

**PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REVESTIMIENTO DE YESO CON
AGENTES REFRACTARIOS DIFERENTES A LA SÍLICE PARA SU
APLICACIÓN AL MÉTODO DE PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS.**

DIANA CAROLINA ROJAS CASTAÑO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2014

**PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REVESTIMIENTO DE YESO CON
AGENTES REFRACTARIOS DIFERENTES A LA SÍLICE PARA SU
APLICACIÓN AL MÉTODO DE PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS**

DIANA CAROLINA ROJAS CASTAÑO

**TRABAJO DE GRADO, PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA METALÚRGICA**

DIRECTOR:

ARNALDO ALONSO BAQUERO

Ingeniero Metalúrgico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2014

A mis padres Néstor Rojas y Maritza Castaño que con su confianza, soporte y perseverancia me enseñaron que todo lo que se desea, con trabajo y dedicación se puede lograr.

A mi hermano Sergio Andrés, quien fue mi mayor motivación para seguir adelante y culminar este proceso.

A Lina que desde el principio hasta el final, ha sido mi compañera, mi amiga y mi apoyo, quien a pesar de las adversidades siempre me aconsejó en cada decisión que debía tomar.

A Luis Emilio Forero, quien en vida me enseñó a encontrar la fuerza para superar los obstáculos y seguir adelante. QEPD.

Diana Carolina

AGRADECIMIENTOS

Como autora de este proyecto presento mis más sinceros agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de realizar y culminar mis estudios profesionales y proporcionarme los recursos necesarios para lograrlo.

Mi director, Ingeniero Metalúrgico, Arnaldo Alonso Baquero por compartirme sus conocimientos y experiencia para hacer de este un mejor trabajo de investigación. Así mismo, las Ingenieras Metalúrgicas, Luz Amparo Quintero, Elcy Córdoba, Carlina Londoño y Johanna Fernández, por su orientación y enseñanza.

Técnicos, Ambrosio Carrillo y Mario Navarrete, que me brindaron herramientas necesarias para alcanzar los objetivos planteados en este proyecto y los planteados como profesional a lo largo del desarrollo de la carrera.

Grupo de investigación GIMAT, por disponer sus instalaciones y equipos para la realización de este proyecto.

Las empresas Oro y Arte E. U. y C. I. Colombian E. U.; y a COLCIENCIAS por financiar este proyecto y proporcionar los recursos necesarios para su efectiva ejecución y exitosa culminación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	16
3.1. MÉTODO DE PRE-ENGASTE	16
3.1.1. Yeso	16
3.1.2. Material refractario	17
3.1.3. Relación “a:p”	19
3.2. PROPIEDADES DEL REVESTIMIENTO	19
3.3. CICLO TÉRMICO	21
3.4. RENTABILIDAD Y RIESGO	21
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
4.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
4.2. ETAPA 2: ADQUISICIÓN DE MATERIA PRIMA.....	24
4.2.1. Especificaciones de la materia prima	24
4.2.2. Preparación del refractario	25
4.3. ETAPA 3: PREPARACIÓN DEL NUEVO REVESTIMIENTO	25
4.3.1. Determinación de los constituyentes del nuevo revestimiento	25
4.3.2. Elaboración de mezclas según técnica de preparación	28
4.3.3. Fabricación de las probetas	28
4.4. ETAPA 4: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS. FASE 1: EN VERDE.....	29
4.5. ETAPA 5: TRATAMIENTO TÉRMICO DEL NUEVO REVESTIMIENTO.....	29

4.6. ETAPA 6: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS. FASE 2: EN SECO.....	30
4.7. ETAPA 7: VERIFICACION MEDIANTE REALIZACIÓN DE PROTOTIPOS..	31
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
5.1. MEDICIÓN DEL TIEMPO DE TRABAJO Y TIEMPO DE FRAGUADO.....	34
5.1.1. Revestimiento de yeso a base de magnesita.....	34
5.1.3. Revestimiento de yeso a base de chamota	38
5.2. MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN...	42
5.2.1. Revestimiento de yeso a base de magnesita.....	42
5.2.2. Revestimiento de yeso a base de chamota	43
5.3. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA.....	46
5.4. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO	49
6. CONCLUSIONES.....	54
7. RECOMENDACIONES.....	56
CITAS	57
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología experimental llevada a cabo en este trabajo.	23
Figura 2. Tratamiento térmico típico.....	29
Figura 3. Medida de temperatura de deshidratación del revestimiento durante el tratamiento térmico.	30
Figura 4. Diagrama binario Al-Zn.	32
Figura 5. Zirrones pre engastados en el modelos de cera.	32
Figura 6. Fotografía de las probetas con Mezcla 20% yeso – 80% magnesita.	35
Figura 7. Fotografía de las probetas con mezcla 25% yeso - 75% magnesita.....	36
Figura 8. Fotografía de las probetas con mezcla 30% yeso - 70% magnesita.....	37
Figura 9. Fotografía de las probetas con mezcla 80% yeso - 20% chamota.	39
Figura 10. Fotografía de las probetas con mezcla 70% yeso - 30% chamota.	40
Figura 11. Fotografía de las probetas con mezcla 60% yeso - 40% chamota.	41
Figura 12. Daño de probeta Mezcla 3.	44
Figura 13. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y a:p de 42:100 (a) A 100X (b) A 500X.	47
Figura 14. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y a:p de 46:100 (a) A 100X (b) A 500X.	48
Figura 15. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y a:p de 50:100 (a) A 100X (b) A 500X.	48
Figura 16. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y a:p de 54:100 (a) A 100X (b) A 500X.	49
Figura 17. Elaboración del molde con árbol en cera.	50
Figura 18. Fotografía de colada 1.	51
Figura 19. Fotografía de colada 2.	52
Figura 20. Fotografía de colada 3.	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de porcentajes de mezcla yeso/refractario.	27
Tabla 2. Relaciones de agua - polvo.	27
Tabla 3. Duración y velocidad de remojo y mezclado.	28
Tabla 4. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 20% Yeso – 80% Magnesita.	34
Tabla 5. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 25% yeso – 75% magnesita.	36
Tabla 6. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 30% yeso – 70% magnesita.	37
Tabla 7. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 80% yeso – 20% chamota.	38
Tabla 8. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 70% yeso – 30% chamota.	40
Tabla 9. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 60% yeso – 40% chamota.	41
Tabla 10. Permeabilidad del revestimiento a base de magnesita.....	42
Tabla 11. Permeabilidad del revestimiento a base de chamota.	44
Tabla 12. Datos de Resistencia a la compresión en seco. Revestimiento a base de chamota.	45
Tabla 13. Parámetros de fusión de la colada 1.	50
Tabla 14. Parámetros de fusión de la colada 2.	52
Tabla 15. Parámetros de fusión de la colada 3.	53

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Ficha de datos técnicos de materia prima empleada en la investigación.	61
ANEXO B. Resultados de composición según Análisis de Fluorescencia de Rayos-X. a) Sulfato de Calcio (CaSO_4), b) Revestimiento Diamante Kerr, c) chamota, y d) Magnesita.....	66
ANEXO C. Listado de equipos empleados.	68
ANEXO D. Procedimiento para la elaboración de las probetas de revestimiento de yeso.	69
ANEXO E. A. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla Diamante Kerr. B. Permeabilidad del revestimiento a base de magnesita.....	70

RESUMEN

TÍTULO: PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REVESTIMIENTO DE YESO CON AGENTES REFRACTARIOS DIFERENTES A LA SÍLICE PARA SU APLICACIÓN AL MÉTODO DE PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS*.

AUTORA: ROJAS CASTAÑO Diana Carolina**.

PALABRAS CLAVES: Permeabilidad, pre-engaste de esmeraldas, relación agua-polvo, refractario, resistencia a la compresión, tiempo de trabajo, tiempo de fraguado.

DESCRIPCIÓN

El objetivo del presente estudio se centró en diseñar un revestimiento de yeso para uso en joyería, utilizando materiales refractarios con mayor estabilidad térmica y química con el fin de evitar esfuerzos que podrían agrietar los moldes durante el ciclo térmico. Para esto se preparó un nuevo revestimiento de yeso donde la sílice es reemplazada por la magnesita y otro donde es reemplazada por la chamota, variando la cantidad de refractario contenido y la relación a:p en cada mezcla. Haciendo uso de estos refractarios fue posible reducir las elevadas temperaturas del tratamiento térmico y obtener propiedades similares a las presentes en el revestimiento comercial.

A partir de los resultados obtenidos se pudo observar que la mezcla que mejores propiedades mostró para uso en joyería fue la de 70% yeso y 30% chamota y relación a:p entre 46:100 y 50:100 debido a su estructura porosa y a su gran estabilidad química y térmica que minimizan el choque térmico y proporcionan tiempos de trabajo, valores permeabilidad y valores resistencia a la compresión óptimas para dicha aplicación. Esto se corroboró durante la elaboración del prototipo empleando una relación a:p de 50:100 donde fue posible la obtención de una pieza de joyería mediante el método de pre-engaste.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ing. Arnaldo Alonso Baquero.

ABSTRACT

TITLE: PREPARATION AND EVALUATION OF A GYPSUM INVESTMENT WITHOUT SILICE REFRACTARY AGENTS USING EMERALDS “STONES IN PLACE” METHOD*.

AUTHOR: ROJAS CASTAÑO Diana Carolina**.

KEYWORDS: Permeability, “Stone in place” of emeralds, water-to-powders ratio, refractory, compressive strength, working time, setting time.

DESCRIPTION:

The main target of this research study focused on the designing of an investment shell of gypsum to use in jewelry industry using refractory materials with higher thermal and chemical stability in order to prevent stresses that might crack the mold during the thermal cycling. For this purpose, a new investment was made, where the silica was replaced by magnesia and another where it was replaced by chamotte, varying the amount water-to-powders ratio (w:p) and of refractory regarding content in each preparation. Using these refractories it was possible to reduce the high thermal temperature treatment and to obtain properties similar to those present in commercial investment.

Based on the obtained results it could be observed that the mixture with better properties to use in jewelry was 70 % gypsum – 30 % chamotte and the relation between 46:100 and 50:100 due to its porous structure and its chemical and thermal stability reduces the thermal shock and provide working times, optimum permeability values and resistance compression values. This was confirmed during the development of the prototype using a relation w:p 50: 100 where a piece of jewelry was made by means of the “stone in place” method.

* Thesis Project

** Faculty Physical Chemistry of Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Ing. Arnaldo Alonso Baquero.

INTRODUCCIÓN

El método de pre-engaste de piedras preciosas ha sido estudiado alrededor del mundo por numerosos fabricantes de joyas desde hace alrededor de tres décadas [19]. La principal ventaja que ofrece este método es un ahorro hasta del 80% en los costos de fabricación, dependiendo principalmente del tipo y precisión del engaste, la preparación del modelo de cera y la calidad de la piedra [22]. Este método ha favorecido la producción de joyas con diamantes, zafiros y rubís; sin embargo, el método no puede ser empleado con esmeralda colombiana debido principalmente a que esta gema se fisura y/o estalla al ser expuesta a temperaturas cercanas a los 600°C [12].

En el método, una vez la gema ha sido engastada y cubierta con la mezcla de revestimiento para la fabricación del molde, deberá soportar las diferentes temperaturas a las que esta pasta es sometida para lograr las propiedades físicas y térmicas que la hacen apta para ser usada como molde de microfundición. Debido a lo anterior, el proceso de fabricación del molde refractario debe adaptarse a las condiciones tolerables por la esmeralda y para esto, se requiere hacer uso de materiales cerámicos que cumplan los requerimientos propios del proceso, en especial, aquellos caracterizados por su estabilidad térmica en los rangos de temperatura del proceso.

El presente trabajo explora la posibilidad de modificar el material refractario utilizado en la mezcla cerámica que dará lugar al molde, manteniendo el sulfato de calcio hemihidratado como aglomerante. Partiendo de las proporciones encontradas en el revestimiento comercial se realizan pruebas con refractarios de chamota y magnesita, con el fin de hallar las composiciones que presenten un comportamiento apto al proceso, así como el tratamiento térmico que brinde las propiedades físicas, térmicas y químicas requeridas por un molde de microfundición.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Preparar y evaluar un revestimiento de yeso para su aplicación al método de pre-engaste de las esmeraldas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la relación agua-yeso en los nuevos revestimientos.
- Determinar la variación de la permeabilidad y de la resistencia a la compresión en seco de los nuevos revestimientos.
- Valorar el comportamiento en colada del nuevo revestimiento de yeso para su uso en joyería.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. MÉTODO DE PRE-ENGASTE

Este método ha sido ampliamente utilizado desde aproximadamente tres décadas atrás, por su capacidad para producir piezas de excelente acabado superficial, precisión dimensional y formas complejas. Consiste en la fabricación de piezas de joyería a partir de un patrón de cera al cual se le engasta la piedra preciosa. Este patrón es recubierto por un revestimiento de yeso y una vez ha fraguado, se procede a la eliminación de la cera sometiéndolo a temperaturas entre los 80 y 130 °C; obteniendo así, la gema sujeta por el refractario junto con la forma de la joya impresa en el molde de yeso. Posteriormente, el molde es sometido a tratamiento térmico adecuado, con el fin, no sólo de eliminar el agua de cristalización, si no también, lograr la estabilidad tanto térmica como dimensional del molde antes de la colada. Finalmente, las aleaciones fundidas se vierten en los moldes. [15, 22].

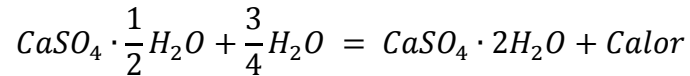
En la actualidad, el revestimiento de yeso usado en joyería para el método de pre engaste de gemas, está compuesto de sílice (SiO_2) en dos formas cristalinas (Cuarzo y Cristobalita) y de Sulfato de Calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$). [14]

3.1.1. Yeso

El yeso (sulfato de calcio hemihidratado), es un aglomerante del revestimiento, que al ser mezclado con agua se vuelve un fluido con excelente capacidad para copiar los detalles finos del prototipo de cera y, en un tiempo apropiado reacciona con el agua para formar un nuevo compuesto que endurecerá en una masa sólida manteniendo la forma y resistencia durante la colada del metal precioso.

Químicamente, el producto primario de la reacción entre el yeso hemihidratado y el agua es sulfato de calcio dihidratado, que actúa como un agente aglomerante

manteniendo al material refractario en la forma deseada. La reacción química involucrada es [14]:



Los revestimientos que contienen como aglomerante yeso dihidratado han sido más apetecidos para moldes de piezas finas, debido a que reproducirá cualquier forma con alta precisión [24].

3.1.2. Material refractario

El material refractario es un material inerte que resiste altas temperaturas sin descomponerse y no reacciona con el metal colado. Los polvos refractarios para fundición de metales preciosos deben resistir extremos calores durante el tratamiento térmico y una excesiva presión durante la fundición; además, deben ser relativamente fáciles de remover después de la colada y proporcionar una superficie lisa. [11]

3.1.2.1. Refractarios con bajo coeficiente de dilatación térmica:

Magnesita

La magnesita se conoce como un mineral de fórmula química $MgCO_3$ que pertenece a la clase carbonatos.

El principal componente de la magnesita es óxido de Magnesio (MgO), el cual es un producto 100% natural, obtenido por medio de la calcinación controlada del mineral de magnesita (carbonato de magnesio). El óxido de Magnesio es el material más importante dentro de los refractarios básicos y su punto de fusión es de 2800 °C. [17]

La magnesita es obtenida a temperaturas entre 1400 y 1600°C, mediante un tratamiento conocido como quemado a muerte, donde se buscan varios factores: a) Disminuir la actividad de la cal libre (CaO), para que el cuerpo cerámico no se expanda por el fenómeno de hidratación y b) Eliminar la mayor cantidad de poros

para crear un cuerpo más denso con características químicas y mecánicas adecuadas al aumentar la temperatura. En la magnesita calcinada a muerte y sinterizada, los cristales de periclasa son grandes y el producto es denso, lo que implica una mayor estabilidad química. [3]

Chamota

La chamota es una mezcla de arena sintética refractaria de grano grueso que se prepara a partir de arcilla calcinada y ladrillos molidos, mezclados con una arcilla cruda para dar plasticidad. Su característica principal es que es muy refractaria y conserva la resistencia mecánica a elevadas temperaturas, cercanas a 800°C.

La estructura de la chamota está formada principalmente por Mullita, la cual contiene porcentajes hasta del 85%, esta fase es la que le da la refractariedad al producto, y cristobalita, la cual limita la refractariedad de la chamota y disminuye la temperatura adecuada de cocción. [1]

Principales propiedades de la chamota:

- Refractariedad: Alta.
- Dilatación: Perfectamente lineal, es decir tiene poca dilatación.
- Porosidad o permeabilidad: Una buena chamota tiene una porosidad abierta del 15 al 20 %. Por tal razón, la chamota exige alrededor de una 1 a 1,2 % más de aglomerante que la arena sílico arcillosa para la misma granulometría y para desarrollar la misma resistencia.

Cuando el yeso es mezclado con un refractario apropiado, retiene estas características siendo adecuado como revestimiento para joyería. Sin embargo, es importante establecer una cantidad de agua apropiada para lograr las propiedades adecuadas para joyería.

3.1.3. Relación “a:p”

La relación de la cantidad de agua con la cantidad de polvo de revestimiento es comúnmente expresada como relación agua – polvo ($w:p$) “water-to-powder ratio”, por sus siglas en inglés. [9]

La relación agua – polvo de un revestimiento de yeso debe estar dentro de un rango limitado debido a que su variación tiene efectos sobre las características del revestimiento y lo que se busca es obtener un material tan consistente como sea posible. La principal razón para establecer una relación adecuada es asegurar que al ser mezclado el revestimiento tenga la viscosidad adecuada que permita copiar los detalles finos.

3.2. PROPIEDADES DEL REVESTIMIENTO

Independientemente de cual sea el refractario utilizado en la fundición de metales preciosos, es fundamental que se sigan ciertos métodos que permitan asegurar un revestimiento con una calidad consistente.

Los factores a tener en cuenta para mantener las propiedades del revestimiento, son la calidad y la temperatura del agua usada en la elaboración del mismo, la cual debe ser destilada o des-ionizada [10]. La temperatura del agua debe estar entre 21 y 24 °C, agua fría incrementaría el tiempo de trabajo mientras que el agua caliente disminuirá este tiempo. [16]

La primera propiedad de un revestimiento con la que se encuentran los joyeros es la viscosidad. Es claramente visto que la viscosidad depende de la a:p. Sin embargo, investigadores mostraron que la viscosidad de un fluido no es un valor constante y depende del estado de movimiento del fluido. Entre más alta sea la rata de movimiento menor será la viscosidad. [12] Este comportamiento es llamado tixotropía. Conduce a ciertas consecuencias: Si el revestimiento es relativamente viscoso, el molde se llenará lentamente y no permitirá el escape de burbujas de aire, resultando en una pieza con superficie rugosa.

Por esto, es fundamental que se sigan ciertos procesos de evaluación para asegurar una calidad consistente:

- Tiempo de remojo: Es el tiempo empleado para agregar el polvo al agua. El polvo debe ser adicionado de manera lenta y constante, usando un tamiz que no permita la adición de partículas aglomeradas. Se recomienda realizarlo entre 1 a 1½ minutos y una velocidad de mezclado mínima. [8, 20]
- Tiempo de mezclado: Es el tiempo requerido para lograr una mezcla homogénea y con buena fluidez. La mezcla fluida se somete a mezclado convencional en máquina entre 3 a 3½ minutos para lograr que todas las partículas se mojen completamente. [8] El incumplimiento de este tiempo puede incrementar las marcas de agua en el molde, debido al agua libre adherida a la superficie de la cera.
- Tiempo de trabajo: Es la cantidad de tiempo en el cual el revestimiento mezclado puede ser trabajado o manipulado antes de perder su viscosidad. Esto puede ocurrir entre 9 y 10½ minutos. [8]
- Tiempo de subida en el vacío: Define la cantidad de vacío que se necesita para liberar el aire atrapado en la mezcla refractaria. El vacío no puede ser excesivo para evitar la salida del revestimiento del recipiente de mezclado. La altura de subida recomendada es de 1,5 pulgadas y el tiempo máximo es de 1 minuto. [8]
- Tiempo de fraguado: Es el tiempo desde que el polvo es añadido al agua hasta que la mezcla alcanza una dureza definida. Es medido según R&R Procedures ASTM C 472-90 mediante el Test Vicat. [8, 10]
- Permeabilidad: Se define como la facilidad que tiene un medio poroso para permitir el flujo de aire a través del sistema poroso interconectado. [6]
- Resistencia a la compresión: Es la resistencia máxima que una probeta normalizada es capaz de soportar cuando se aplica una carga creciente en forma continua hasta que se produzca la rotura por la presión aplicada (en kg/cm^2). [18]

3.3. CICLO TÉRMICO

El tratamiento térmico al que se somete el molde puede ser adaptado según el tipo de piedra y aleación usada. Dependiendo de esto, existen temperaturas máximas que no pueden ser excedidas [23]:

- 630°C (1166°F) para diamantes y esmeraldas.
- 680°C (1256°F) para otras piedras sensibles.
- 730°C (1346°F) para zirconia cúbica o piedras sintéticas.

Sin embargo, según el Dr. Ajit Menon, las piedras con inclusiones a menudo sufren grietas durante el tratamiento térmico, y por lo tanto, recomienda que la temperatura del horno no exceda los 482°C (900°F). [20] Ver Figura 2. Este es el caso de la esmeralda colombiana debido a que en su estructura presenta diversas sustancias diminutas e inclusiones en diferentes estados (sólido, líquido y gas) [7] que las hace muy sensibles a la temperatura.

Las gemas a menudo se agrietan o rompen debido al choque térmico si son enfriadas bruscamente desde altas temperaturas. Por lo tanto, después de fundir, los moldes que contienen esmeraldas deben ser enfriados lentamente por una o dos horas antes de destruirlos.

3.4. RENTABILIDAD Y RIESGO

El riesgo de dañar una gema incrementa proporcionalmente con el tamaño de la gema. El riesgo de dañar piedras de $d = 1.5 \text{ mm}$ es cercano a 0.5 %, el cual es aceptable. Sin embargo, el riesgo aumenta al 2 % para piedras largas con $d = 5 \text{ mm}$.

El riesgo también depende de:

- Tipo de piedra: Las esmeraldas son más sensibles que los diamantes.
- Pureza y calidad de la piedra: La más pura es mejor.

- Corte de la piedra: Cortes redondos y sin esquinas son mucho menos sensibles que un corte triangular. Los ángulos agudos incrementan el riesgo a rotura.
- Tipo de engaste: El riesgo de la piedra expuesta es proporcional a la superficie de contacto entre piedra y la cera/metal [23].

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo mediante la implementación de las etapas descritas en la Figura 1.

Figura 1. Metodología experimental llevada a cabo en este trabajo.



4.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó permanentemente una revisión detallada de los conceptos relacionados con la fabricación de joyas a partir del método de pre engaste, al igual que las técnicas de caracterización de la materia prima empleada en la elaboración del revestimiento. La información se tomó de artículos científicos, tesis de grado, libros, normas y páginas de internet, haciendo uso de la base de datos de la UIS.

4.2. ETAPA 2: ADQUISICIÓN DE MATERIA PRIMA

Se obtuvieron las cantidades necesarias de yeso de alta pureza, agua destilada y minerales refractarios (chamota y magnesita), con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en la investigación.

4.2.1. Especificaciones de la materia prima

- Agua destilada y/o des-ionizada:

Antes de la elaboración de las probetas, se realizó medición de pH al agua destilada empleada en la elaboración de las mezclas refractarias, con el fin garantizar que las propiedades del revestimiento se mantuvieran lo más constante posibles. El pH medido fue 7,5.

- Yeso tipo alfa:

El yeso empleado fue sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) de 99% de pureza, tipo alfa, de color blanco y estado físico sólido (polvo). La ficha de datos técnicos se encuentra en el Anexo A. La composición elemental entregada por el proveedor fue corroborada tomando una muestra del yeso y analizándola mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Para esto, se empleó un Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de rayos-X, marca BRUKER (ver resultados en el Anexo B).

- Material Refractario:

Se escogieron dos tipos de refractarios de acuerdo a su accesibilidad y a su gran estabilidad química y térmica: MAGNESITA, proveniente de la empresa Magnesita Refractarios S.A., y CHAMOTA proveniente de la empresa ERECOS S.A. (ver fichas técnicas en el ANEXO A). De igual forma, se realizó Fluorescencia de Rayos X para verificar los datos proporcionados por el proveedor (ver ANEXO B).

4.2.2. Preparación del refractario

Debido a que la chamota fue adquirida en forma de ladrillos de dimensión 9" de alta alúmina, fue necesario llevar a cabo un procedimiento de reducción de tamaño de partícula hasta malla #200. Para esto, los ladrillos se sometieron a trituración mediante una trituradora de mandíbula, luego se sometieron a molienda en un Molino de bolas durante 2 horas y finalmente se llevaron a un tamizador mecánico. Esto fue realizado con el fin de proporcionar un buen copiado al momento de realizar las probetas.

Por otra parte, la magnesita fue adquirida en polvo de granulometría malla #65; sin embargo, fue sometido al molino de bolas durante 2 horas y a posterior tamizado hasta malla #200 con el fin de obtener un polvo de granulometría más fina.

Los equipos empleados en la reducción de tamaño de partícula se encuentran ubicados en el Laboratorio de Beneficio de minerales de la Universidad Industrial de Santander.

4.3. ETAPA 3: PREPARACIÓN DEL NUEVO REVESTIMIENTO

En esta etapa se establecieron las mejores condiciones para realizar la mezcla, cumpliendo con los requerimientos básicos que debe tener un revestimiento para uso en joyería.

4.3.1. Determinación de los constituyentes del nuevo revestimiento

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se obtuvo que los revestimientos de yeso usados en joyería tienen una composición aproximada de 25 % de yeso

(CaSO₄) y 75 % de material refractario. Se recomienda una a:p en un rango limitado de 38 a 42 ml por cada 100 g de polvo, dependiendo del prototipo a colar, ya sea para detalles gruesos o finos, respectivamente. [22]

Debe tenerse en cuenta que la proporción de yeso/refractario es diferente entre el uso de magnesita y el de chamota, debido a la naturaleza de esta última. Para establecer el porcentaje adecuado de la chamota como refractario, fue necesario realizar pruebas preliminares que permitieron obtener tiempos de trabajo y de fraguado cercanos a los proporcionados por el revestimiento de yeso comercial usado en joyería. Inicialmente, al emplear el porcentaje de refractario sugerido en la literatura, se observó que la mezcla tenía un comportamiento lodoso y no alcanzaba el fraguado. Por consiguiente, de manera experimental, se elaboraron mezclas disminuyendo el porcentaje de chamota y aumentando el porcentaje de yeso en intervalos de 5 % hasta lograr un material consistente. Cuando se alcanzó una mezcla con una relación 50 % de yeso y 50 % de chamota, la mezcla comenzó a mostrar un cierto comportamiento favorable, sin embargo, aún no era completamente adecuada.

A partir de esto, se realizaron ensayos experimentales variando la cantidad de yeso y la cantidad de material refractario, en porcentajes por encima y por debajo de lo recomendado en la literatura. Las mezclas finales para cada revestimiento se encuentran registradas en la Tabla 1.

Finalmente, se consiguió crear un revestimiento de yeso y chamota, completamente nuevo y diferente a lo encontrado en la literatura. Por consiguiente, se estudiaron tres relaciones yeso / chamota como se muestra en la Tabla 1, es importante resaltar que se trata de un revestimiento cuya cantidad de aglomerante es superior a la cantidad de refractario.

Las mezclas en seco de cada relación yeso/refractario fueron realizadas en un tambor giratorio durante 45 minutos cada una, para asegurar una distribución

uniforme de partículas, evitando la formación de aglomerados tanto de yeso como de refractario.

Tabla 1. Relación de porcentajes de mezcla yeso/refractario.

Mezcla	Materia prima	Proporción	Mezcla	Materia prima	Proporción
# 1	Magnesita	80%	# 1	Chamota	20%
	Yeso	20%		Yeso	80%
# 2	Magnesita	75%	# 2	Chamota	30%
	Yeso	25%		Yeso	70%
# 3	Magnesita	70%	# 3	Chamota	40%
	Yeso	30%		Yeso	60%

La literatura establece una relación a:p entre 38 y 42 ml de agua por cada 100 g de polvo. Para el presente trabajo, se estableció un rango partiendo de una relación de 38:100 y posteriormente, se aumentó la cantidad de agua observando la fluidez de la mezcla y su comportamiento durante el mezclado. Como se observa en la Tabla 2, los valores establecidos se encuentran por encima de dicho rango debido a que las mezclas de estudio requirieron mayor cantidad de agua para proporcionar condiciones adecuadas de mezclado. Sin embargo, no se emplearon relaciones a:p por encima de 60:100 debido a que el tiempo de fraguado se incrementaba al aumentar la cantidad de agua, lo cual se evidencia en los resultados obtenidos para el tiempo de trabajo y el tiempo de fraguado.

Tabla 2. Relaciones de agua - polvo.

Revestimiento	a:p
Magnesita/Yeso	52:100
	54:100
	56:100
	58:100
	60:100

Revestimiento	a:p
Chamota/Yeso	42:100
	46:100
	50:100
	54:100
	58:100

4.3.2. Elaboración de mezclas según técnica de preparación

Las mezclas se prepararon por medio de la técnica convencional que consiste en adicionar lentamente el polvo al agua y someterla a mezclado mecánico por un tiempo determinado. Para la agitación de la pasta se empleó una batidora de pedestal Mixmaster marca OSTER. El polvo fue agregado al agua haciendo uso de un tamiz con el fin de evitar el paso de posibles aglomerados, promoviendo así un mezclado más homogéneo.

Además, a partir de la revisión bibliográfica realizada, se estableció el tiempo de remojo y el tiempo de mezclado con sus respectivas velocidades de agitación, para evaluar el comportamiento de cada pasta, como se muestra en la Tabla 3. Estos valores se mantuvieron constantes para la elaboración de las probetas de los dos revestimientos estudiados, el de base magnesita y el de base chamota.

Tabla 3. Duración y velocidad de remojo y mezclado.

	Duración [min]	Velocidad [rpm]
Tiempo de Remojo	1,30	274
Tiempo de Mezclado	2,30	876

4.3.3. Fabricación de las probetas

Para la elaboración de las probetas de yeso se utilizaron tres (3) cilindros de acero inoxidable de 2 pulgadas de altura por 2 pulgadas de diámetro interno, rectificadas con pendiente de desmoldeo y bases de caucho vulcanizado. Las medidas corresponden a las probetas de arenas de la norma AFS (Sociedad Americana de Fundidores) [18].

Se elaboraron 3 probetas por cada mezcla y 3 probetas por cada relación $a:p$ para realizar varias mediciones y obtener un valor promedio que proporcione una medida confiable [13]. El procedimiento empleado en la elaboración de las probetas se muestra en el Anexo D.

4.4. ETAPA 4: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS. FASE 1: EN VERDE

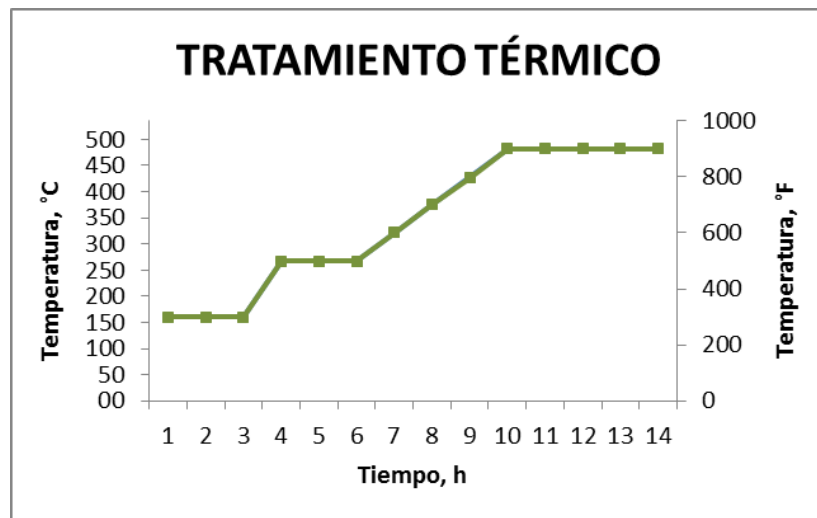
Durante esta etapa se registró el tiempo de trabajo y el tiempo de fraguado (inicial y final) de cada una de las mezclas propuestas durante la elaboración de las probetas.

El tiempo de trabajo fue medido, haciendo pasar una pequeña cantidad de mezcla de un recipiente a otro cada 15 segundos. El tiempo fue leído cuando el revestimiento llegó a ser lo suficientemente espeso como para que no se derramara de una taza a la otra. La medida del tiempo de fraguado, se realizó según R&R Procedures ASTM C 472-90 mediante el Test Vicat [10].

4.5. ETAPA 5: TRATAMIENTO TÉRMICO DEL NUEVO REVESTIMIENTO

Algunos autores recomiendan que para el pre engaste de gemas con inclusiones, el horno no debe exceder los 483°C (900 °F) y debe existir un largo sostenimiento a la máxima temperatura. El tratamiento térmico típico que muestra el autor Menon se describe en la figura 2 [20]; y de esta forma se llevó a cabo en el desarrollo del presente trabajo.

Figura 2. Tratamiento térmico típico.



Fuente: MENON, A. y MARTIN, J. Casting gemstones in place. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1996.

Las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico para eliminar el agua (ver ANEXO D). Este se realizó en la mufla programable que se encuentra en el laboratorio de microfundición, del Grupo GIMAT.

Haciendo uso de una probeta patrón, y con ayuda de un multímetro digital con termopar, marca AMPROBE, se obtiene que la eliminación del agua inicia durante el primer sostenimiento del tratamiento térmico; es decir, 2 h a 149 °C (300 °F) y la deshidratación continúa hasta que alcanza los 260°C (500 °F). Con el largo sostenimiento a la temperatura máxima del tratamiento térmico, es decir a 483 °C (900°F), se busca garantizar un calentamiento homogéneo para toda la probeta y evitar el choque térmico al momento de la colada. El montaje realizado se muestra en la figura 3.

Figura 3. Medida de temperatura de deshidratación del revestimiento durante el tratamiento térmico.



4.6. ETAPA 6: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS. FASE 2: EN SECO

Después de realizado el tratamiento térmico, se determinó el valor de permeabilidad para cada probeta, según norma AFS, la cual es empleada para el ensayo de arenas de fundición; para esto se utilizó un permeámetro eléctrico de lectura directa, marca Dietert Detroit. Adicionalmente, la resistencia a la compresión, fue medida a partir de la máquina universal de ensayos AFS, Harry W. Dietert Serie 33624.

Posteriormente, se realizó la caracterización morfológica de los moldes mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM). Este análisis mostró la textura de las probetas cerámicas y forma, tamaño y distribución de los poros.

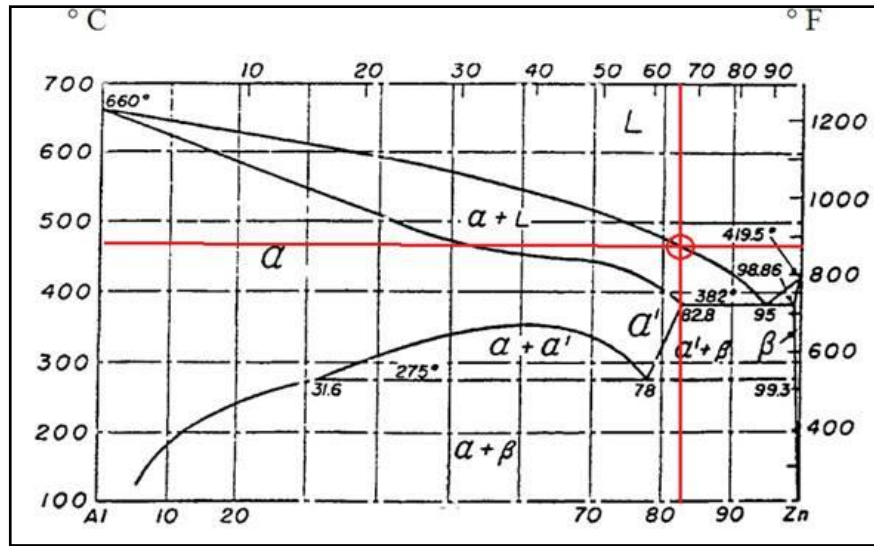
Para llevar a cabo estas pruebas, previamente, las muestras fueron montadas sobre una resina. Luego fueron sometidas a una serie de lijas y paños, utilizando una Pulidora Mecatech 334 marca Presi hasta lograr una superficie lisa y uniforme.

Con base en los resultados obtenidos mediante los ensayos de permeabilidad y resistencia a la compresión, así como las pruebas realizadas mediante SEM, se seleccionó la mezcla que presentó las condiciones de trabajo más similares a las mostradas por un yeso comercial con el fin de emplearla en la realización de los prototipos. Estas condiciones de trabajo fueron halladas por la autora del presente trabajo, haciendo uso de probetas elaboradas con Revestimiento Diamante Kerr (ver ANEXO E).

4.7. ETAPA 7: VERIFICACION MEDIANTE REALIZACIÓN DE PROTOTIPOS

La colada fue realizada empleando una aleación 16Al-Zn. En la figura 4 es posible observar el diagrama binario Al-Zn que se empleó para establecer la composición de la aleación, teniendo en cuenta su temperatura de fusión (~ 480 °C). Por otra parte, la temperatura de colada utilizada fue de ~ 580 °C, debido a que es recomendable usar un sobrecalentamiento por encima de la temperatura de fusión de la aleación; adicionalmente, se consideró que una temperatura excesiva origina un consumo innecesario de energía en la fusión y desgaste del refractario, mientras que una temperatura insuficiente disminuye la fluidez. [4, 21]

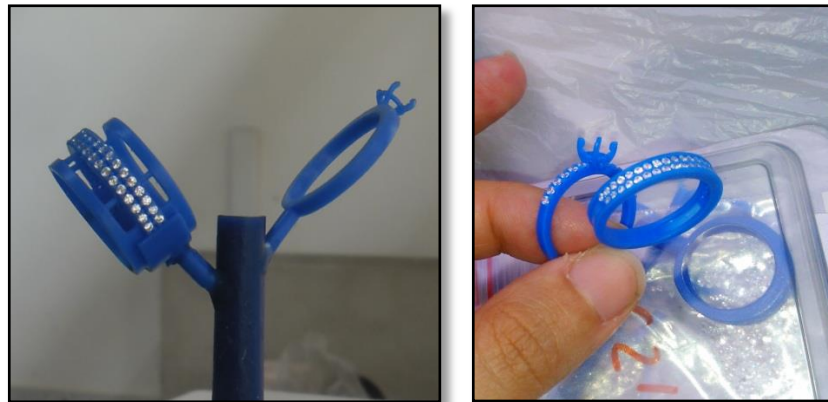
Figura 4. Diagrama binario Al-Zn.



Fuente: Aluminio – Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta: 11 de Julio de 2014].
Disponibile en: <http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html> [2]

Para la elaboración del prototipo final, se utilizaron piedras de Zircón de 1,5 mm y 1,25 mm de diámetro para dos diseños diferentes de anillos, los cuales son mostrados en la figura 5.

Figura 5. Zircones pre engastados en el modelos de cera.



La aleación se fundió en un horno eléctrico de resistencia al vacío ubicado en el laboratorio de microfundición de la Universidad Industrial de Santander. Para esto, se llevó a cabo el descerado durante la primera etapa del tratamiento térmico realizado; es decir, a una temperatura progresiva cercana a los 130 °C y posteriormente se verificó que las piedras no salieran del molde.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. MEDICIÓN DEL TIEMPO DE TRABAJO Y TIEMPO DE FRAGUADO

5.1.1. Revestimiento de yeso a base de magnesita

Las tablas 4, 5 y 6 muestran los tiempos de trabajo y tiempos de fraguado, obtenidos a partir de las tres relaciones yeso/magnesita estudiadas (20/80, 25/75 y 30/70, respectivamente). Estos tiempos fueron hallados en minutos al variar la relación $a:p$ para cada mezcla de estudio.

Los resultados registrados en la Tabla 4, mostraron excesivos tiempos de fraguado, lo cual puede generar un aumento innecesario de tiempo en la producción de joyas. Esto se debe al bajo contenido de yeso, que cumple la función de aglomerante, generando un retraso en el proceso de fraguado.

Tabla 4. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 20% Yeso – 80% Magnesita.

MEZCLA # 1: 20 % de Yeso - 80 % de Magnesita			
a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Test Vicat	
		Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
52:100	26,00	26,00	30,00
54:100	25,00	30,00	36,00
56:100	26,00	32,00	42,00
58:100	34,00	40,00	42,00
60:100	38,00	40,00	44,00

Las probetas realizadas con esta relación yeso/magnesita mostraron gran cantidad de marcas de agua en la interfaz cilindro - revestimiento como se observa en la figura 6 y podrían aparecer igualmente en la interfaz revestimiento – pieza. Estas marcas de agua aparecen una vez el molde solidifica, debido a que ocurre la separación de agua indicando, a su vez, que a mayor tiempo de fraguado se

intensifican más dichas marcas de agua, que además producen una superficie más rugosa y débil [9]. Adicionalmente, es posible observar que aunque las probetas fueron enfriadas lentamente dentro de la mufla, sufrieron agrietamiento debido al choque térmico, lo cual puede ser atribuido a que la magnesita presenta una elevada capacidad calorífica permitiéndole almacenar calor en el interior de las probetas. [5] Estas grietas se apreciaron en todas las mezclas elaboradas con magnesita y se muestran en la figura 6, 7 y 8.

Figura 6. Fotografía de las probetas con Mezcla 20% yeso – 80% magnesita.



Los resultados registrados en la Tabla 5 muestran que al adicionar 5 % de yeso a la mezcla, se logra obtener tiempos similares a los ofrecidos por el yeso comercial, que se muestra en el ANEXO E.

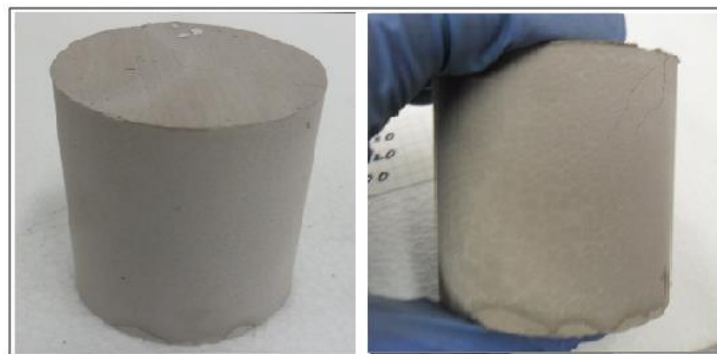
En todas las probetas realizadas con esta relación yeso/magnesita, se observa claramente que la $a:p$ tiene una gran influencia con respecto al tiempo de fraguado, debido a que este aumenta a medida que la relación $a:p$ lo hace, así como ocurrió con la mezcla # 1. Particularmente, las probetas elaboradas con $a:p$ de 60:100, mostraron una altura excesiva durante el vacío, lo que causa que se derrame el material de la probeta durante el vacío. Esto permite predecir que se presentaría la misma situación para relaciones superiores a 60:100, por lo cual valores por encima de este no pueden ser empleados en joyería.

Tabla 5. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 25% yeso – 75% magnesita.

MEZCLA # 2: 25 % de yeso - 75 % de magnesita			
a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Test Vicat	
		Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
52:100	9,00	12,00	14,00
54:100	12,00	16,00	18,00
56:100	14,00	16,00	19,00
58:100	14,00	14,00	23,00
60:100	16,00	18,00	23,00

Por otra parte, las mezclas mostraron una excelente capacidad de vertimiento en el cilindro empleado para la fabricación de las probetas, lo cual podría facilitar el copiado de detalles finos del prototipo de cera. Además, en la figura 7 se puede observar que las marcas de agua se mostraron menos intensificadas que las obtenidas con la mezcla # 1 y, a su vez, se obtuvo menor rugosidad.

Figura 7. Fotografía de las probetas con mezcla 25% yeso - 75% magnesita.



Los resultados registrados en la Tabla 6 muestran que al aumentar el contenido de yeso, respecto a las mezclas 1 y 2, se logra obtener tiempos de trabajo y de fraguado menores a los ofrecidos por las mismas. Sin embargo, el tiempo de

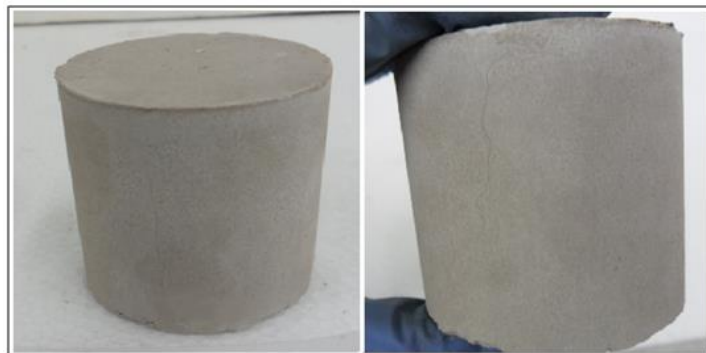
fraguado resulta ser demasiado corto, limitando el tiempo requerido para verter la mezcla en la probeta.

Tabla 6. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 30% yeso – 70% magnesita.

MEZCLA # 3: 30 % de yeso - 70 % de magnesita			
a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Test Vicat	
		Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
52:100	-	-	-
54:100	-	-	-
56:100	3,00	5,00	7,00
58:100	8,00	11,00	12,00
60:100	14,00	16,00	18,00

Por otra parte, al aumentar la cantidad de yeso se disminuyó la formación de marcas de agua, permitiendo obtener superficies más lisas, como se muestra en la figura 8. Cuando la relación *a:p* está por debajo de 54:100, la cantidad de agua no es suficiente para un mezclado exitoso, permitiendo la formación de aglomerados secos e impidiendo la elaboración de las probetas. Con una *a:p* de 56:100 el fraguado es casi inmediato al vacío.

Figura 8. Fotografía de las probetas con mezcla 30% yeso - 70% magnesita.



Finalmente, el mejor comportamiento se observa en la Mezcla # 2 debido a que presenta tiempos de trabajo y de fraguado similares a los del yeso comercial.

5.1.3. Revestimiento de yeso a base de chamota

Las tablas 7, 8 y 9 muestran los tiempos de trabajo y tiempos de fraguado, obtenidos a partir de las tres relaciones yeso/ chamota estudiadas (80/20, 70/30 y 60/40, respectivamente). Estos tiempos fueron hallados en minutos al variar la relación $a:p$ para cada mezcla de estudio. Es importante resaltar que el porcentaje de yeso es mayor con relación a las mezclas de magnésita debido a que la matriz de la chamota es porosa, mientras que la de magnésita no lo es.

La Tabla 7 muestra los tiempos de trabajo y de fraguado obtenidos para una mezcla de 80% yeso y 20% chamota. Para una relación $a:p$ de 42:100 no fue posible registrar los tiempos debido a que esta cantidad de agua fue muy baja, proporcionando una mezcla altamente viscosa que fraguó inmediatamente después de haber finalizado el tiempo de mezclado. Al aumentar la cantidad de agua, las mezclas se tornaron más fluidas; sin embargo, fraguaron durante el vacío o inmediatamente después debido al alto contenido de yeso.

Tabla 7. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 80% yeso – 20% chamota.

MEZCLA # 1: 80 % de yeso - 20 % de chamota			
a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Test Vicat	
		Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
42:100	-	-	-
46:100	3,00	4,00	6,00
50:100	4,30	6,00	7,00
54:100	5,45	7,00	8,00
58:100	6,00	7,00	9,00

La figura 9, muestra una de las probetas desmoldeadas y permite observar aberturas de gran tamaño causadas por burbujas de aire que quedaron atrapadas debido al rápido fraguado; además, durante el vacío, el revestimiento no subió mucho como todos, es decir que no hubo suficiente salida de aire. Esto hace que la relación yeso/chamota (80/20) no sea adecuada para el uso en joyería.

Figura 9. Fotografía de las probetas con mezcla 80% yeso - 20% chamota.



En la Tabla 8 se puede observar que al reducir la cantidad de yeso en un 10 %, la mezcla presenta tiempos de trabajo adecuados para la elaboración de moldes debido a que puede ser vertida con buena fluidez. Así mismo, el resultado del Test Vicat es favorable con relaciones $a:p$ superiores a 42:100, debido a que la pequeña diferencia entre el tiempo de fraguado inicial y final, evita la formación de marcas de agua. Para una relación $a:p$ entre 46:100 y 54:100, las alturas que alcanzaron las mezclas durante el vacío, no excedieron la altura del encintado de los cilindros.

Después de aplicar el tratamiento térmico y de realizar el desmoldeo de las probetas, se observan superficies lisas en la interfaz cilindro – revestimiento, como se muestra en la figura 10. Además, es posible observar que la superficie está libre de grietas, marcas de agua y que evidencia facilidad de copiado de detalles, lo cual es deseable para el uso en joyería.

Tabla 8. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 70% yeso – 30% chamota.

MEZCLA # 2: 70 % de yeso - 30 % de chamota			
a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Test Vicat	
		Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
42:100	5,30	6,00	7,00
46:100	6,30	9,00	10,00
50:100	7,30	9,00	10,00
54:100	9,45	12,00	14,30
58:100	13,15	15,00	16,00

Figura 10. Fotografía de las probetas con mezcla 70% yeso - 30% chamota.



La Tabla 9 muestra los tiempos de trabajo y de fraguado obtenidos para una mezcla de 60 % yeso y 40 % chamota. A partir de esta, es posible observar que la mezcla no es recomendada para elaboración de moldes, debido a que los largos tiempos de fraguado de la mezcla producirán severas marcas de agua y defectos en la pieza.

En las probetas con *a:p* de 42, 46 y 50 mL por cada 100 g de revestimiento, se observa la formación de una capa de agua en la parte superior, la cual puede ser formada debido a la sobrehidratación de las moléculas de CaSO_4 y a la precipitación de la chamota. La figura 11 tanto la capa de agua, como la textura de

la parte superior de las probetas una vez ha fraguado. Además, es posible observar ampollas, causadas por burbujas de aire que quedaron atrapadas en el interior de la probeta.

Tabla 9. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla 60% yeso – 40% chamota.

MEZCLA # 3: 60 % de yeso - 40 % de chamota			
a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Test Vicat	
		Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
42:100	17,00	19,00	25,00
46:100	17,30	19,00	26,00
50:100	22,00	25,00	33,00
54:100	30,00	48,00	-
58:100	-	-	-

Figura 11. Fotografía de las probetas con mezcla 60% yeso - 40% chamota.



Al comparar los revestimientos de magnesita y de chamota estudiados, es posible observar que los de magnesita presentan marcas de agua, superficies rugosas y gran cantidad de grietas después de realizar el tratamiento térmico, lo cual puede causar fallas durante la colada de las piezas de joyería y por lo tanto, no son

recomendables para el trabajo en joyería. Por otra parte, los revestimientos de chamota presentan una superficie libre de marcas de agua y lisa. Particularmente la mezcla # 2 del revestimiento yeso/chamota, presenta las mejores condiciones de trabajo debido a que permite obtener mezclas con buena fluidez y sus tiempos de trabajo y de fraguado son similares a los mostrados en un yeso comercial; además, el vacío empleado es suficiente para liberar el aire atrapado dentro de la probeta sin causar la salida del revestimiento.

5.2. MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

5.2.1. Revestimiento de yeso a base de magnesita

La Tabla 10 muestra los valores de permeabilidad AFS obtenidos para las tres mezclas elaboradas con magnesita (20/80, 25/75 y 30/70).

Tabla 10. Permeabilidad del revestimiento a base de magnesita.

Permeabilidad [AFS]			
a:p	MEZCLA # 1: 20 % Yeso 80 % Magnesita	MEZCLA # 2: 25 % Yeso 75 % Magnesita	MEZCLA # 3: 30 % Yeso 70 % Magnesita
52:100	2,5	3	-
54:100	3	3,5	-
56:100	5	4	-
58:100	5	4	5
60:100	6	5	6

Es posible observar que estas mezclas arrojaron valores entre 2,5 y 6 AFS, resultando en moldes poco permeables, lo cual indica la necesidad de utilizar vacío para poder colar los moldes para el trabajo en joyería, debido a que resultarían en una colada sin éxito porque los gases no podrían escapar del interior del molde y es posible un retroceso del metal líquido.

Por otra parte, no fue posible determinar el valor de la resistencia a la compresión de las probetas, debido a que estas permanecieron intactas aun cuando fueron sometidas a la carga máxima de operación de la máquina universal de ensayos. Esto significa que los valores de resistencia a la compresión de las probetas elaboradas con magnesita, se encuentran por encima de 96 kg/cm^2 . Además, considerando que la permeabilidad es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión, es posible predecir que estas probetas tendrían alta resistencia después de la cocción lo que permitirá colar piezas más gruesas; sin embargo, se requeriría mayor esfuerzo para remover el revestimiento de la pieza fundida lo que podría generar daños mecánicos en la superficie de piezas pequeñas.

Adicionalmente, al obtener valores altos de resistencia a la compresión, es posible deducir que el agrietamiento que sufren las probetas después del tratamiento térmico, solamente es a nivel superficial. Sin embargo, el agrietamiento es uno de los principales factores por los que se descarta el revestimiento a base de magnesita para uso en joyería, debido a que el molde no podría resistir las presiones que ejerce el metal durante la colada y causar desprendimiento del revestimiento.

5.2.2. Revestimiento de yeso a base de chamota

La tabla 11 muestra los valores de permeabilidad AFS obtenidos para las tres mezclas elaboradas con chamota (80/20, 70/30 y 60/40). Es posible observar que para la Mezcla # 1, solo se obtuvieron los valores de permeabilidad para las probetas con $a:p$ por encima de 54:100, debido a que no fue posible la elaboración de probetas para relaciones $a:p$ por debajo de este valor porque la mezcla no quedaba completamente húmeda. Sin embargo, la mezcla # 2, muestra resultados de permeabilidad adecuados debido a que son cercanos a los obtenidos con el yeso comercial (ver ANEXO E).

Tabla 11. Permeabilidad del revestimiento a base de chamota.

Permeabilidad [AFS]			
a:p	MEZCLA # 1: 80 % Yeso 20 % Chamota	MEZCLA # 2: 70 % Yeso 30 % Chamota	MEZCLA # 3: 60 % Yeso 40 % Chamota
42:100	-	3	-
46:100	-	7	-
50:100	-	11	-
54:100	5	13	-
58:100	6	23	-

Por otra parte, las probetas de la mezcla 3 son tan débiles, que algunas se desmoronaban al manipularlas y otras al ser sometidas al proceso de medición en el permeámetro no resistieron la pequeña presión que este requiere para sujetarlas, como se observa en la figura 12.

Figura 12. Daño de probeta Mezcla 3.



Los valores obtenidos de resistencia a la compresión en seco de las probetas a base de chamota se muestran en la Tabla 12. En general, es posible observar que a medida que la relación *a:p* aumenta, la resistencia a la compresión disminuye debido a que la permeabilidad también aumenta, como se mostró en la Tabla 11.

En la mezcla #1, los valores de resistencia a la compresión para una a:p por debajo de 50:100 no son confiables, debido a las aberturas y a la irregularidad que presenta la superficie de las probetas. Para una relación de a:p de 50:100 los valores se encuentran por encima de 96 Kg/cm² resultando en un molde muy duro.

A pesar de que la mezcla # 2 ha mostrado los mejores resultados a lo largo de la investigación, muestra valores de resistencia a la compresión elevados, lo cual permite deducir que el revestimiento podría ser más difícil de romper después de la colada, en relación con el yeso comercial. Sin embargo, los resultados demuestran que es una mezcla que resiste elevadas temperaturas durante el tratamiento térmico y por ende resistirá la presión que se ejercería durante la fundición.

Tabla 12. Datos de Resistencia a la compresión en seco. Revestimiento a base de chamota.

Resistencia a la compresión [kg/cm2]			
a:p	MEZCLA # 1: 80 % Yeso 20 % Chamota	MEZCLA # 2: 70 % Yeso 30 % Chamota	MEZCLA # 3: 60 % Yeso 40 % Chamota
42:100	-	> 96	20
46:100	-	91	16
50:100	-	90	< 5
54:100	> 96	87	-
58:100	93	84	-

De forma contraria, la mezcla # 3 es descartada debido a que los valores de resistencia a la compresión son muy bajos, lo que resulta en un material que no muestra buenas aptitudes para ser usado en joyería debido a que la mezcla no resistirá altas temperaturas durante el tratamiento térmico y por ende no resistirá la presión durante el proceso de fundición.

Finalmente, al comparar los revestimientos de magnesita y de chamota estudiados, es posible observar que los elaborados con magnesita presentan valores más bajos de permeabilidad AFS en relación con los revestimientos de chamota; mientras que los valores de resistencia a la compresión se mostraron por encima de 96 Kg/cm^2 indicando que podría soportar la presión de colada pero a su vez, dificultaría el desmoldeo de la pieza fundida, por lo cual no se considerará su uso en la elaboración del prototipo. Otra razón por la cual se descarta el uso de las mezclas con magnesita es el agrietamiento por choque térmico. Por otra parte, los revestimientos base chamota mostraron buena permeabilidad y resistencia a la compresión indicando que son aptos para aplicaciones en joyería; particularmente, la mezcla # 2 mostró los mejores resultados para dicha aplicación, empleando una relación $a:p$ entre 46:100 y 50:100.

5.3. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

Una vez establecido el revestimiento que presenta el mejor comportamiento para emplearlo en joyería, se realizó una caracterización morfológica con el fin de observar la distribución, forma y tamaño de los poros.

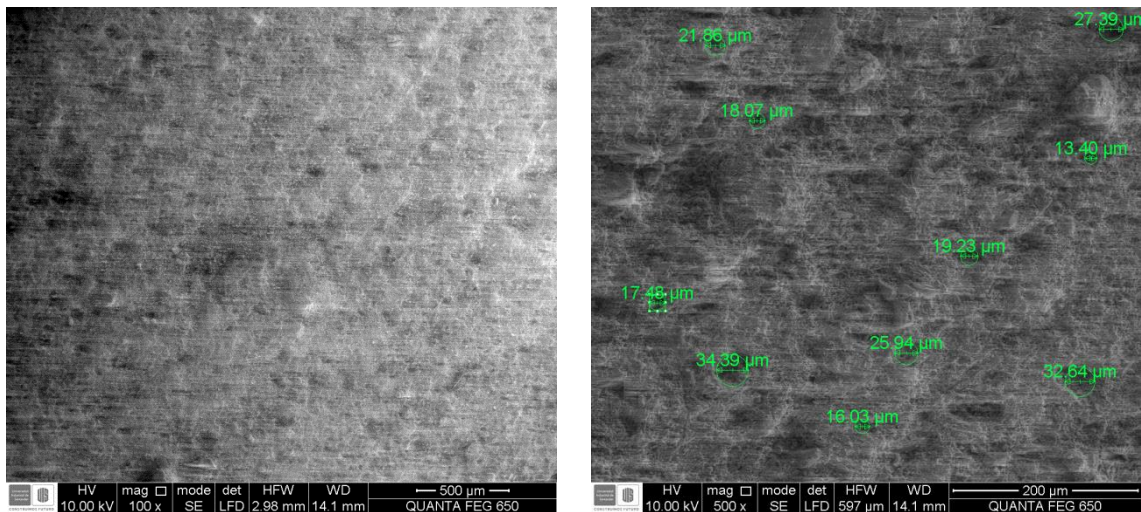
En las figura 13 a la 16, se muestran las micrográficas obtenidas a 100X y 500X aumentos mediante SEM, de los revestimientos base chamota elaborados con la mezcla # 2 (70/30) para relaciones $a:p$ de 42:100, 46:100, 50:100 y 54:100. Las probetas con relación $a:p$ de 58:100 no fueron evaluadas mediante SEM debido a que sus poros eran visibles a simple vista, sin el uso de instrumentos auxiliares.

Al observar las micrográficas del revestimiento mostradas en la figura 13 a la 16, es posible notar el efecto que tuvo la adición de agua sobre la mezcla de 70% yeso y 30% chamota. Las micrográficas muestran que a medida que aumentaba la cantidad de agua, el recubrimiento mostraba poros con forma más definida pero de tamaños diferentes. Es decir, las probetas con relación $a:p$ de 42:100 y 46:100 presentan tamaños de poros pequeños y similares entre ellos; mientras que las

probetas con relación $a:p$ de 46:100 y 50:100 presentan diversidad en los tamaños de poros mostrando unos muy pequeños y otros muy grandes. Este efecto se hace más notorio a medida que aumenta dicha relación.

Sin embargo, las probetas con relación $a:p$ de 42:100, cuyas micrografías se muestran en la figura 13, no son recomendables para uso en joyería debido a que presenta baja cantidad de poros y su tamaño es muy pequeño, lo que confirma la baja permeabilidad obtenida y permite predecir un retroceso del metal en el momento de la colada.

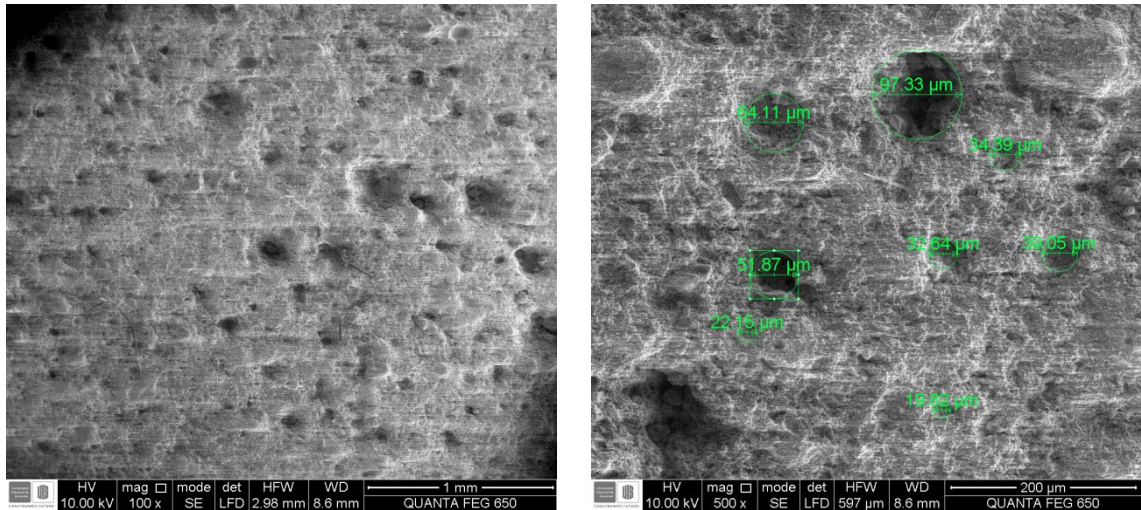
Figura 13. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y $a:p$ de 42:100 (a) A 100X (b) A 500X.



Fuente: Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650

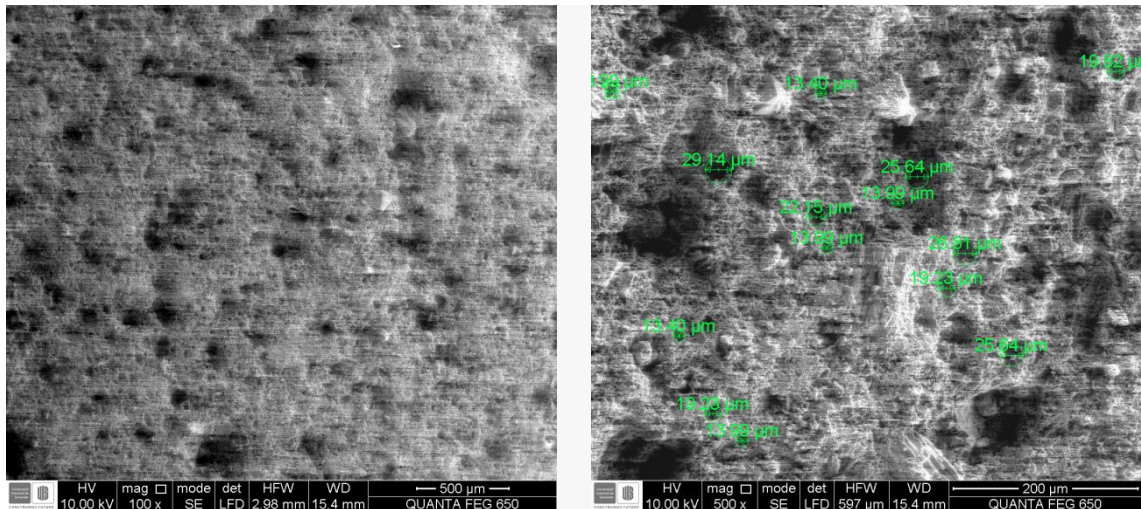
Por otra parte, las probetas con relación $a:p$ de 46:100 y 50:100, cuyas micrografías se muestran en la figura 14 y 15, son recomendables para uso en joyería debido a que presentan una considerable cantidad de poros y no existe gran diferencia de tamaño entre los mismos. Con estos resultados se esperaría buen acabado superficial de las piezas fundidas y un llenado exitoso.

Figura 14. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y a:p de 46:100 (a) A 100X (b) A 500X.



Fuente: Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650

Figura 15. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y a:p de 50:100 (a) A 100X (b) A 500X.

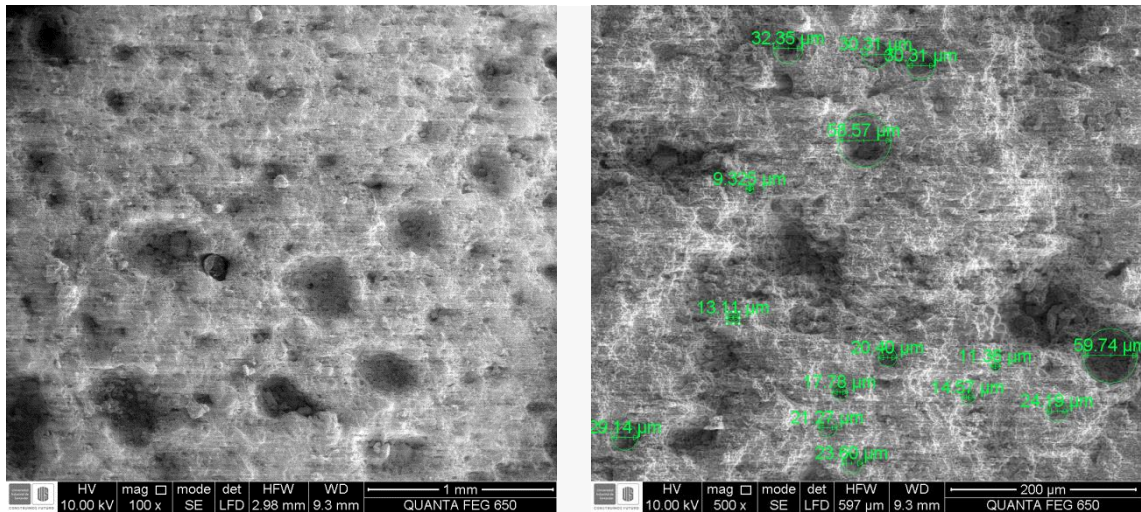


Fuente: Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650

Por último, las probetas con relación a:p de 54:100, cuyas micrografías se muestran en la figura 16, tampoco son recomendables para uso en joyería debido a que presentan gran diferencia en el tamaño de los poros presentes

proporcionando una inadecuada distribución de los mismos y gran cantidad de defectos en la pieza fundida.

Figura 16. Micrografías SEM de las probetas de mezcla 70% yeso – 30% chamota y *a:p* de 54:100 (a) A 100X (b) A 500X.



Fuente: Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650

5.4. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

A partir de los resultados obtenidos durante la investigación realizada, se seleccionó la mezcla #2 del revestimiento de yeso a base de chamota preparada con una *a:p* de 50:100, debido a que mostró condiciones de trabajo y propiedades adecuadas para ser empleada en joyería. La preparación del molde se llevó a cabo a partir del procedimiento mostrado en el ANEXO D.

Para realizar la colada se elaboró un molde utilizando un cilindro de acero con agujeros usado especialmente en microfundición, el cual cuenta con una base de goma donde se monta el árbol en cera. Los anillos son de diseños diferentes, variando la forma, tipo de engaste y tamaño de las gemas, como se observa en la figura 17.

Figura 17. Elaboración del molde con árbol en cera.



Una vez finalizó el fraguado, el molde fue sometido al tratamiento térmico señalado en el numeral 4.5 del presente trabajo. Al finalizar el tratamiento térmico, se garantizó la completa eliminación del agua.

Se realizaron tres coladas modificando los parámetros de fusión, como se muestra en las tablas 13, 14 y 15.

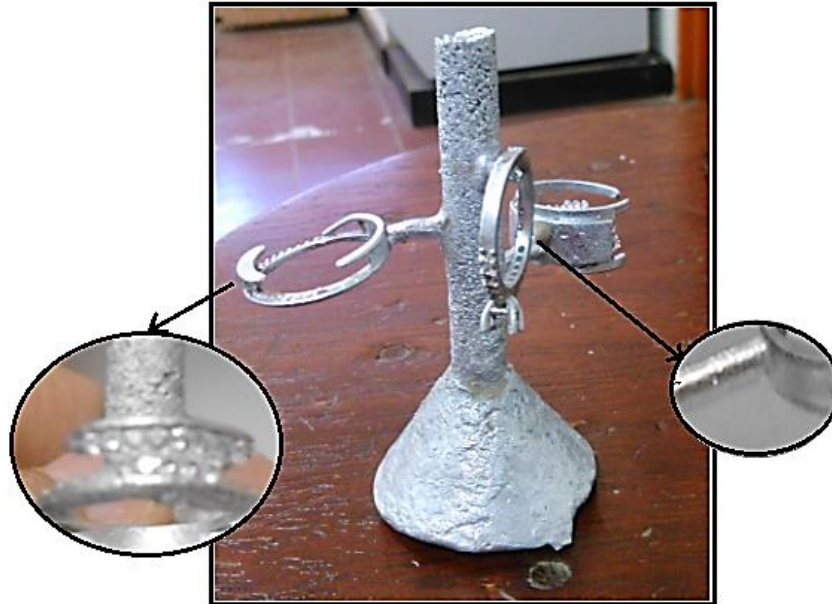
Tabla 13. Parámetros de fusión de la colada 1.

Vacío	No
Molde permeable	Yeso/Chamota
Permeabilidad	~ 10 AFS
Granulometría	Malla # 200
Temperatura del molde	~ 200 °C
Temperatura de fusión	480°C
Temperatura de colada	580°C

La pieza obtenida a partir de la colada realizada con los parámetros señalados en la Tabla 13, se muestra en la figura 18. Aunque los anillos no salieron completos, se puede evidenciar que la temperatura de colada parece ser la adecuada, debido a que el anillo que se encontraba a mayor distancia del bebedero fue llenado casi

en su totalidad; por lo tanto el llenado incompleto puede ser atribuido a la ausencia de vacío o a la baja temperatura del molde.

Figura 18. Fotografía de colada 1.



Adicionalmente, se evidencia la presencia del rechupe característico de una pieza fundida, lo que comprueba que los resultados obtenidos de permeabilidad son adecuados para emplear dicho revestimiento en joyería. Por otra parte la pieza no muestra señas de retroceso de metal ni agitación del mismo, pues se obtuvieron superficies lisas y estéticas, requeridas en joyería. Además, se observa en uno de los anillos, que la tercera parte las piedras engastadas según su diseño cumple con lo propuesto, es decir, las gemas quedaron en su lugar, se mantuvo su textura, su forma y precisión.

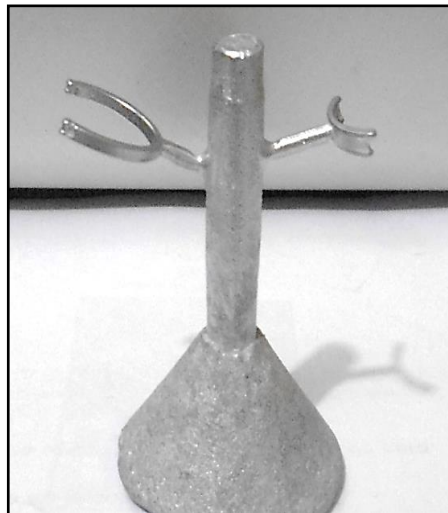
La Tabla 14 muestra los parámetros empleados para la realización de la colada 2, en la cual se aumentó la temperatura del molde a 300°C. Los resultados obtenidos se observan en la figura 19.

Tabla 14. Parámetros de fusión de la colada 2.

Vacío	No
Molde permeable	Yeso/Chamota
Permeabilidad	~ 10 AFS
Granulometría	Malla # 200
Temperatura del molde	~ 300 °C
Temperatura de fusión	480°C
Temperatura de colada	580°C

Aunque los anillos no salieron completos, se observa que al aumentar la temperatura del molde se pueden obtener piezas de mejor acabado superficial, mostrando una superficie lisa, brillante y libre de poros.

Figura 19. Fotografía de colada 2.



Los parámetros de fusión empleados para la realización de la colada 3 se muestran en la Tabla 15 y la pieza fundida obtenida se muestra en la figura 20. Se puede apreciar que al aplicar vacío durante la colada se obtuvieron anillos completos, con buen acabado superficial donde el pre-engaste de gemas fue posible.

Tabla 15. Parámetros de fusión de la colada 3.

Vacío	~ 60 mm/Hg
Molde permeable	Yeso/Chamota
Permeabilidad	~ 10 AFS
Granulometría	Malla # 200
Temperatura del molde	~ 300 °C
Temperatura de fusión	480°C
Temperatura de colada	580°C

Figura 20. Fotografía de colada 3



Finalmente, la investigación logró mostrar que el molde elaborado a base de chamota, cuya relación polvo / refractario fue establecida en esta investigación como sigue: 70 % de yeso y 30 % de chamota y relación $a:p$ es de 50:100, puede ser considerado como un revestimiento de buen comportamiento debido a que permitió disminuir la temperatura del tratamiento térmico y resiste las elevadas presiones durante la colada, logrando así, un aporte significativo para llevar a cabo la aplicación del método de pre-engaste de esmeraldas.

6. CONCLUSIONES

La naturaleza porosa de la chamota estudiada no permitió emplear una proporción yeso/refractario tal como se indica en la literatura (25/75), debido a que al utilizar esta relación, se obtuvo una mezcla con aspecto lodoso y no alcanzo el fraguado, indicando que se requiere mayor cantidad de aglomerante.

Las mezclas elaboradas con magnesita no mostraron relaciones agua:polvo favorables para su aplicación en joyería debido a que mostraron largos tiempos de fraguado, generando marcas de agua y superficies rugosas. Por otra parte, las probetas elaboradas con este revestimiento presentaron agrietamiento después de ser sometidas a tratamiento térmico, lo cual puede ser atribuido a que la magnesita presenta una elevada capacidad calorífica, lo cual genera un choque térmico al extraerlas de la mufla.

El revestimiento de yeso / chamota mostró mejor comportamiento con relaciones agua:polvo entre 46:100 y 50:100, principalmente para la mezcla con 70 % yeso y 30 % chamota, proporcionando condiciones de trabajo similares a las ofrecidas por el yeso comercial. El molde no presentó agrietamiento después de la colada y se observó buen acabado superficial de las piezas coladas.

La mayor permeabilidad fue de 23 AFS, la cual fue obtenida con el revestimiento elaborado con 70 % de yeso y 30 % de chamota y cuya relación agua:polvo fue de 58:100. Sin embargo, este aumento de permeabilidad está acompañado de un mayor tamaño de poro lo que resulta en piezas con defectos superficiales.

El revestimiento yeso/magnesita arrojó valores elevados de resistencia a la compresión (> 96 kg/cm²) en cada mezcla preparada, por lo cual estas no

pueden ser empleadas para fundición de joyería debido a que se dificulta realizar el desmoldeo causando daños mecánicos a la pieza fundida.

El prototipo obtenido demostró que el revestimiento con 70 % de yeso y 30 % de chamota y cuya relación agua:polvo es 50:100, es apto para ser usado en joyería debido a que no presentó agrietamiento después de la colada y las piezas obtenidas salieron completas, con buen acabado superficial y el pre-engaste de las gemas fue posible.

7. RECOMENDACIONES

Realizar estudios con el revestimiento a base de chamota variando la granulometría del refractario con el fin de mejorar la permeabilidad. Tener en cuenta utilizar una proporción de malla # 200 para no dañar la calidad del acabado superficial logrado en esta investigación.

Es importante eliminar toda el agua del molde antes de la fundición, para evitar que se escape metal líquido y cause defectos o incluso salpicaduras de metal fuera del molde.

Estudiar un revestimiento que contenga una relación chamota/magnesita como refractario, y yeso como aglomerante, con el fin de combinar las propiedades térmicas de los dos materiales.

Realizar mezclas yeso/magnesita con mayor contenido de aglomerante para verificar su efecto sobre el choque térmico y con ello la formación de grietas.

CITAS

- [1]. ACEVEDO, Ana y VÉLEZ, Dayana. Aplicación de recubrimientos a gemas de esmeralda en el proceso de molde en cera perdida. Método pre engaste. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- [2]. Aluminio – Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta: 11 de Julio de 2014]. Disponible en:
<http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html>
- [3]. ALVARADO, E., Producción de polvos de óxido de Magnesio a partir de diferentes precursores. 1998. Trabajo de grado (Master en Ciencias Químicas con especialidad en Ingeniería cerámica). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [4]. BAQUERO, Arnaldo. Las propiedades de la fundición. Bucaramanga. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 1998.
- [5]. BLANCO, Francisco. Lección 2. Propiedades térmicas de los refractarios. Universidad de Oviedo. España. [En línea]. [Consulta 3 de Agosto de 2014] Disponible en:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.REFRACTARIOS.PROPIEDADES.Termicas.pdf>
- [6]. BUDNIKOV, P. The technology of ceramics and refractories. Edit. The Massachusetts Institute of Technology. 1964.
- [7]. CARRILLO, V. Esmeraldas en Colombia patrimonio geológico de la humanidad. 1^{ra} Edición., Editorial Sociedad Colombiana de geología, 2009.
- [8]. CART, Christopher. Evaluating Investment Powders. pp. 369-380.
- [9]. CARTER, R., Effects of Changing the Water-To-Powder Ratio on Jewelry Investments. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2001.

- [10]. CARTER, R., Effects of Water Quality and Temperature on Investment Casting Powders. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2000.
- [11]. CRUZ, L. Horno rotatorio para tostar minerales. Bucaramanga, 1982. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. pp. 10 – 47.
- [12]. DIETER, O. Properties of investment. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. pp. 47-62.
- [13]. Folleto comercial. Metal Casting Plaster. G-P Gypsum Corporation. Bulletin 163.
- [14]. INGO, G.M., Et al. Thermochemical and microstructural study of CaSO₄ bonded investment as a function of the burnout process parameters. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry, 2000.
- [15]. JONES, S., YUAN, C. Advances in Shell Moulding for Investment Casting. En: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 135, 2003. pp. 258-265.
- [16]. KERR., Sybron Dental Specialties. Jewelry / Industrial Products. Disponible en: <<http://www.kerrcasting.com>>
- [17]. Magnesita [En línea]. [Consulta: 15 de Abril de 2014]. Disponible en:<http://www.igme.esinternetPanoramaMineroHistorico1994_95MAGIGME>
- [18]. Manual de Arenas para Fundición. American Foundrymen's Society. 1967. p. 11-12, 29-42.
- [19]. McKEER, I. Stone-in-place casting: the investment perspective. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Mayo 2004. pp. 293-309.
- [20]. MENON, A. y MARTIN, J. Casting gemstones in place. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1996. pp. 69-81.

- [21]. ROJAS, Linda, HERNANDEZ, Elkin. Recuperación de retornos de zamak niquelado para la elaboración de aleaciones con alto contenido de aluminio (Fantaxias). Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- [22]. SBORNICCHIA, P., Et al. Advances in Jewellery Microcasting. En: Thermochemica Acta, Vol. 419. 2004. pp. 195-204.
- [23]. SCHUSTER, H., RASELLI, M., Stone-in-Place Casting for High-End Jewelry. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Mayo 2008. pp. 283-294.
- [24]. SCHWARTZ, C. Chemical and physical properties of investment. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. pp. 99-106.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. CARTER, R., Does investment permeability impact jewelry castings? En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2004.
- [2]. GUERRERO, Yehimy y ESCOBAR, Hernando. Adecuación de la permeabilidad de moldes en yeso mediante la adición de espumantes y/o agitación para su aplicación al método de pre engaste de esmeraldas. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- [3]. ROCHIER, M. Les Liants Minéraux. Les Plâtres. 1re Partie. Centre Technique des Industries de la Fonderie. Vol. 273, Diciembre 1968. pp. 528-536.
- [4]. YAMAN, B., CIGDEM, M. Effect of particle size variations of gypsum bonded investment powders on metallurgical quality of investment castings. En: International Journal of Cast Metals Research, Turquía, Vol. 23, 2010. pp. 60-65.

ANEXOS

ANEXO A. Ficha de datos técnicos de materia prima empleada en la investigación.

LADRILLOS REFRACTARIOS DE ALTA ALUMINA	
BAUXAL 85	
Clasificación NTC - 773, ASTM C-27	85% de Alúmina
Análisis Químico (%)	
Al ₂ O ₃	85.0
SiO ₂	7.9
Fe ₂ O ₃	1.0
TiO ₂	2.2
CaO	0.1
MgO	0.4
Alcalis	0.1
P ₂ O ₅	3.3
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	>37
Temperatura equivalente (°C) NTC -706, ASTM C-24	>1820
Porosidad aparente (%) NTC -674, ASTM C-20	17.0 - 21.0
Densidad aparente (g/cm ³) NTC -674, ASTM C-20	2.72 - 2.82
Resistencia a la compresión en frío. Mpa (kg/cm ²) NTC -682, ASTM C-133	52.0 - 72.0 (520 - 720)
Módulo de ruptura en frío. Mpa (kg/cm ²) NTC -682, ASTM C-133	13.0 - 19.0 (130 - 190)
Cambio lineal permanente a 1600 ° C (%) NTC - 688, ASTM C - 113	0.0 - 1.0E
Deformación bajo carga en caliente a 1450 ° C (%) NTC - 1107, ASTM C - 16	1.0 - 2.0
<small>Los datos anteriores se basan en los resultados promedios de las pruebas de control sobre lotes de producción industrial de ladrillos normales prensados de 9" utilizando los procedimientos descritos en las Normas Técnicas Colombianas y ASTM donde ellas sean aplicables y no deben emplearse para efectos de especificaciones garantizadas. Pueden presentarse variaciones de los resultados dependiendo del tamaño, forma o proceso de fabricación.</small>	
E = Expansión	1993-01-17

Todos los derechos reservados © ERECO

Marca: SLAG-OPTIMIZER-L

Edição: 19.10.2010

Descrição

Óxido de magnésio em pó, reativo, obtido através da calcinação controlada da magnesita (carbonato de magnésio natural).

Aplicações Principais

É um óxido de magnésio de alta pureza, reatividade moderada, ideal para uso como corretivo de escória.

Análise Química (%)

Ensaio	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	Mg Crua
Val.Típico	94,90	1,82	1,50	0,90	0,52	0,36	
Específic.	Mínimo 94,00	Máximo 2,00	Máximo 2,00	Máximo 1,00	Máximo 0,60	Máximo 0,60	Mínimo 48,00

Propriedades Físicas Típicas

Densidade Aparente Solta (g/cm ³).....	1,00
Densidade Aparente Compactada (g/cm ³).....	1,20
Área superficial BET - (m ² /g).....	10,50
Insolúveis em HCl - (%).....	3,10

Propriedades Físicas Especificadas

Atividade Ácido Acético (seg.).....	Máximo 160
Umidade (%).....	Máximo 1,00
Resíduo em malha 65 (212µm) - (%).....	Máximo 22,00
Perda ao fogo a 1000°C x 1 h - (%).....	Máximo 12,00

Embalagem

Sacos de papel Kraft, valvulados, multifolhados para 25 kg.

Prazo de Estocagem

360 dias, desde que embalados em bags com liner e estocados em local limpo e sem umidade.

Observações

- 1 - Os ensaios são realizados de acordo com as normas: ABNT, ASTM, EN, DIN e procedimentos internos.
 - 2 - Para informações adicionais sobre segurança recomenda-se consultar a Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ da marca.
 - 3 - A exposição à umidade pode causar empedramento.
- As informações contidas nesta folha poderão sofrer alterações sem aviso prévio. Contatar nossa área comercial.



YESOS ESPECIALIZADOS DE MÉXICO S.A. DE C.V.

MANUEL JOSE OTHON No. 2025 MONTECILLO C.P. 78310 TEL (444) 816-8447 SAN LUIS POTOSI, S.L.P.
www.yesosespecializados.com

FICHA DE DATOS TÉCNICOS

1. Producto Químico e Identificación

PRODUCTO: Yeso Tipo Alfa	MARCA: ALFA LOTEADO
FAMILIA QUÍMICA: Sulfato de Calcio Hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$)	

2. Especificaciones

CONSISTENCIA TIPO (por cada 100 g polvo)	40 cc	
TIEMPO DE FRAGUADO "VICAT"	2.5 – 4 min	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	WET (1 hr)	DRY (48 hrs)
	250	600
EXPANSIÓN LINEAL DE FRAGUADO	0.1 – 0.5 %	

3. Composición e Información de Componentes

SULFATO DE CALCIO HEMIHDRATADO ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$)	> 98.0 %
MAGNESIO	< 0.02 %
SILICE	0.08 %
ALUMINIO	< 0.37 %
FIERRO	0.03 %
PLOMO	< 0.0004 %
ESTRONCIO	0.079 %
SILICIO (SiO ₂)	0.04 %

Referencia: Absorción Atómica

4. Propiedades Físicas y Químicas

Aspecto:	Blanco
Estado Físico:	Sólido (polvo)
pH @ 25°C	~ 7
Tamaño de partículas:	74 micras
Densidad :	1.5 - 2.0 g/cm ³
Solubilidad @ 25°C:	0.3 g / 100 mL
Punto de fusión:	No Aplicable

5. Identificación de Riesgos

No se considera que este producto cause riesgos inusuales durante su empleo normal. La exposición a altos niveles de polvo puede causar irritación en la piel, ojos, nariz y garganta. Al mezclarse con agua este material se endurece y se calienta, a veces con rapidez. NO INTENTE hacer vaciados de partes del cuerpo humano utilizando este material.

Ojos: El polvo aéreo o el contacto directo pueden causar irritación de los ojos.

Piel: El contacto directo, prolongado y repetido con la piel puede provocar irritación. Para evitarla, enjuague con agua hasta que la piel quede libre de material, y luego lave la piel con jabón suave y agua. La exposición repetida puede reseca la piel.

Inhalación: La inhalación de polvo puede irritar la nariz y garganta, provocando molestias como estornudos e irritación nasal.

Ingestión: Es poco probable que ocurra. El yeso alfa no es tóxico, sin embargo la ingestión de una cantidad suficiente podría producir obstrucción mecánica de los intestinos.

6. Manejo y Almacenamiento

Almacene en una zona ventilada, fresca y seca, alejada de fuentes de calor y humedad. Las condiciones de punto de rocío y de otro tipo que favorezcan la presencia de líquido endurecerán este material durante su almacenamiento. Mantenga las bolsas y otros contenedores bien cerrados para impedir el contacto con la humedad.

7. Estabilidad y Reactividad Químicas

Estabilidad: El material es estable en entornos secos, libres de humedad.

Condiciones a evitar: Contacto con ácidos, agua, humedad alta. La exposición con agua y ácidos deriva reacciones vigorosas que producen gran cantidad de calor.

Polimerización Peligrosa: No ocurre.

Descomposición Peligrosa: Más de 1450°C, Oxido de Calcio (CaO) y bióxido de azufre (SO₂).

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

SATIN CAST DIAMANTE

Investment Powder

1 - IDENTIFICATION

Manufacturer: KerrLab
Address: 1717 West Collins Avenue
City, State, Zip: Orange, CA 92867
Telephone: 1-800-KERR-123
24-Hour Emergency: Chemtrec 1-800-424-9300
International 1-703-527-3887
Date Prepared: September 8, 2005

2 - COMPOSITION INFORMATION

Hazardous Ingredients

	CAS#	PEL	TLV	%
Cristobalite	14464-46-1	0.05mg/m ³	0.1mg/m ³	35-45
Calcium Sulfate Hemihydrate	7778-48-9	5mg/m ³	10mg/m ³	25-30
Quartz	14808-60-7	0.1mg/m ³	0.1mg/m ³	25-35

Other Ingredients

Sodium Tetraborate

3 - PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Boiling Point: N/A
Specific Gravity (H₂O = 1): 2.4
Vapor Pressure (mm Hg): N/A
Melting Point: N/A
Vapor Density (AIR = 1): N/A
Solubility in Water: Slightly soluble
Appearance and Odor: Off-white, odorless powder

4 - FIRE AND EXPLOSION HAZARD DATA

Flash Point (Method Used): N/A
Flammable Limits: LEL: N/A **UEL:** N/A
Extinguishing Media: N/A
Special Fire Fighting Procedures: N/A
Unusual Fire and Explosion Hazards: N/A

5 - REACTIVITY DATA

Stability: Stable
Conditions to Avoid: None
Incompatibility (Material to Avoid): Hydrofluoric acid, in which silica will dissolve and produce the corrosive gas silicon tetrafluoride
Hazardous Decomposition Products: N/A
Hazardous Polymerization: Will not occur

6 - HEALTH HAZARD DATA

Routes of Entry:

Skin: May cause dry feeling on skin.

Eyes: May cause irritation.

Inhalation: Prolonged exposure to respirable crystalline silica may cause chronic lung injury (silicosis). Acute developing silicosis may occur in a short time in heavy exposure. Silicosis is a form of disabling pulmonary fibrosis which can be progressive and may lead to death. The International Agency for Research on Cancer (IARC) reports sufficient evidence of the carcinogenicity of crystalline silica to humans IARC Group 1. Kerr Manufacturing Company accepts no responsibility and disclaims all liability for harmful health effects and customers must comply with all applicable health and safety regulations relating to the safe handling of our silica-containing products.

Ingestion: Hardens when wetted and, if ingested, may result in an obstruction.

Carcinogenicity - NTP: No

IARC Monographs: Yes **OSHA Regulated Carcinogen:** Yes

7 - EMERGENCY FIRST AID PROCEDURES

Skin: Wash with soap and water. Use hand lotion.

Eyes: Wash eyes immediately with large amounts of water, lifting lower and upper lids occasionally. If irritation persists, get medical attention.

Inhalation: Move exposed person to fresh air at once.

Ingestion: Consult physician.

8 - PRECAUTIONS FOR SAFE HANDLING & USE

Steps to be taken in case material is released or spilled: Ventilate area of spill or release. Sweep up. Avoid unnecessary stirring or handling in order to prevent formation of dust.

Waste Disposal Method: Landfill

Precautions to be taken in handling and storing: Do not breathe dust. Keep container closed. Use according to directions.

9 - CONTROL MEASURES

Respiratory Protection (Specify Type): Use NIOSH-approved equipment. Also see ANSI Standard Z88.2-1980, "Practices for Respiratory Protection".

VENTILATION

Local Exhaust: Use sufficient local exhaust to reduce the level of respirable crystalline silica to the PEL.

Mechanical (General): May be sufficient

Protective Gloves: Gloves optional

Eye Protection: Eye goggles

Other Protective Clothing or equipment: N/A

Work/Hygiene Practices: Handle in accordance with good personal hygiene and safety practices. These practices include avoiding unnecessary exposure.

10 - TRANSPORTATION

Not DOT regulated.

11 - SPECIAL INFORMATION

HMS (Hazardous Material Identification System) Rating:

H3 F0 R0

[HMS Index: 4 - Severe Hazard; 3 - Serious Hazard;

2 - Moderate Hazard; 1 - Slight Hazard; 0 - Minimum Hazard]

State RTK: California Proposition 65 Warning: This product contains a chemical, crystalline silica, known to the state of California to cause cancer.

ANEXO B. Resultados de composición según Análisis de Fluorescencia de Rayos-X. a) Sulfato de Calcio (CaSO_4), b) Revestimiento Diamante Kerr, c) chamota, y d) Magnesita

a

Elemento	Númro Atómico (Z)	Concentración
Ca	20	34,06%
S	16	22,61%
K	19	0,25%
Sr	38	0,22%
Si	14	0,07%
Mg	12	0,03%
Al	13	0,02%
Fe	26	0,02%
Cu	29	N.C
Zn	30	N.C
Balance (C,H,O)		---

b

Elemento	Númro Atómico (Z)	Concentración
Si	14	28,09%
Ca	20	9,75%
S	16	8,48%
Sr	38	0,15%
Al	13	0,06%
Mg	12	0,03%
Fe	26	0,02%
K	19	0,01%
Ti	22	89 ppm
Cu	29	N.C
Zn	30	N.C
Balance (C,H,O)		---

c

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Al	13	38,88%
Si	14	6,02%
Ti	22	1,91%
P	15	1,90%
Fe	26	1,84%
Mg	12	0,89%
Ca	20	0,46%
K	19	0,23%
Zr	40	0,09%
Ce	58	0,06%
Na	11	0,06%
Sr	38	0,06%
Cr	24	0,05%
S	16	0,03%
La	57	0,03%
Mn	25	0,02%
Th	90	0,01%
Ga	31	0,01%
Nb	41	93 ppm
As	33	80 ppm
Y	39	78 ppm
Sc	21	64 ppm
Ni	28	57 ppm
Cu	29	55 ppm
Pb	82	52 ppm
Zn	30	27 ppm
Rb	37	8 ppm
Balance (C,H,O)		---













d

Elemento	Númro Atómico (Z)	Concentración
Mg	12	37,11%
Fe	26	2,29%
Mn	25	0,91%
Si	14	0,85%
Ca	20	0,39%
Al	13	0,15%
Cl	17	0,08%
S	16	0,07%
K	19	0,03%
Cu	29	0,01%
Ti	22	0,01%
Zn	30	71 ppm
Br	35	57 ppm
Zr	40	56 ppm
Ni	28	38 ppm
As	33	N.C
Co	27	N.C
Balance (C,H,O)		---

ANEXO C. Listado de equipos empleados.

EQUIPOS	APLICACIÓN
Trituradora de mandíbula. Laboratorio de Beneficio de minerales. Planta de aceros.	Triturador de refractario.
Molino de bolas. Cap. 25 Tn. Laboratorio de Beneficio de minerales. Planta de aceros.	Reducción de tamaño de partícula
Tamizador mecánico. Lab. Caracterización de materiales. Escuela de Ingeniería Civil.	Clasificador hasta malla #200
Balanza digital TRAVELER OHAUS. Laboratorio de Micro fundición.	Pesaje de material
Batidora Industrial de pedestal Mixmaster. OSTER. Lab.de Micro fundición. Planta de aceros.	Mezclado
Equipo Vicat. HUBBOLDT MFT. CO. Pertenece a Lab. Caracterización de materiales. Escuela de Ingeniería Civil.	Medición tiempo de fraguado
Máquina de vacío. LAMICOL	Vacío de probetas
Mufla programable. VULCAN 3-550. Laboratorio Micro fundición. Planta de Aceros	Tratamiento Térmico
Máquina de pulir MECATECH 334. Laboratorio Micro fundición. Planta de Aceros.	Preparación superficial de las muestras de cada revestimiento.
Baño ultrasónico ULTRASONIC LC 30 H	Limpieza de muestras de cada revestimiento.
Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos-X. BRUKER	Análisis semi-cuantitativo composición química de la materia prima
Permeámetro eléctrico de lectura directa. DIETERT DETROIT. Ref. 338	Medida de la permeabilidad.
Máquina universal de ensayos AFS. DIETERT Co. SERIE 33624	Medida de la resistencia a la compresión en seco.
Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650 del Lab. de Microscopia en la Sede de Guatiguará	Caracterización física de las probetas.
Microscopio Óptico Confocal HIROX-3D del Laboratorio GIMAT. Escuela de Ingeniería Metalúrgica	Medida de tamaño de poro en probetas de cada revestimiento.

ANEXO D. Procedimiento para la elaboración de las probetas de revestimiento de yeso.

 <p>1. Pesar el revestimiento</p>	 <p>2. Medir el agua</p>	 <p>3. Agregar el revestimiento al agua y mezclar 1-1/2 minutos.</p>	 <p>4. Mezclar por 3-1/2 minutos a mayor velocidad.</p>
 <p>5. Verter en el cilindro.</p>	 <p>6. Realizar por vacío por 20 segundos.</p>	 <p>7. Dejar reposar por 2 horas.</p>	 <p>8. Precalentar el horno a 149°C.</p>
 <p>9. Retirar la base de goma del cilindro.</p>	 <p>10. Introducir las probetas en el horno.</p>	 <p>11. Aplicar el Tratamiento termico adecuado.</p>	 <p>12. Enfriamiento lento después de la colada</p>

Fuente: KERR., Sybron Dental Specialties. Jewelry / Industrial Products.

Disponible en: <<http://www.kerrcasting.com>>

ANEXO E. A. Tiempo de trabajo y de fraguado de la mezcla Diamante Kerr. **B.** Permeabilidad del revestimiento a base de magnésita

A.

MEZCLA: Diamante Kerr

a:p	Tiempo de Trabajo [min]	Tiempo de Fraguado Inicial [min]	Tiempo de Fraguado Final [min]
38:100	7,45	13,00	16,00
42:100	8,15	13,00	17,30

B.

MEZCLA: Diamante Kerr

a:p	Permeabilidad [AFS]	Resistencia a la compresión [[Kg/cm2]
38:100	10	63
42:100	12	70