media (%)	0,500	**0,500**	0,500
Arena fina (%)	0,180	**0,230**	0,280
Primcote (%)	0,020	**0,020**	0,020
Ácido bórico (%)	0,015	**0,015**	0,015

La tabla 2.3 muestra los porcentajes utilizados de cada una de las muestras para preparar las mezclas. La mezcla 2 se realizará cumpliendo con la norma ISO (2012), y las mezclas 1 y 3 se realizarán variando el porciento de la muestra gruesa y fina, en el porciento de la muestra media no se realizarán cambios ya que, el mayor porciento de partículas que deben tener estas masas monolíticas deben de estar comprendida en el rango, menor que 1 mm mayor que 0,5 mm, según PIP (2013). Luego de tener mezcladas las arenas y libre de partículas ferromagnéticas se le añade el ácido bórico y el primcote. El primcote se le añade a la mezcla como un aditivo que facilitará el moldeo y compactación de las probetas en el proceso inicial de conformación de las probetas de ensayo y el ácido bórico es un aglutinante que se adiciona para las mezclas de sílice y su objetivo fundamental está en la sinterización de la masa monolítica refractaria, el cual es el responsable de la formación de vidrios de boro silicato, aumentando la compactación de las probetas y su resistencia mecánica. Una vez preparadas las mezclas con todos los requisitos cumplidos por normas establecidas se procede a rellenar las probetas con un diámetro interior y altura de 50 x 50 mm como indica la norma ASTM (2010). Al realizar este paso hay que compactar las mezclas de forma manual en las probetas de ensayo para que no existan imperfecciones en la forma y propiedades de las probetas que influyan negativamente en los resultados de los análisis posteriores.

Terminado el rellenado y compactación manual de las probetas, (9 en total, 3 de cada mezcla) se colocan en el horno de calcinación a una temperatura de 1100 ºC por un tiempo equivalente a las 6 horas, este proceso es parte del sinterizado del material refractario en el horno, en el cual se aumentan las propiedades de resistencia mecánica del material refractario. Pasado el tiempo requerido se extraen del horno las probetas para realizarle los análisis correspondientes.

2.4 Clasificación de las clases de la arena sílice por tamizado

La clasificación de clases será realizada cumpliendo con la norma (NC, 2014), una norma cubana que especifica los métodos usados para determinar la distribución del tamaño de partículas de los minerales mediante el proceso de tamizado. Es aplicable para tamaños de partículas desde 16 µm hasta 71 mm.

Este método se basa en pesar la muestra y hacerla pasar por un juego de tamices.

Preparación de la muestra

La muestra inicial se secará a una temperatura igual o superior a los 105 °C.

Procedimiento

Preparación y limpieza de los tamices de ensayo o juego de tamices

En caso de los tamices que van a ser utilizados por primera vez, estos serán desengrasados y limpiados. La limpieza de los tamices será llevada a cabo con gran cuidado para que la malla no sea dañada. También podrían ser golpeados ligeramente para eliminar las partículas atrapadas. En algunas ocasiones puede ser necesario lavar los tamices finos con una solución caliente de agua y jabón.

Tiempo de tamizado

El tiempo de tamizado depende de las características del material, el volumen de la carga inicial, la intensidad del tamizado y la abertura del tamaño nominal de los tamices. Un tiempo de tamizado fijo basado en la experiencia puede ser conveniente.

Tamizado manual

1. Tome el tamiz o juego de tamices con ambas manos y muévalo horizontalmente hacia afuera y hacia dentro con una amplitud aproximada de 70 mm. Si el material es difícil de tamizar especialmente en la fracción de menos 4 mm, más 1 mm, interrumpa el movimiento de vaivén por un movimiento circular.
2. Para tamaño de abertura menor de 1 mm, tome el tamiz o juego de tamices con una mano y golpee aproximadamente 60 veces en un minuto contra la otra mano con una inclinación de 10 ° a 20 °, después de 30 golpes ponga el tamiz en posición horizontal, gire 90 ° y de un golpe fuerte con la mano contra el marco del tamiz. Si las partículas son difíciles de tamizar o cuando está usando tamices finos, tamice ligeramente el material que queda sobre el tamiz con la ayuda de una brocha suave a fin de aflojar las partículas atrapadas en el mismo. El polvo o partículas que pasan por las aberturas del mismo son adicionados a la fracción tamizada.

3. Detenga la operación cuando se alcance el tiempo de tamizado fijado o el punto final de tamizado.
4. Pese las fracciones de tamaño de partículas separadas individualmente.

Pesaje de las muestras

Una vez terminado el proceso de tamizado manual, de cada tamiz se toma el peso de la de la materia prima cernida y retenida.

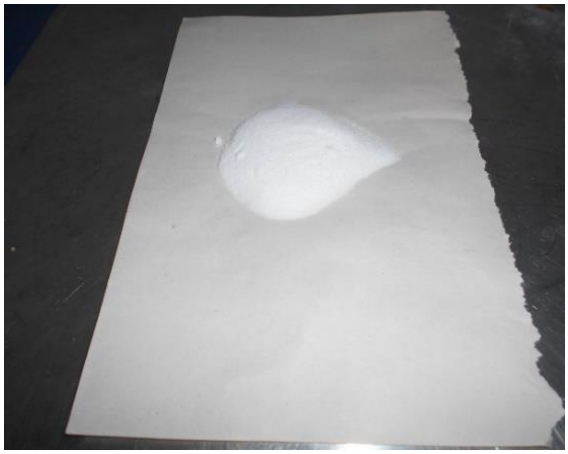
2.4.1 Equipos utilizados para realizar la clasificación de clases de la arena sílice

Según (NC, 2014) se debe utilizar un juego de tamices seleccionados de acuerdo al interés del cliente, los cuales serán tres tamices rectangulares de 0,20 mm, 1,00 mm, y 5,00 mm de diámetro, con el fin de obtener tres tipos de clases de tamaño, (Ver figura 2.3).

Figura 2.3 Tamiz de 0,2, 1,0 y 5,0 mm respectivamente

2.5 Aglutinante y aditivo utilizados para complementar la masa monolítica refractaria

El **ácido bórico** ($B(OH)_3$) es un aglutinante que se adiciona para las mezclas de sílice y su objetivo fundamental está en la sinterización de la masa monolítica refractaria, el cual es el responsable de la formación de vidrios de boro silicato. El ácido bórico es un sólido blanco, cristalino, ligeramente ácido (Ver figura 2.4) y soluble en agua. El ($B(OH)_3$) lo preparó por primera vez Wilhelm Homberg, se encuentra de forma nativa en ciertos volcanes como la Toscana (Italia).



2.4 Muestra representativa de ácido bórico

A la mezcla monolítica refractaria también se le añade el porciento requerido de **primcote** (Ver figura 2.5), que es una sustancia que alberga en su seno el pigmento y lo mantiene fijo al soporte, y como es de base agua facilita el moldeo de las mezclas para materiales refractarios monolíticos. También es utilizado en la preparación de caldos o suspensiones de revestimientos cerámicos primarios empleados en la fundición a la cera perdida, aunque también puede ser empleado para caldos secundarios (TECAL, 2010).

2.5 Muestra representativa de primcote

Propiedades del Primcote:

- Composición básica: Sílice coloidal
- Total de sólidos (incluyendo SiO_2): 30 %, en peso
- Tamaño de las partículas: 10 nm
- pH a 25 °C: 10,6 (Básico)
- Densidad: 1,18 g/ml
- Carga de las partículas: Negativa

Recomendaciones generales sobre el uso del Primcote:

- Mezcle correctamente el producto antes de usar.
- Productos anti-espuma y humectantes están ya contenidos en el Primcote, otras adiciones no son compatibles.
- Las mezclas deben ser limpiadas y no contener siliconas u otros contaminantes.

2.6 Análisis de la resistencia al choque térmico de las probetas de ensayo

Según Salcines (1985) para determinar la resistencia al choque térmico de las probetas de ensayo se puede aplicar el método de Quenching, el cual consiste en calentar las probetas a altas temperatura y enfriarlas rápidamente hasta la temperatura ambiente por inmersión en agua, aceites, alcohol etc. Para el ensayo que se realizará a la arena sílice de Casilda, Trinidad, se colocarán las probetas en el horno de calcinación y se calentarán hasta una temperatura de 1100 °C, manteniéndolas por un tiempo de 30 minutos y luego enfriándolas en agua e iniciando un nuevo ciclo, y así sucesivamente hasta que la probeta pierda el 20% de su masa inicial. Este ensayo se mide en ciclos y se realizará con una probeta de cada de las mezclas preparadas.

2.7 Cálculo de la porosidad de las probetas

La porosidad es la parte del volumen de la pieza refractaria que es ocupada por los poros, se define como la relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total de la pieza. Para el cálculo de la porosidad total se aplicará la siguiente ecuación (Salcines, 1985).

$$P_t = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \cdot 100\ \% \qquad (1)$$

donde:

P_t - Porosidad total, %

ρ_m - Densidad real del material refractario, g/m^3

ρ_a - Densidad aparente, g/m^3

Análisis de unidades

$$Pt = \frac{\frac{g}{cm^3} - \frac{g}{cm^3}}{g/cm^3} \cdot \% = \%$$

La densidad aparente es la densidad de la pieza refractaria después de un proceso de calentamiento y se determina de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{G_2}{V} \quad (2)$$

donde

V – Volumen de la probeta después de sinterizada, cm^3

G_2 - Masa de la pieza después de calentada, g

Análisis de unidades

$$\rho_a = \frac{g}{cm^3}$$

Después del proceso de sinterización las probetas son extraídas del horno de calcinación, y se procede a tomarles el peso con el objetivo de calcular la porosidad total de las probetas de ensayo, ya que la ecuación que plantea Salcines (1985) requiere el peso de la probeta después de un calentamiento para determinar la densidad aparente. La densidad real del material la viene incluida en los datos que ofrece la compra del material refractario según Centro (2019) y el volumen del cilindro se determina a través de los conocimientos adquiridos en matemáticas mediante la siguiente ecuación:

$$Vc = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

donde

Vc – Volumen total del cilindro, cm^3

Π – Constante, 3,14

r – Radio de la circunferencia, cm^2

h - Altura del cilindro, cm

Análisis de unidades

$$Vc = cm^2 \cdot cm = cm^3$$

2.8 Resistencia de la compresión en frio de las probetas

La resistencia de la compresión en frio es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión se realizó colocando probetas de ensayos con forma cilíndrica de 50 x 50 mm, en una máquina universal marca Tenson en donde se aplica una carga hasta

romperlas. Para la realización de este ensayo se cumplirá con la norma (ASTM, 2010).

2.8.1 Técnica operatoria del ensayo resistencia de la compresión en frio

- Se coloca en la máquina las probetas para el ensayo de compresión.
- Colocada la probeta se carga el equipo, con la palanquilla.
- Se procede a aplicar la carga al equipo, girando lentamente el volante hasta la rotura de la probeta.
- Luego se toma el valor máximo de compresión que alcanzó la probeta.
- En el momento de la rotura, la aguja del manómetro cae a su posición cero, pero el valor de la resistencia a la rotura queda indicado mediante una aguja auxiliar que posee el manómetro.

Alcance

Este método cubre la determinación de la resistencia a la compresión en frío materiales refractarios de arena sílice.

Importancia y uso

La compresión en frío de un material refractario es una indicación de su conveniencia para usarlo en construcción de refractarios, no es una medida de su rendimiento a altas temperaturas. El método sirve para todo tipo de productos refractarios, incluyendo ladrillos de alta alúmina, silicio, básicos, arcilla calcinada, aislación de hornos y mezclas moldeables, plásticas y apisonables. La velocidad de compresión normalmente afecta la medición de la resistencia, por lo que se recomienda considerar las respectivas velocidades, tamaños de las muestras y los módulos de elasticidad al comparar datos.

2.8.2 Equipos utilizados para realizar el ensayo de compresión en frio

A continuación se muestra el equipo mecánico marca Tenson (ver figura 2.6) universal para pruebas de compresión.

Figura 2.6 Equipo universal para pruebas de compresión, marca Tenson

Muestras de prueba

Las muestras de prueba tienen las dimensiones de 50 x 50 mm según (ASTM, 2012). En el caso de probetas que posean otra forma, deben poseer dos caras aproximadamente planas y paralelas.

Preparación de las muestras

Las dos superficies de 50 x 50 mm que recibirán la carga deben de estar planas y paralelas una con respecto a la otra.

Procedimiento

Utilice al menos dos probetas para realizar el ensayo.

Aplique la carga con el equipo, ubicando la muestra de tal manera que su eje vertical se alinee con el centro de la esfera del equipo. La velocidad no debe variar en +/- 10 % de la velocidad establecida según el tipo de material.

2.8.3 Cálculo del ensayo del ensayo de compresión en frio

El resultado de la compresión según el Sistema Internacional de Unidades es en kgf/cm^2 por lo que es necesario convertir los valores de Newton en kgf y calcular el área de la circunferencia de las probetas, en nuestro caso todas las probetas tiene las mismas dimensiones. Para convertir los N en kgf se divide el resultado obtenido por 9,8, ya que 1 kgf = 9,8 N, según (ASTM, 2012) y para determinar el área de la circunferencia se aplica conocimientos adquiridos en matemáticas.

Área de la circunferencia

$$A_{circ} = \pi \cdot r^2 \quad (4)$$

donde:

A_{circ} = área de la circunferencia, cm^2

π = constante, 3,14

r^2 = radio, cm

Aplicando este procesamiento de cálculo obtendremos el resultado de la compresión en frio como requiere el Sistema Internacional de Unidades en (kgf/cm^2).

Conclusiones parciales

Con el desarrollo de este capítulo se describieron los materiales y métodos utilizados para realizar el análisis de la arena sílice de Casilda, Trinidad. Se determinó realizar la separación de clases por una norma cubana, de tamizado. Se planteó realizar una variación de los porcientos de las mezclas en la granulometría clasificada como gruesa y fina con el fin de obtener otros resultados.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Este capítulo tiene como objetivo el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión de las probetas de ensayo a partir de tres mezclas, también la resistencia al choque térmico mediante el método de Quenching, el cálculo de la porosidad y realizar una valoración preliminar económica de la factibilidad de la instalación de la arena sílice de Casilda, Trinidad como material refractario monolítico en el horno de inducción de la Empresa Mecánica de Camagüey con el objetivo de reducir el número de importaciones al país.

3.1 Resultados de la clasificación de clases de la arena sílice por tamizado

Para realizar la clasificación de clases de la arena sílice por el proceso de tamizado se cumplió con la norma (NC, 2014) la cual especifica los métodos usados para determinar la distribución del tamaño de partículas de los minerales mediante un tamizado, se obtuvo una separación de clases de tamaños para la arena sílice de Casilda, Trinidad, en la cual se obtuvo una granulometría menor que 5,0 mm como se indica en la tabla 3.1. +1 1 y 0,1 -0,1

Tabla 3.1 Clasificación de clases de tamaños, según (NC, 2014)

Muestras	Tamaño de abertura del tamiz (mm)
Gruesa	- 5,0 + 1,0
Media	- 1,0 + 0,2
Fina	- 0,2

La tabla 3.1 muestra la granulometría o tamaño de partículas de la arena sílice luego del proceso de separación de clases por tamizado. Según los resultados obtenidos en la realización de separación de tamaño, la muestra gruesa tiene un granulometría que oscila entre menor que 5,0 mm y mayor que 1,0 mm, con peso de 5,95 kg, la muestra media tiene un tamaño menor que 1,0 mm y mayor que 0,2 mm con un peso de 13,60 kg, y la muestra fina contiene las partículas menores que 0,2 mm, con un peso de 4,70 kg, para un peso total de 24,35 kg, es decir que se perdieron 0,45 kg después del proceso de calcinación. Luego del proceso de separación de clases por tamizado las muestras se homogenizaron mezclando las partículas con una pala, y se obtuvieron las muestras

representativas escogiendo un poquito de diferentes partes de la misma muestra, hasta que se logró obtener 1 kg de cada una de las muestras, para luego mezclarlas entre sí, según los porcientos requeridos por la norma (ISO, 2012). A continuación se muestran en la figura 3.1 las muestras de arena sílice se Casilda, Trinidad después del proceso de separación de clases por tamizado manual.

Figura 3.1 Muestras de las arenas tamizadas, gruesa, media y fina.

3.2 Análisis del proceso de sinterización de las probetas

En el proceso de sinterización del refractario en el horno de calcinación (ver figura 3.2) se observó una compactación de la masa refractaria monolítica de arena sílice, mediante el cual se aumentaron sus propiedades mecánicas producto de la porción de ácido bórico que se le añadió a cada una de las mezclas. Según Salcines (1985) la arena sílice por debajo de una temperatura de 575 °C se transforma en α, una forma cristalina estable y a partir de 575 °C hasta 878 °C se transforma en la forma cristalina β, una forma cristalina estable, en cual experimenta una dilatación de un 5 %, pero a temperaturas superiores a los 878 °C la forma cristalina β deja de ser estable pasando a serlo la tridimita y a partir de los 1250 °C comienza a deformarse la tridimita en cristobalita, la cual posee una estructura frágil debido a sus propiedades, y a temperaturas próximas a los 1743 °C (temperatura de fusión de la arena sílice) la forma cristalina cristobalita empieza a transformarse en cristales de cuarzo, es decir, que cada transformación cristalina de la arena sílice trae consigo el aumento del volumen específico y la densidad. Por lo que se decidió realizar el sinterizado a la temperatura de 1100 °C, ya que la máxima variación de volumen se experimenta con transformación de β en tridimita, y la misma posee el menor coeficiente de dilatación, y una unión solida de los cristales.

Figura 3.2 Sinterización de las probetas de ensayo

3.3 Resultado de la resistencia al choque térmico de las probetas de ensayo

Mediante el método de Quenching, se comprobó que las probetas de ensayo se mostraron resistentes al choque térmico, ya que no hubo presencia de grietas ni deformación en ninguna de ellas. Después del proceso de sinterización las probetas de ensayo fueron extraídas del horno de calcinación y se tomó una probeta de cada una de las mezclas preparadas para sumergirlas en agua, repitiendo este procedimiento hasta que perdieran aproximadamente el 20 % de su masa. La probeta que resultó tener mayor número de ciclos (calentamiento y enfriamiento) fue la número dos como indica la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultado del análisis de resistencia al choque térmico de las probetas

Probetas	**Ciclos**
1	7
2	**10**
3	6

Según indican los resultados obtenidos en el análisis de resistencia al choque térmico como indica la tabla 3.2, se determinó que la probeta que resistió mayor números de ciclos fue la 2 para un total de 10 ciclos. Este resultado indica que la resistencia al choque térmico de la mezcla 2 de arena sílice de Casilda, Trinidad como material refractario monolítico será el más resistente a los

cambios bruscos de temperatura en comparación con las probetas 1 y 3. Independientemente de este resultado a escala industrial en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte se instaló un material refractario monolítico en el horno de inducción INDUCTOTHERM con los porcientos que se utilizaron en la mezcla 2 para conformar su respectiva probeta, el cual resistió 26 choques térmicos, siendo un resultado satisfactorio.

3.4 Resultados del cálculo de la porosidad de las probetas.

La porosidad de un material conformado incide directamente en su resistencia mecánica, mientras más baja sea la porosidad más resistencia mecánica tendrá el material refractario. Se realizó el cálculo de la porosidad total de las probetas según la ecuación 1. La tabla 3.3 refleja los valores obtenidos en el pesaje de las probetas de ensayo después de la sinterización.

Tabla 3.3 Peso (g) de las probetas de ensayo sinterizadas

Muestras	**1**	**2**	**3**
Peso de Probetas (g)	210	230	220

Según los resultados obtenidos en el pesaje de las probetas de ensayo después del proceso de sinterización como muestra la tabla 3.3, se puede determinar su densidad aparente después de calcular el volumen de las probetas para luego determinar el valor de la porosidad total de las probetas aplicando las siguientes ecuaciones:

Sustituyendo valores en (3)

$$\mathrm{Vc} = 3{,}14 \cdot 2{,}5^2 \cdot 5$$

Vc = 98,125 cm^3

Sustituyendo valores de 3 en 2, para la probeta 1

$$\rho_a = \frac{210}{98{,}125} = 2{,}140 \text{ g/cm}^3$$

Sustituyendo valores de 3 en 2, para la probeta 2

$$\rho_a = \frac{230}{98{,}125} = 2{,}344 \text{ g/cm}^3$$

Sustituyendo valores de 3 en 2, para la probeta 3

$$\rho_a = \frac{220}{98{,}125} = 2{,}242 \text{ g/cm}^3$$

Luego de tener los resultados de la densidad aparente de todas las probetas se procede a determinar la porosidad total

Sustituyendo 2 en 1, para la probeta 1

$$P_t = \frac{2{,}65 - 2{,}140}{2{,}65} \cdot 100\ \% = \mathbf{19{,}245}\ \%$$

Sustituyendo 2 en 1, para la probeta 2

$$P_t = \frac{2{,}65 - 2{,}344}{2{,}65} \cdot 100\ \% = \mathbf{11{,}547}\ \%$$

Sustituyendo 2 en 1, para la probeta 3

$$P_t = \frac{2{,}65 - 2{,}242}{2{,}65} \cdot 100\ \% = \mathbf{15{,}396}\ \%$$

A continuación se muestran los resultados de la porosidad total de las probetas de ensayo de forma más específica en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Resultados del cálculo de la porosidad total de las probetas de ensayo

Probetas	**Resultado (%)**
1	19,245
2	**11,547**
3	15,396

Según los resultados obtenidos mediante el cálculo de la porosidad total según Salcines (1985), la probeta con menor valor de porosidad fue la número 2, es decir, que la probeta 2, tendrá mayor resistencia de compresión en comparación con las demás probetas elaboradas, ya que, mientras menor sea el resultado de porosidad mayor serán sus resistencias mecánicas. Esta mezcla 2 impide con mayor eficiencia la penetración de líquidos y gases por su estructura, teniendo este resultado varias consecuencias positivas para el revestimiento del horno de inducción, como son una alta resistencia a la corrosión y brindar mayor resistencia el desgaste. Aunque la eliminación total de la porosidad es imposible debido a su misma naturaleza de formación se pueden disminuir si se aplica una

ingeniería detallada. Mientras menor sea el resultado de la porosidad menor será la posibilidad que penetre un gas en presencia de un gradiente de presión.

3.5 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión en frio.

La resistencia a la compresión en frio ha sido considerada como uno de los máximos exponentes de la resistencia mecánica general de un material refractario. Aunque hoy en día las roturas a compresión representan una pequeña proporción de los problemas que aparecen en la construcción del revestimiento de un horno, de cualquier forma, resulta muy útil como comprobación indirecta de otras propiedades que pueden afectar al material refractario, como es el desgaste, y repercutir sobre la resistencia a la abrasión y al choque térmico. La resistencia a la compresión de una pieza refractaria depende de la porosidad y densidad, forma de distribución de los poros y la temperatura de sinterización. Este parámetro adquiere importancia para aquellos hornos, cuyo refractario se encuentra sometido a golpes mecánicos o grandes pesos. Mediante el equipo mecánico Tenson universal para pruebas de compresión se realizó dicho ensayo en frio para dos probetas de cada una de las mezclas elaboradas, donde se obtuvieron los resultados (en Newton) que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados de compresión en frio de las probetas de ensayo

Probetas		Resultados de compresión (N)
1	a	800
	b	600
2	**a**	**1200**
	b	1100
3	a	950
	b	960

Según los datos obtenidos en el ensayo de análisis de compresión en frio se puede analizar que la probeta 2 tuvo mayor resistencia a la compresión que las demás probetas, dicha mezcla fue la de menor resultado de porosidad total comprobando que a menor porosidad mayor resistencia a la compresión. Las propiedades mecánicas de la mezcla dos son superiores con respecto a las mezclas uno y tres, es decir que la mezcla dos ofrecerá mayor resistencia a la

rotura una vez instalado como revestimiento monolítico del horno de inducción de la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte. Independientemente de este ensayo, la resistencia mecánica de la mezcla 2 se comprobó a escala industrial, la cual resistió un total de 26 coladas.

3.5.1 Cálculo de los resultados de la compresión en frio

Para convertir los resultados obtenidos en el ensayo de compresión en frio (Newton) en el sistema internacional de unidades (kgf/cm^2), primeramente se convierten los Newton en kilogramos fuerza (kgf), para realizar este procedimiento se aplicó la ecuación 4 para determinar el área de la circunferencia de las probetas:

$\mathbf{A_{circ}}$ = **19,625 cm^2**

Como todas las probetas tienen las mismas dimensiones 50 x 50 mm se tomará en cuenta que el área de la circunferencia es la misma para todas las probetas y los milímetros se convirtieron en centímetros para facilitar los respectivos cálculos. Que el área de las probetas tenga el mismo resultado quiere decir que el valor de resistencia a la compresión se realizó sobre un área de igual tamaño.

Para la probeta (1)

800 N = 81,632 kgf /19,625 cm^2
600 N = 61,224 kgf/19,625 cm^2

Para la probeta (2)

1200 N = 122,449 kgf/19,625 cm^2
1100 N = 112,245 kgf/19,625 cm^2

Para la probeta (3)

950 N = 96,939 kgf/19,625 cm^2
960 N = 97,959 kgf/19,625 cm^2

A continuación se muestran los resultados del ensayo de la compresión en frio en unidades requeridas por el Sistema Internacional de Unidades, ver tabla 3.6.

Tabla 3.6 Resultados de la compresión en frio de las probetas de ensayo

Probetas		**Resultados de compresión (kgf/cm^2)**
1	A	4,159
	B	3,119
2	**A**	**6,239**
	B	5,719
3	A	4,939
	B	4,991

3.6 Valoración preliminar del impacto económico

La política económica de nuestro país en los últimos 10 años ha estado enfatizando en la sustitución de importaciones, y la aplicación de este trabajo en la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte generaría un paso importante en este aspecto, ya que el material refractario monolítico que se utiliza en el horno de inducción es importado desde Italia y comprado a un precio relativamente alto. A continuación en la tabla 3.7 se muestran algunos aspectos económicos analizados en esta investigación del material refractario nacional y el importado incluyendo su rendimiento de trabajo o vida útil.

Tabla 3.7 Datos económicos de los materiales refractarios

Material refractario	Precio por kg	Total de coladas	Cambios mensuales	Costo del revestimiento	Gastos mensual
Importado	9,000 (EUR)	30	4	675,00 (EUR)	2700 (EUR)
Nacional	0,030 (CUC)	26	5	2,25 (CUC)	11,25 (CUC)

Según indica la tabla 3.7, 1 kg de material refractario importado equivale a 9 euros, y 1 kg de la arena sílice de Casilda, Trinidad 0,030 CUC según (Centro, 2019), lo que significa que el precio del material refractario importado es 300 veces más caro que la arena sílice nacional. La cantidad total en kg que ocupa el revestimiento del horno de inducción es de 75 kg, es decir, que el costo de un revestimiento con material refractario importado es de 675 euros, y el costo del revestimiento con material refractario nacional es de 2,25 CUC. En cuanto a la

diferencia de número de coladas que resisten ambos materiales refractarios no es muy grande, ya que el material refractario importado resiste 30 coladas y el nacional 26, esto nos daría una diferencia de 4 coladas. Analizando el número de fundiciones diarias del Taller de Fundición a la Cera Perdida de la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte, se puede llegar a la conclusión que en dicho taller se realizan aproximadamente 4 fundiciones diarias según datos de la empresa, utilizando el material refractario importado se necesita cambiar el revestimiento 4 veces al mes con un costo equivalente a los 2700 euros y utilizando el material refractario nacional como revestimiento del horno de inducción serian 5 cambios en un mes para un costo total de 11,25 CUC. Si se utiliza la arena sílice de Casilda, Trinidad como material refractario monolítico para el horno de inducción de la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte mensualmente la empresa se estaría ahorrando aproximadamente 2600 euros mensuales.

Conclusiones parciales

Se determinó que la probeta de ensayo 2, preparada con la mezcla 2 cumpliendo con la norma ISO (2012) fue la de mejores resultados en los análisis de resistencia al choque térmico, valor de porosidad y resistencia a la compresión en frio. Luego del análisis de los resultados obtenidos la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte realizó una instalación del revestimiento el horno de inducción INDUCTOTHERM a partir de la arena sílice de Casilda, Trinidad utilizando los porcientos de la mezcla 2. El material refractario monolítico de arena sílice de Casilda, Trinidad que se instaló en el horno de inducción resistió una jornada de trabajo de 26 coladas.

CONCLUSIONES

1. Se caracterizó la arena sílice de Casilda, Trinidad, la cual posee un punto de fusión de 1713 °C, una densidad de 2,65 g/cm^3, contiene 97 % de SiO_2 en su composición química, y según el valor de su pH es un material ácido.
2. Al realizar los ensayos de compresión en frío, cálculo de la porosidad y resistencia al choque térmico de las probetas de ensayo se comprobó que la mezcla 2 es la de mayor resistencia mecánica, menor porosidad y más resistente al choque térmico siendo esta la mezcla más factible a utilizar como revestimiento monolítico para el horno de inducción.
3. Al establecer una comparación entre el material refractario importado y el de arena sílice de Casilda, Trinidad se demostró que económicamente es más rentable utilizar la materia prima nacional, ya que mensualmente la Planta Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte se ahorría aproximadamente 2600 CUC.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar la arena sílice de Casilda, Trinidad como material refractario monolítico en el horno de inducción de la Empresa Mecánica de Camagüey Ignacio Agramonte.
2. Antes de proceder a la sinterización del revestimiento se recomienda realizar un análisis de su composición para conocer de antemano que temperatura requiere para evitar defectos en el aislamiento.
3. Llevar un historial de mantenimiento del revestimiento del horno de inducción.
4. Inspeccionar visualmente después de cada colada el diámetro del revestimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ASTM.** Ensayos de compresión en frio. ASTM C-20-83, 2012.
2. **ASTM.** Normas para probetas de ensayos. ASTM C 133-84, 2010.
3. **Centro, Geominera del Centro.** Contrato económico de compra venta. Villa Clara, 2019.
4. **Cooper, R.** Desarrollo de masas refractarias para hornos de inducción, 2003.
5. **Gonzalo, F.** Prolongación de la vida util del revestimiento refractario en un horno de inducción INTRAMET. Ecuador, 2006.
6. **Grey, S.** Tesis, Influencia de la granulometría de la arena sílice en el consumo de Resina y Catalizador. Moa, 2010.
7. **Guzmán, A.** Tesis, Sinterización de materiales refractarios. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON. México, 2001.
8. **Inductotherm, Corp.** Guía de fundamentos de seguridad en la fundicón por inducción que puede salvar tu vida, 2011.
9. **Inductotherm, Corp.** Induccition heating and Melting Safety Fundamentals Guide, 2006.
10. **ISO.** Monolithic (unshaped) refractory materials : Internacional Standard, 2012-3:2012(E).
11. **Loyola, O. Conf,** Materiales Refractarios. Moa, 2017.
12. **NC.** Minerales — Análisis granulométrico por tamizado. Requisitos generales. La Habana : Cuban National Bureau of Standards, 631, 2014.
13. **Oliveros D.** Tesis, Caracterización de la arena sílice desde el punto de vista físico-mecánicos para determinar los parámetros y propiedades de las mezclas autofragantes, 2002.
14. **PIP.** Monolithic Refractory Material Specification : Editorial Revision. PIP RFSM1000, 2013.
15. **Portilla, M.** Tesis, Elaboración de un procedimiento para fundir acero de medio carbono en el horno de inducción. Quito, 2012.
16. **Ryan, W.**Refractory lining for induction furnace. EEUU, 2008.
17. **Tabira, S.** Revestimientos en hornos de inducción. España : Instituto de fundición, 2010.
18. **Salazar, E.** Tesis, Montaje de revestimiento con refractarios para hornos de inducción. Ecuador, 1989.
19. **Salcines, M.** Tecnología de Fundición. La Habana : Pueblo y Educación, 1985.

20. **Santander, N.** Refractarios empleados en los hornos de inducción. Chile, 1999.

21. **TECAL.** Manual de microfusión catalana. España, 2010.

22. **Valery, R.** Handbook of Induction Heating, 2003.

23. **Varela, J.** Permeabilidad y distribución de tamaño de poros. Argetina. Serie II, 287, 1994.