

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN REVESTIMIENTO REFRACTARIO  
MAGNESITA-YESO EN EL PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN PARA LA  
OBTENCIÓN DE JOYAS PRE-ENGASTADAS CON ESMERALDAS  
COLOMBIANAS**

**DERLY ZULAY RIVERA ROJAS**

**ANGIE GABRIELA ARENAS MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2015**

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN REVESTIMIENTO REFRACTARIO  
MAGNESITA-YESO EN EL PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN PARA LA  
OBTENCIÓN DE JOYAS PRE-ENGASTADAS CON ESMERALDAS  
COLOMBIANAS**

**DERLY ZULAY RIVERA ROJAS**

**ANGIE GABRIELA ARENAS MARTINEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA  
METALÚRGICA**

**DIRECTOR:**

**ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA**

**INGENIERA METALÚRGICA. PhD**

**CODIRECTOR:**

**ING. CARLINA MARGARITA LONDOÑO**

**INGENIERA METALÚRGICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2015**

## DEDICATORIAS

*“A Dios porque toda obra que se consigue con éxito es bajo su bendición”*

*A mi madre Gloria Rojas Salazar, por ser esa mujer valiente y llena de amor, que con esfuerzo y dedicación ha guiado cada una de las etapas de mi vida, siendo el pilar para superar los obstáculos presentados durante esta larga travesía, gracias por siempre confiar en mí.*

*A mis hermanos Hayder Rivera y Nathalia Rivera, con su respaldo y amistad han sido partícipes de las victorias y derrotas en mi caminar, verlos cumplir sus sueños me llena de felicidad, forman parte indispensable de mi vida.*

*A Oscar Sadder, por alegrar mis días con sus gratas muestras de amor y ser esa voz de aliento para no desfallecer en los momentos difíciles y continuar trabajando por alcanzar mis sueños, gracias por siempre “Amore mío”.*

*- Derly Zulay Rivera Rojas-*

*A Dios por ser la guía y fortaleza en cada uno de mis pasos.*

*A Nubia Martínez por su total entrega a su labor como madre, por ser esa mujer ejemplo de fuerza, dedicación y amor que día a día me ayudó en este primer paso de mi formación profesional.*

*A mi padre Gabriel Arenas por ser el más grato ejemplo de honestidad y forjar en mí una mujer con carácter, capaz de tomar decisiones en pro de alcanzar mis sueños.*

*A mi hermana Lizeth Arenas por ser mi ejemplo a seguir de perseverancia.*

*A mi gran amor Leyver Rivera por entregarme incondicionalmente su apoyo en cada decisión, por cada momento compartido, cada beso dado, cada abrazo en el momento indicado, pero sobre todo por descubrir en mí la gran mujer que soy.*

*A mis amigas Lizeth Pinzón e Isabel Miranda por ser mis confidentes, por ser partícipes de mis alegrías y tristezas y más que nada por enseñarme el significado de la verdadera amistad.*

*Los quiero*

*-Angie Gabriela Arenas Martínez-*

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias, ya que sin su apoyo incondicional no seríamos las personas integrales, correctas, llenas de sueños y metas por alcanzar.

A la Universidad Industrial de Santander por ser el alma mater que ha forjado las bases de nuestro conocimiento para ser unas profesionales con ética y responsabilidad social.

A la doctora Elcy María Córdoba Tuta, por su confianza depositada y acompañamiento imprescindible durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A nuestra codirectora, Carlina Margarita Sofía Londoño Montes por su apoyo como profesional y amistad brindada.

A COLCIENCIAS y a las empresas Oro & Arte Joyeros y Colombian EU, por la financiación del presente Trabajo de Grado a través del proyecto titulado "Innovación del método de gemas pre-engastadas en el proceso de microfundición, para su implementación en la joyería con esmeraldas colombianas" (Código Colciencias: 1102-502-27903, Código UIS: 9418).

A los Técnicos, Mario Navarrete y Ambrosio Carrillo, por brindarnos las herramientas necesarias para desarrollar y cumplir los objetivos planteados en nuestro proyecto de investigación.

Al grupo de investigación GIMAT y el laboratorio de rayos X del parque tecnológico Guatiguará, por disponer sus instalaciones y equipos para la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	18
1. OBJETIVOS .....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 ESPECÍFICOS .....	20
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	21
2.1 FUNDAMENTACIÓN .....	24
2.1.1 Proceso de fundición a la cera perdida.. .....	24
2.1.2 Método de Pre-engaste.....	25
2.1.3 Esmeraldas colombianas.. .....	26
2.1.4 Molde refractario convencional en el proceso de microfundición de joyería.....	27
2.1.5 Permeabilidad del molde refractario.....	27
2.1.6 Magnesita.....	28
2.1.7 Yeso.....	29
2.1.8 Polietilenglicol, PEG.....	30
2.1.9 Almidón.....	30
3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	32
3.1 ETAPA 1. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO .....	33
3.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	33
3.2.1 Caracterización de la materia prima.....	33
3.2.2 Calcinación de la magnesita.....	34
3.2.3 Distribución granulométrica.....	34
3.3 ETAPA3. DESARROLLO DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO .....	34
3.3.1 Determinación de la relación magnesita-yeso y agua-polvo.....	34
3.3.2 Análisis térmico de la mezcla refractaria magnesita-yeso.....	36
3.3.3 Tratamiento térmico de la mezcla refractaria.. .....	36

3.4	ETAPA 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS.....	37
3.4.1	Determinación de las propiedades físico-mecánicas..	37
3.4.2	Adición de agentes formadores de poros.....	38
3.5	ETAPA 5. PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN.....	38
3.5.1	Verificación del acabado superficial, copiado y llenado del molde refractario.....	38
3.5.2	Proceso de micro-fundición por cera perdida con el pre-engaste de esmeraldas colombianas..	40
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	41
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....	41
4.1.1	Análisis granulométrico..	41
4.1.2	Calcinación de la magnesita.....	42
4.2	MEDICIÓN DEL TIEMPO DE TRABAJO Y TIEMPO DE FRAGUADO .....	45
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS MAGNESITA-YESO ..	47
4.3.1	Análisis térmico de la mezcla refractaria magnesita-yeso. ....	48
4.3.2	Resistencia a la compresión.....	49
5.3.3	Permeabilidad.....	51
5.3.4	Resistencia al choque térmico.....	53
5.4	AGENTES FORMADORES DE POROS.....	56
5.5	PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN POR CERA PERDIDA CON EL PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS COLOMBIANAS. ....	60
5.5.1	Estudios preliminares – proceso de micro-fundición sin gemas pre-engastadas..	60
5.5.2	Pruebas de microfundición con pre-engaste de esmeraldas.....	64
6.	CONCLUSIONES.....	69
7.	RECOMENDACIONES .....	71
	REFERENCIAS .....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	ANEXOS.....	78

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Características y propiedades de las esmeraldas. ....	26
<b>Tabla 2.</b> Relación revestimiento magnesita-yeso.....	35
<b>Tabla 3.</b> Relación Agua-Polvo.....	35
<b>Tabla 4.</b> Análisis de DRX cuantitativo de la magnesita sin calcinar y calcinada 1000°C.....	43
<b>Tabla 5.</b> Fases presentes mezcla magnesita-yeso 60/40 con 60mL de agua por cada 100g de sólidos, antes del tratamiento térmico, sin calcinación y calcinado.....	50
<b>Tabla 6.</b> Fases presentes en la mezcla magnesita-yeso 60/40 con 60mL de agua por cada 100g de sólidos, después del tratamiento, sin calcinación y calcinado. ....	50
<b>Tabla 7.</b> Muestras seleccionadas para el estudio de adición de agentes formadores de poros.....	55
<b>Tabla 8.</b> Revestimientos seleccionados para el proceso de microfundición. ....	58

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Árbol de piezas fundidas.....	24
<b>Figura 2.</b> Modelo en cera con gemas pre-engastadas.....	25
<b>Figura 3.</b> Representación gráfica de la metodología del proyecto. ....	32
<b>Figura 4.</b> Tratamiento térmico aplicado al revestimiento refractario magnesita-yeso. .....	37
<b>Figura 5.</b> Fotografías del proceso de obtención de las piezas fundidas a partir del árbol de cera.....	39
<b>Figura 6.</b> Diagrama de fases binario Al-Zn.....	39
<b>Figura 7.</b> Diagrama de fases binario Ag-Cu.....	40
<b>Figura 8.</b> Distribuciones granulométricas de la materia prima calcinada y sin calcinar (1)-(3) malla 140 y (2)-(4) malla 200.....	41
<b>Figura 9.</b> Análisis Termogravimétrico y de flujo de calor (DSC) de la Magnesita..	42
<b>Figura 10.</b> Micrografías SEM de la magnesita a 4000X, (A) sin calcinar, (B).....	44
<b>Figura 11.</b> Cambio de coloración de la magnesita, antes y después de la calcinación.....	44
<b>Figura 12.</b> Tiempo de trabajo relaciones magnesita-yeso, pasantes malla -140 y - 200, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada.....	45
<b>Figura 13.</b> Tiempo de fraguado relaciones magnesita-yeso pasante malla 140, magnesita sin calcinar y magnesita calcinada.....	46
<b>Figura 14.</b> Tiempo de fraguado relaciones magnesita-yeso pasante malla 200, magnesita sin calcinar y magnesita calcinada.....	46
<b>Figura 15.</b> Fotografía de una probeta con 64% de agua, empleada en la prueba de tiempo de fraguado.....	47
<b>Figura 16.</b> Análisis Termogravimétrico TG y Calorimetria de barrido diferencial de la mezcla refractaria magnesita/yeso 70/30.....	48

<b>Figura 17.</b> Resistencia a la compresión relaciones magnesita-yeso, pasantes malla 140 y 200, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada.....	49
<b>Figura 18.</b> Permeabilidad del revestimiento magnesita-yeso malla 140, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada. ....	52
<b>Figura 19.</b> Permeabilidad del revestimiento magnesita-yeso malla 200, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada. ....	52
<b>Figura 20.</b> Revestimiento obtenido con magnesita sin calcinar al terminar el tratamiento térmico. ....	53
<b>Figura 21.</b> Ciclos de choque térmico mezcla 60/40 magnesita sin calcinar (A) y magnesita calcinada (B). ....	54
<b>Figura 22.</b> Resistencia a la compresión antes y después del choque térmico en función del contenido de magnesita en el revestimiento.....	54
<b>Figura 23.</b> Resistencia a la compresión en función del % de polietilenglicol (PEG) (a) y de almidón de yuca (b) adicionados en las mezclas de magnesita calcinada. ....	56
<b>Figura 24.</b> Permeabilidad en función del % de polietilenglicol (a) y almidón de yuca (b) adicionados en las mezclas de magnesita calcinada.....	57
<b>Figura 25.</b> Micrografías SEM de los revestimientos obtenidos con magnesita calcinada/yeso (60/40) y 60 mL de agua por cada 100 g de sólido, a 200X, (A) sin agente, (B) 3% PEG, (C) 2% almidón de yuca. ....	59
<b>Figura 26.</b> Micrografías revestimientos magnesita calcinada/yeso (60/40) y 60 mL de agua por cada 100 g de sólido 8000X, (a) 3% PEG, (b) 2% almidón de yuca. .	60
<b>Figura 27.</b> Acabado superficial del prototipo 1, mezcla: magnesita calcinada/yeso 60/40 con 60% de agua, sin formador de poros. ....	62
<b>Figura 28.</b> Acabado superficial del prototipo 2, mezcla: magnesita/yeso 60/40 con 60% de agua, 3% PEG. ....	63
<b>Figura 29.</b> Acabado superficial del prototipo 3, mezcla: magnesita/yeso 60/40 con 60% de agua, 2% almidón de yuca.....	63
<b>Figura 30.</b> Poros presentes en el revestimiento con adición de PEG. ....	64

**Figura 31.** Árbol de cera con esmeraldas pre-engastadas, (a) sin recubrimiento, (b) con recubrimiento. ....65

**Figura 32.** Prototipos finales con esmeraldas pre-engastadas, (a-c) sin recubrimiento, (b-d) con recubrimiento. ....66

**Figura 33.** Micrografías de los prototipos finales 10X, Zn-Al revelado con ácido fluorhídrico, Ag-Cu revelado con dicromato de potasio. ....67

**Figura 34.** Caracterización de las esmeraldas antes-después de la colada. ....68

## ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A: Ficha técnica de referencia para la magnesita, suministrada por el vendedor MAGNESITA S.A.....	78
Anexo B: Ficha técnica del yeso. ....	79
Anexo C: Resultados de composición según Análisis de Difracción de rayos X y Fluorescencia de Rayos-X. a) Magnesita, b) Yeso.....	80
Anexo D: Análisis de Difracción de rayos X, DRX Magnesita calcinada. ....	82
Anexo E: Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) de la Magnesita calcinada y sin calcinar.....	83
Anexo F: Tiempos de trabajo y de fraguado de las proporciones Magnesita-Yeso estudiadas, A) Magnesita sin calcinar, B) Magnesita calcinada. ....	84
Anexo G: Resistencia a la compresión composiciones de magnesita-Yeso estudiadas, magnesita sin calcinar y calcinada. ....	86
Anexo H: Permeabilidad del revestimiento Magnesita-Yeso estudiadas, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada. ....	87
Anexo I: Resistencia a la compresión antes y después del choque térmico en función del contenido de Magnesita en el revestimiento.....	88
Anexo J: Caracterización revestimiento comercial Diamante Kerr .....	89
Anexo K: Espectroscopia de Energía Dispersiva EDS, Revestimientos magnesita/yeso 60/40 con 60% de agua.....	92

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN REVESTIMIENTO REFRACTARIO MAGNESITA-YESO EN EL PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE JOYAS PRE-ENGASTADAS CON ESMERALDAS COLOMBIANAS.\*

**AUTORES:** RIVERA ROJAS, Derly Zulay; ARENAS MARTINEZ, Angie Gabriela.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Microfundición, Pre-engaste, Esmeraldas.

### DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se estudia la posible aplicación de un revestimiento refractario a base de magnesita en el proceso de microfundición con la técnica de cera perdida. Las mezclas fueron trabajadas bajo las siguientes variables: proporción magnesita/yeso, agua/polvo, calcinación de la magnesita y la adición de dos agentes formadores de poros, Polietilenglicol (PEG) y almidón de yuca. Para caracterizar los revestimientos, se realizaron pruebas de Tiempo de fraguado según la norma ASTM C472-99, resistencia a la compresión en frío según la norma ASTM C133-97, resistencia al choque térmico según la norma NTC 1432 y Permeabilidad; así mismo se evaluó la influencia de la adición de agentes formadores de poros en las propiedades antes mencionadas. Posteriormente se seleccionaron las mezclas con mejores propiedades para realizar fundiciones preliminares sin esmeraldas utilizando la técnica de cera perdida, con el fin de evaluar el acabado superficial y llenado de las piezas.

Mediante el análisis de las fundiciones preliminares se escogió el revestimiento con el cual se obtuvo un acabado superficial y copiado aceptable de las piezas, para fundir con esmeraldas pre-engastadas utilizando la técnica de cera perdida efectuando coladas a bajo y alto punto de fusión, en la cual cada árbol en cera contenía dos anillos, uno con esmeralda recubierta de zirconita-alcohol y otro sin recubrir, dando como resultado pérdida notoria de las propiedades de la gema, de lo cual se pudo concluir que la mezcla de magnesita-yeso, no es un material apto para el proceso de pre engaste con esmeraldas colombianas.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales, Directora. PhD. Elcy María Córdoba Tuta. Codirectora. Ing. Carlina Sofía Londoño Montes.

## ABSTRACT

**TITLE:** ASSESSMENT OF A REFRACTORY MAGNESITE-GYPSUM COATING APPLICATION IN MICRO CASTING PROCESS TO OBTAIN JEWELS PRESETTING WITH COLOMBIAN EMERALDS. \*

**AUTHORS:** RIVERA ROJAS, Derly Zulay; ARENAS MARTINEZ, Angie Gabriela. \*\*

**KEY WORDS:** Micro casting, Presetting, Emeralds.

### DESCRIPTION:

In this paper, the possible application of a refractory coating based on magnesite in the process of micro casting with lost wax technique is studied. The mixtures were worked under the following variables: rate of magnesite / gypsum, water / dry mix, magnesite calcined and the addition of two pore forming agents, polyethylene glycol (PEG) and cassava starch. In order to characterize the coatings, tests like setting time, compressive cold strength, thermal shock resistance and permeability were performed according to ASTM C472-99, ASTM C133-97, and NTC 1432 standards, respectively; likewise, the influence of the addition of pore forming agents in the above properties were evaluated. Subsequently, mixtures with better properties for preliminary castings without emeralds were selected, using the lost wax technique. It was done in order to evaluate surface quality and filling pieces

Based in preliminary casting the coating with the best superficial quality and acceptable copied was chosen. The cast was done in high and low melting point. Each wax tree containing two rings, one emerald coated with alcohol-zirconite and other uncoated, resulting in noticeable loss gem properties. In this way, it conclude that the mixture of magnesite -gypsum is not a suitable material for the presetting with Colombian emeralds.

---

\* Thesis

\*\* Physic-chemical engineering Faculty. Metallurgical engineering and science materials school, Director. PhD. Elcy María Córdoba Tuta. Codirector. Ing. Carlina Sofía Londoño Montes.

## INTRODUCCIÓN

El método tradicional de micro-fundición, en la industria de joyería colombiana, implica el uso de revestimientos cerámicos, compuestos por sulfato de calcio semihidratado, cuarzo- $\alpha$  - cristobalita- $\alpha$  y agua destilada, [1] los cuales requieren de tratamientos térmicos a temperaturas superiores a los soportados por las esmeralda (400°C aproximadamente), para la formación de fases cristalinas, que brindan estabilidad térmica a la mezcla. Esta gema, en el método de pre-engaste, durante las etapas de tratamiento térmico del molde refractario y de colada del metal, debe soportar temperaturas en las que las inclusiones internas, se volatilizan, generándose fisuras que le confieren a las esmeraldas baja resistencia al choque térmico, lo cual se refleja en la ruptura de la gema al entrar en contacto con el metal líquido, por el cambio brusco de temperatura [2].

Ante este inconveniente, es necesario adaptar un revestimiento con las condiciones adecuadas (tratamiento térmico y permeabilidad) para el uso de la esmeralda en el proceso de pre-engaste, que evite que sufra algún tipo de deterioro que le haga perder su gran valor comercial. En este sentido en la presente investigación se fabricaron revestimientos refractarios de magnesita, calcinada y sin calcinar, con agentes formadores de poros y usando el yeso como aglomerante, para conferir cualidades tales como: una resistencia mecánica y estabilidad dimensional adecuada para el proceso de colada del metal y el desmoldeo de la pieza final, alta permeabilidad para una correcta evacuación de gases durante el colado del metal y un adecuado acabado superficial de la pieza fundida.

La experimentación inicio con la caracterización de las materias primas, seguida de la preparación de las pastas cerámicas magnesita-yeso seleccionándose las más adecuadas según los tiempos de trabajo y fraguado; posteriormente se fabricaron las probetas cerámicas, las cuales fueron caracterizadas teniendo en

cuenta la resistencia a la compresión, permeabilidad y resistencia al choque térmico. Con el objetivo de favorecer la permeabilidad de los revestimientos, se evaluó el efecto de la adición de agentes formadores de poros. A partir de los resultados anteriores, se seleccionaron tres revestimientos para su evaluación en el proceso de microfundición de joyas con y sin pre-engaste de esmeraldas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la aplicación de un revestimiento refractario magnesita-yeso en el proceso de micro-fundición para la obtención de joyas pre-engastadas con esmeraldas colombianas.

### **1.2 ESPECÍFICOS**

- ✓ Desarrollar revestimientos refractarios a partir de magnesita-yeso bajo diferentes condiciones de calcinación de la magnesita, relación refractario/aglomerante y adición de agentes formadores de poros.
- ✓ Caracterizar física, mecánica y térmicamente los revestimientos obtenidos bajo las condiciones de estudio.
- ✓ Evaluar experimentalmente el comportamiento del revestimiento refractario Magnesita- yeso en el proceso de micro-fundición, aplicado al pre-engaste de esmeraldas colombianas.

## 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El proceso de micro-fundición ha sido utilizado y conocido por siglos datando de varios miles de años en el pasado; la referencia más antigua conocida por escrito de un proceso de fundición a la cera perdida está fechada en el año 1789 A.C, proveniente de la ciudad babilónica de Sippar, durante el reinado del gran rey Hammurabi [3].

Posteriormente en 1540, en el considerado primer libro impreso sobre metalurgia, De la Pirotechnia, cuyo autor fue Vannoccio Biringuccio, encargado de la fundición Artística del Vaticano, fue descrito detalladamente el arte de fundir "...existen moldes similares para grandes estatuas, si se desea hacerlas de bronce, primero se hacen en cera, de acuerdo al procedimiento ordinario...", creando un molde original en cera, el cual puede ser fácilmente pulido y trabajado [4].

Pero fue hasta en 1907 que fueron realizadas las primeras investigaciones para la implementación de este método en la industria de la joyería, siendo el proceso de micro-fundición o a la cera perdida la técnica más empleada por su disposición para la fabricación de piezas en serie, manteniéndose hasta la actualidad como el principal. Este consiste en elaborar un modelo en cera (a mano o mediante prototipos rápidos), réplica del anillo o pieza que se desea realizar y se deposita en un molde de yeso el cual es sometido posteriormente a un tratamiento térmico logrando las condiciones adecuadas para realizar la colada del metal [5].

En la joyería tradicional el paso a seguir para la obtención de una pieza final es el engaste de la gema, definido como el arte de fijar las piedras preciosas en el metal, buscando que las joyas muestren su máxima belleza. En este proceso el joyero o engastador, de manera manual y con ayuda de herramientas, fija las

gemas a la joya, necesitando precisión, experiencia y un vasto conocimiento de este arte. Esta es la razón por la que el engaste se considera un proceso extra en la producción, que aumenta los costos y disminuye la eficiencia de la misma.

Existen varios tipos de engaste, dependiendo en su mayoría de las características, propiedades y forma que presenta la gema; los engastes más utilizados en la joyería tienen como desventaja que la experiencia del engastador y el tipo de gema hacen que sea casi único para cada una de ellas, donde el más mínimo error podría llevar a la fractura de las piedras, implicando costos y tiempos elevados en la producción [6].

De esta manera el proceso a la cera perdida sufrió una modificación importante, siendo su principal avance la implementación del pre-engaste de gemas. Las primeras publicaciones del uso de este método se realizaron en el año 1988 [7], desde entonces esta técnica se ha venido implementado en los últimos años para el ajuste industrial de piedras sintéticas a gran escala, puesto que se incurre en menos costos laborales, las gemas lucen más grandes, el ajuste de las gemas es más fuerte y al no existir el engaste manual, se presentan menos rupturas a causa de la manipulación. Esto se debe a que la gema es fijada al árbol de cera antes de la fabricación del revestimiento refractario y del colado del metal fundido.

Este método fue inicialmente utilizado para el pre-engaste del óxido de circonio cúbico, donde el costo de ajuste manual no era justificable, posteriormente se utilizó con piedras preciosas naturales como el diamante, rubí y zafiro, según lo menciona Valerio Faccenda en Handbook on investment casting, en 2003 [8].

Al ver los resultados obtenidos aplicando el proceso de fundición a la cera perdida junto al método de pre-engaste en la fabricación de joyas de diamante, se ha buscado la implementación a gemas que tienen el mismo interés comercial; el inconveniente encontrado ha sido que no todas las gemas de interés, como en el

caso particular de la esmeralda colombiana, presentan las mismas características y propiedades que el diamante.

La esmeralda es una piedra preciosa perteneciente al grupo del berilo, caracterizada por su color verde, que puede ir desde el verde pálido, a un extraordinario color verde intenso, a pesar de su dureza cercana al 8 en la escala de Mohs, es una gema frágil y delicada, ya que posee inclusiones, conocidas como "jardín". Estas inclusiones son fracturas internas, por lo cual la esmeralda debe ser tratada con mucho cuidado después de la talla en procesos de engastado y limpieza, evitando ejercer grandes presiones sobre la piedra, sin someterla a cambios bruscos de temperatura, que podrían llegar a fracturarla totalmente [9].

El revestimiento tradicional que cubre el molde en cera perdida posee características importantes en la micro-fundición, como son el copiado de las piezas con un adecuado acabado superficial, resistencia al choque térmico, la dureza requerida para el desmoldeo, permeabilidad suficiente para la evacuación de gases presentes en el proceso, pero debido al tratamiento térmico aplicado, superando la temperatura de 400°C, este no se puede usar en el pre-engaste de esmeraldas.

Por esta razón ha sido necesario el estudio de nuevas alternativas para obtener un revestimiento que brinde la posibilidad de pre-engastar esmeraldas, modificando la mezcla trabajada tradicionalmente, implementando materias primas como magnesita, la cual reemplazaría al cuarzo  $\alpha$  y la cristobalita  $\alpha$ , brindando mayor estabilidad dimensional por sus características estructurales, al no sufrir transformaciones polimórficas, resistencia al choque térmico y alta refractariedad [10].

## 2.1 FUNDAMENTACIÓN

**2.1.1 Proceso de fundición a la cera perdida.** El proceso de fundición de precisión a la cera perdida recibe su nombre debido a que se obtiene en la pieza fundida, usualmente de dimensiones pequeñas, un excelente acabado superficial y un estrecho control dimensional, mediante un modelo desechable, compuesto de materiales de bajo punto de fusión como ceras y parafinas. El molde grueso, también llamado molde en bloque o molde sólido, es el procedimiento tradicional para realizar el moldeo en el proceso de cera perdida [11].

Este proceso consiste en vaciar una colada de material refractario sobre el modelo de cera, provisto de los correspondientes canales de colada y respiración, en un recipiente adecuado. La colada debe tener una fluidez suficiente para llenar todos los intersticios del modelo y copiar hasta los más mínimos detalles, obteniéndose un árbol de piezas fundidas a imagen del molde ver Figura 1.

**Figura 1.** Árbol de piezas fundidas



**Fuente:** Joyería /fundiart.com.

El equipo utilizado consiste de un horno de cámara doble, la superior es la cámara de fusión y la inferior se denomina cámara de vaciado. Después de la fusión y del tratamiento del metal, el molde se localiza en la cámara inferior, donde es sellado

para evacuar el aire hasta igualar las presiones internas, por último se abre la válvula y se realiza el vaciado del metal líquido en el molde hasta el enfriamiento total [12].

**2.1.2 Método de Pre-engaste.** En la elaboración de piezas de joyería, el método tradicional es el engaste de la piedra, sin embargo es posible realizarlo directamente en el modelo de cera; ésta técnica es conocida como “Stone in place” o pre-engaste, en donde se ubica la piedra en el molde antes de la colada (ver Figura 2Figura 2). Las piedras preciosas que se utilizan en el método de pre-engaste suelen ser de alta calidad, dimensiones precisas y sin inclusiones. Este proceso no está diseñado para esmeraldas pre engastadas en microfundición debido a que las propiedades de estas gemas se van a perder por encima de 350-400°C y para ello es necesario modificar todas las etapas del proceso [13].

**Figura 2.** Modelo en cera con gemas pre-engastadas.



**Fuente:** Prototipo en cera para joyería, disponible en <http://merida.anunciosya.com.mx/fotos/8182>

**2.1.3 Esmeraldas colombianas.** La esmeralda es una variedad del mineral Berilo, los geólogos identifican como esmeralda a los minerales de Berilio que presentan un color verde vivo debido a la presencia de cromo y vanadio, su fórmula científica viene dada por:  $\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18}) + (\text{Cr}, \text{V})$ .

Los depósitos de esmeraldas colombianos se forman a partir de las salmueras que emigraron a través de una deformación sedimentaria en condiciones metamórficas de bajo grado. Aunque las salmueras tienen muchas similitudes con el agua de formación, presentan alta salinidad y una composición química compleja. Estos fluidos están constituidos principalmente de NaCl y con bajas concentraciones de otros elementos, y se quedan atrapados como inclusiones en las esmeraldas colombianas, los cuales le brindan características particulares a las mismas [14].

Las principales características de las esmeraldas, la composición básica, inclusiones o propiedades como la fragilidad, densidad, dureza, fractura, raya, color y brillo pueden variar según el tipo de yacimiento donde se encuentren las esmeraldas, pero en rasgos generales en la Tabla 1 se reflejan las características y propiedades de dicha gema [15].

**Tabla 1.** Características y propiedades de las esmeraldas.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
<b>Fragilidad</b>	Muy alta
<b>Densidad</b>	2.63 – 2.8 g/ cm <sup>3</sup>
<b>Dureza</b>	7.5 – 8 (Mohs)
<b>Fractura</b>	Concoidea
<b>Color</b>	Verde
<b>Brillo</b>	Vítreo
<b>Raya</b>	Blanca

**Fuente:** GAVRILENKO E. Tesis Doctoral. Esmeraldas de los Urales (Rusia) Condiciones de formación y propiedades características. Universidad politécnica de Madrid.

**2.1.4 Molde refractario convencional en el proceso de microfundición de joyería.** Los compuestos comunes de los revestimientos para fundición son una mezcla de 25-30% de sulfato de calcio dihidratado  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (yeso) que actúa como aglutinante y 70-75% de sílice, como material refractario en forma de cuarzo  $\alpha$  y cristobalita  $\alpha$  [16-17].

El yeso es el aglomerante más usado en los revestimiento para el proceso de micro-fundición, debido a su excelente capacidad de copiar detalles dada su granulometría fina y la forma acicular de sus granos, pero es muy impermeable y dificulta la evacuación de los gases, produciendo defectos en las piezas, como falta de llenado y porosidades generadas por gases que queden atrapados. Una manera de solucionar estos inconvenientes es incrementar la temperatura de la aleación, pero como se ha venido mencionado, para lograr el uso de esmeraldas colombianas pre-engastadas, esta medida no es viable. Por lo tanto una alternativa es aumentar la permeabilidad del molde, para poder disminuir la temperatura de colada y trabajar con aleaciones de menor punto de fusión.

Con el fin de modificar la técnica de fabricación y las propiedades mecánicas y térmicas del yeso como material de revestimiento, además de aumentar la permeabilidad se ha implementado la adición de agentes formadores de poros para generar canales por los cuales se dé el escape de los gases.

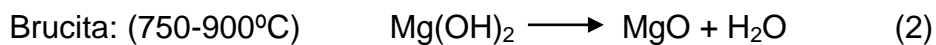
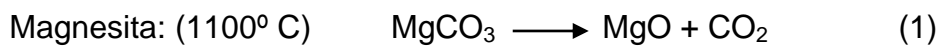
**2.1.5 Permeabilidad del molde refractario.** En procesos de moldeo, la permeabilidad se define como la propiedad física de la masa moldeada que permite que el gas pase a través de ella. Sin embargo, en terminos generales, la permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que

lo atraviese sin alterar su estructura interna. La velocidad con la que el fluido (gas) atraviesa el material depende de tres factores básicos: [18].

- ✓ La porosidad del material.
- ✓ La densidad del fluido, afectada por su temperatura.
- ✓ La presión a que está sometido el fluido.

En el proceso de microfundición para que un material sea permeable, éste debe ser poroso, es decir, debe contener cavidades vacías o poros que le permitan la evacuación de los gases en el momento de la colada, disminuyendo imperfecciones de las piezas fundidas. Así mismo, estas cavidades deben estar enlazadas para acondicionar caminos para que los gases pasen a través del material.

**2.1.6 Magnesia.** Es un material refractario cuyo constituyente principal es el óxido de magnesio, MgO, su forma cristalina se denomina periclusa. El óxido de magnesio es normalmente obtenido de la calcinación del carbonato ( $\text{MgCO}_3$ ) y el hidróxido ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) de magnesio, tal como muestran las siguientes reacciones.



Durante el calentamiento de la magnesita se consideran los siguientes cambios:

- 1) Pérdida de  $\text{CO}_2$  formando magnesita cáustica a los  $1.000^\circ\text{ C}$  (fácilmente hidratable).

- 2) Cerca a una temperatura de 1.400° C se inicia la formación de los primeros cristales de periclasa, aumentando de volumen con el aumento de la temperatura.
- 3) Cuando los cristales han alcanzado los 20 a 25 micrones se dice que la magnesita esta calcinada a muerte, siendo apta para ser utilizada. En estas condiciones el MgO muy difícilmente se hidrata.

De esta manera mediante el quemado a muerte se busca factores como disminuir la actividad de la cal libre (CaO), para controlar la expansión del cuerpo cerámico debido al fenómeno de hidratación, a su vez eliminar la mayor cantidad de poros creando 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 más grandes y el producto es denso, lo que implica una mayor estabilidad química [19]. El MgO puro funde a 2.800° C (depende de las impurezas presentes), su peso específico es de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, como contrapartida es poco resistente al choque térmico [20].

**2.1.7 Yeso. Comercial** es el resultado de la calcinación de sulfato de calcio dihidratado, sometido a temperaturas de 120 a 130°C, para eliminar parte del agua de cristalización por evaporación, obteniéndose un hemihidratado de calcio:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CaSO}_4) \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  [21].

Dada su estructura porosa, el yeso fraguado aporta propiedades bioclimáticas excepcionales. Sus excelentes cualidades de aislamiento y regulación higrométrica, hacen de él un material insustituible en las modernas técnicas de construcción; además su plasticidad y maleabilidad le confieren una excelente propiedad al copiado de piezas para la industria de microfundición.

**2.1.8 Polietilenglicol, PEG.** Es un poliéster ampliamente empleado en la industria. Su estructura química puede representarse como  $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{H}$ , usado como biomaterial debido a sus propiedades fisicoquímicas. Se produce por la interacción de óxido de etileno con agua, etilenglicol u oligómeros de etilenglicol [22].

El PEG es soluble en agua, por lo que la mayoría de sus aplicaciones se dan en disoluciones acuosas, siendo mayor su solubilidad a mayor peso molecular. Así mismo, es menos hidrófilo, posee baja inflamabilidad y baja presión de vapor, es biodegradable, biocompatible y no tóxico en comparación con otros disolventes alternativos.

Es implementado como agente químico formador de poros en la obtención de matrices cerámicas, que se caracterizan por una baja densidad, ser buenos aislantes térmicos y acústicos; el PEG es introducido en la fase solvente, y se puede remover de la red fácilmente al aumentar la temperatura  $>140^\circ\text{C}$ , donde al ser eliminado se liberan los poros, generando un área superficial grande con un aumento en la permeabilidad por su variación de tamaños, siendo a menudo materiales microporosos [23].

**2.1.9 Almidón.** Hidrato de carbono que constituye la principal reserva energética de casi todos los vegetales, tiene usos alimenticios e industriales. Desde el punto de vista químico, es una mezcla de dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina; contienen regiones cristalinas y no cristalinas en capas alternadas. Puesto que la cristalinidad es producida por el ordenamiento de las cadenas de amilopectina.

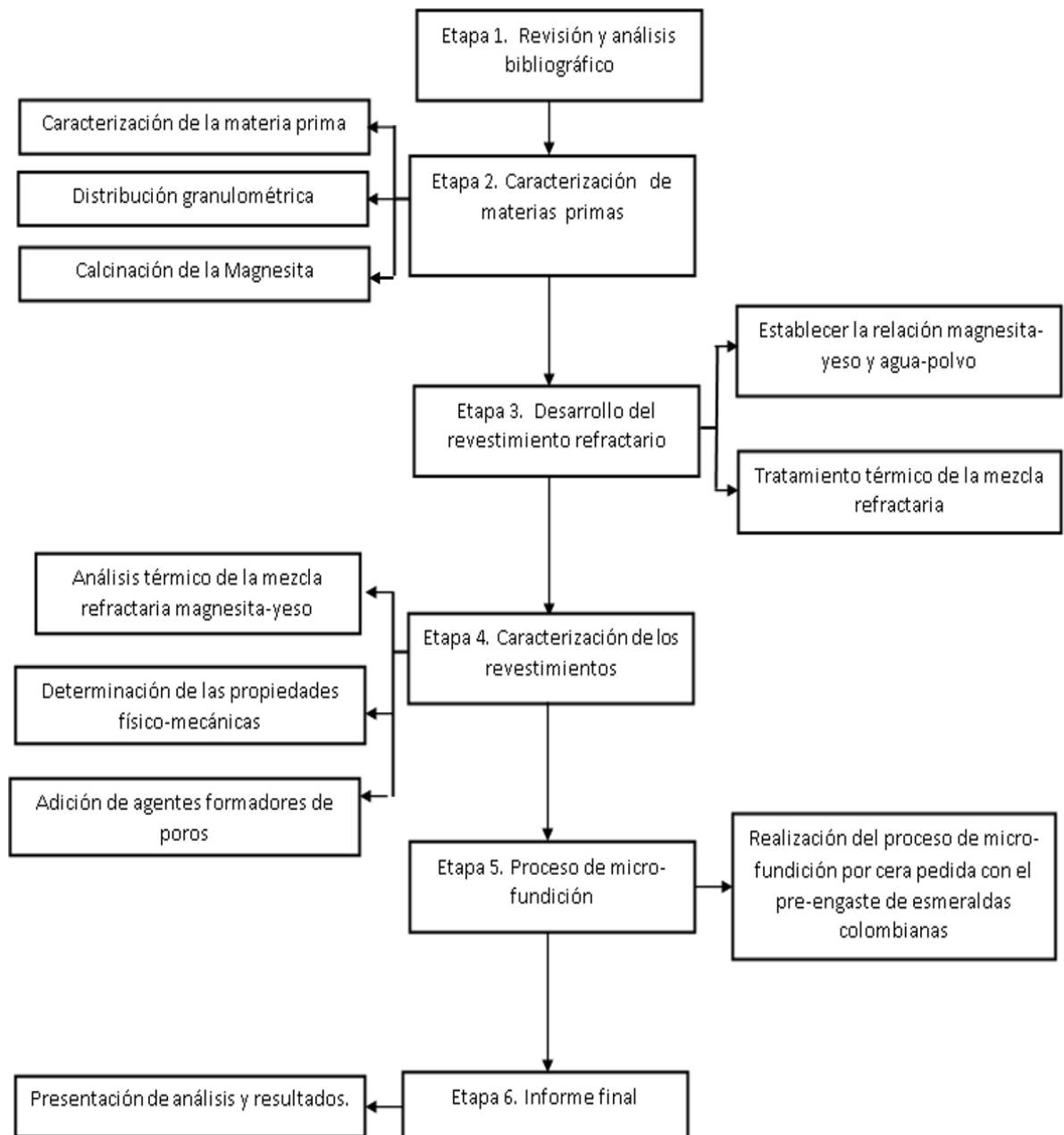
Los tamaños y las formas de los granos de almidón, varían de un cereal a otro; en el trigo, centeno, cebada, maíz y yuca los granos son sencillos, mientras que los de arroz son compuestos. La mayor parte de las células del almidón de yuca tienen tamaños que van de 1 a 40 micras y son evacuados de la matriz cerámica al superar los 75°C posterior a la gelatinización máxima [24].

El uso de almidón de yuca fino como agente formador de poros, permite mejorar la permeabilidad de la matriz cerámica de los revestimientos utilizados en el proceso de microfundición sin comprometer su resistencia mecánica y afectar la calidad superficial de la pieza fundida en estos moldes [25].

### 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo mediante la implementación de las etapas descritas en la Figura 3.

**Figura 3.** Representación gráfica de la metodología del proyecto.



### **3.1 ETAPA 1. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

Se realizó la búsqueda de información sobre la magnesita como materia prima en revestimientos refractarios, su comportamiento después de ser calcinada, la influencia de la adición de agentes formadores de poros en la permeabilidad del molde; además de la adaptación de todo lo anterior a la aplicación en microfundición. La documentación necesaria se obtuvo de publicaciones científicas, tesis de grado, normas y páginas de internet, haciendo uso de la base de datos de la UIS.

### **3.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS**

**3.2.1 Caracterización de la materia prima.** Como material refractario se utilizó magnesita proveniente de la empresa Magnesita Refractarios S.A; como aglomerante, yeso Piedra Hidrocal 106 XB tipo III Blanco, las fichas técnicas se encuentran en los anexos A y B. Para garantizar el nivel de pureza se analizó su composición química y mineralógica, por medio de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX) (Anexo C). Para cada una de las materias primas, tales análisis se realizaron, respectivamente, en los equipos difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE y espectrómetro secuencial de Fluorescencia de rayos-X de longitud de onda dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER. Además, se evaluaron las propiedades térmicas de la magnesita, por medio de un Análisis Térmico Integral, para lo cual se empleó el equipo Analizador térmico marca SETSYS EVOLUTION 16/18 marca SETARAM INSTRUMENTATION.

**3.2.2 Calcinación de la magnesita.** Teniendo en cuenta que de la caracterización del refractario, se determinó la presencia de carbonato e hidróxido de Mg, además de la magnesita, se realizó la calcinación del material a una temperatura de 1000°C, durante 6 horas, sin atmosfera controlada en la mufla Nabertherm GmbH, modelo HTCT 08/ 16, con el fin de transformar en óxido el carbonato e hidróxido de Mg.

**3.2.3 Distribución granulométrica.** La magnesita se sometió a un proceso de tamizaje, dado que fue adquirida en polvo, llevándose hasta pasante de 140 y 200 de la malla tyler, siendo la granulometría una variable de estudio en el proceso de fabricación del revestimiento refractario. El análisis granulométrico de la materia prima (calcinada y sin calcinar), para las mallas -140 y -200, se realizó empleando los tamices 140-200-270-bandeja de la serie Taylor. Los equipos empleados se encuentran ubicados en el laboratorio de Beneficio de minerales de la Universidad Industrial de Santander.

### **3.3 ETAPA3. DESARROLLO DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO**

**3.3.1 Determinación de la relación magnesita-yeso y agua-polvo.** Los porcentajes de magnesita-yeso (calcinada y sin calcinar) y agua-polvo, con los cuales se trabajó, fueron definidos dentro de un rango limitado por la viscosidad y tiempo de trabajo, que brindaran un llenado del molde y copiado de detalles finos de la pieza de forma eficiente. De esta manera, el tiempo de trabajo fue medido haciendo pasar una cantidad establecida de mezcla de un recipiente a otro, cada 15 segundos, concluyendo el tiempo cuando la mezcla pierde su capacidad de fluir sobre la pared interna de dicho recipiente, proporcionando el periodo que el

joyero, durante el proceso de microfundición, podrá emplear para manipularla, este procedimiento es desarrollado empíricamente por los joyeros.

Ahora bien, partiendo del proyecto de grado elaborado por Rojas, D [26], en el que se manejaron proporciones magnesita-yeso sin calcinar, 80/20, 75/25, 70/30, donde se evidenció la influencia inapropiada de la alta dureza que posee la magnesita en el proceso de desmoldeo, se realizaron ensayos experimentales, disminuyendo la cantidad de material refractario, para conseguir las cualidades deseadas en el nuevo revestimiento; de este modo, se trabajaron las proporciones especificadas en las Tablas 2 y 3, tanto para la magnesita calcinada como sin calcinar, con granulometrías pasantes 140 y 200 malla tyler.

Así mismo, mediante el Test Vicat, regido por la norma ASTM C 472-99, se verificó el tiempo de fraguado, tiempo en el que la mezcla alcanza una dureza definida.

**Tabla 2.** Relación revestimiento magnesita-yeso.

<b>RELACIÓN MAGNESITA-YESO</b>			
<b>Malla</b>	<b>Mezcla 1</b>	<b>Mezcla 2</b>	<b>Mezcla 3</b>
<b>- # 140</b>	70-30	60-40	50-50
<b>- # 200</b>			

**Tabla 3.** Relación Agua-Polvo.

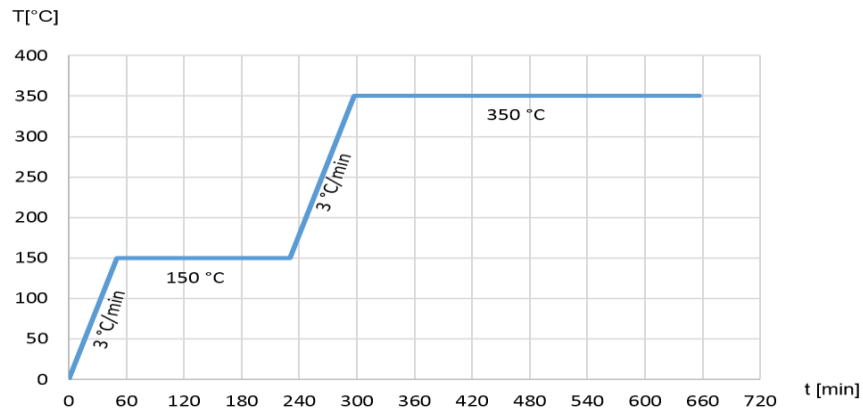
<b>% EN PESO</b>	<b>RELACIÓN AGUA-100 DE POLVO</b>			
		58	60	62

Por ende, al tener cuantificados los parámetros fundamentales, se realizaron probetas de las mezclas mencionadas anteriormente, de 2" de diámetro por 2" de alto, siguiendo un proceso de mezclado mecánico por un minuto, en el cual el polvo se adicionó lentamente después de haber sido homogeneizado en su totalidad, usando la mezcladora de pedestal Mixmaster marca OSTER a 647 rpm. Posteriormente se realizó vacío a cada una de las probetas, antes de ser llevadas al tratamiento térmico, con la intención de liberar las burbujas de aire atrapadas en su interior, disminuyendo la cantidad de defectos, mediante la máquina de vacío LAMICOL. Todo lo anterior se efectuó con el ánimo de analizar factores como la permeabilidad, la resistencia a la compresión y resistencia al choque térmico del revestimiento refractario, condiciones necesarias para su implementación en el proceso de microfundición.

**3.3.2 Análisis térmico de la mezcla refractaria magnesita-yeso.** Se llevó a cabo un análisis térmico, con el fin de evaluar el comportamiento del polvo refractario (refractario-aglomerante) en verde y determinar su comportamiento a altas temperaturas, con lo cual se estableció el tratamiento térmico adecuado para la obtención del revestimiento.

**3.3.3 Tratamiento térmico de la mezcla refractaria.** El tratamiento fue establecido según los resultados de los análisis térmicos, realizados a las mezclas refractarias magnesita-yeso. Los ciclos de calentamiento de las mezclas, seleccionadas en la etapa anterior, se hicieron a una temperatura no superior a 350°C y velocidad de 3°C/min (ver Figura 4), buscando la protección de la esmeralda, la estabilidad térmica y propiedades mecánicas adecuadas del revestimiento. El tratamiento térmico del revestimiento se realizó en el horno programable marca VULCAN 3-550.

**Figura 4.** Tratamiento térmico aplicado al revestimiento refractario magnesita-yeso.



### 3.4 ETAPA 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS

**3.4.1 Determinación de las propiedades físico-mecánicas.** Después de someter el revestimiento refractario al tratamiento térmico, se evaluó la resistencia a la compresión y permeabilidad. Con el ánimo de obtener una mayor confiabilidad de los resultados, se elaboraron 3 probetas por cada ensayo, buscando determinar un valor promedio. Acto seguido, se seleccionaron los revestimientos cuyas propiedades físico-mecánicas se acercaran más a la de los revestimientos tradicionales, para realizar las pruebas de resistencia al choque térmico (norma NTC 1432) a una temperatura de 700° C. Para cada ensayo se utilizaron 5 probetas, cada una de las cuales se sometió a 5 ciclos de calentamiento-enfriamiento durante 12 minutos  $C/U$ . Al finalizar el quinto ciclo se determinó la resistencia a la compresión y se calculó la disminución de la misma por efecto del choque térmico.

Los equipos usados en estos ensayos fueron: Permeámetro eléctrico de lectura directa marca Harry W. Dietert Co serial 338, para arenas de fundición basada en

la norma AFS [27], donde las medidas de porosidad se llevaron a cabo con intervención de mercurio; la máquina universal de ensayos, Harry W. Dietert Co. Control Equipment, DETROIT, MICH. Serial 33624, bajo la norma AFS; equipo INSOLTEC LTDA, TREBEL.

**3.4.2 Adición de agentes formadores de poros.** En esta etapa se evaluó el efecto que tiene la adición de polietilenglicol y almidón de yuca como agentes formadores de poros, en proporciones de 3-5% y 0,5-1-2% respectivamente, en la resistencia a la compresión y la permeabilidad de los revestimientos refractarios seleccionados en la etapa anterior.

### **3.5 ETAPA 5. PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN**

**3.5.1 Verificación del acabado superficial, copiado y llenado del molde refractario.** Luego de seleccionar los revestimientos con las propiedades físico-mecánicas y térmicas más adecuadas para el proceso de microfundición, se evaluaron preliminarmente en dicho proceso, sin gemas pre-engastadas, con el fin de estudiar cualitativa y cuantitativamente el acabado superficial, utilizando el microscopio Hirox. Para ello se realizó, inicialmente, el montaje del árbol de cera en la base de goma de la matriz cilíndrica utilizada para la microfundición, tal como se aprecia en la Figura 5Figura 5. El árbol estuvo conformado por dos anillos y una placa, para evaluar el copiado de detalles y analizar el acabado de la superficie respectivamente.

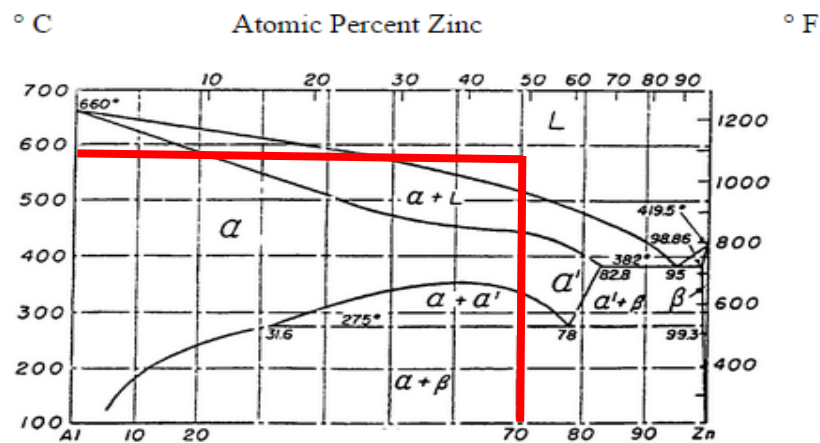
La aleación utilizada en esta etapa fue Al-Zn 30-70%, teniendo en cuenta su buena colabilidad, temperaturas de fusión y de colada de 520°C y 600°C, respectivamente (ver figura 6). Este proceso se realizó en un horno eléctrico

NEUTEC/USA de resistencia al vacío, ubicado en el laboratorio de microfundición de la Universidad Industrial de Santander.

**Figura 5.** Fotografías del proceso de obtención de las piezas fundidas a partir del árbol de cera



**Figura 6.** Diagrama de fases binario Al-Zn

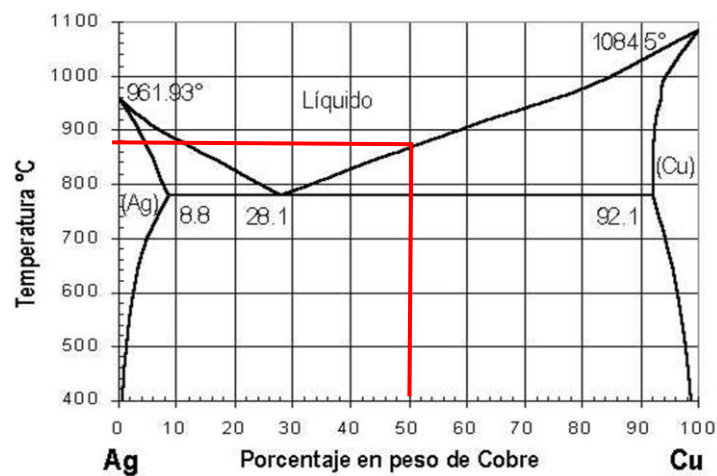


**Fuente:**Aluminio-Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta 18 de marzo de 2015].  
 Disponible en: <[http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al\\_zn\\_alloy.html](http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html)> [28]

Con base en los resultados obtenidos en esta parte del proyecto, se seleccionó el revestimiento más adecuado para el proceso de microfundición, el cual se empleó para las coladas finales con pre-engaste de esmeraldas.

**3.5.2 Proceso de micro-fundición por cera perdida con el pre-engaste de esmeraldas colombianas.** Para las coladas finales se emplearon dos aleaciones, 30% Al-70% Zn y 50% Ag-50% Cu. Las temperaturas de fusión y colada de esta última aleación fueron 870°C y 970°C, respectivamente (ver Figura 7).

**Figura 7.** Diagrama de fases binario Ag-Cu



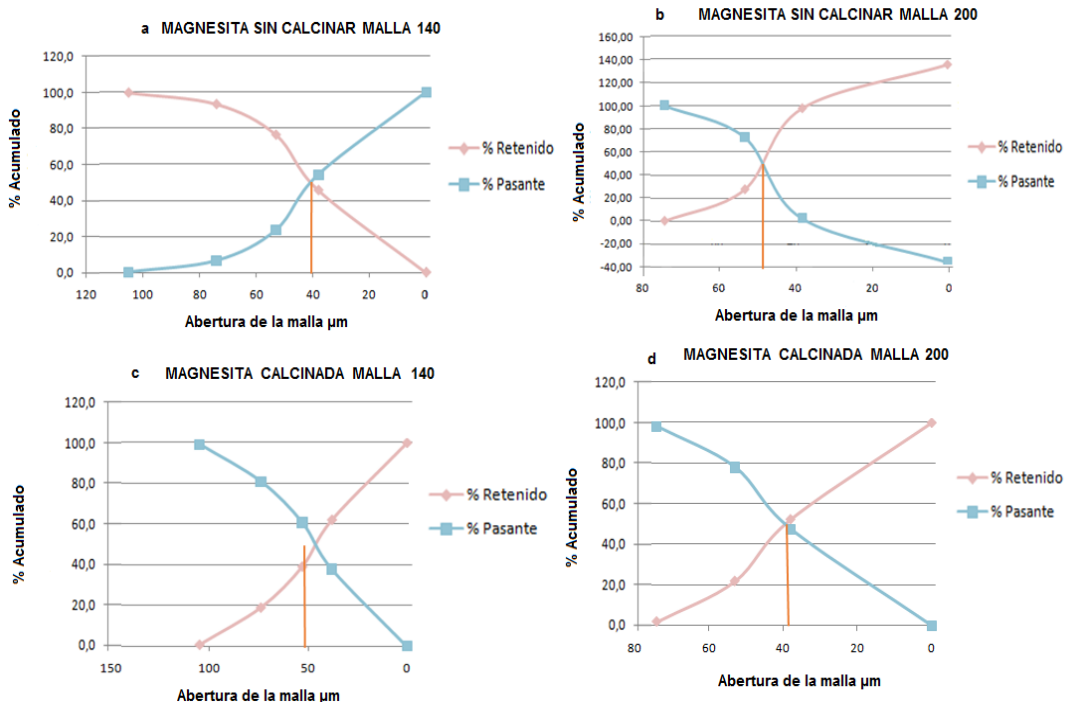
**Fuente:**Plata-Cobre de estado sólido [En línea]. [Consulta 18 de marzo de 2015].  
Disponibile en: < [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pejercicios5\\_3.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pejercicios5_3.html) [29]

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

**4.1.1 Análisis granulométrico.** El análisis granulométrico realizado a la magnesita calcinada y sin calcinar para cada una de las mallas (-140 y -200) mostró que las materias primas tienen un diámetro promedio de partícula entre 38 y 48  $\mu\text{m}$  (Figura 8Figura 8), los cuatro materiales presentan distribuciones granulométricas con elevada cantidad de finos, lo cual es favorable para el copiado de los detalles y contribuye a un adecuado acabado superficial en las piezas fundidas.

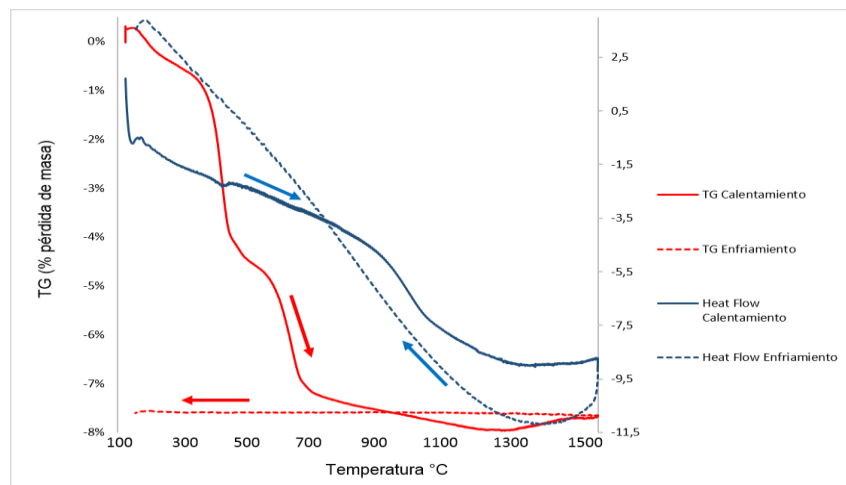
**Figura 8.** Distribuciones granulométricas de la materia prima calcinada y sin calcinar (1)-(3) malla 140 y (2)-(4) malla 200.



**4.1.2 Calcínación de la magnesita.** En la Figura 9 se presentan los resultados de los análisis térmicos (TG y DSC) realizados a la magnesita original (sin calcinar), tanto en calentamiento como en enfriamiento. En el termograma (TG) se observan tres zonas de pérdida de masa, a temperaturas de 100°C, 300°C y 500°C, aproximadamente (ver Figura 9), atribuidas a la pérdida de humedad, descomposición del hidróxido de magnesio y del carbonato de magnesio respectivamente.

Para la curva de flujo de calor (DSC), se evidencian dos picos endotérmicos, el primero a 100°C y el segundo a 300°C ya que la magnesita en el rango de temperatura de estudio presenta las transformaciones mencionadas anteriormente detectables para esta prueba. Del termograma se observa que se alcanza la estabilidad térmica a 1000°C aproximadamente, relacionado con la transformación del  $MgCO_3$  en  $MgO$  con la estructura cristalina de la periclasa (cúbica) (ver Anexo D). La estabilidad de la magnesita luego del calentamiento es corroborado por el termograma durante el enfriamiento, dada la usencia de variaciones de masa.

**Figura 9.** Análisis Termogravimétrico y de flujo de calor (DSC) de la Magnesita.



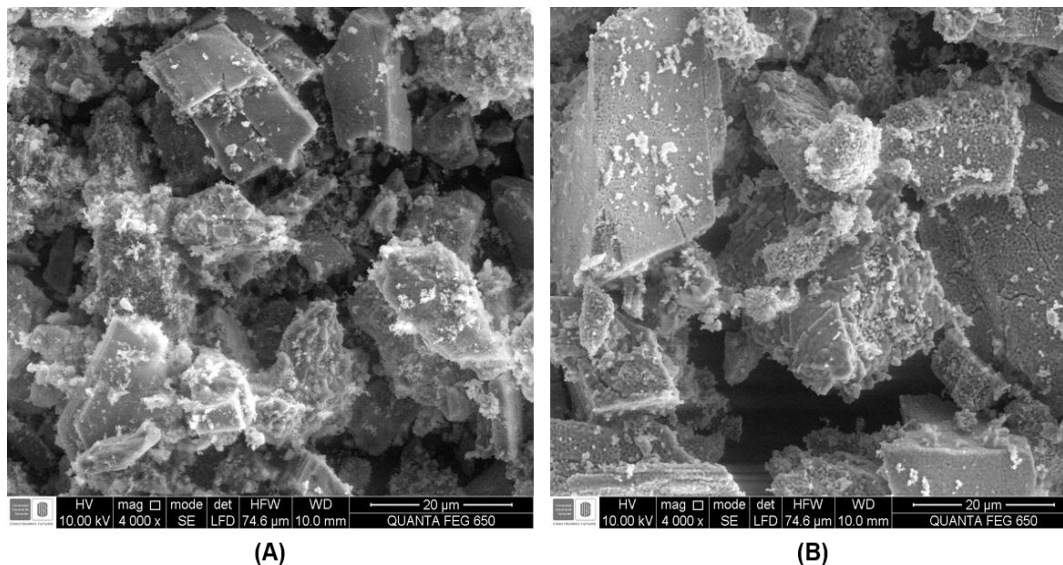
La magnesita calcinada presenta cristales de periclasa de mayor tamaño, con una morfología porosa por la evacuación del  $CO_2$  durante la cocción, formando

partículas esferoidales (ver Figura 10). Estas contienen Magnesio y Oxígeno, como lo revela el análisis EDS (Anexo E), lo que implica una mayor estabilidad química de la magnesita, que permite que sea compacta y resistente a la abrasión, con un contenido en MgO por encima del 85%, debido a la pérdida de fases cristalinas presentes en la materia prima sin calcinar (ver Tabla 4), propiedades que favorecen el revestimiento. [30]

**Tabla 4.** Análisis de DRX cuantitativo de la magnesita sin calcinar y calcinada 1000°C.

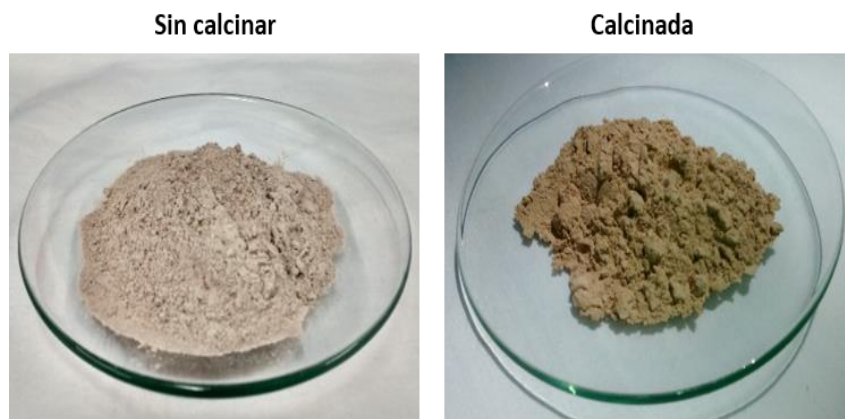
<b>MAGNESITA SIN CALCINAR</b>			
	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CUANTITATIVO (D.E)</b>
<b>Cristalinos</b>	MgO	Periclasa	84,2% (0,1)
	Mg(CO <sub>2</sub> )	Magnesita	2,3% (0,1)
	Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita	3,5% (0,1)
	Fe(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O)	Szomolnokita	N.C
	CaCO <sub>3</sub>	Calcita	<1%
	Ca <sub>1.95</sub> Al <sub>3.9</sub> Si <sub>8.1</sub> O <sub>24</sub>	Chabazita	<1%
	Mn <sub>28.5</sub> Si <sub>135</sub> Al <sub>57</sub> O <sub>384</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>27.2</sub>	Faujasita	<1%
<b>Total Cristalinos</b>			91,0%
<b>Amorfos y otros</b>			9,0%
<b>MAGNESITA CALCINADA</b>			
	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CUANTITATIVO (D.E)</b>
<b>Cristalinos</b>	MgO	Periclasa	85,6 % (0,2)
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetita	1,7% % (0,1)
<b>Total Cristalinos</b>			87,3%
<b>Amorfos y otros</b>			12,7%

**Figura 10.** Micrografías SEM de la magnesita a 4000X, (A) sin calcinar, (B).



Así mismo, se produjo un cambio notorio de tonalidad del material (ver Figura 11), pasando de gris a pardo claro, con agregados de pardo rojizo, fenómeno asociado a la recristalización de la periclasa.

**Figura 11.** Cambio de coloración de la magnesita, antes y después de la calcinación.

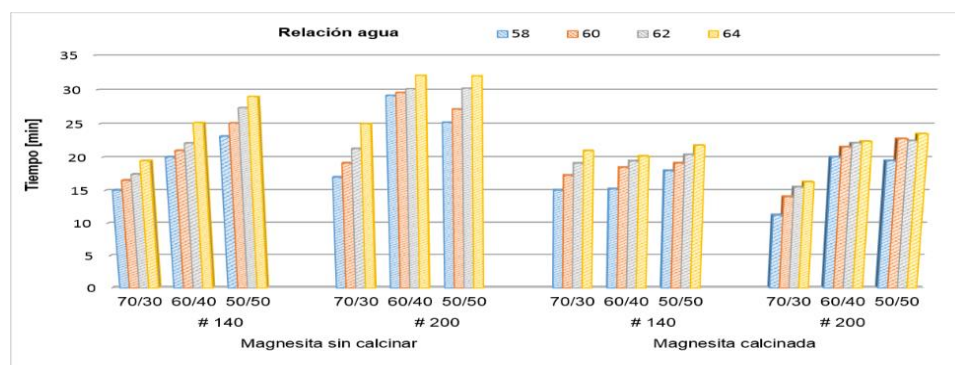


## 4.2 MEDICIÓN DEL TIEMPO DE TRABAJO Y TIEMPO DE FRAGUADO

En las tablas del Anexo F se presentan los valores de tiempo de trabajo y de fraguado obtenidos para todas las mezclas magnesita/yeso estudiadas; los datos de tiempo de trabajo fueron graficados en la Figura 12. Para todas las mezclas, se obtuvieron altos tiempos de fraguado respecto a la mezcla comercial (de 5 a 9 1/2 min, aproximadamente). Estos mayores tiempos de trabajo presentan como ventaja que el joyero tiene mayor periodo de manejo de la mezcla, cuando se requiere realizar producciones en masa.

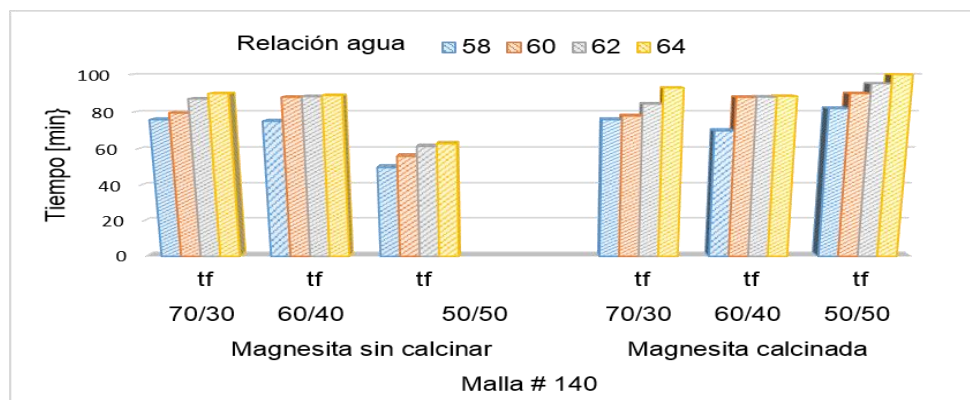
Al comparar los valores de tiempo de trabajo para las diferentes muestras, la tendencia general es que para una misma mezcla, a medida en que aumenta el porcentaje de agua y de yeso, aumenta el tiempo de trabajo, debido a que a mayor cantidad de agua, el yeso que actúa como aglomerante tarda más tiempo en absorber en su totalidad el agua agregada. Así mismo se observa que los valores de tiempo de trabajo para la magnesita sin calcinar, son mayores que los de las mezclas con magnesita calcinada, lo cual puede estar relacionado con la reactividad de la primera con el agua, para formar hidróxido de magnesio, reacción que compite con la hidratación del yeso.

**Figura 12.** Tiempo de trabajo relaciones magnesita-yeso, pasantes malla -140 y -200, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada

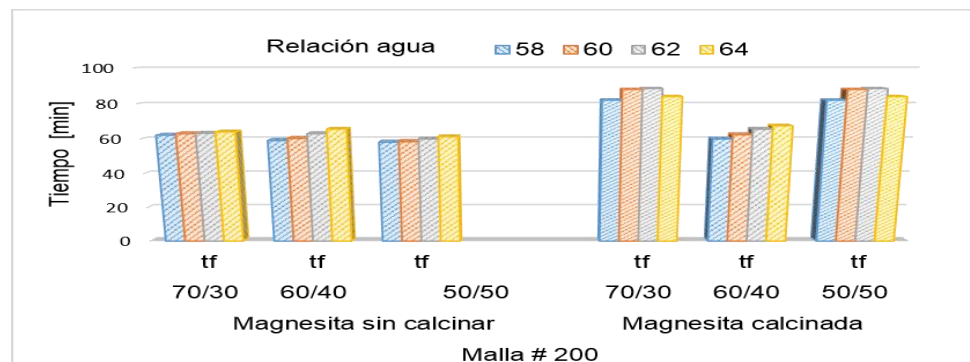


En cuanto a los tiempos de fraguado (Figuras 13 y 14), se observa que, en general, tales tiempos son mayores para las pastas obtenidas con la granulometría del refractario más gruesa (pasante malla 140) que con la más fina (pasante malla 200), lo cual se relaciona con un mayor contacto entre el yeso y las partículas finas de la magnesita, que facilita la aglomeración de estas últimas con el yeso durante su fraguado.

**Figura 13.** Tiempo de fraguado relaciones magnesita-yeso pasante malla 140, magnesita sin calcinar y magnesita calcinada



**Figura 14.** Tiempo de fraguado relaciones magnesita-yeso pasante malla 200, magnesita sin calcinar y magnesita calcinada.



Al finalizar el fraguado de las probetas se evaluó la textura de su superficie, encontrando que las probetas con un contenido de agua superior a 64mL por cada 100 g de polvo, presentaron fraguado no homogéneo debido a la saturación de la mezcla y la decantación de partículas, así como el exceso de humedad en los bordes de las probetas dando una excesiva rugosidad (ver Figura 15). Estos defectos superficiales del revestimiento se transfieren, durante el proceso de microfundición, a la pieza fundida, quedando esta última con un acabado superficial deficiente; por tal motivo se cerró el rango de la proporción de agua a valores máximos de 64%.

**Figura 15.** Fotografía de una probeta con 64% de agua, empleada en la prueba de tiempo de fraguado.

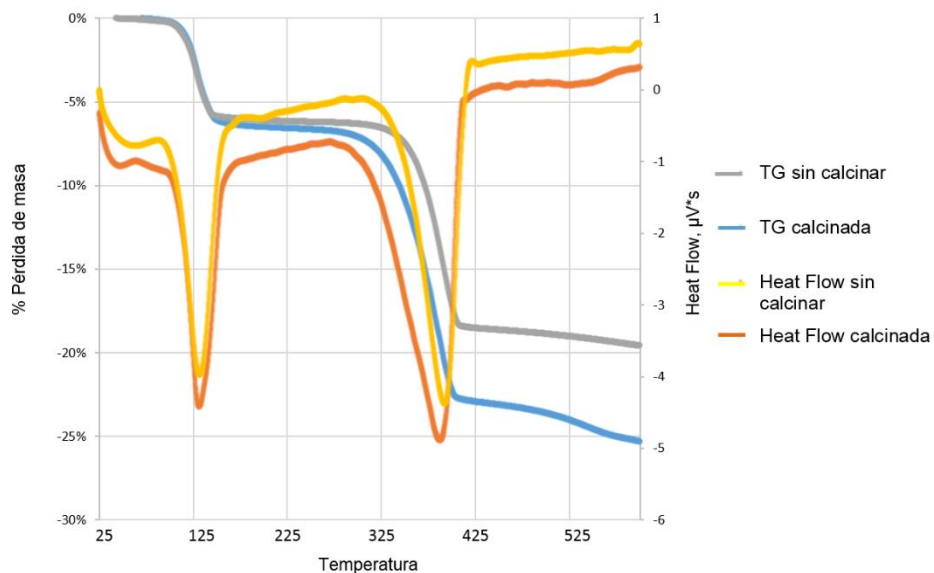


#### 4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS MAGNESITA-YESO

**4.3.1 Análisis térmico de la mezcla refractaria magnesita-yeso.** En la Figura 16 se presentan los análisis térmicos (TG y DSC) para una mezcla magnesita-yeso 70/30, con la magnesita calcinada y sin calcinar. Este análisis se realizó con el fin de evaluar el comportamiento de la mezcla cerámica luego del tratamiento térmico. Se observan dos pérdidas entre 100 y 140°C, se atribuye a la deshidratación del yeso o del sulfato de calcio desde su forma dihidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), pasando por la hemihidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) hasta la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). La segunda zona se observa entre 325 y 400°C, y se relaciona con la eliminación del grupo OH del hidróxido de magnesio, formado en el momento de realización de la barbotina.

Es evidente que la pérdida de masa en esta segunda zona, es mayor para el revestimiento obtenido con magnesita sin calcinar que con la calcinada, lo cual se debe a la mayor estabilidad de esta última. En las curvas DSC se observan dos picos endotérmicos asociados a las zonas de reacción descritas anteriormente.

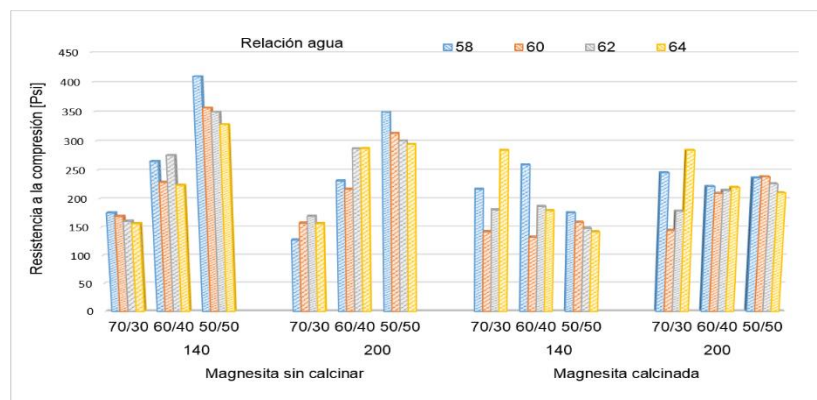
**Figura 16.** Análisis Termogravimétrico TG y Calorimetria de barrido diferencial de la mezcla refractaria magnesita/yeso 70/30.



**4.3.2 Resistencia a la compresión.** Las relaciones empleadas durante el estudio, presentan valores elevados de resistencia a la compresión (Anexo G), excediendo significativamente los rangos de la mezcla comercial (42 - 54 Psi), factor crítico para el proceso de micro-fundición al momento de realizar el desmoldeo, ya que se presentarían dificultades para liberar la pieza del revestimiento, produciendo el desprendimiento de las gemas y/o ruptura de piezas con geometría irregular.

Los resultados muestran que para la magnesita sin calcinar al aumentar el porcentaje de yeso incrementa la resistencia a la compresión (ver Figura 17), esto se debe a la elevada resistencia del yeso, que alcanza valores entre 3000 – 6000 Psi y la naturaleza del material, que sin ser tratado térmicamente posee mayor cantidad de fases cristalinas, las cuales reaccionan con el yeso (Tabla 5); fases como la Brucita y Magnesita, que en combinación con el yeso, generan compactación a la mezcla. Caso contrario a la magnesita calcinada, ya que al ser tratada térmicamente con anterioridad (ver Tabla 6), se disminuyen las fases hidratadas y carbonatos presentes, aumentando el contenido de periclasa la cual brinda mayor estabilidad química al óxido de magnesio.

**Figura 17.** Resistencia a la compresión relaciones magnesita-yeso, pasantes malla 140 y 200, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada.



**Tabla 5.** Fases presentes mezcla magnesita-yeso 60/40 con 60mL de agua por cada 100g de sólidos, antes del tratamiento térmico, sin calcinación y calcinado.

<b>MAGNESITA SIN CALCINAR</b>		
	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>CRISTALINOS</b>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso
	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Brucita
	$\text{MgO}$	Periclasa
	$\text{MgO}$	Magnesia
	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Talco
	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	Yeso
	$\text{Mg}(\text{CO}_3)$	Magnesita
<b>MAGNESITA CALCINADA</b>		
	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>CRISTALINOS</b>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso
	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Brucita
	$\text{MgO}$	Periclasa
	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	Anhidrita

**Tabla 6.** Fases presentes en la mezcla magnesita-yeso 60/40 con 60mL de agua por cada 100g de sólidos, después del tratamiento, sin calcinación y calcinado.

<b>MAGNESITA SIN CALCINAR</b>		
	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>CRISTALINOS</b>	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$	Yeso
	$\text{MgO}$	Periclasa
	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	Yeso
	$\text{Mg}(\text{CO}_3)$	Magnesita
<b>MAGNESITA CALCINADA</b>		
	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>CRISTALINOS</b>	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$	Yeso

	Ca (SO <sub>4</sub> )	Yeso
	MgO	Periclasa

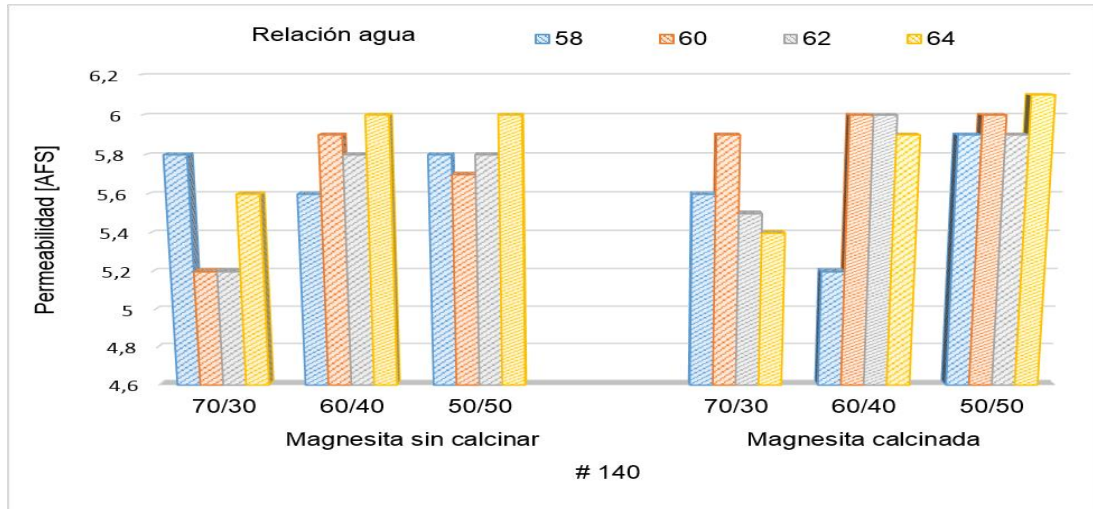
**5.3.3 Permeabilidad.** En el Anexo H, se presentan los valores de permeabilidad en unidades AFS de las composiciones trabajadas, calcinadas y sin calcinar, asociados a las Figuras 18 y 19, con granulometría pasante mallas 140 y 200, respectivamente, donde se evidencian el aumento de la permeabilidad en relación con la mezcla comercial, Diamante kerr (Anexo J), equivalente a 4,8 AFS.

Al comparar los valores de permeabilidad de los revestimientos obtenidos con las dos granulometrías, se observa que con la granulometría más fina (pasante malla 200) se tienen valores de permeabilidad que oscilan entre 5,4 y 6,2 AFS; mientras que con la granulometría más gruesa (pasante malla 140), los valores están entre 5,2 y 6,1 AFS.

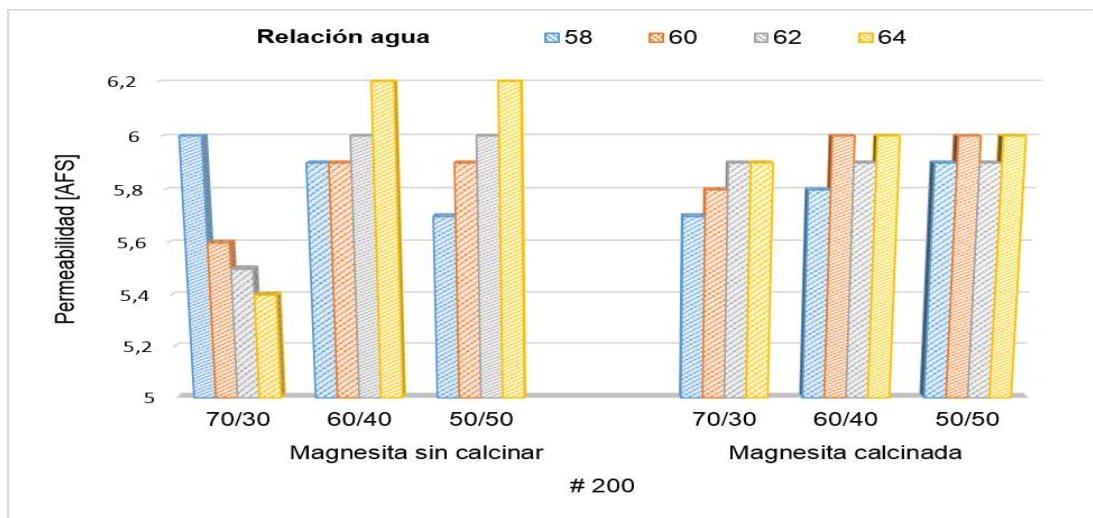
Lo anterior indica que, al tener una granulometría más amplia, el material está más compacto y posee una porosidad menor; esto sucede con la malla 140, a diferencia de la malla 200, donde las partículas tienen un tamaño más homogéneo, lo que impide una reacomodación intersticial de las mismas.

No obstante, teniendo en cuenta que el material presenta una distribución granulométrica con elevada cantidad de finos, las diferencias de permeabilidad entre las distintas granulometrías no son muy significativas.

**Figura 18.** Permeabilidad del revestimiento magnesita-yeso malla 140, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada.



**Figura 19.** Permeabilidad del revestimiento magnesita-yeso malla 200, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada.



**5.3.4 Resistencia al choque térmico.** El ensayo se realizó a una temperatura de 700° C a las mezclas especificadas en las tablas del Anexo I, se seleccionaron bajo el criterio de menor resistencia a la compresión del revestimiento magnesita-yeso, dado que todos los revestimientos tuvieron resistencias muy elevadas en comparación con el revestimiento tradicional.

La magnesita y la periclasa, por naturaleza, presentan baja conductividad térmica, además de la descomposición del carbonato de magnesio a temperaturas que oscilan entre 250 y 550°C, lo que genera que la magnesita sin calcinación inicie este proceso durante el tratamiento térmico del revestimiento, cuya temperatura máxima es de 350°C, sufriendo grietas al concluirlo (ver Figura 20), a diferencia del material calcinado que previamente fue tratado térmicamente y la evacuación del CO<sub>2</sub> del carbonato ya ha sucedido.

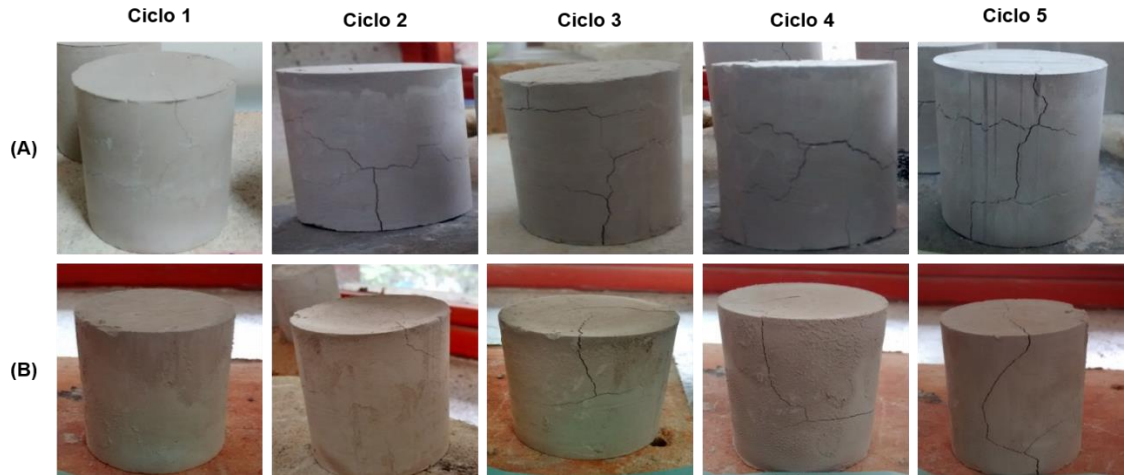
**Figura 20.** Revestimiento obtenido con magnesita sin calcinar al terminar el tratamiento térmico.



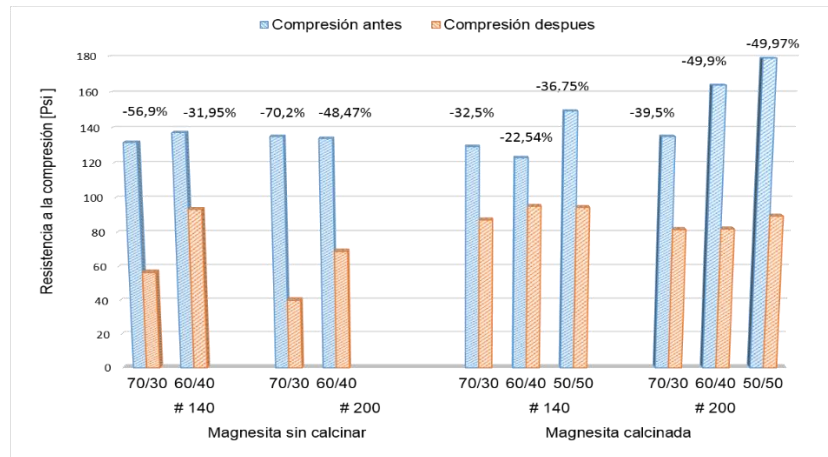
Durante los cinco ciclos de 12 minutos cada uno, a los que fueron sometidas cinco probetas, se presentó un agrietamiento pronunciado desde el tercer ciclo en las mezclas de magnesita calcinada (ver Figura 21) y desde el ciclo dos para las mezclas no calcinadas, comportamiento acorde con la resistencia a la compresión

posterior al choque térmico mostrada en la Figura 22, donde se alcanzaron valores tan bajos como 40,17 Psi.

**Figura 21.** Ciclos de choque térmico mezcla 60/40 magnesita sin calcinar (A) y magnesita calcinada (B).



**Figura 22.** Resistencia a la compresión antes y después del choque térmico en función del contenido de magnesita en el revestimiento.



Ahora bien, al comparar los revestimientos de magnesita calcinada y sin calcinar, es posible observar que aquellos con magnesita sin calcinar presentan gran

cantidad de grietas después del tratamiento térmico, las cuales se intensifican al aumentar la temperatura, por lo que durante el colado del metal fundido se obtendrían piezas de joyería con defectos de fundición; así mismo, cuentan con una elevada resistencia a la compresión, lo que puede causar fallas durante el proceso de microfundición en la etapa de desmoldeo, generando ruptura de las piezas o desprendimiento de la gema.

Por lo tanto, la magnesita sin calcinar no es recomendable para este tipo de revestimientos. Caso contrario a la mezcla magnesita calcinada/yeso, que posee mejor resistencia al choque térmico y menor resistencia a la compresión, propiedades que benefician el proceso de microfundición a la cera perdida, dando una liberación apropiada de la pieza fundida.

Dado lo anterior, se descartan las mezclas con magnesita sin calcinar, siguiendo así con el estudio de agentes formadores de poros de las mezclas mostradas en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Muestras seleccionadas para el estudio de adición de agentes formadores de poros

<b>MAGNESITA CALCINADA 1000°C</b>	
<b>Magnesita / yeso malla pasante 200</b>	<b>mL de agua por cada 100 g de sólidos</b>
<b>70/30</b>	<b>60</b>
<b>60/40</b>	
<b>50/50</b>	

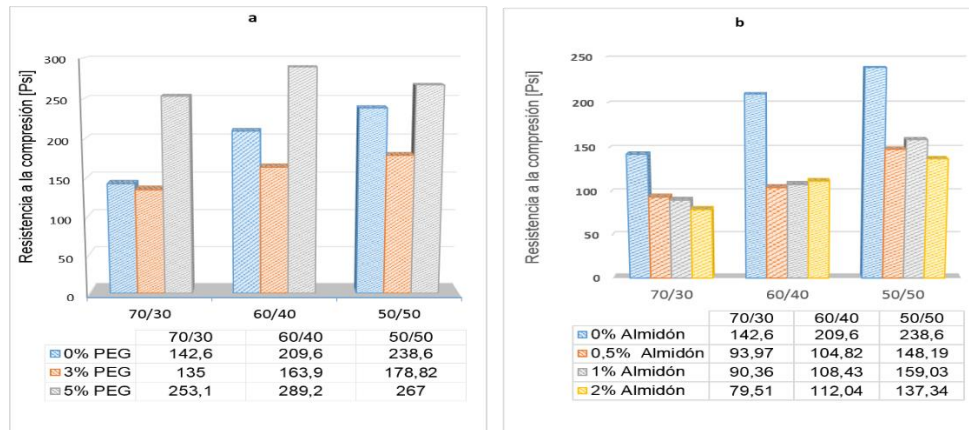
## 5.4 AGENTES FORMADORES DE POROS

Con el propósito de aumentar la permeabilidad de la mezcla refractaria se adicionó polietilenglicol (PEG) y almidón de yuca como agentes formadores de poros, en proporciones de 3-5% y 0,5-1-2%, respectivamente, evaluando la influencia de cada uno en la resistencia a la compresión (Figura 23) y la permeabilidad (Figura 24) del revestimiento, obtenido con magnesita calcinada.

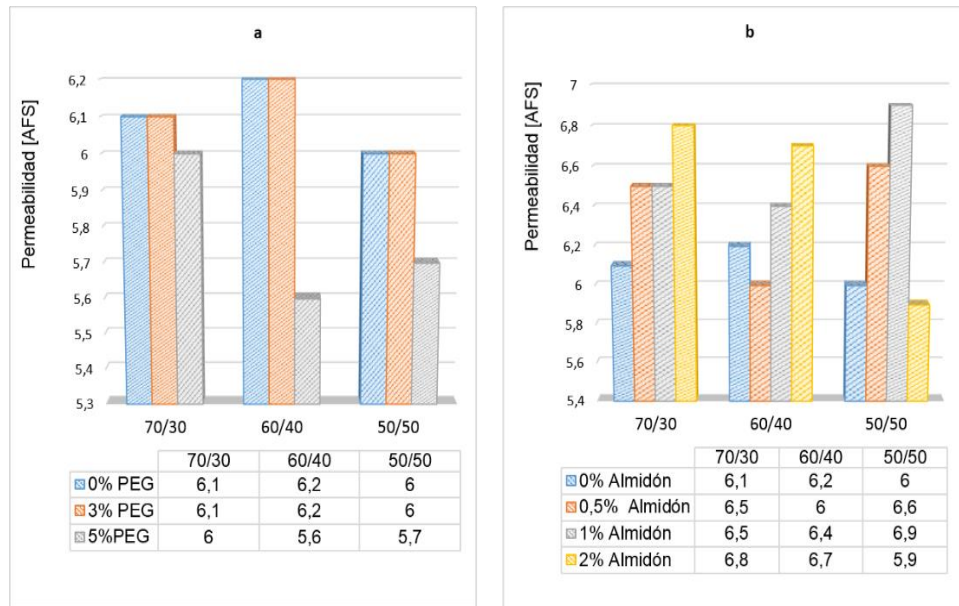
Al variar el porcentaje de PEG en el revestimiento, se obtiene una leve disminución de la resistencia a la compresión sin aumento de la permeabilidad al agregar 3%; caso opuesto al adicionar 5% donde la compresión aumenta notablemente y la permeabilidad disminuye (ver Figuras 23(a) y 24(a)), comportamiento contrario al esperado.

Así mismo, al adicionar almidón de yuca, se incrementa la permeabilidad a la vez que el porcentaje agregado. Gracias a este aumento en la porosidad, se produce una leve disminución en la resistencia a la compresión de las mezclas, siendo la tendencia de las proporciones 60/40 y 70/30 (ver Figuras 23(b) y 24(b)).

**Figura 23.** Resistencia a la compresión en función del % de polietilenglicol (PEG) (a) y de almidón de yuca (b) adicionados en las mezclas de magnesita calcinada.



**Figura 24.** Permeabilidad en función del % de polietilenglicol (a) y almidón de yuca (b) adicionados en las mezclas de magnesita calcinada



Según los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y permeabilidad en función de la cantidad de agente formador de poros adicionado, para 3% de PEG y 2% de almidón de yuca, se obtuvieron las mezclas con mejores propiedades para realizar los prototipos preliminares, con una aleación Al-Zn.

Teniendo en cuenta que los resultados entre las mezclas 60/40 y 70/30 no presentan una diferencia significativa, se partió de la relación costo magnesita/yeso, donde la diferencia entre la facilidad de obtención y el costo en el mercado de las dos materias primas, difiere en gran medida, siendo la magnesita un producto de valor elevado, escogiendo finalmente la proporción magnesita/yeso 60/40 (ver Tabla 8).

**Tabla 8.** Revestimientos seleccionados para el proceso de microfundición.

<b>MUESTRA SELECCIONADA PARA REALIZAR PROTOTIPOS</b>						
<b>Magnesita calcinada/ yeso 60/40 malla - # 200</b>						
<b>Formador de poros</b>	<b>mL de agua por cada 100 g de sólidos</b>	<b>t Trabajo [min]</b>	<b>t Fraguado [min]</b>	<b>Permeabilidad [AFS]</b>	<b>Resistencia compresión [Psi]</b>	<b>Resistencia compresión * [Psi]</b>
<b>sin</b>	60	21,56	62,4	6,23	163,85	82,00
<b>3% PEG</b>	60	21,58	62,4	6,2	163,9	78,5
<b>2% Almidón de yuca</b>	60	21,58	62,4	6,7	112,04	69,00

\* Resistencia a la compresión luego de choque térmico

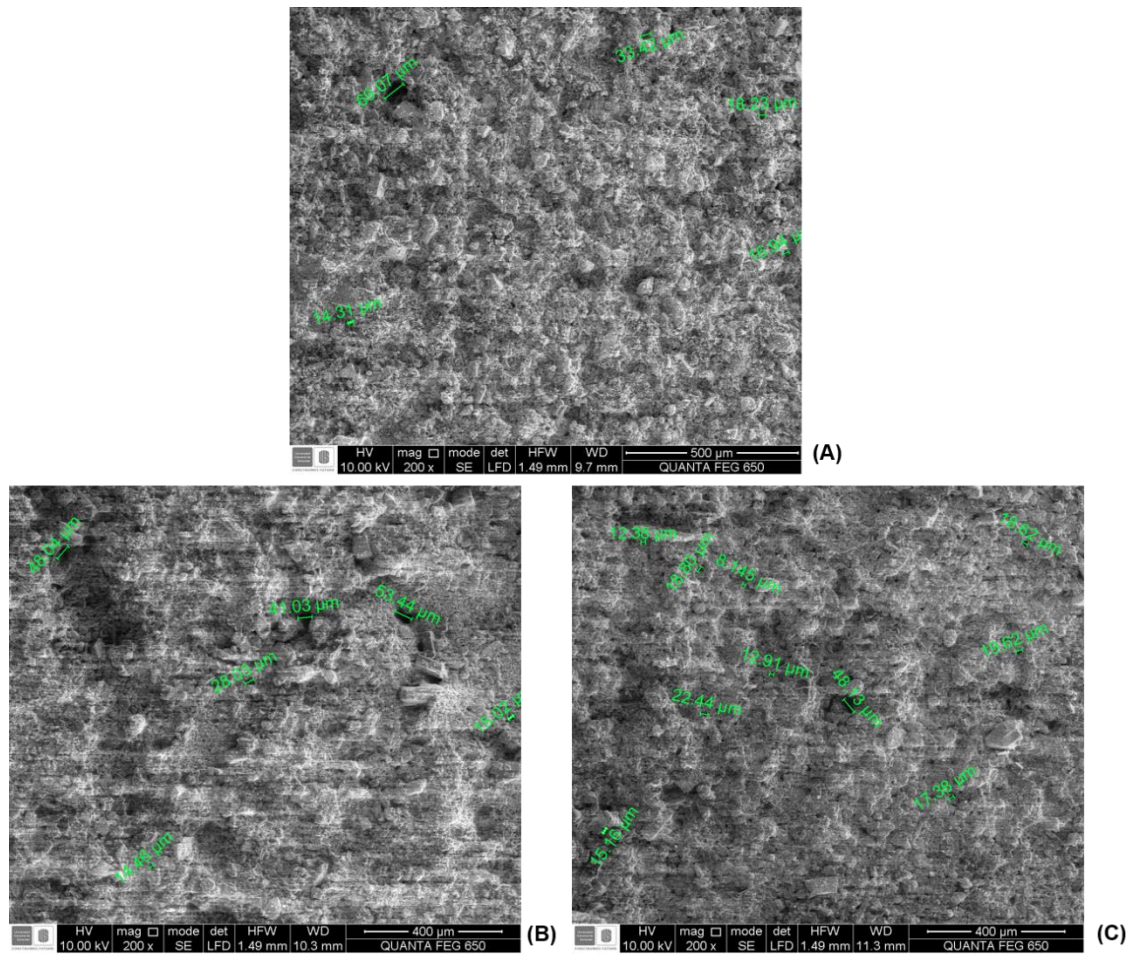
Mediante el análisis de microscopia electrónica de barrido SEM se analizó la microestructura de los revestimientos refractarios magnesita/yeso, posterior al tratamiento térmico, con temperatura máxima de 350°C, mostrada en la Figura 25, con el objetivo de evaluar el efecto de los agentes formadores de poros en el tamaño de estos, además de los compuestos presentes en ellos por medio del microanálisis EDS.

Ahora bien, el revestimiento sin agente formador de poros (Figura 25 A), muestra tamaños entre 14-18  $\mu\text{m}$  con una distribución homogénea; en cambio posee otros de mayor tamaño que se salen del rango, atribuidos a un vacío inadecuado o incompleto de la barbotina.

Así mismo se evidenció que la adición de PEG (Figura 25 B), genera poros con tamaño entre 28-53  $\mu\text{m}$  y agrupados, a diferencia del almidón de yuca (Figura 25 C) con el cual se obtienen poros con tamaños de 8-19  $\mu\text{m}$  con una mejor distribución, lo que justifica el comportamiento presentado en las pruebas de permeabilidad al adicionar este agente formador de poros.

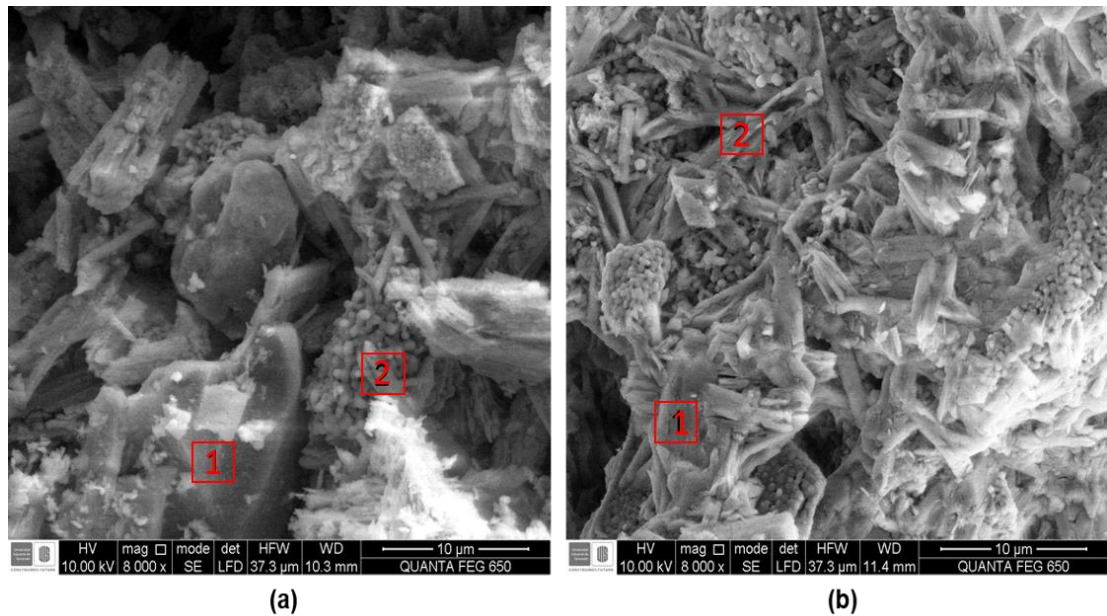
Teniendo en cuenta que los revestimientos poseen la misma composición 60/40, y se varía el agente formador de poros, que por su naturaleza es evacuado durante la cocción, el análisis por EDS (ver Anexo K) evidenció la presencia de los mismos compuestos, tales como Mg, O, Ca, S, asociados a la periclasa y al sulfato de calcio.

**Figura 25.** Micrografías SEM de los revestimientos obtenidos con magnesita calcinada/yeso (60/40) y 60 mL de agua por cada 100 g de sólido, a 200X, (A) sin agente, (B) 3% PEG, (C) 2% almidón de yuca.



Comparando microestructuralmente los revestimientos con contenido de agentes formadores de poros, PEG y almidón de yuca, mostrados en la Figura 26, se observa una diferencia notoria en la distribución de las fases presentes, 1 (Mg, O) y 2 (Ca, S, O), diferenciadas por los análisis EDS (Anexo K), donde el almidón de yuca genera mejor distribución del yeso sobre los granos de periclasa, además de uniformidad en el tamaño de las agujas. Estas características permiten prever un mejor copiado y acabado superficial en las piezas fundidas con el revestimiento modificado con almidón de yuca, que con PEG.

**Figura 26.** Micrografías revestimientos magnesita calcinada/yeso (60/40) y 60 mL de agua por cada 100 g de sólido 8000X, (a) 3% PEG, (b) 2% almidón de yuca.



## 5.5 PROCESO DE MICRO-FUNDICIÓN POR CERA PERDIDA CON EL PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS COLOMBIANAS.

**5.5.1 Estudios preliminares – proceso de micro-fundición sin gemas pre-engastadas.** Las coladas fueron llevadas a cabo con la aleación Al-Zn, siguiendo

las pautas mencionadas en el desarrollo experimental, con los revestimientos especificados en la Tabla 8.

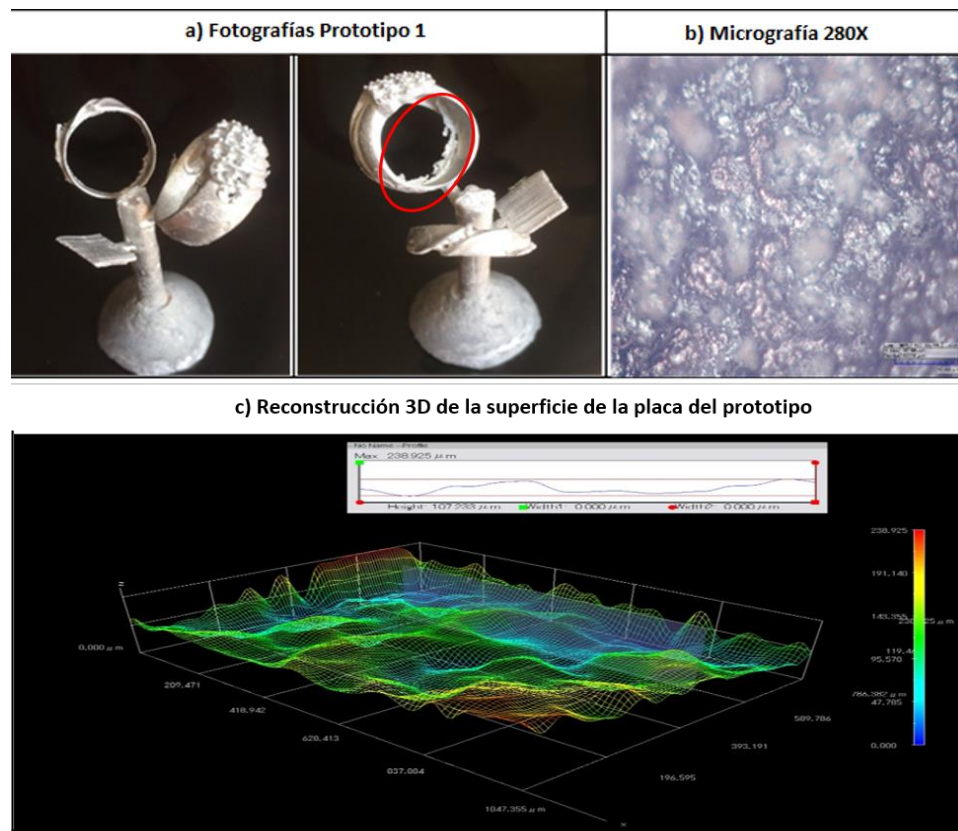
Al analizar las superficies de los prototipos obtenidos (Figuras 27 (a) - 28(a) y 29 (a)) se evidenció el copiado adecuado que presenta el revestimiento, indicando que la barbotina o suspensión cerámica, llenó todos los espacios sobre la superficie del modelo en cera, copiando cada detalle de este durante el fraguado.

Así mismo, al adicionar agentes formadores de poros, la rugosidad de las piezas fundidas incrementa, tal como lo evidencian las reconstrucciones 3D de las superficies de los prototipos (ver Figura 27(b y c) – Figura 28 (b y c) – Figura 29 (b y c)), mostrando que la adición de PEG y almidón de yuca generan burbujas en el revestimiento que, a la vez, son copiados por el metal líquido, brindando como resultado una superficie más rugosa. Con ayuda de las reconstrucciones 3D se determinaron los valores de rugosidad promedios, siendo estos 107,33  $\mu\text{m}$ , 248,392  $\mu\text{m}$  y 253,674  $\mu\text{m}$ , para el prototipo sin formador de poros, con PEG y con almidón de yuca, respectivamente.

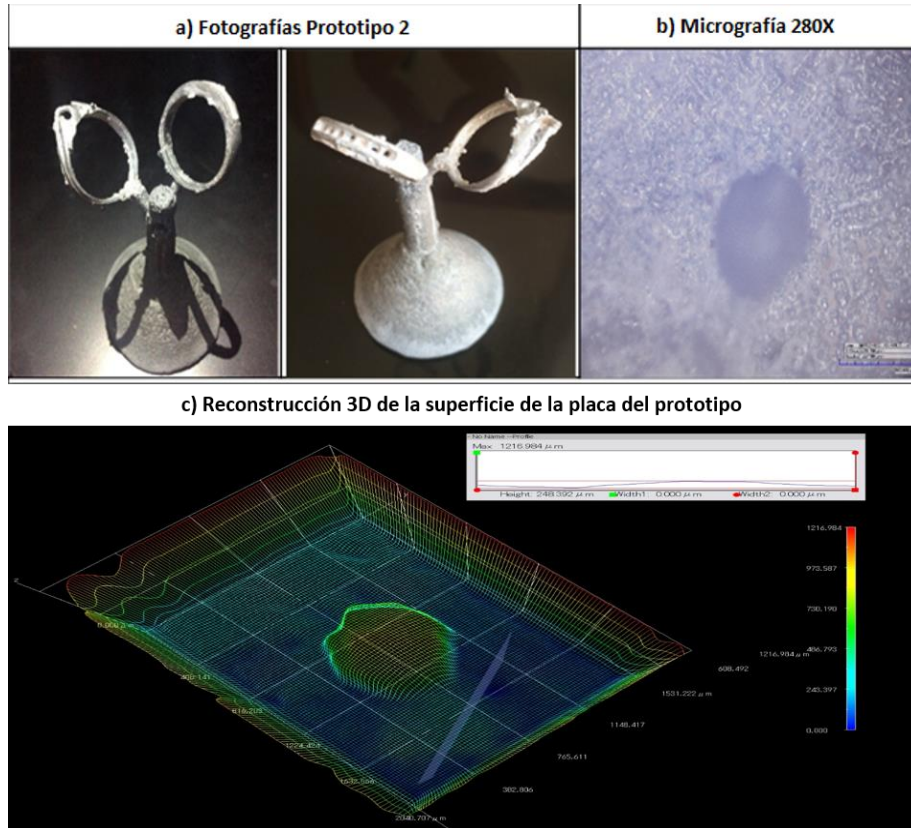
A pesar de la mayor rugosidad de los prototipos desarrollados con los revestimientos obtenidos con formadores de poros, el copiado de los detalles del molde fue bueno en todos los casos, produciéndose piezas con detalles completos y definidos. No obstante debido a la baja resistencia al choque térmico que posee la magnesita, al encontrarse a una temperatura de 350°, terminado el tratamiento térmico, y al entrar en contacto con el metal fundido a 604°C, además de las diferencias de presión y temperatura, se generan grietas en los revestimientos, conllevando a la sobre-penetración del metal en este, dando como resultado piezas con defectos de fundición, defectos superficiales denominados barbas o aletas, tal como se aprecia en la Figura 27(a).

Haciendo un análisis detallado de cada prototipo, se obtuvieron diferencias notorias; la mezcla 60/40 sin adición de agentes formadores de poros (Figura 27 (a)), presenta copiado adecuado de cada detalle del modelo en cera; pero, como se menciona anteriormente, posee exceso de material en forma de barbas; al agregar PEG (Figura 28(a)) se obtuvo un acabado superficial pobre, con barbas gruesas, además de poros de gran tamaño, con diámetro mayor a  $600\mu\text{m}$  (ver Figura 30), pertenecientes al revestimiento y copiados por el metal. Esto se debe a las burbujas con gran tensión superficial atrapadas en la barbotina, que no son evacuadas durante el tiempo de vacío, dejando gases atrapados. Por su parte, el revestimiento con adición de almidón de yuca, presenta poros de tamaño pequeño que no afectan de forma significativa el copiado de los detalles en los anillos.

**Figura 27.** Acabado superficial del prototipo 1, mezcla: magnesita calcinada/yeso 60/40 con 60% de agua, sin formador de poros.



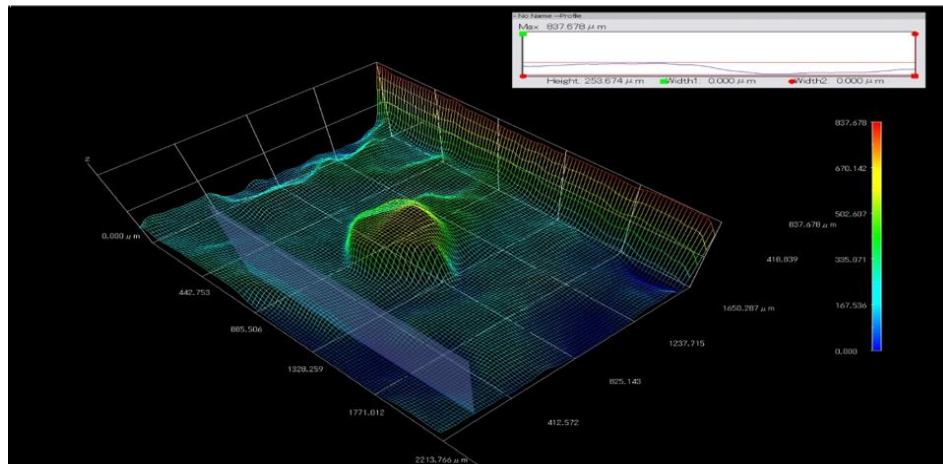
**Figura 28.** Acabado superficial del prototipo 2, mezcla: magnesita/yeso 60/40 con 60% de agua, 3% PEG.



**Figura 29.** Acabado superficial del prototipo 3, mezcla: magnesita/yeso 60/40 con 60% de agua, 2% almidón de yuca.



c) Reconstrucción 3D de la superficie de la placa del prototipo



**Figura 30.** Poros presentes en el revestimiento con adición de PEG.

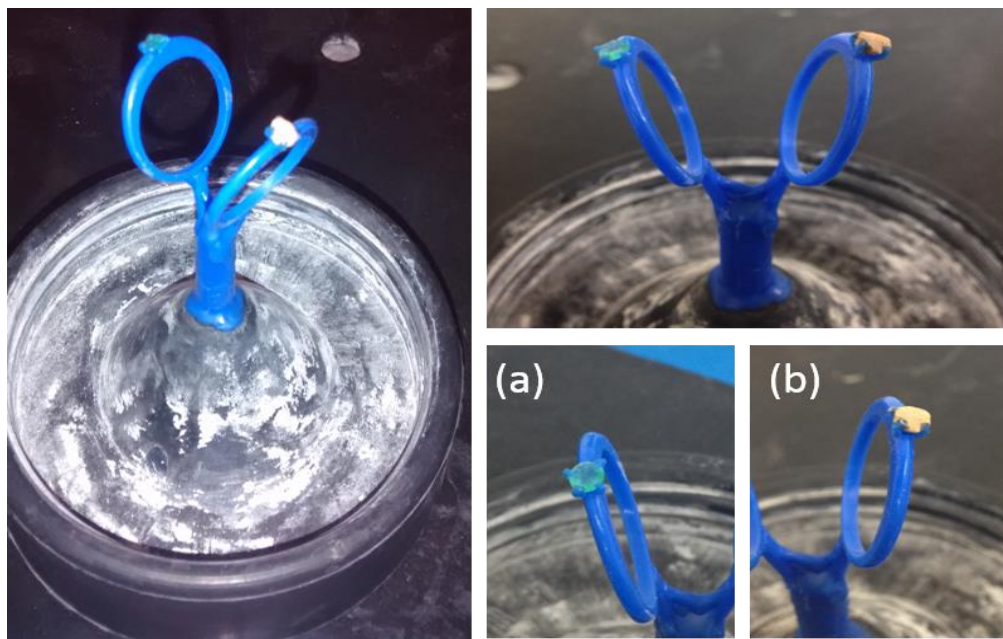


**5.5.2 Pruebas de microfundición con pre-engaste de esmeraldas.** De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio preliminar (apartado 5.5.1), con los revestimientos con los dos agentes formadores de poros, se seleccionó para las coladas finales, el revestimiento modificado por la adición de almidón de yuca al 2%.

Tal como se explicó en el apartado metodológico, en esta parte final de la investigación, se realizaron dos coladas, una a baja temperatura (604°C) con la aleación 30% Al- 70% Zn y otra a alta temperatura (970°) con la aleación 50% Ag- 50% Cu. En cada una de las coladas, se utilizó un árbol con dos modelos de anillos en cera, en los cuales se engastaron las esmeraldas previamente. Con el fin de determinar si el recubrimiento de las esmeraldas con una suspensión de

circonita-alcohol (60%-40%), realmente actúa como protector de la gema al daño por su exposición a altas temperaturas, tal como lo indican Villamizar, S y Rivera, K. [31], en cada árbol de cera una de las dos esmeraldas se recubrió y la otra no (ver Figura 31).

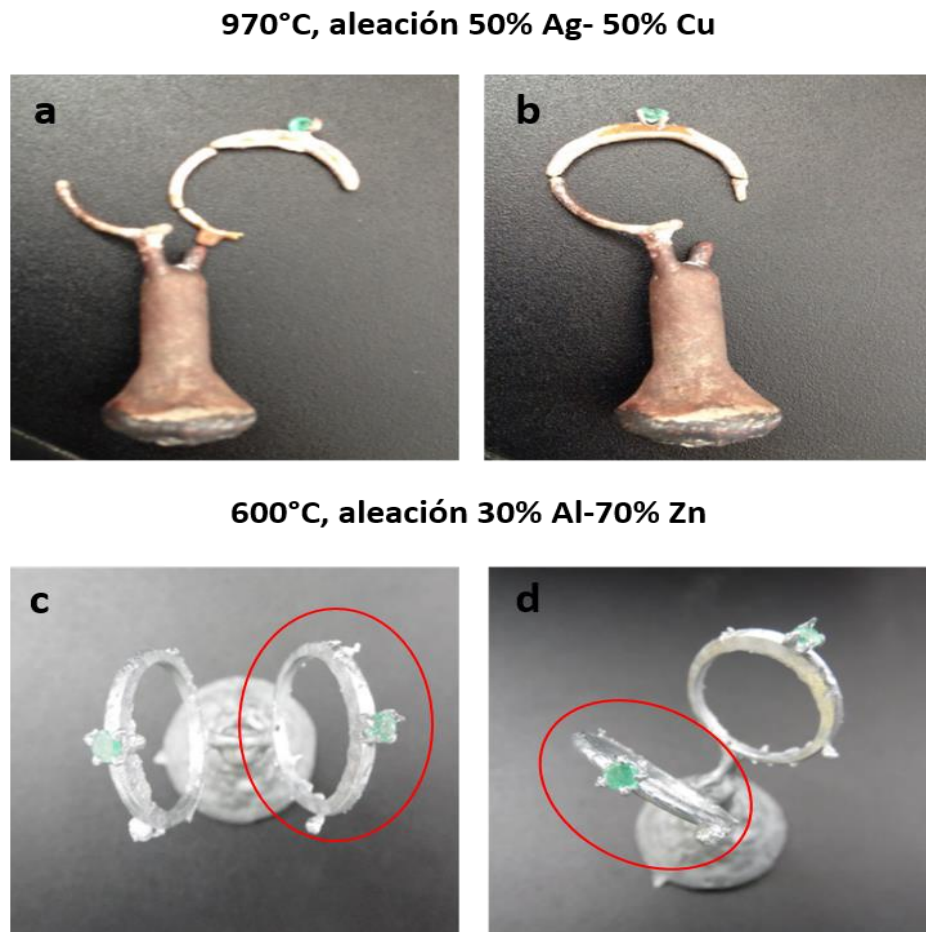
**Figura 31.** Árbol de cera con esmeraldas pre-engastadas, (a) sin recubrimiento, (b) con recubrimiento.



El revestimiento al ser expuesto a una temperatura de 974°C, no mostró agrietamiento durante la colada, pero sí un llenado inadecuado, dando como resultado piezas incompletas y fragmentadas (Figura 32 (a) y (b)), donde se evidencia una solidificación segregada debido al enfriamiento rápido de la aleación, la cual es frágil; a diferencia de la aleación Al-Zn cuyo llenado fue adecuado, presentando el comportamiento manifestado en los ensayos preliminares (ítem 5.5.1), produciéndose piezas con acabado superficial rugoso,

acompañado de defecto de fundición denominados barbas y aletas (ver Figura 32 (c) y (d)), producto del agrietamiento del revestimiento.

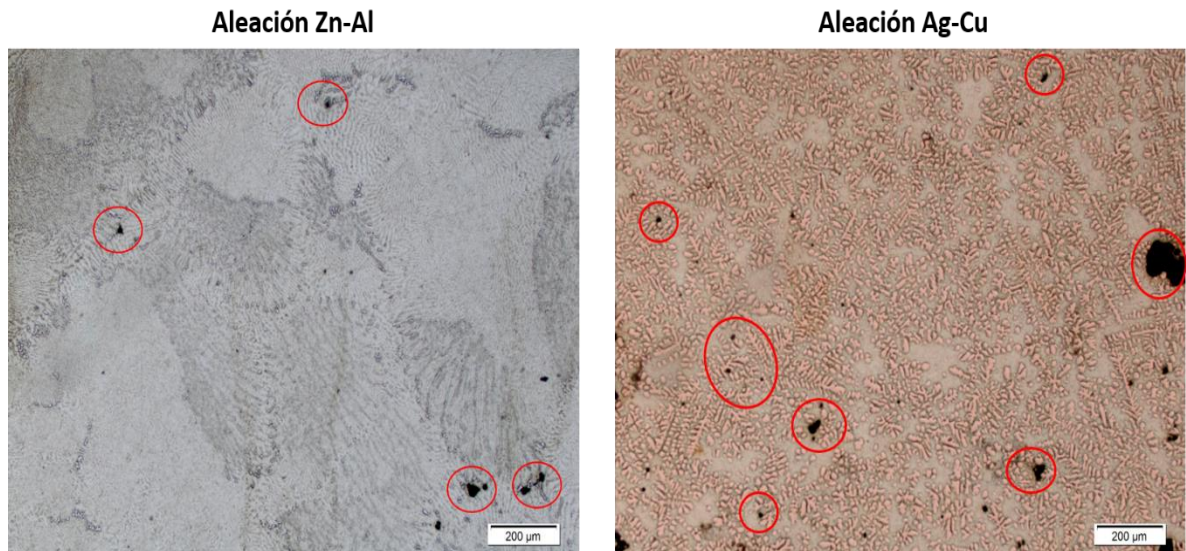
**Figura 32.** Prototipos finales con esmeraldas pre-engastadas, (a-c) sin recubrimiento, (b-d) con recubrimiento.



Se realizó un análisis metalográfico a groso modo de los prototipos finales, donde se evidencia la acumulación de gases formando poros en las dos aleaciones implementadas; se observó mayor número de poros en la aleación Ag-Cu como se muestra en la Figura 33, tales poros son asociados a la inadecuada evacuación de

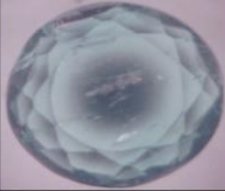
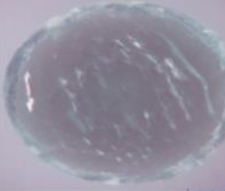



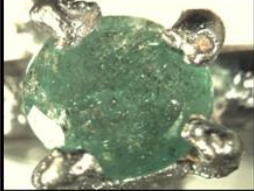



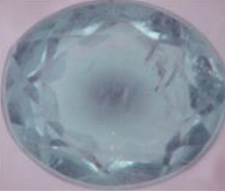
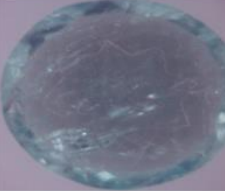
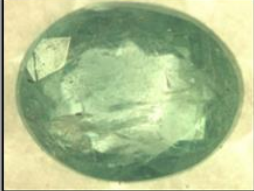
los gases en el molde al momento de la colada, quedando atrapados en el metal líquido, dando como resultado el llenado incompleto de la pieza (ver Figura 32).

**Figura 33.** Micrografías de los prototipos finales 10X, Zn-Al revelado con ácido fluorhídrico, Ag-Cu revelado con dicromato de potasio.



Las esmeraldas empleadas en el proceso de pre-engaste, fueron de tipo I y tienen como característica principal la presencia de pocas inclusiones, además de un color verde suave. Para evaluar cualitativamente los posibles daños originados en las esmeraldas durante el tratamiento térmico del revestimiento y por el contacto con el metal líquido, las esmeraldas se analizaron con ayuda del microscopio Hirox antes y después del proceso de microfundición (ver Figura 34). Se observa deterioro de las gemas expuestas a las dos coladas a 604°C y 970°C, comportamiento acentuado para la esmeralda sin recubrimiento, siendo perceptible el aumento de la cantidad y tamaño de las grietas, así como la pérdida de brillo.

**Figura 34.** Caracterización de las esmeraldas antes-después de la colada.

TIPO	NUMERO Esmeralda	ANTES DE LA COLADA		DESPUES DE LA COLADA	ALEACIÓN
		CARA PLANA	PUNTA		
I	99 CON RECUBRIMIENTO				Al-Zn (604°C)
	98 SIN RECUBRIMIENTO				
	97 CON RECUBRIMIENTO				Ag-Cu (970°C)
	68 SIN RECUBRIMIENTO				

## 6. CONCLUSIONES

- La calcinación de la magnesita generó un aumento en el contenido de periclasa y cambios de morfología que influyen en la estabilidad química y la velocidad de hidratación del material, aspectos favorables para la adecuación del revestimiento al proceso de microfundición.
- La adición de almidón de yuca como agente formador de poros, promueve el incremento de la permeabilidad del revestimiento, además de una distribución homogénea del aglomerante entre las partículas del material refractario, característica que le confiere un mejor copiado y acabado superficial en piezas fundidas. Contrario a lo anterior el polietilenglicol genera porosidades de gran tamaño que afectan de forma significativa el copiado de los detalles en piezas de joyería.
- Se concluye que las condiciones más adecuadas para la obtención del revestimiento magnesita-yeso implementado en el proceso de microfundición a la cera perdida, fueron presentadas por la proporción refractario/aglomerante 60/40, magnesita calcinada, con un contenido de agua de 60 mL por cada 100g de polvo, granulometría pasante malla 200 a 547 rpm.
- Los ensayos de microfundición con los nuevos revestimientos, magnesita/yeso, presentan defectos de fundición denominados barbas como resultado del choque térmico y material en exceso en forma de poros por la adición de polietilenglicol como agente formador de poros.
- Al someter el revestimiento refractario al proceso de micro-fundición aplicando el pre-engaste de esmeraldas, con temperatura de colada de 604°C y 970°C,

se obtienen gemas que sufren cambios físicos como el aumento en el tamaño y cantidad de las grietas además de la pérdida de brillo, características que le confieren su gran valor comercial.

- Finalmente, se concluye que la magnesita posee características como alta resistencia a la compresión, baja resistencia al choque térmico y la permeabilidad inadecuada para ser implementada en el proceso de microfundición, dando piezas incompletas y superficies con rugosidad inapropiada para piezas de joyería.

## 7. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios con el revestimiento magnesita/yeso empleando velocidades de agitación mayores a 547 rpm, para obtener una matriz cerámica con mejor distribución de los poros y de las fases.
- Estudiar a profundidad el efecto de la calcinación de la magnesita a mayores temperaturas y evaluar el comportamiento de esta en los revestimientos refractarios.
- Diseñar un tratamiento térmico adecuado, que garantice la total deshidratación del yeso, a una temperatura en la cual la gema conserve las propiedades que le confieren su gran valor comercial.
- Implementar un permeámetro más sensible para determinar la permeabilidad de los revestimientos, para proyectos posteriores.

## REFERENCIAS

- [1] SBORNICCHIA, Patrizio; GIAMPIERO, Gabriel M. Los avances en microfundición joyería. ELSEVIER, 2003. p 1-2.
- [2] [11] DIETER, O. Properties of investment. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. Pp. 47-62.
- [3] L.B. Hunt. The Long History of Lost Wax Casting, Over five thousand years of art and craftsmanship. Gold Bulletin, 1980, 13, (2), 63-79. 1980.
- [4] FUNDISA. (s.f.).[En línea]. [citado 5-julio-2014]. Disponible en internet <http://www.fundisa.com.ar/Historia.htm>.
- [5] [9] Diseño, C.T. (s.f.). Guía para diseñadores y prescriptores de joyería [citado 28-junio-2014]. Disponible en internet [www.tainingjoyaexperience.com7file/98008/](http://www.tainingjoyaexperience.com7file/98008/).
- [6] Gremio de joyeros, plateros y relojeros de Madrid. El arte del engastado. [citado 12-noviembre-2014]. Disponible en internet [http://www.gremiomadrid.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2871&Itemid=336](http://www.gremiomadrid.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2871&Itemid=336).
- [7] FACCENDA, Valerio P; GABRIEL M. INGO. Advances in investment and burnout furnace design, CNR-ICMAT, Italy.
- [8] FACCENDA, Valerio. Handbook on investment casting. The lost wax casting process for carat gold jewellery manufacture. World Gold Council. 2003

[10] Mineral and Gemstone Kingdom. COMPLETE INFORMATION GUIDE TO ROCKS, MINERALS, GEMSTONES. Minerals.net

[12] [13] Departamento de Metalurgia Grupo cera Perdida. (1992).SEGUNDO SEMINARIO DE FUNDICIÓN DE PRECISIÓN A LA CERA PERDIDA. Medellín.

[14] [15] GAVRILENKO, Egor. Tesis Doctoral. Esmeraldas de los Urales (Rusia) Condiciones de formación y propiedades características. Universidad politécnica de Madrid.

[16] C. Strydomn, Ther thermal dehydration of synthetic gypsum, Thermochemica Acta, ELSERVIER, 1995.

[17] Y. K. Tolosa Lara y A. Valderrama Castro. Estudio de las variables que regulan el tratamiento térmico del yeso y su adaptación al método de pre-engaste de las esmeraldas colombianas. Bucaramanga, 2012.

[18] INCORPORATED, A. F. (1952). FOUNDRY SAND HANDBOOK.CHICAGO, ILLINOIS: COPYRIGHT.

[19] 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.

[20] Handbook of mineralogy (UofA).

[21] Yesos. [citado 14-noviembre-2014] Disponible en internet <http://dentizta.ccadet.unam.mx/MATERIALESDENTIZTA/Recursoseducativos/materialdimpresion/CONTENIDOS/yesostrabajo.htm>.

[22] [24] Mineralogía aplicada, Salud y Medio Ambiente; p 48; p 60

[23] MONOPOLI, Victor Manuel. Síntesis ambientalmente compatible de 2-etil-1-hexil acetato y p-metoxiacetofenona catalizada por heteropoliácidos Keggin inmovilizados en soportes no convencionales. 2012; pag-36.

[25] LONDOÑO, Carlina. Evaluación del efecto de la distribución del tamaño de poros sobre la permeabilidad y la textura de moldes cerámicos utilizados en el proceso de microfundición.

[26] ROJAS, Diana Carolina. 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. Trabajo de grado Universidad Industrial de Santander. 2014.

[27] Manual de arenas para fundición. American Foundrymen's Society. 1967. P. 11-12, 29-42.

[28] Aluminio-Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta 18 de marzo de 2015]. Disponible en:[http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al\\_zn\\_alloy.html](http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html).

[29] Plata-Cobre de estado sólido [En línea]. [Consulta 18 de marzo de 2015]. Disponible en [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pejercicios5\\_3.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pejercicios5_3.html).

[30] MAGNESITA, Panorama minero. MAGIGME (1994). Disponible en internet [http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/Historico/1994\\_95/MAGIGME.pdf](http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/Historico/1994_95/MAGIGME.pdf).

[32] VILLAMIZAR, Sebastian y RIVERA, Michell. Caracterización y aplicación de recubrimientos cerámicos a gemas de esmeraldas colombianas para su protección en el proceso de moldeo en cera perdida método pre-engaste. 2014.

## BIBLIOGRAFÍA

Aluminio-Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta 18 de marzo de 2015]. Disponible en:[http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al\\_zn\\_alloy.html](http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html).

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.

C. Strydomn, Ther thermal dehydration of synthetic gypsum, Thermochemica Acta, ELSERVIER, 1995.

Departamento de Metalurgia Grupo cera Perdida. (1992).SEGUNDO SEMINARIO DE FUNDICIÓN DE PRECISIÓN A LA CERA PERDIDA. Medellín.

DIETER, O. Properties of investment. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. Pp. 47-62.

Diseño, C.T. (s.f.). Guía para diseñadores y prescriptores de joyería [citado 28-junio-2014]. Disponible en internet [www.tainingjoyaexperience.com7file/98008/](http://www.tainingjoyaexperience.com7file/98008/)

FACCENDA, Valerio P; GABRIEL M. INGO. Advances in investment and burnout furnace design, CNR-ICMAT, Italy.

FACCENDA, Valerio. Handbook on investment casting. The lost wax casting process for carat gold jewellery manufacture. World Gold Council. 2003

FUNDISA. (s.f.).[En línea]. [citado 5-julio-2014]. Disponible en internet <http://www.fundisa.com.ar/Historia.htm>

GAVRILENKO, Egor. Tesis Doctoral. Esmeraldas de los Urales (Rusia) Condiciones de formación y propiedades características. Universidad politécnica de Madrid.

Gremio de joyeros, plateros y relojeros de Madrid. El arte del engastado. [citado 12-noviembre-2014]. Disponible en internet [http://www.gremiomadrid.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2871&Itemid=336](http://www.gremiomadrid.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2871&Itemid=336)

Handbook of mineralogy (UofA)

INCORPORATED, A. F. (1952). FOUNDRY SAND HANDBOOK. CHICAGO, ILLINOIS: COPYRIGHT.

L.B. Hunt. The Long History of Lost Wax Casting, Over five thousand years of art and craftsmanship. Gold Bulletin, 1980, 13, (2), 63-79. 1980.

LONDOÑO, Carlina. Evaluación del efecto de la distribución del tamaño de poros sobre la permeabilidad y la textura de moldes cerámicos utilizados en el proceso de microfundición.

MAGNESITA, Panorama minero. MAGIGME (1994). Disponible en internet [http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/Historico/1994\\_95/MAGIGME.pdf](http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/Historico/1994_95/MAGIGME.pdf)  
Manual de arenas para fundición. American Foundrymen's Society. 1967. P. 11-12, 29-42.

Mineral and Gemstone Kingdom. COMPLETE INFORMATION GUIDE TO ROCKS, MINERALS, GEMSTONES. Minerals.net.

Mineralogía aplicada, Salud y Medio Ambiente; p 48; p 60.

MONOPOLI, Victor Manuel. Síntesis ambientalmente compatible de 2-etil-1-hexil acetato y p-metoxiacetofenona catalizada por heteropoliácidos Keggin inmovilizados en soportes no convencionales. 2012; pag-36.

Plata-Cobre de estado sólido [En línea]. [Consulta 18 de marzo de 2015]. Disponible en [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pejercicios5\\_3.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pejercicios5_3.html).

ROJAS, Diana Carolina. 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. Trabajo de grado Universidad Industrial de Santander. 2014.

SBORNICCHIA, Patrizio; GIAMPIERO, Gabriel M. Los avances en microfundición joyería. ELSEVIER, 2003. p 1-2.

VILLAMIZAR, Sebastian y RIVERA, Michell. Caracterización y aplicación de recubrimientos cerámicos a gemas de esmeraldas colombianas para su protección en el proceso de moldeo en cera perdida método pre-engaste. 2014.

Y. K. Tolosa Lara y A. Valderrama Castro, «Estudio de las variables que regulan el tratamiento térmico del yeso y su adaptación al método de pre-engaste de las esmeraldas colombianas,» Bucaramanga, 2012.

Yesos. [citado 14-noviembre-2014] Disponible en internet <http://dentizta.ccadet.unam.mx/MATERIALESDENTIZTA/Recursoseducativos/materialdimpresion/CONTENIDOS/yesostrabajo.htm>

## ANEXOS

### Anexo A: Ficha técnica de referencia para la magnesita, suministrada por el vendedor MAGNESITA S.A.



#### FOLHA DE DADOS TÉCNICOS

6651

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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sup>3</sup> ).....	1,00
Densidade Aparente Compactada (g/cm <sup>3</sup> ).....	1,20
Área superficial BET - (m <sup>2</sup> /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

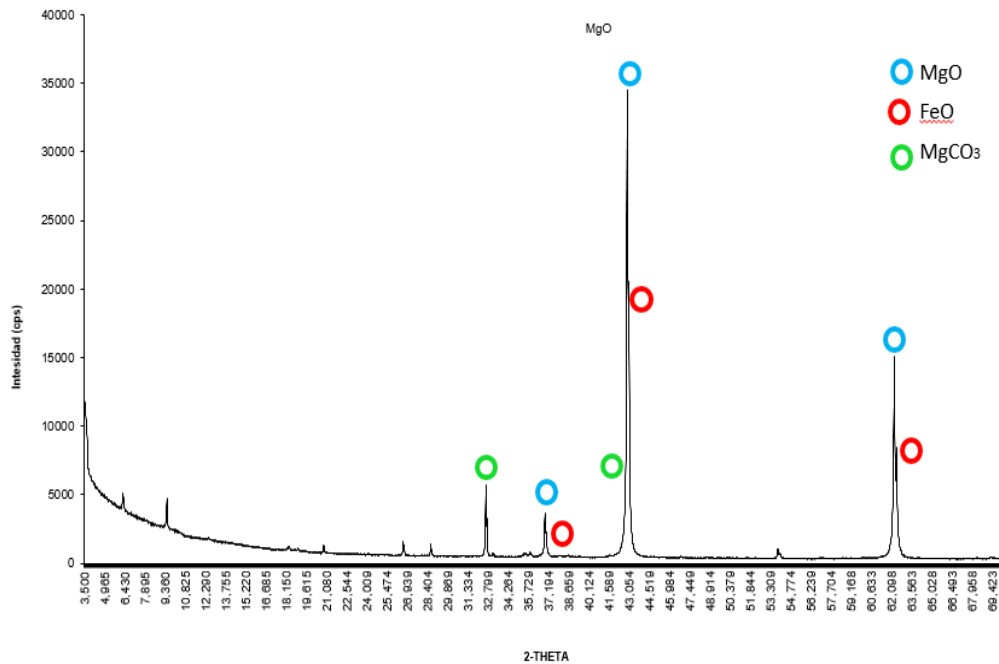
Sacos de papel Kraft, valvulados, multifolhados para 25 kg.

**Anexo B: Ficha técnica del yeso.**

YESO PIEDRA HIDROCAL 106 XB TIPO III BLANCO	
Resistencia a la compresión	
3.000 Psi (214 Kg/cm <sup>2</sup> )	<b>Humedad</b>
6.000 Psi (424 Kg/cm <sup>2</sup> )	<b>Seca</b>
Expansión de fraguado	<b>0,10%</b>
Expansión higroscópica	<b>0,20%</b>
Tiempo de fraguado	<b>10 minutos</b>
Tiempo de trabajo	<b>3-5 minutos</b>
Consistencia	<b>28 ml, agua 100 mgs polvo</b>

**Anexo B: Resultados de composición según Análisis de Difracción de rayos X y Fluorescencia de Rayos-X. a) Magnesita, b) Yeso.**

a) Difracción de rayos X Magnesita.

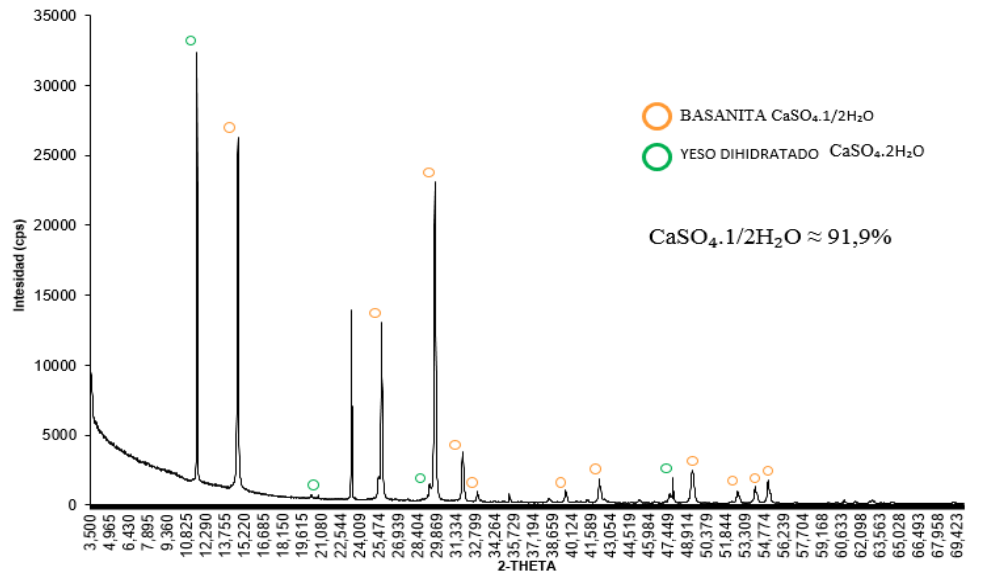


Fluorescencia de rayos X Magnesita.

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)		---

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)		---

b) Difracción de rayos X DRX yeso

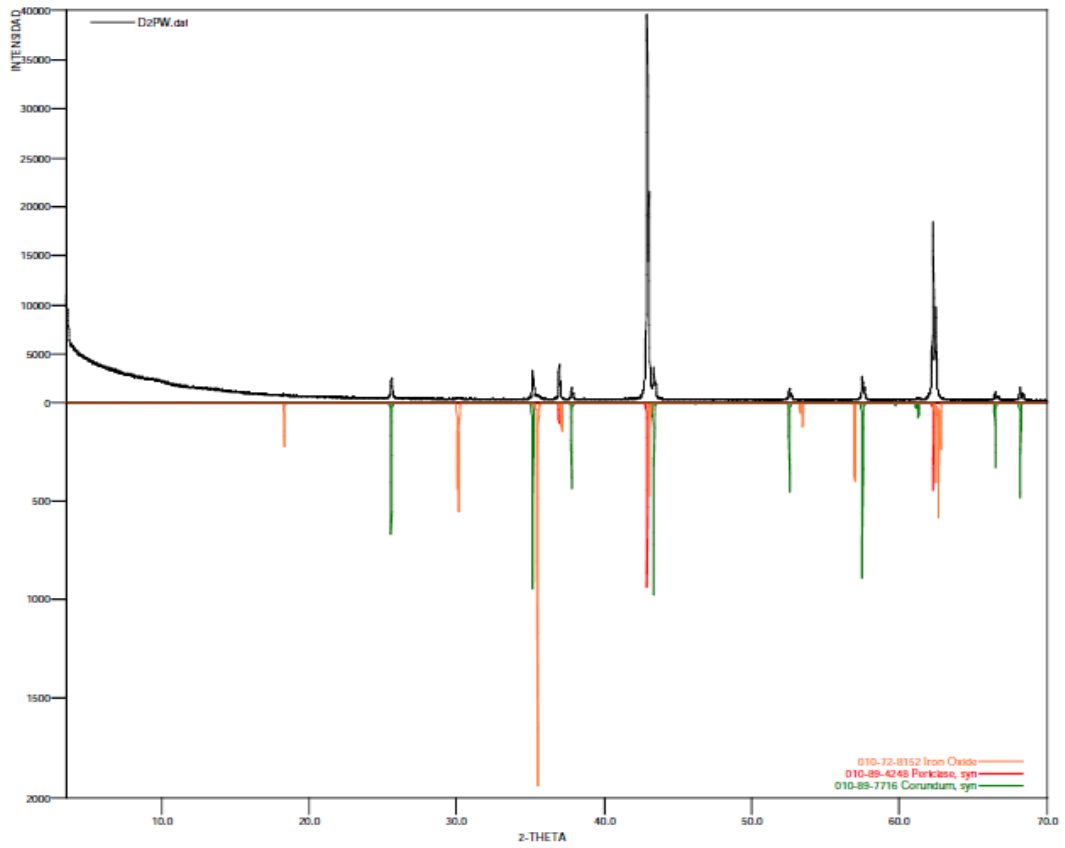


Fluorescencia de rayos X yeso.

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Ca	20	28,75%
S	16	20,27%
Si	14	0,23%

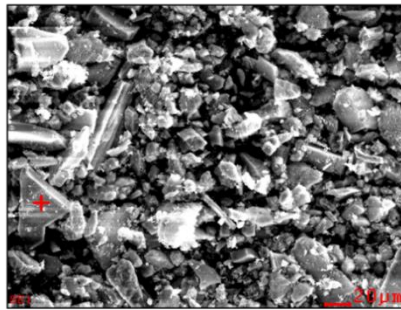
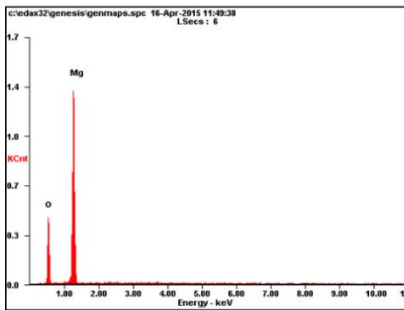
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Sr	38	0,18%
Na	11	0,10%
Mg	12	0,08%
Al	13	0,06%
Fe	26	0,04%
As	33	96 ppm
K	19	50 ppm
Cu	29	17 ppm
<i>Balance (C,H,O)</i>		---

## Anexo D: Análisis de Difracción de rayos X, DRX Magnesita calcinada.



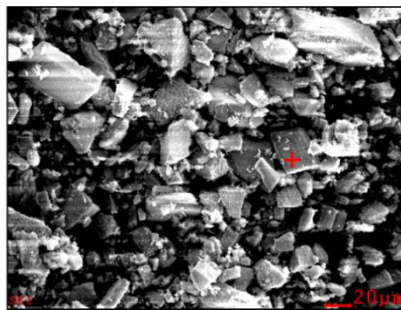
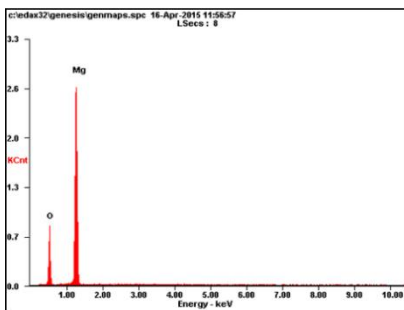
**Anexo E: Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) de la Magnesita calcinada y sin calcinar.**

**MAGNESITA SIN CALCINAR**



Element	Wt%	At%
OK	36.71	46.85
MgK	63.29	53.15
Matrix	Correction	ZAF

**MAGNESITA CALCINADA**



Element	Wt%	At%
OK	34.09	44.01
MgK	65.91	55.99
Matrix	Correction	ZAF

Anexo F: Tiempos de trabajo y de fraguado de las proporciones Magnesita-Yeso estudiadas, A) Magnesita sin calcinar, B) Magnesita calcinada.

<b>Mezcla 1: 70% Magnesita- 30% Yeso sin calcinar</b>							
<b>A</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t TRABAJO [min]</b>		<b>ti FRAGUADO [min]</b>		<b>tf FRAGUADO [min]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
		58	15,06	17,02	45,23	41,55	76
60	16,55	19,15	47,4	42,56	79,6	63	
62	17,46	21,30	50	43,00	87,12	63,24	
64	19,48	25	55,26	45,10	90	64	

<b>Mezcla 1: 70% Magnesita- 30% Yeso calcinada</b>							
<b>B</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t TRABAJO [min]</b>		<b>ti FRAGUADO [min]</b>		<b>tf FRAGUADO [min]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
		58	15,06	11,26	53	63	76
60	17,3	14,06	60	65	78	88	
62	19,12	15,53	61,17	66	84,37	88,5	
64	21	16,31	62,45	68	93	84	

<b>Mezcla 2: 60% Magnesita- 40% Yeso sin calcinar</b>							
<b>A</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t TRABAJO [min]</b>		<b>ti FRAGUADO [min]</b>		<b>tf FRAGUADO [min]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
		58	48,25	29,15	70,45	48	75,15
60	50,08	29,58	78	50,15	88	60,29	
62	50,36	30,13	79,26	52,40	88,35	63	
64	51,2	32,08	80	58,02	89	65,57	

<b>Mezcla 2: 60% Magnesita- 40% Yeso calcinada</b>							
<b>B</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t TRABAJO [min]</b>		<b>ti FRAGUADO [min]</b>		<b>tf FRAGUADO [min]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
		58	15,23	20,05	60,20	50,1	70
60	18,49	21,56	78	56	88	62,4	
62	19,45	22,15	78,45	58,02	88,15	65,57	
64	20,18	22,4	79	60	88,52	67,45	

<b>Mezcla 3: 50% Magnesita- 50% Yeso sin calcinar</b>							
<b>A</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t TRABAJO [min]</b>		<b>ti FRAGUADO [min]</b>		<b>tf FRAGUADO [min]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
		58	23,15	25,18	36,15	45	50
60	25,10	27,15	43,36	45,1	56,14	58,47	
62	27,35	30,2	48,57	45,59	61,46	60	
64	29	32	50,02	46,15	63	61,25	
<b>Mezcla 3: 50% Magnesita- 50% Yeso calcinada</b>							
<b>B</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t TRABAJO [min]</b>		<b>ti FRAGUADO [min]</b>		<b>tf FRAGUADO [min]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
		58	18	19,5	75	44,55	82
60	19,15	22,8	83,02	45	90	60,15	
62	20,4	22,49	86,20	45,5	95,24	60,21	
64	21,8	23,52	88,45	48	100	60,48	

**Anexo G: Resistencia a la compresión composiciones de magnesita-Yeso estudiadas, magnesita sin calcinar y calcinada.**

<b>MAGNESITA SIN CALCINAR [Psi]</b>			
<b>Magnesita/ Yeso</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>Malla # 140</b>	<b>Malla # 200</b>
70/30	58	175,48± 0,04	127,51 ± 0,1
	60	169,25± 0,4	157,34± 0,23
	62	160,89± 0,1	169,46± 0,4
	64	156,62± 0,58	156,62± 0,12
60/40	58	265,05± 0,4	231,31± 0,35
	60	228,91± 0,3	216,86± 0,7
	62	275,46± 0,23	287,12±0,83
	64	223,84± 0,5	287,45± 1,2
50/50	58	409,63± 1,4	349,39± 0,23
	60	356,62± 0,12	313,24± 1,3
	62	349,67± 0,05	300,48± 0,45
	64	328,35± 0,42	294,56± 0,9
<b>MAGNESITA CALCINADA [Psi]</b>			
<b>Composició n polvo</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>Malla # 140</b>	<b>Malla # 200</b>
70/30	58	216,86± 0,6	245,65± 0,12
	60	142,16± 0,08	144,57± 0,9
	62	180,72± 0,12	178,31 ± 0,45
	64	284,33± 1,1	284,33± 0,07
60/40	58	259,24± 0,05	221,68± 0.75
	60	132,53± 0,45	209,63± 0,6
	62	186,71 ± 0,2	214,74 ± 0,04
	64	179,42 ± 0,9	220,08± 0,35
50/50	58	175,52 ± 0,12	236,62± 0,5
	60	159,03± 0,23	238,55± 0,32
	62	148,27± 0,5	226,40± 0,11
	64	142,05± 0,06	210,76 ± 0,12

**Anexo H: Permeabilidad del revestimiento Magnesita-Yeso estudiadas, magnesita sin calcinar, magnesita calcinada.**

<b>MAGNESITA SIN CALCINAR [AFS]</b>			
<b>Magnesita/ Yeso</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>Malla # 140</b>	<b>Malla # 200</b>
70/30	58	5,8± 0,2	6± 0,15
	60	5,2± 0,1	5,6± 0,15
	62	5,2± 0,1	5,5± 0,20
	64	5,6± 0,12	5,4± 0,12
60/40	58	5,6± 0,1	5,9± 0,12
	60	5,9± 0,11	5,9± 0,10
	62	5,8± 0,06	6,0± 0,12
	64	6,0± 0,12	6,2± 0,20
50/50	58	5,8± 0,15	5,7± 0,12
	60	5,7± 0,15	5,9± 0,06
	62	5,8± 0,10	6,0± 0,15
	64	6± 0,15	6,2± 0,15
<b>MAGNESITA CALCINADA [AFS]</b>			
<b>Magnesita/ Yeso</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>Malla # 140</b>	<b>Malla # 200</b>
70/30	58	5,6± 0,11	5,9± 0,46
	60	5,9± 0,23	5,9 ± 0,23
	62	5,5± 0,17	5,5± 0,11
	64	5,4± 0,05	5,7± 0,25
60/40	58	5,2± 0,09	5,8± 0,2
	60	6,2 ± 0,15	6 ± 0,2
	62	6,0± 0,11	5,9± 0,25
	64	5,9± 0,11	6,0± 0,11
50/50	58	5,9± 0,21	6,9± 0,08
	60	6,9 ± 0,05	6,0 ± 0,05
	62	5,0± 0,17	5,9± 0,11
	64	6,1± 0,11	6 ± 0,09

**Anexo I: Resistencia a la compresión antes y después del choque térmico en función del contenido de Magnesita en el revestimiento.**

Muestras seleccionadas revestimiento Magnesita-Yeso calcinada 1000°C

<b>MAGNESITA CALCINADA 1000°C ( B )</b>											
<b>Magnesita / Yeso</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t Trabajo [min]</b>		<b>t Fraguado [min]</b>		<b>Permeabilidad [AFS]</b>		<b>Compresión (i) [Psi]</b>		<b>Compresión (f) [Psi]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
<b>70/30</b>	<b>60</b>	17,3	14,0 6	78	88	6,2 ±0,1 2	6,07 ±0,6	131,6 ±1,2	135 ±0,1 2	87,3 ±0,9	81,7 ±0,2 1
<b>60/40</b>	<b>60</b>	18,4 9	21,5 6	88	62,4	7,03 ±0,0 5	6,23 ±0,4	122,9 ±0,9 4	163,9 ±0,7	95,2 ±0,1 5	82,0 0 ±0,0 3
<b>50/50</b>	<b>60</b>	19,1 5	22,8	90	60,1 5	6,07 ±0,1	6,0 ±0,0 9	149,4 ±0,4 6	178,9 ±0,2	94,5 0 ±0,1 1	89,5 0 ±0,8

Muestras seleccionadas revestimiento Magnesita-Yeso sin calcinar

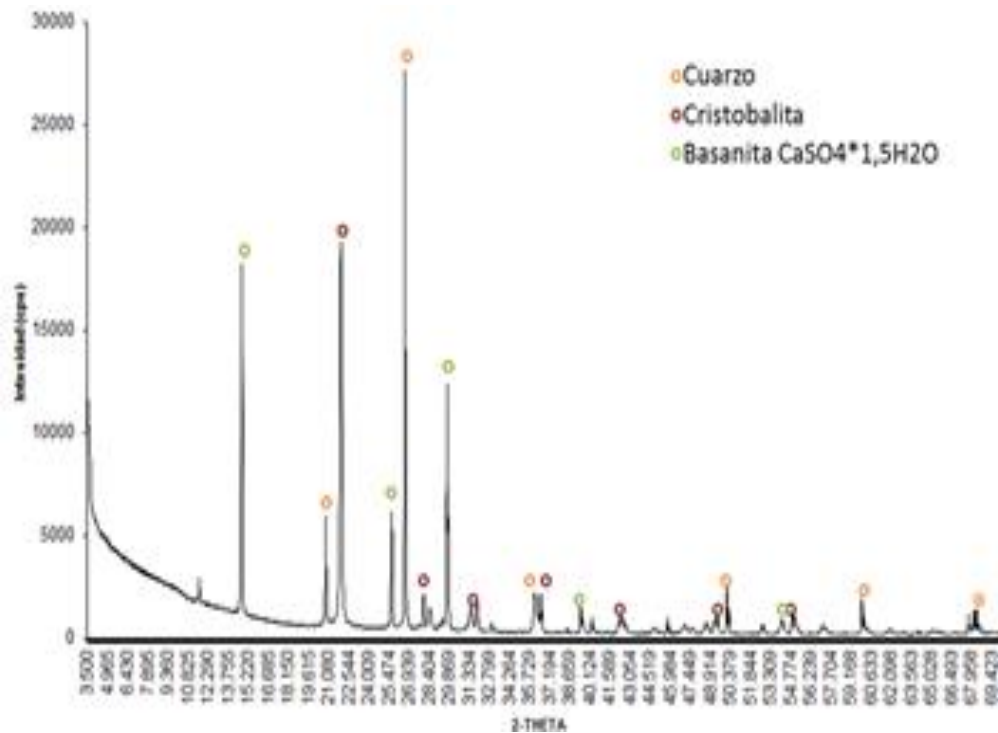
<b>MAGNESITA SIN CALCINAR ( A )</b>											
<b>Magnesita/ Yeso</b>	<b>ml por cada 100g sólido</b>	<b>t Trabajo [min]</b>		<b>t Fraguado [min]</b>		<b>Permeabilidad [AFS]</b>		<b>Compresión (i) [Psi]</b>		<b>Compresión (f) [Psi]</b>	
		<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>200</b>
<b>70/30</b>	<b>64</b>	19,4 8	25	90	64	5,93 ±0,4 3	6 ±0,0 9	131,6 ±0,1 2	135 ±0,1	56,7 0 ±0,1 4	40,1 7 ±0,6
<b>60/40</b>	<b>64</b>	51,2	32,0 8	89	65,5 7	5,93 ±0,1 6	6 ±0,1	137,2 0,9	133,9 0,26	93,3 7 ±0,0 8	69,0 0 ±0,4

## Anexo J: Caracterización revestimiento comercial Diamante Kerr

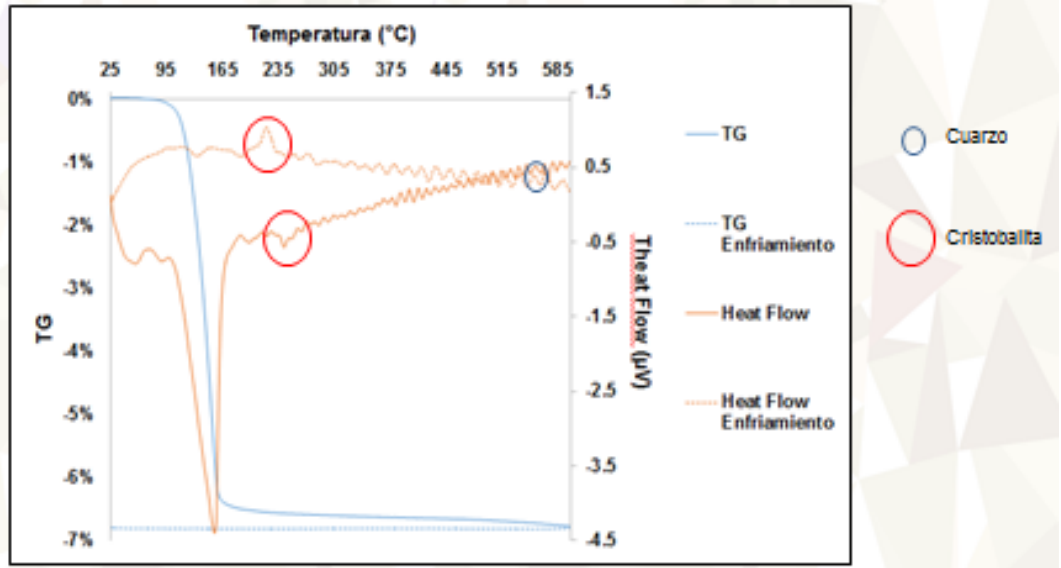
Fluorescencia de rayos X.

Elemento	Concentración (% peso)
Si	28,09
Ca	9,75
S	8,48
Sr	0,15
Al	0,06
Otros	0,06
Balance C-H-O	53,41

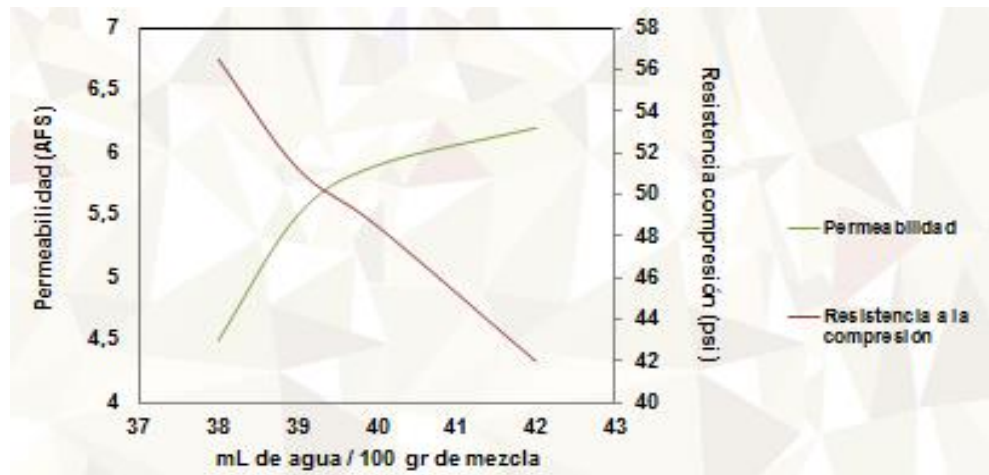
Difracción de rayos X



## Análisis térmico TG-DSC



Resistencia a la compresión-permeabilidad.

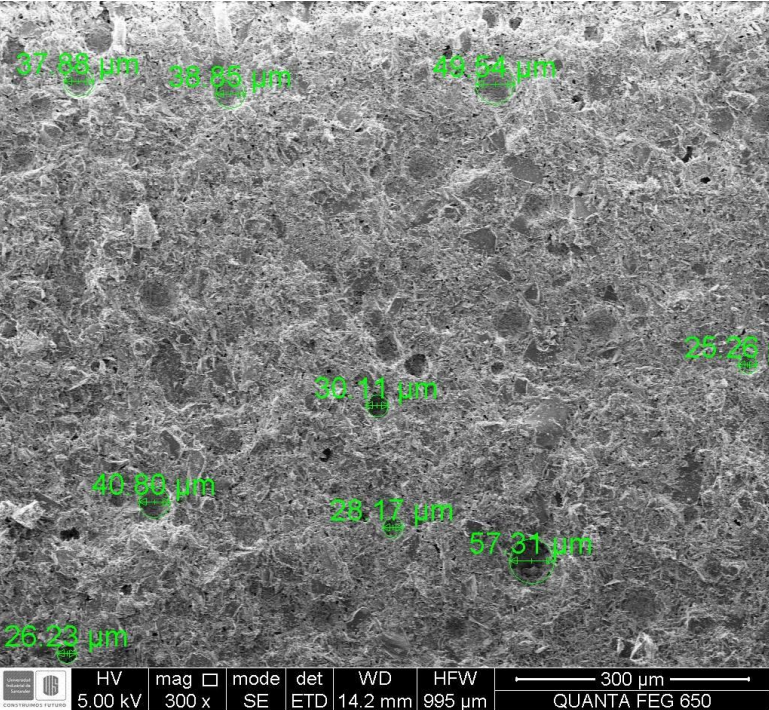


Choque térmico



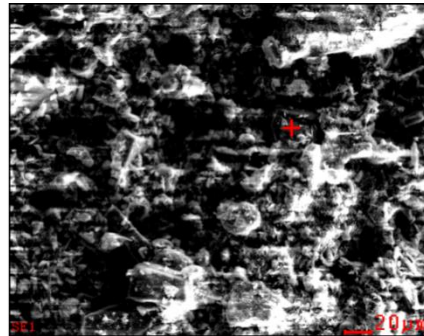
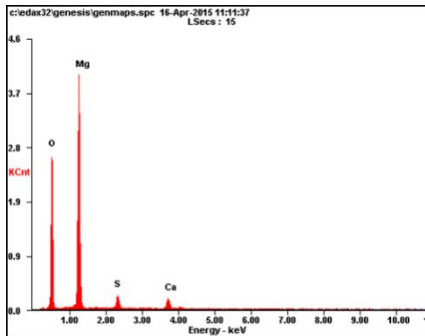
Fuente: Carlina Londoño.

Espectroscopia electrónica de barrido SEM



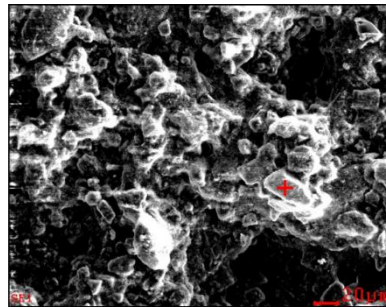
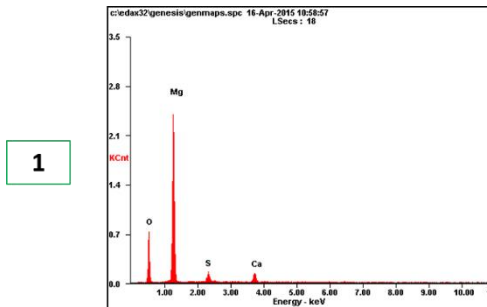
## Anexo K: Espectroscopia de Energía Dispersiva EDS, Revestimientos magnesita/yeso 60/40 con 60% de agua.

EDS sin agentes formadores de poros.

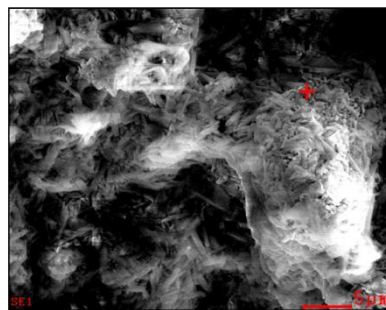
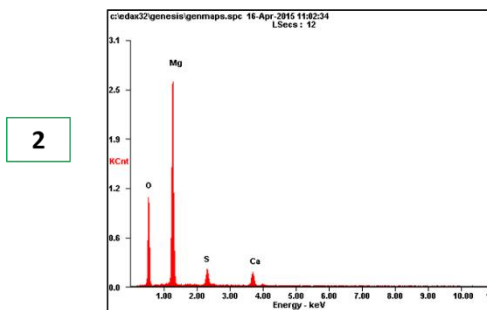


Element	Wt%	At%
OK	49.04	60.49
MgK	43.90	35.63
SK	03.29	02.02
CaK	03.77	01.86
Matrix	Correction	ZAF

EDS Revestimiento con 3% de polietilenglicol.



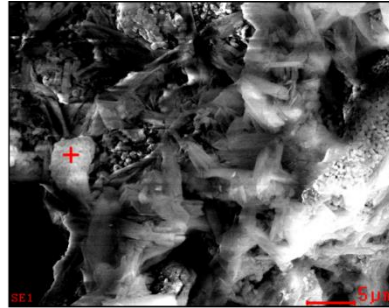
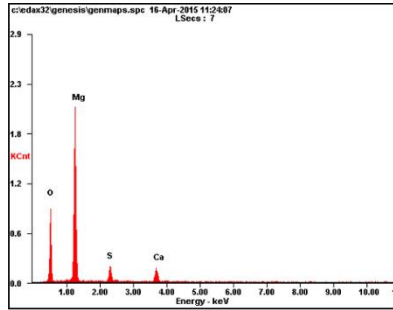
Element	Wt%	At%
OK	34.34	45.57
MgK	55.33	48.32
SK	04.81	03.18
CaK	05.52	02.93
Matrix	Correction	ZAF



Element	Wt%	At%
OK	41.07	52.99
MgK	47.87	40.63
SK	05.30	03.41
CaK	05.76	02.97
Matrix	Correction	ZAF

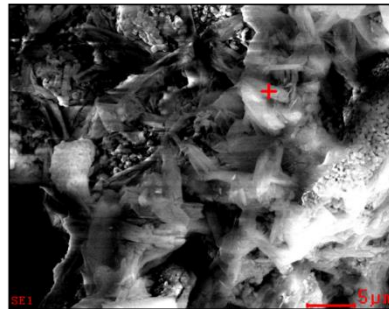
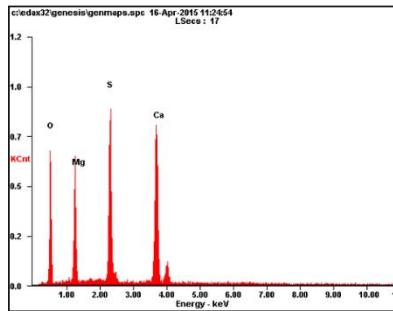
EDS Revestimiento con 2% Almidón de yuca.

1



Element	Wt%	At%
OK	41.59	53.70
MgK	46.17	39.23
SK	05.88	03.79
CaK	06.36	03.28
Matrix	Correction	ZAF

2



Element	Wt%	At%
OK	44.03	61.70
MgK	12.50	11.53
SK	17.49	12.23
CaK	25.98	14.53
Matrix	Correction	ZAF