

**EVALUACIÓN DE LA MEZCLA REFRACTARIA CHAMOTA-YESO EN LA
FABRICACIÓN DE UN REVESTIMIENTO PARA EL PROCESO DE
MICROFUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA APLICANDO EL PRE-ENGASTE DE
ESMERALDAS COLOMBIANAS**

**PAULA ANDREA RAMÍREZ PÉREZ
CARLOS HERNÁN BENAVIDES QUINTERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2015

**EVALUACIÓN DE LA MEZCLA REFRACTARIA CHAMOTA-YESO EN LA
FABRICACIÓN DE UN REVESTIMIENTO PARA EL PROCESO DE
MICROFUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA APLICANDO EL PRE-ENGASTE DE
ESMERALDAS COLOMBIANAS**

**PAULA ANDREA RAMÍREZ PÉREZ
CARLOS HERNÁN BENAVIDES QUINTERO**

Trabajo de grado, presentado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director:

Phd. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

Co-Director

Ing. CARLINA SOFIA LONDOÑO MONTES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2015

A Dios, por darme la vida y acompañarme en cada paso de mi camino.

A mis padres, Rubiel Ramírez y María Cristina Pérez, por darme las bases y confianza suficiente para tomar mis propias decisiones, por ser amigos y cómplices, ustedes me enseñaron que el éxito solo se consigue combinando la perseverancia, la pasión y el amor en cada paso que das.

A mis abuelos, Jairo Pérez y Maria Ludy de Pérez, por criarme, cumplirme y aguantarme todos los caprichos, por desvelarse para que cene y madrugar para que desayune, pero sobre todo por enseñarme que el amor verdadero dura para siempre.

A mi tío, Juan miguel Pérez, por darme el mejor consejo que he podido recibir, “La vida no le paga a uno por lo que uno sabe, sino por lo que uno hace con lo que sabe”; y a mi tío, Jairo Alberto Pérez, por enseñarme que la humildad y la generosidad nos llenan de grandes riquezas.

A naty, mi hermana, tú me enseñaste lo fácil que es ser madre y amiga al mismo tiempo.

A mis amigos, por hacer parte de mi vida y permitirme ser parte de la suya.

Los amo con todo el corazón.

PAULA ANDREA RAMIREZ PEREZ

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad durante toda mi vida.

A mis padres, Hernán Benavides Silva y Delfina Quintero Carvajal, por su apoyo incondicional en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis hermanos, Deisy Benavides, Holman Benavides y Sebastián Benavides con quienes he aprendido el significado de disfrutar la alegría de la vida con las acciones diarias de la misma.

A la familia Guerrero Quintero quienes gracias a su buen corazón me brindaron una compañía digna de una familia, por su confianza y apoyo en los momentos difíciles.

A Jorge Enrique Gallo y Elizabeth Chacón Dueñas quienes abrieron la puerta de su hogar y permitieron gozar de una estadía grata y amena durante mis estudios.

A mis amigos por compartir sus victorias y derrotas y por apoyarnos mutuamente en nuestra formación profesional y aún más importante la personal.

Gracias infinitas.

CARLOS HERNÁN BENAVIDES QUINTERO

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, ya que sin su ayuda y apoyo no estaríamos donde nos encontramos y no seríamos lo que somos.

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de realizar nuestros estudios profesionales, brindándonos los recursos necesarios para lograrlo.

A nuestra directora, Elcy María Córdoba Tuta, por confiar sus conocimientos y experiencia para desarrollar un mejor trabajo de investigación.

A nuestra codirectora, Carlina Sofía Londoño Montes por su orientación, consejos y enseñanzas.

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, Ambrosio Carrillo y Mario Navarrete, 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

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. CONCEPTOS TEÓRICOS	22
2.1 CHAMOTA	22
2.2 YESO	23
2.3 PROCESO DE MICROFUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA	23
2.4 ESMERALDA	26
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	27
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	28
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS (CHAMOTA-YESO)	28
3.2.1 Materia prima utilizada	28
3.2.2 Preparación del material refractario	28
3.2.3 Distribución granulométrica del material refractario	29
3.2.4 Análisis térmico del material refractario (chamota)	29
3.3 DESARROLLO DE LAS MEZCLAS REFRACTARIAS	29
3.3.1 Preparación de las mezclas refractarias	29
3.3.2 Tiempo de trabajo y tiempo de fraguado	30
3.3.3 Análisis térmico de las mezclas chamota-yeso	31
3.3.4 Tratamiento térmico de los revestimientos	31

3.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA APTA PARA EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN	32
3.4.1 Elaboración y caracterización de probetas con las mezclas chamota-yeso	32
4.4.2 Pruebas físico- mecánicas	32
3.5 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN	33
3.6 PROCESO DE MICROFUNDICIÓN CON LOS REVESTIMEINTOS DESARROLLADOS	34
3.6.1 Pruebas preliminares de microfundición	34
3.6.2 Prueba final de microfundición con pre-engaste de esmeraldas	34
3.6.3 Evaluación de las propiedades de la esmeralda	35
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	37
4.1.1 Distribución granulométrica	37
4.1.2 Análisis Elemental y de fases cristalinas de las materias primas	38
4.1.3 Análisis térmico de la chamota	39
4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTAS CERÁMICAS	40
4.2.1 Medición del tiempo de trabajo	40
4.2.2 Medición del tiempo de fraguado	44
4.2.3 Análisis térmico de la mezcla chamota/yeso	45
4.3 ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS CHAMOTA/YESO	46
4.3.1 Resistencia a la compresión	47
4.3.2 Medición de la permeabilidad	49
4.3.3 Resistencia al choque térmico	51
4.3.4 Efecto de la velocidad de agitación de las mezclas en las características de los revestimientos	54
4.3.5 Evaluación del tamaño de poros y fases presentes	56
4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL REVESTIMIENTO EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN	57
4.4.1 Coladas preliminares	57

4.4.1.1 Análisis del revestimiento después del tratamiento térmico	58
4.4.1.2 Fundición preliminar M1:	59
4.4.1.3 Fundición preliminar M2:	61
4.4.1.4 Fundición preliminar M3:	62
4.4.2 Fundición con el revestimiento comercial KERR (Muestra M4):	63
4.4.3 Fundición final con pre-engaste de esmeraldas M5:	64
5. CONCLUSIONES	68
6. RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS	71
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas del proceso de microfundición a la cera perdida.....	25
Figura 2. Esmeralda engastada antes y después de la fundición	25
Figura 3. Tratamiento térmico aplicado durante la investigación a todos los revestimientos.....	31
Figura 4. a) Cilindro metálico contenedor del revestimiento refractario durante el tratamiento térmico. b) Árbol de anillos fabricado con cera, ubicado sobre la base de goma del cilindro metálico.....	34
Figura 5. Diagrama Zinc-Aluminio (Zn-Al) [18].....	35
Figura 6: Probetas elaboradas para la composición refractaria 85/15 a) malla 140, b) malla 200.	47
Figura 7. Agrietamiento progresivo durante choque térmico a 700 °C de una mezcla refractaria chamota/yeso.	52
Figura 8. a) Micrografía SEM del revestimiento chamota/yeso. a) M1; b) M2; c) M3.....	57
Figura 9. Revestimiento y modelo del refractario, granulometría pasante malla 200, a:p 55:100 y velocidad de agitación a 647 rpm después de ser sometido al tratamiento térmico.	59
Figura 10. Vista superior y frontal en corte longitudinal, correspondientes al cilindro metálico con el revestimiento.	59
Figura 11. Resultado obtenido en la primera fundición preliminar M1.	60
Figura 12. Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M1.	61
Figura 13. Resultado obtenido en la segunda fundición preliminar M2.....	62
Figura 14. Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M2.	62

Figura 15. Resultado obtenido en la tercera fundición preliminar M3.	63
Figura 16. Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M3.	63
Figura 17. Resultado obtenido utilizando como revestimiento la mezcla comercial KERR.....	64
Figura 18. Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M4.	64
Figura 19. Revestimiento M5 después de TT con 8 h de sostenimiento a 350°C..	65
Figura 20. Resultado obtenido en la fundición final con pre-engaste de esmeraldas M5.	66
Figura 21. Fotografías de las esmeraldas antes (a y b) y después (c y d) del proceso de microfundición con el pre-engaste de las gemas.	67

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curvas granulométricas para la chamota, a) Malla 140, b) Malla 200..	37
Gráfica 2. Curva termogravimétrica y de flujo de calor (DSC) de la chamota.	39
Gráfica 3. Tiempo de trabajo vs cantidad de agua, para un pasante de componente refractario correspondiente a malla 200.	40
Gráfica 4. Tiempo de trabajo vs cantidad de agua, para un pasante de componente refractario correspondiente a malla 140.	41
Gráfica 5. Curva termogravimétrica y de flujo de calor (DSC) de la mezcla refractaria chamota/yeso.	46
Gráfica 6. Resistencia a la compresión para el revestimiento refractario chamota/yeso, a) pasante de malla 200 y b) pasante malla 140.	48
Gráfica 7. Permeabilidad (AFS) para los revestimientos refractarios chamota/ yeso, a) pasante malla 200 y b) pasante malla 140.	50
Gráfica 8. Variación de la resistencia a la compresión de los revestimientos por choque térmico. a) Pasante Malla 200, b) Pasante Malla 140.	52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados difracción de rayos-x para la materia prima chamota.....	38
Tabla 2. Resultados difracción de rayos-x para la materia prima yeso.....	39
Tabla 3. Composiciones chamota/yeso escogidas después de establecer el tiempo de trabajo de las mezclas.....	43
Tabla 4. Tiempo de fraguado para las diferentes mezclas chamota/yeso.	45
Tabla 5. Consolidado de propiedades físico-mecánicas de las mezclas chamota/yeso estudiadas.	54
Tabla 6. Caracterización físico-mecánica de los revestimientos obtenidos con diferentes velocidades de agitación.	55

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ficha técnica de referencia para la chamota, suministrada por el vendedor ERECOS.....	80
Anexo B. Ficha técnica de referencia para el yeso mexicano.....	81
Anexo C. Resultados de composición según Análisis de Fluorescencia de Rayos-X. a) Yeso ortopédico (sulfato de calcio hemihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), b) chamota silico – aluminosa.....	82
Anexo D. Difractogramas de rayos-x para las materias primas chamota y yeso ...	83
Anexo E. EQUIPOS UTILIZADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN.	85
Anexo F. Procedimiento De Fabricación De Probetas Para Ensayos.....	86
Anexo G. Mezclas descartadas durante el tiempo de fraguado.....	87
Anexo H. Resultados de Difracción de rayos X para la mezcla refractaria chamota-yeso antes y después del tratamiento térmico.	88
Anexo I. Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) para las muestras M1, M2 y M3.	90

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA MEZCLA REFRACTARIA CHAMOTA-YESO EN LA FABRICACIÓN DE UN REVESTIMIENTO PARA EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN DE CERA PÉRDIDA APLICANDO EL PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS COLOMBIANAS*

AUTORES: CARLOS HERNÁN BENAVIDES QUINTERO
PAULA ANDREA RAMÍREZ PÉREZ**

PALABRAS CLAVES: Microfundición, Pre-engaste, Refractario, Revestimiento, Cera perdida, Chamota, Yeso.

DESCRIPCIÓN:

El éxito de la joyería mundial es tal, que actualmente se buscan nuevos procesos que disminuyan los tiempos y costos de fabricación de joyas, sin dejar caer la calidad de las mismas. En este estudio, se evaluó un parámetro importante para dicho proceso, el revestimiento refractario; por tal motivo se utilizó una mezcla compuesta por arcilla quemada (chamota) y yeso bajo diferentes condiciones de granulometría, relación refractario/aglomerante y velocidad de agitación, la cual se implementaría durante la microfundición de cera perdida aplicando el pre-engaste de esmeraldas colombianas. El estudio se dividió en tres etapas. La primera etapa contempló el desarrollo de mezclas variando el tamaño de partícula y las proporciones de chamota y yeso; en la segunda etapa se determinó el efecto de estas variables en las características físico-mecánicas y térmicas de los revestimientos, eligiendo aquellos que presentaban los mejores valores de resistencia a la compresión, permeabilidad y resistencia al choque; en la tercera etapa se evaluó el comportamiento experimental de dichos revestimientos elegidos, variando la velocidad de agitación de las mezclas y realizando la microfundición de cera perdida utilizando una aleación de aluminio-zinc y el pre-engaste de la piedra preciosa, con el fin de evaluar la capacidad de copiado y la resistencia del molde durante la colada de la misma.

Finalmente se obtuvieron buenos valores para las propiedades físico-mecánicas durante la experimentación y desarrollo del revestimiento, pero bajos, al momento de realizar el molde y posterior colada de la aleación con la esmeralda preengastada, debido a los esfuerzos a los cuales se encuentra expuesto durante la aplicación del tratamiento térmico.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Ingeniería Metalúrgica, Director PhD Elcy María Córdoba Tuta. Codirector Ing. Carlina Sofía Londoño.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF MIXING REFRACTORY CHAMOTTE-GYPSUM IN THE MANUFACTURE OF A COATING FOR LOST WAX MICROCASTING PROCESS BY APPLYING THE PRE-ENGASTE OF COLOMBIAN EMERALDS*

AUTHOR: CARLOS HERNÁN BENAVIDES QUINTERO
PAULA ANDREA RAMÍREZ PÉREZ**

KEY WORDS: Microcasting, Pre-engaste, Refractory, revetment, lost-wax, chamotte, gypsum

DESCRIPTION

The success of the global jewelry is such that currently is looking for new processes that decrease time and costs of jewelry making, without dropping the quality of mimas them. This study evaluated an important parameter for that process, the refractory lining; for this reason was used a mixture consisting of burnt clay (firebrick) and plaster under different conditions of particle size, refractory/Binder ratio and speed of agitation, which would be implemented during the microcasting of lost-wax by applying the pre-engaste of Colombian emeralds. The study was divided into three stages. The first stage contemplate the development of mixtures varying particle size and the proportions of chamotte and gypsum; in the second stage of determined the effect of these variables on the physical-mechanical and thermal characteristics of coatings, choosing those who showed the best values of resistance to compression, permeability and resistance to shock; the third stage evaluated the experimental behavior of such coating elected, varying mixtures agitation speed and making the wax microcasting lost used an aluminum-zinc alloy and the pre-engaste of the gemstone, in order to assess the ability of copying and the mould during the casting of the same resistance.

Finally obtained good values for the physical and mechanical properties during experimentation and development of cladding, but low, to the time of mould and subsequent casting of alloy with preengastada Emerald, due to the efforts which is exposed during application of heat treatment.

* Bachelor thesis

** Faculty of physico-chemical engineering, metallurgical engineering, School. Director: Phd Elcy María Córdoba Tutam, Co-director Ing Carlina Sofia Londoño.

INTRODUCCIÓN

La joyería colombiana a través de los años ha desarrollado técnicas en microfundición con el fin de aportar al mercado un producto que cumpla los más altos estándares de calidad demandados por los clientes de esta industria; dicho avance tecnológico envuelve procesos que van desde la realización de la aleación o metal base de la joya, hasta el trabajo con piedras preciosas que sin duda alguna aportan un mayor valor y variedad a la hora de competir contra la producción mundial, la cual se encuentra bajo un marco estratégico teniendo como referente que el país es el primer productor de esmeraldas en el mundo, exportándolas en bruto, talladas o montadas sobre joyas.[1].

Los diamantes u otras gemas son asegurados típicamente en monturas o engastes que utilizan salientes, puntas o canales, con el fin de ajustarlos contra la misma, de modo que queden bien asegurados. A este proceso se le conoce como engaste, el cual requiere de mano de obra especializada y alta precisión, ya que el tamaño de las piedras es muy pequeño y se pueden cometer errores al momento de asegurarlas, ocasionando un desprendimiento durante la manipulación de la joya y pérdidas en su valor.

Sin embargo la competitividad frente a nuevos procesos para la fabricación de anillos con joyas montadas aumenta día a día, ejemplo de ellos es la microfundición a la cera perdida, utilizando el pre-engaste de gemas, método empleado para incrustar directamente una piedra determinada sobre una joya durante el proceso de colada del metal fundido [2]. Ante esto la industria joyera del país, utilizando los recursos mencionados, busca implementar este método a la fabricación de anillos con esmeraldas colombianas, proceso de sumo cuidado, ya

que la esmeralda sufre cambios a temperaturas cercanas a los 400°C, tales como pérdida de sus propiedades ópticas y agrietamientos [3].

Una posible solución al problema anterior es la disminución de la temperatura de fusión de la aleación y/o la fabricación de un revestimiento que adquiriera las propiedades aptas para la microfundición con tratamientos térmicos, a temperaturas a las cuales la esmeralda no pierde sus propiedades. En este sentido, en el presente trabajo de grado, se propuso el desarrollo de un revestimiento alternativo compuesto por un refractario (chamota) y un aglomerante (yeso), el cual puede subsanar los problemas presentados frente a la mezcla comercial, cuyas propiedades físico-mecánicas son logradas después de transformaciones polimórficas a temperaturas superiores al estimado para el pre-engage del anillo con la esmeralda. Caso contrario del revestimiento a evaluar, donde la chamota junto al yeso con la aplicación del tratamiento térmico no sufren cambios importantes, exceptuando la deshidratación del segundo a una temperatura por debajo de la requerida, esperando lograr buenas propiedades sin alterar el correcto acabo superficial del producto final.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la mezcla refractaria chamota-yeso en la fabricación de un revestimiento para el proceso de microfundición a la cera perdida aplicando el pre-engaste de esmeraldas colombianas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar revestimientos a partir de chamota-yeso bajo diferentes condiciones de granulometría, relación refractario/aglomerante y velocidad de agitación de la mezcla.
- Determinar el efecto de las variables de estudio en las características físico-mecánicas y térmicas de los revestimientos desarrollados.
- Evaluar el comportamiento del revestimiento desarrollado en el proceso de microfundición aplicado a la técnica de pre-engaste de esmeraldas colombianas.

2. CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1 CHAMOTA

Es un material granular obtenido de la pulverización de los ladrillos refractarios, u otro producto cerámico cocido, cuya composición llega a tener un alto porcentaje de sílice y alúmina. También se puede obtener, a altas temperaturas, a partir de arcillas refractarias. Añadiendo chamota a la arcilla se mejora la textura, se reduce la contracción y se evita la formación de grietas durante la cocción. Normalmente, la chamota presenta un contenido mínimo de 40% de alúmina, 30% mínimo de sílice, 4% máximo de óxido de hierro (III), 2% máximo de óxido de calcio y de óxido de magnesio en total y absorbe un máximo del 7% de agua. Evita defectos como el agrietamiento, además añade resistencia a la cerámica y cuanto más finas sean las partículas de la chamota, más estrechamente se unen con la arcilla y más denso y fuerte será el producto cocido final [4].

De forma general, las principales propiedades de la chamota son:

- Refractariedad: Alta.
- Dilatación: Perfectamente lineal, es decir tiene poca dilatación.
- Porosidad o permeabilidad: Una buena chamota tiene una porosidad abierta del 15 al 20 %. Por tal razón, la chamota exige alrededor de una 1 a 1,2 % más de aglomerante que la arena sílico-arcillosa para la misma granulometría y para desarrollar la misma resistencia [8].

2.2 YESO

El yeso es un producto preparado básicamente a partir de una piedra natural denominada aljez, mediante deshidratación, al que puede añadirse en fábrica determinados componentes de otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad, que una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente [11]. Este mineral es blanco, pero debido a impurezas puede tornarse gris, castaño o rosado. Se denomina sulfato de calcio di-hidratado y su estructura cristalina está constituida por dos moléculas de agua y por una de sulfato de calcio.

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, la plasticidad y maleabilidad le confieren una excelente propiedad al copiado de piezas para la industria de micro-fundición.

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

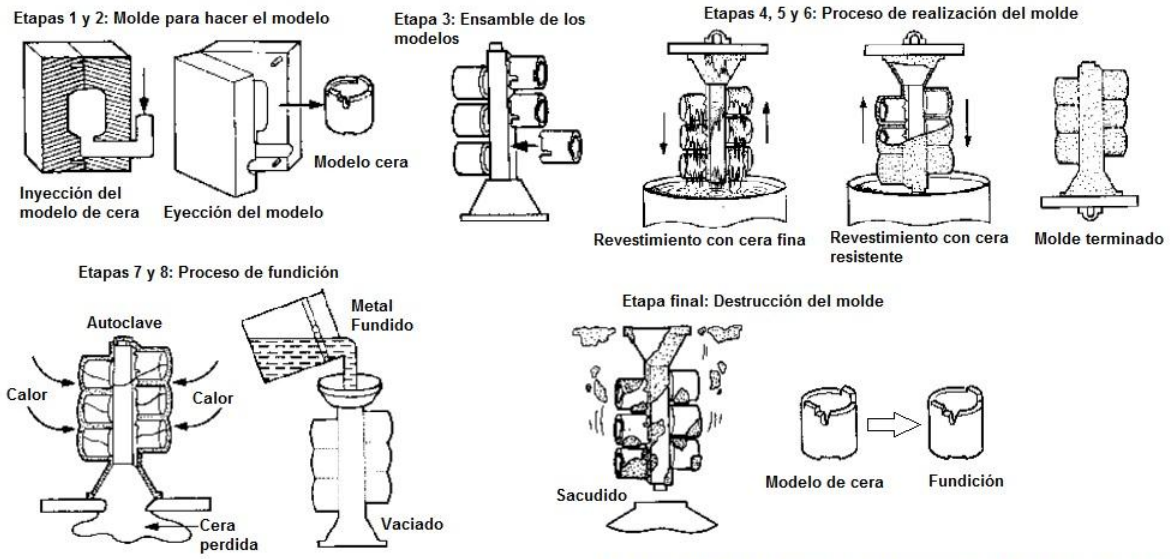
2.3 PROCESO DE MICROFUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA

Es un método que se emplea para obtener piezas de configuraciones complicadas con un espesor de pared de hasta 0.5 mm, esta tecnología es muy empleada en joyería, fundición artística y otras ya que en una serie de casos elimina el labrado por corte [5]. Durante este proceso se utiliza un patrón de cera o material similar para ser recubierto por una mezcla cerámica. Después, el molde

es secado, el patrón se funde y extrae, y el metal fundido es vertido en el molde. Se puede decir que es una técnica que requiere una habilidad considerable para su ejecución. [12]

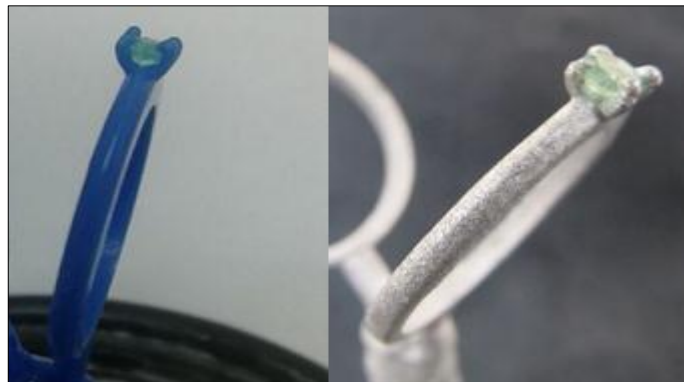
En la Figura 1 se observan las diferentes etapas durante el proceso de fundición a la cera perdida; para las etapas 1 y 2, se confecciona el modelo patrón con la forma de la pieza a ejecutar, el cual se rellena con cera líquida, al endurecerse la cera, se tiene una reproducción en este material del modelo primitivo. En la etapa 3, al modelo en cera se le agregan canales de llenado necesarios para poder lograr el llenado del metal fundido. Se adhieren varios modelos de cera en un “árbol” para facilitar la fundición de varias piezas a la vez. En las etapas 4, 5 y 6 se procede a la inmersión de todo el conjunto en un baño cerámico que posteriormente formará el molde final. En el paso 7 y 8 se quema la cera al introducir el molde refractario en un horno a una temperatura superior a la temperatura de fusión de la cera (100 °C), asegurándose de eliminar por completo hasta el menor vestigio de esta y por último cuando la cera está totalmente eliminada, se procede a vaciar en el molde el metal fundido, este entra por los bebederos y se esparce por los canales de colada de tal forma que cubre la cavidad del molde donde se encontraba la cera. Finalmente el metal se enfría y se destruye el molde, quedando al descubierto la pieza y todo el entramado de arterias que ahora son de metal, las cuales serán suprimidas [9].

Figura 1. Etapas del proceso de microfundición a la cera perdida



El pre-engaste es un método por el cual la piedra preciosa es asegurada al modelo que posteriormente será colado, con el fin de disminuir los costos de mano de obra y mejorar la presentación del producto final, es decir, dichas piedras son engastadas directamente en la cera para luego ser sometidas al proceso de calentamiento en el horno para el posterior colado del metal y así obtener una pieza terminada con las piedras engastadas (ver Figura 2). [14]

Figura 2. Esmeralda engastada antes y después de la fundición



En la actualidad, la joyería usa un revestimiento refractario de yeso-sílice para el método de pre engaste de piedras preciosas, compuesto de sílice (SiO_2) en dos formas cristalinas (Cuarzo y Cristobalita) y de Sulfato de Calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$), el cual debe ser llevado a temperaturas superiores a los 600°C durante el tratamiento térmico, debido a los cambios polimórficos de la sílice [19], siendo esta una temperatura que daña las gemas delicadas como la esmeralda. De ahí la necesidad de reemplazar el material refractario (sílice) por uno de mayor estabilidad a bajas temperaturas, de tal manera que se pueda realizar el tratamiento térmico del revestimiento a temperaturas que no superen los 400°C .

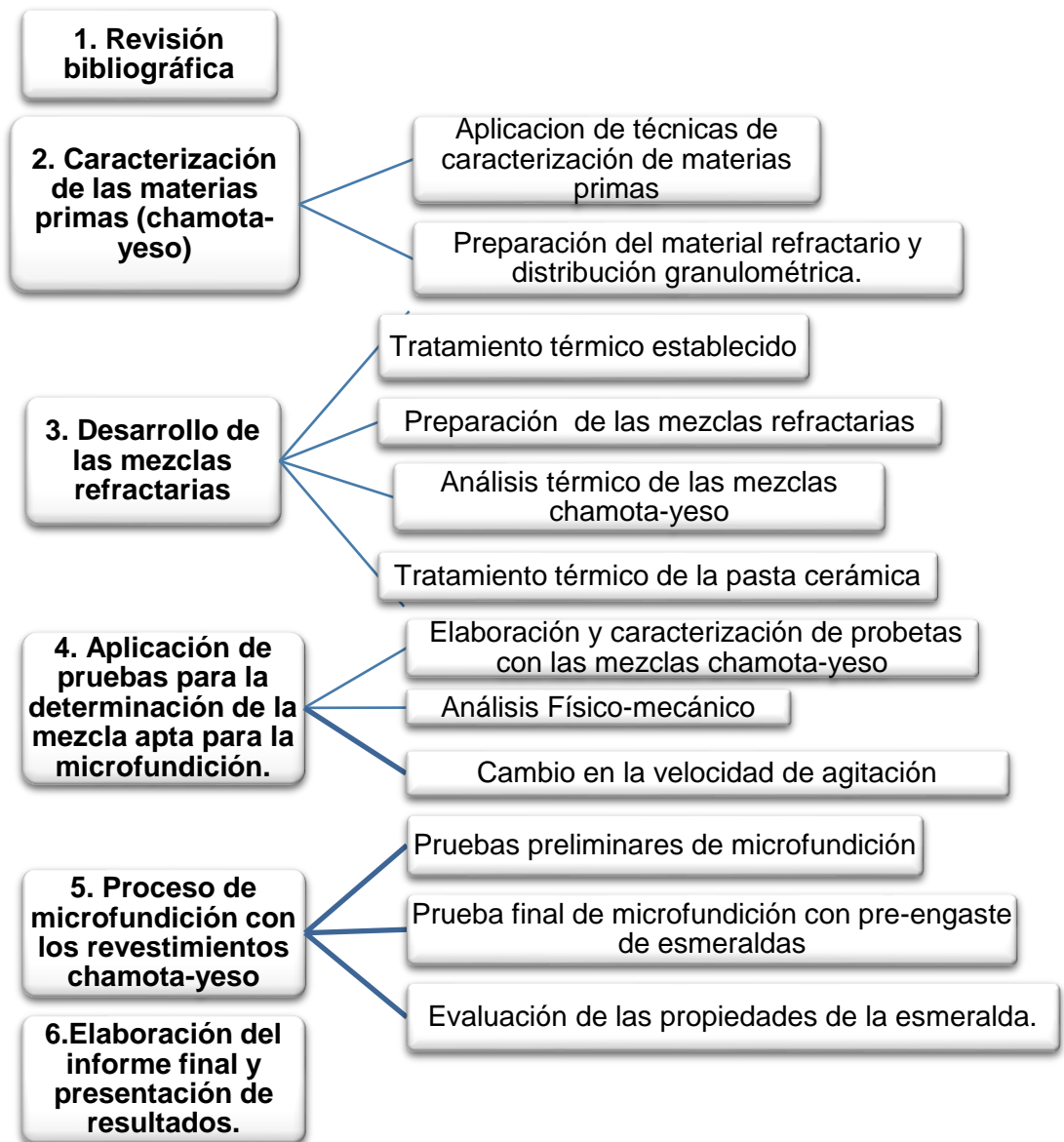
2.4 ESMERALDA

Es una variedad del mineral denominado Berilo, o silicato de berilio y aluminio, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$, que además contiene cromo y vanadio, los cuales le dan su característico color verde. La esmeralda tiene raya blanca, lustre vítreo, dureza de 7.5 a 8 en la escala de Mohs debido a su sistema cristalino hexagonal y su peso específico oscila entre 2,65 y 2,90.

Gran cantidad de esmeraldas son encontradas con fisuras, además son malas conductoras del calor, por lo que son susceptibles a romperse por el choque térmico. Teniendo en cuenta que las esmeraldas se forman en depósitos de pegmatita o venas hidrotermales de ambientes metamórficos, donde las temperaturas oscilan entre 398 a 498°C y presiones que ascienden a $1 - 3$ kBar, al ser sometidas a estas mismas temperaturas o superiores, pueden presentar cambios en su estructura que dan lugar a la pérdida de propiedades valiosas [7].

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación se presenta el esquema general de las etapas seguidas durante el desarrollo de la investigación.



3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Durante esta etapa, se realizó permanentemente una revisión detallada de las normas técnicas para el desarrollo del método experimental y de los conceptos relacionados con el pre-engaste de esmeraldas en joyas, así como de la técnica de la cera perdida y las características del revestimiento para este proceso. La información fue tomada de artículos científicos, tesis de grado, patentes y libros, haciendo uso de la base de datos de la UIS y páginas de internet.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS (CHAMOTA-YESO)

3.2.1 Materia prima utilizada Se realizó la compra de las materias primas para la elaboración del revestimiento cerámico. La chamota utilizada provino de la empresa ERECOS S.A. (ver ficha técnica en el Anexo A); de igual manera se empleó sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) de 98% de pureza, tipo alfa, de color blanco, estado físico sólido (polvo) y pH aproximado de 7 (Ver ficha técnica en el Anexo B).

Por otra parte se caracterizaron las materias primas con el fin de verificar los datos proporcionados por el proveedor implementando la técnica de fluorescencia de Rayos X (Ver Anexo C). Asimismo se determinaron las fases cristalinas mediante Difracción de Rayos X (Ver anexo D).

3.2.2 Preparación del material refractario Debido a que el material refractario fue adquirido en forma de ladrillos de cuña, se hizo necesaria la conminución del material (Chamota), utilizando como primera medida la trituración manual hasta obtener un tamaño de partícula entre 0,5 y 1 centímetro, luego se sometió a molienda en un molino de bolas durante 3 horas y finalmente se llevó a un

tamizador mecánico con el fin de obtener un tamaño de partícula adecuado para el proceso (pasante tamices mallas #140 y # 200).

3.2.3 Distribución granulométrica del material refractario Durante este proceso se determinó el tamaño de partícula según la norma ASTM-C136 [15]. Se tomó una muestra representativa de 200 g por medio de la técnica de rifles, y posteriormente se llevó a una serie de tamices Tyler de malla #140, #170, #200, # 270 y #400; finalmente, se tomaron los respectivos pesos de cada malla para hacer los debidos cálculos.

3.2.4 Análisis térmico del material refractario (chamota) La chamota se analizó térmicamente con el fin de evaluar su estabilidad termoquímica, para ello se utilizó un equipo marca SETSYS EVOLUTION 16/18 de la empresa SETARAM INSTRUMENTATION a una temperatura máxima de 1000°C y una rata de calentamiento de 3°C/min, obteniendo la curva termogravimétrica y el análisis de calorimetría diferencial de barrido.

3.3 DESARROLLO DE LAS MEZCLAS REFRACTARIAS

3.3.1 Preparación de las mezclas refractarias Después de realizada la revisión bibliográfica, se encontró que el revestimiento comercial utilizado en joyería, tiene una composición aproximada de 75% de material refractario y de 25% de yeso (CaSO_4), por tal motivo se realizaron mezclas del polvo refractario (chamota–yeso) en proporciones 65/35, 70/30, 75/25, 80/20 y 85/15 respectivamente. Se da a entender al lector que cada composición mencionada en el transcurso del libro corresponde siempre a chamota/yeso teniendo el primero como el material refractario y de mayor proporción.

Se preparó la pasta cerámica en una relación “a:p”, la cual es la relación de la cantidad de agua con la cantidad de polvo de revestimiento, comúnmente expresada como relación agua – polvo (w:p) “water-to-powder ratio”, por sus siglas en inglés, o en español a:p, en proporciones que oscilaban desde 48 mL: 100g hasta 100 mL: 100g respectivamente; dicho rango fue establecido para cada mezcla de manera experimental, a partir de lo recomendado por la literatura (38 a 42 mL por cada 100 g de polvo) y tomando valores por encima y por debajo de acuerdo con la fluidez que presentaba cada mezcla. Las condiciones de mezclado de la pasta fueron: velocidad de agitación de 647 rpm y tiempo de agitación de 30 segundos. Para esta actividad se utilizó un mezclador Industrial de pedestal Mixmaster. OSTER. Ver anexo E.

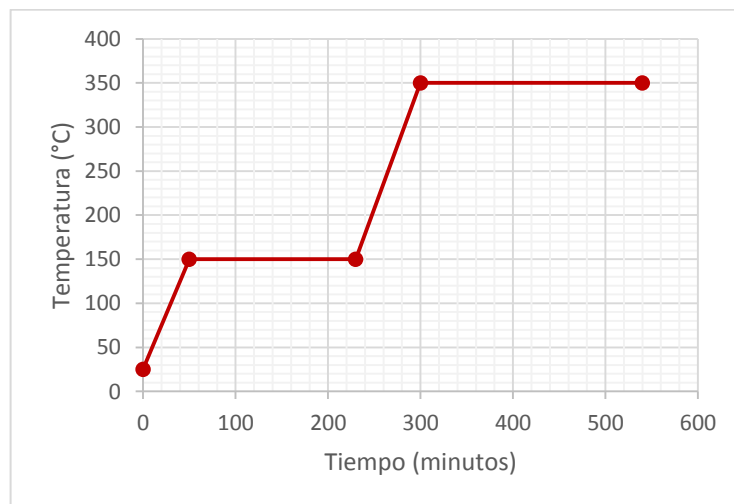
3.3.2 Tiempo de trabajo y tiempo de fraguado Durante esta etapa se realizaron pruebas de tiempo de trabajo y tiempo de fraguado con el fin de elegir las pastas cerámicas que se encontraban dentro de los rangos de trabajo adecuados para el desarrollo del revestimiento. Los mismos debían oscilar entre 5 minutos 30 segundos hasta 10 minutos, para el tiempo de trabajo y de 15 minutos hasta 4 horas para tiempo de fraguado.

La prueba para tiempo de fraguado, se realizó según la norma ASTM C 472-99 mediante el Test Vicat [16]. El cual consistió en dejar caer una aguja con un peso de 300 g sobre la pasta de revestimiento, registrando el tiempo de fraguado inicial, el cual, se toma cuando la mezcla es lo suficientemente fuerte como para mantener la aguja Vicat por lo menos 1 mm de penetración al interior de la pasta; la medición es repetida cada 5 minutos dependiendo de la penetración obtenida hasta que la aguja no penetre más, siendo este el tiempo de fraguado final. Las mezclas cerámicas que no se encontraban dentro de los tiempos estándares de fraguado y trabajo fueron descartadas durante la experimentación.

3.3.3 Análisis térmico de las mezclas chamota-yeso Se realizaron análisis térmicos a las mezclas con el fin de evaluar las pérdidas de masa y las posibles reacciones que ocurriesen, utilizando un equipo marca SETSYS EVOLUTION 16/18 de la empresa SETARAM INSTRUMENTATION a una temperatura máxima de 600°C y una tasa de calentamiento de 3°C/min, obteniéndose las curvas termogravimétricas y los análisis de calorimetría diferencial de barrido de las mezclas chamota/yeso.

3.3.4 Tratamiento térmico de los revestimientos A continuación (Ver Figura 3) se muestra el tratamiento térmico implementado durante toda la investigación, el cual consistía de dos etapas; en la primera, se hizo un calentamiento con una tasa de 3 °C/min desde 25°C hasta 150 °C manteniendo la temperatura por 3 horas con el fin de garantizar la eliminación total de la humedad contenida en el revestimiento, y en la segunda, se siguió el calentamiento a la misma velocidad hasta 350°C, ya que es una temperatura similar a la cual la esmeralda pierde la mayor parte de sus propiedades, realizando finalmente un mantenimiento de 4 horas a dicha temperatura.

Figura 3. Tratamiento térmico aplicado durante la investigación a todos los revestimientos



3.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA APTA PARA EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN

3.4.1 Elaboración y caracterización de probetas con las mezclas chamota-yeso Para la elaboración de las probetas se utilizaron tres (3) cilindros de acero inoxidable de 2 pulgadas de altura por 2 pulgadas de diámetro interno, rectificadas con pendiente de desmolde de 2 grados. Las medidas corresponden a las probetas de arenas de la norma AFS (Sociedad Americana de Fundidores).

Se elaboraron 15 probetas por cada mezcla para cada relación a:p. El procedimiento empleado en la elaboración de las probetas se muestra en el Anexo F.

4.4.2 Pruebas físico- mecánicas Se realizaron análisis físico-mecánicos de las probetas cerámicas previamente seleccionadas, aplicando pruebas de resistencia a la compresión, permeabilidad y resistencia al choque térmico con el fin de evaluar el comportamiento de estas luego de aplicado el tratamiento térmico.

Se determinó el número de permeabilidad para cada probeta, según norma AFS, la cual es empleada para el ensayo de arenas de fundición; para esto se utilizó un permeámetro eléctrico de lectura directa, marca Dietert Detroit, Ref. 338. Adicionalmente, la resistencia a la compresión, fue medida a partir de la máquina universal de ensayos AFS, Harry W. Dietert Serie 33624. (Ver Anexo E)

Por otra parte, la prueba de resistencia al choque térmico fue realizada con el fin de evaluar la variación de la resistencia a la compresión de cada mezcla, después de ser expuestas a temperaturas similares a las del material fundido durante la colada. Se realizaron 5 ciclos de calentamiento (13 minutos) y enfriamiento (13 minutos) con un valor de temperatura aproximado de 700 °C según la norma ASTM C 1171-05 [17].

Después de realizadas las pruebas para tiempo de trabajo, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, permeabilidad y resistencia al choque térmico, se compararon los resultados obtenidos con los de la mezcla comercial, seleccionando los revestimientos con valores similares o superiores para cada prueba.

3.5 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN

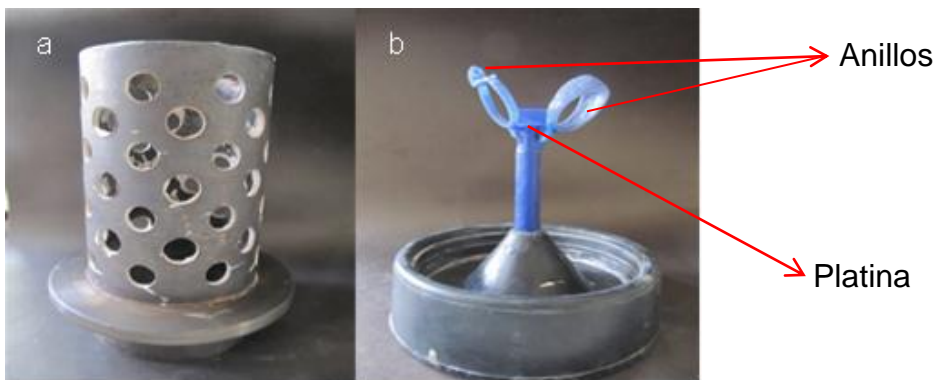
Durante las pruebas físico-mecánicas realizadas para los revestimientos se mantuvo una velocidad constante de agitación de 647 rpm, sin embargo, para observar la influencia de esta variable, se repitieron las pruebas anteriores a aquellos revestimientos seleccionados anteriormente, aumentando la velocidad de agitación a 1200 rpm con un agitador marca IKA RW 20 digital durante 30 segundos. Al aumentar la velocidad de agitación se buscaba aumentar la generación de porosidad en el revestimiento y el llenado del molde con la aleación durante la etapa de colado.

Posteriormente, se realizó la caracterización morfológica de las probetas mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM). Así mismo, se realizó análisis por Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS) para identificar diferentes fases en los revestimientos. Este análisis mostró la textura de las probetas cerámicas y forma, tamaño y distribución de los poros; además se empleó la técnica de difracción de Rayos X (DRX) con el fin de determinar las fases cristalinas presentes en la pasta cerámica antes y después del tratamiento térmico.

3.6 PROCESO DE MICROFUNDICIÓN CON LOS REVESTIMIENTOS DESARROLLADOS

3.6.1 Pruebas preliminares de microfundición Se realizaron tres (3) ensayos a escala de laboratorio del proceso de micro fundición con cera perdida, utilizando las mezclas finalmente elegidas para las malla 140 y 200, con el fin de evaluar el acabado superficial de la joya y la permeabilidad del molde al variar la velocidad de agitación de la mezcla de 647 rpm a 1200 rpm. Para la elaboración de los moldes se utilizó un cilindro metálico agujerado con fin de facilitar el desmolde final (Ver Figura 4a); además, para estas primeras coladas se empleó un árbol en cera consistente de tres modelos, dos anillos y una platina, con los primeros se buscó evaluar la capacidad del molde para copiar los detalles, mientras que con la platina se evaluó el acabado superficial que el revestimiento le confirió a la pieza fundida (ver Figura 4b).

Figura 4. a) Cilindro metálico contenedor del revestimiento refractario durante el tratamiento térmico. b) Árbol de anillos fabricado con cera, ubicado sobre la base de goma del cilindro metálico.

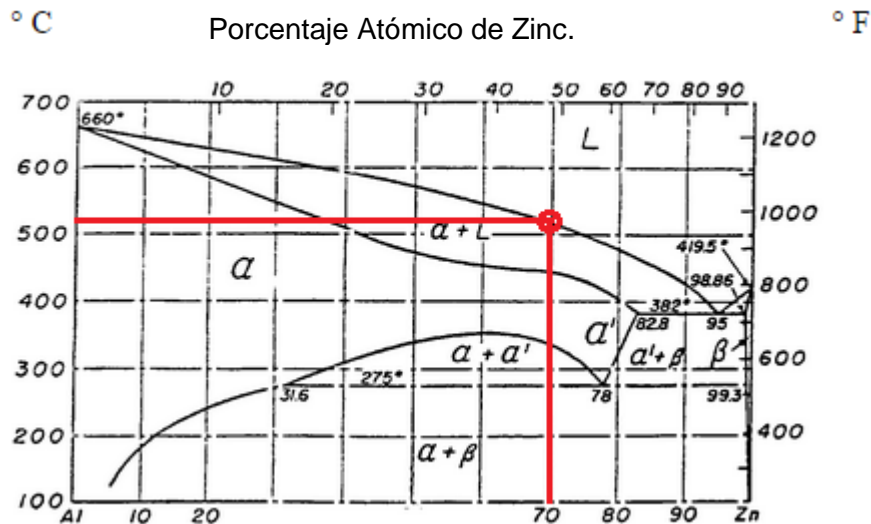


3.6.2 Prueba final de microfundición con pre-engaste de esmeraldas La última colada se realizó con un modelo de dos anillos utilizando esmeraldas pre-engastadas, utilizando la mezcla con mejores resultados en las coladas

preliminares, con el fin de evaluar si el revestimiento desarrollado es adecuado para su implementación en el proceso de microfundición de joyas con pre-engaste de esmeraldas.

La aleación utilizada durante todas las coladas, fue Zn-Al (70-30)% cuya temperatura de fusión es aproximadamente 520°C (ver Figura 5), por lo que las coladas se hicieron a 650°C. Para esto se empleó un horno eléctrico de resistencia al vacío ubicado en el laboratorio de microfundición de la Universidad Industrial de Santander. En las pruebas, el descerado se realizó durante la primera etapa del tratamiento térmico del revestimiento; es decir, a una temperatura cercana a los 150 °C.

Figura 5. Diagrama Zinc-Aluminio (Zn-Al) [18]



Fuente: Aluminio – Zinc de estado sólido [18]

3.6.3 Evaluación de las propiedades de la esmeralda Las esmeraldas utilizadas para realizar la colada, fueron analizadas visualmente por microscopia óptica con un estereoscopio, evaluando los defectos e inclusiones, así como las propiedades ópticas de la gema antes y después de ser sometida al proceso de colada, con el

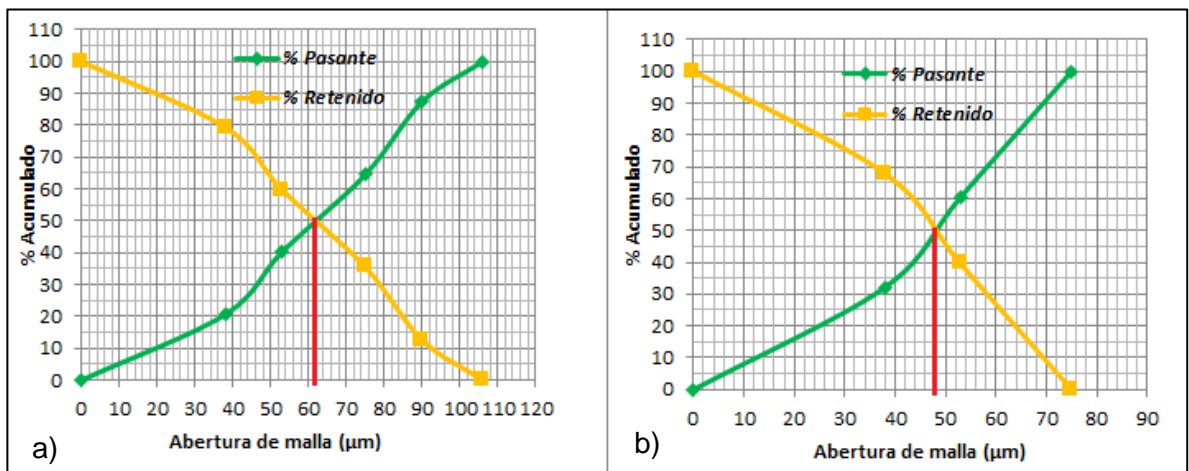
fin de evaluar si el revestimiento es compatible para el proceso de microfundición con pre-engaste de esmeraldas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

4.1.1 Distribución granulométrica En la Gráfica 1 se observan las curvas granulométricas características para el material refractario (chamota), del cual se calculó el D50 para obtener el tamaño de partícula medio de las muestras de estudio, correspondientes a un valor aproximado de 62 μm para el pasante malla 140 (ver Gráfica 1a) y de 47 μm para el pasante malla 200 (ver Gráfica 1b). Las dos distribuciones granulométricas, indican que los materiales tienen partículas suficientemente finas para conferir buena capacidad de copiado al revestimiento, además influye en el tiempo de trabajo y de fraguado de las mismas, ya que un área superficial mayor, consecuencia de la granulometría fina, permite una mejor adsorción de humedad en la mezcla.

Gráfica 1. Curvas granulométricas para la chamota, a) Malla 140, b) Malla 200.



4.1.2 Análisis Elemental y de fases cristalinas de las materias primas El Anexo C muestra la composición elemental del material silico-aluminoso (chamota), obtenida por la técnica de fluorescencia de Rayos X, en la cual los principales elementos son el silicio (Si) con una concentración de 26,93% y Aluminio (Al) con una concentración de 16,81%, demostrando la naturaleza silicoaluminosa del material. Por otra parte El análisis elemental para el yeso muestra una concentración igual a 28,75% de calcio y 20,27% de azufre, siendo elementos característicos de dicho material aglomerante (Ver Anexo C).

El análisis mineralógico (DRX) de las materias primas (ver tablas 1 y 2 y Anexo D) mostró las fases cristalinas presentes en la chamota y el yeso; en el material refractario se evidenció un alto contenido de sílice en sus tres formas polimórficas, cuarzo, tridimita y cristobalita; además de mullita y corindón. Por su parte, en el material aglomerante se encontraron fases típicas del yeso como lo son la Bassanita y la Anhidrita.

Tabla 1. Resultados difracción de Rayos-x para la materia prima chamota.

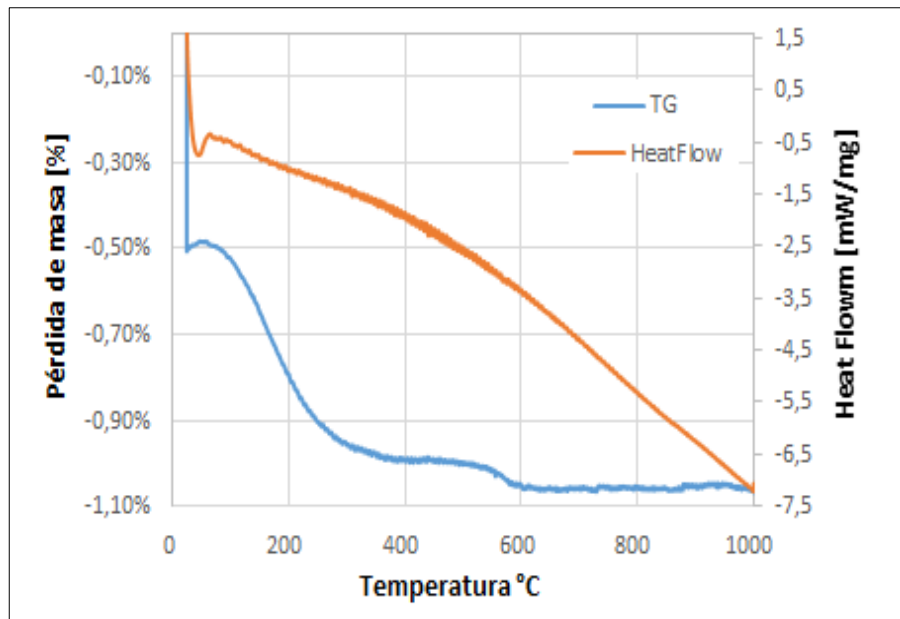
	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	SiO ₂	Cuarzo	20.1 % (0.2)
	SiO ₂	Cristobalita	4.5 % (0.1)
	SiO ₂	Tridimita	1.3 % (0.1)
	Al(Al _{1,272} Si _{0,728} O _{4,864})	Mullita	17.1% (0.3)
	TiO ₂	Rutilo	<1 %
	Fe ₂ O ₃	Hematita	N.C
Total Cristalinos			43.9%
Amorfos y Otros			56.1%

Tabla 2. Resultados difracción de Rayos-x para la materia prima yeso.

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	SiO ₂	Cuarzo	<1 %
	Ca(SO ₄)(H ₂ O) _{0.5}	Bassanita	59.9 % (0.3)
	Ca(SO ₄)	Anhidrita	6.7% (0.1)
Total Cristalinos			67.1 %
Amorfos y Otros			32.9 %

4.1.3 Análisis térmico de la chamota En la Gráfica 2 se observa la curva termogravimétrica y la correspondiente al análisis DSC (Differential Scanning Calorimetry) obtenidos para el material refractario (chamota).

Gráfica 2. Curva termogravimétrica y de flujo de calor (DSC) de la chamota.



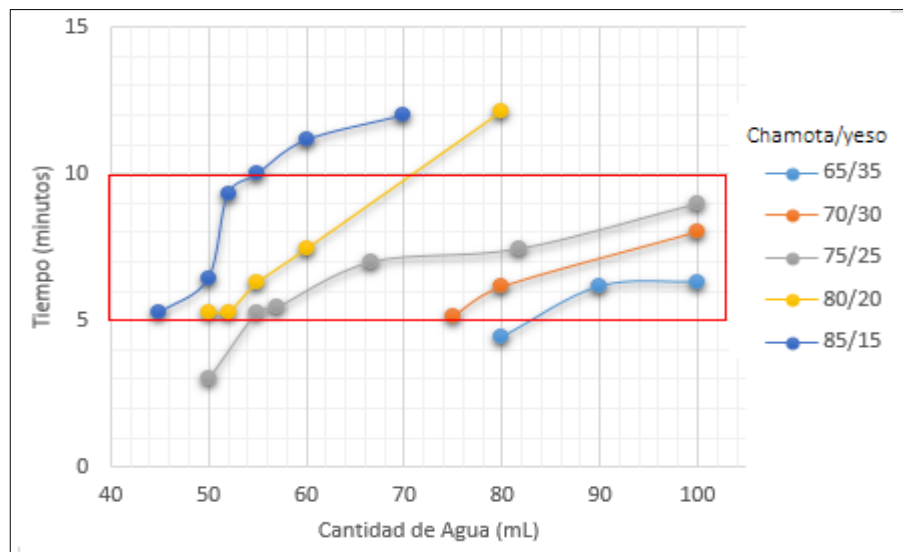
De la anterior gráfica se observa que existen dos zonas de pérdida de masa de aproximadamente 1 % en el intervalo de temperatura comprendido entre 25-590°C, lo cual es debido a la pérdida de humedad alrededor de los 150°C y a la pérdida de materia volátil a mayores temperaturas, ya que la chamota contiene gran cantidad de materiales amorfos (ver Tabla 1). Para la curva de flujo de calor

(DSC), no se presentan picos endotérmicos, ni exotérmicos, ya que la chamota es un material térmicamente estable, por lo cual no presenta, en el rango de temperatura de estudio, transformaciones físicas o químicas importantes, tal como cambios de fase, descomposición o transformaciones polimórficas detectables para esta prueba.

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTAS CERÁMICAS

4.2.1 Medición del tiempo de trabajo Las gráficas 3 y 4 muestran los resultados obtenidos con diferentes composiciones de la mezcla chamota/yeso, tanto para el pasante de malla #200 como #140; estos tiempos fueron hallados en minutos al variar la relación agua (mL): polvo (g), a:p, para cada mezcla de estudio.

Gráfica 3. Tiempo de trabajo vs cantidad de agua, para un pasante de componente refractario correspondiente a malla #200.

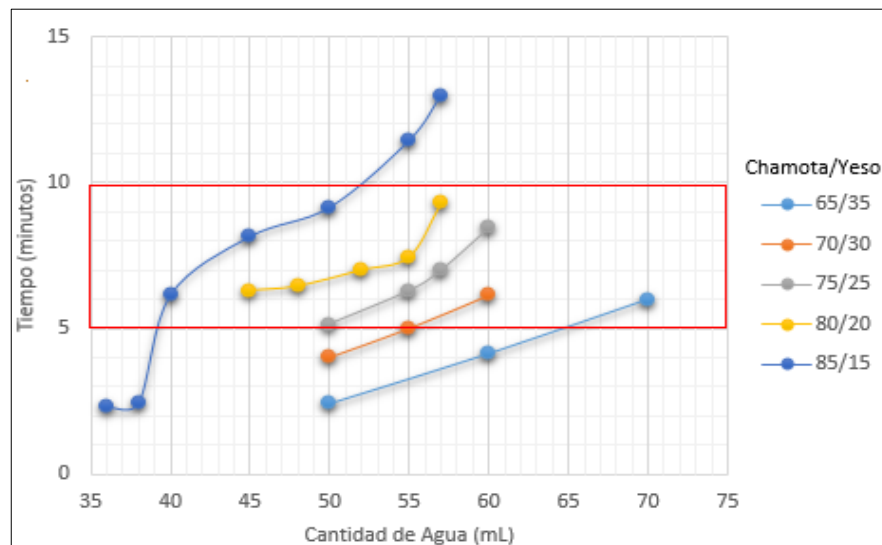


En esta primera etapa de evaluación de las mezclas refractario/yeso se tomó como criterio de selección o descarte de las mismas, el rango de tiempo de trabajo

entre 5 y 10 minutos, teniendo en cuenta a cada uno de estos tiempos como los límites mínimo y máximo necesarios para que el operario pueda manejar una mezcla fluida, que permita realizar un vacío óptimo, sin tener que exceder el tiempo del proceso a la espera del fraguado del material.

Para todos los ensayos, se observó un comportamiento similar, en donde a medida que aumenta la cantidad de agua, independientemente del tamaño de partícula del refractario en la mezcla, aumenta el tiempo de trabajo de la misma. Tal comportamiento se relaciona con el aumento de la fluidez de la pasta con el incremento de la adición de agua, lo que retarda el inicio del fraguado de las mezclas.

Gráfica 4: Tiempo de trabajo vs cantidad de agua, para un pasante de componente refractario correspondiente a malla 140.



En cuanto a la relación chamota/yeso, se observa que, para las dos granulometrías, el tiempo de trabajo aumenta a medida que se disminuye la proporción de yeso en la mezcla, tal comportamiento es lógico teniendo en cuenta que el refractario no tiene propiedades aglomerantes/cementantes, por lo tanto a

medida que se agrega más yeso a la mezcla, esta pierde fluidez por efecto del fraguado del mismo.

Finalmente en cuanto a la tercera variable de estudio, granulometría, los resultados indican que al aumentar el tamaño de las partículas del refractario en la mezcla, se incrementa el tiempo de trabajo de la misma. Tomando a manera de ejemplo una adición de agua de 50mL/100g polvo, los tiempos de trabajo para las mezclas 75/25, 80/20 y 85/15 son 5, 5.3 y 6.5 minutos respectivamente, para el material pasante malla 200, mientras que tales tiempos aumentan a 5.3, 6.3 y 9.5 minutos para el material más grueso (pasante malla 140). Este efecto de la granulometría se relaciona con el hecho al cual las partículas más finas absorben más agua debido a su mayor área superficial, además las distribuciones más amplias favorecen el acomodamiento de las partículas más finas en los espacios dejados por las más gruesas, lo cual aumenta la fluidez de la pasta.

Teniendo en cuenta el criterio de aceptación de un tiempo de trabajo entre 5 y 10 minutos, las composiciones que cumplieron con el criterio de selección y con las cuales continuó el estudio del tiempo de fraguado se muestran en las tablas 3(a) y 3(b).

Tabla 3. Composiciones chamota/yeso escogidas después de establecer el tiempo de trabajo de las mezclas

a) Pasante malla 200		
Proporción (Chamota/Yeso)	Proporción agua/polvo (mL:g)	Tiempo de trabajo (min)
65/35	100:100	6,3
	90:100	6,15
70/30	100:100	8
	80:100	6,15
75/25	100:100	9
	80:100	7,45
	60:100	7
	57:100	5,45
	55:100	5,3
80/20	60:100	7,45
	55:100	6,3
	52:100	5,3
	50:100	5,3
85/15	55:100	10
	52:100	9,3
	50:100	6,45
	45:100	5,3
b) Pasante malla 140		
Proporción (Chamota/Yeso)	Proporción agua/polvo (mL:g)	Tiempo de trabajo (min)
65/35	70:100	6
70/30	60:100	6,15
75/25	60:100	8,45
	57:100	7

	55:100	6,3
	50:100	5,3
80/20	57:100	9,3
	55:100	7,45
	52:100	7
	48:100	6,45
	45:100	6,3
85/15	50:100	9,45
	45:100	9,15
	40:100	8,15
	38:100	6,15

4.2.2 Medición del tiempo de fraguado En las tablas 4(a) y 4(b) se presentan los valores iniciales y finales del tiempo de fraguado para cada una de las mezclas preseleccionadas por su adecuado tiempo de trabajo, junto con el cumplimiento de los límites adaptados de la norma ASTM C 472-99 Test Vicat, por ello fueron establecidos como criterios de selección un tiempo mínimo igual al máximo requerido en tiempo de trabajo (10 minutos), que es el tiempo al cual debe iniciar a fraguar el material, y uno final equivalente a 300 minutos, éste último es un criterio práctico teniendo en cuenta de no afectar la productividad de los talleres de joyería. De esta manera se seleccionaron las composiciones mostradas en la Tabla 4 y se descartaron las composiciones mostradas en el Anexo G, esta últimas presentaron un comportamiento similar, donde la aguja Vicat penetraba la misma distancia, es decir hasta la base del recipiente durante toda la prueba (300 minutos).

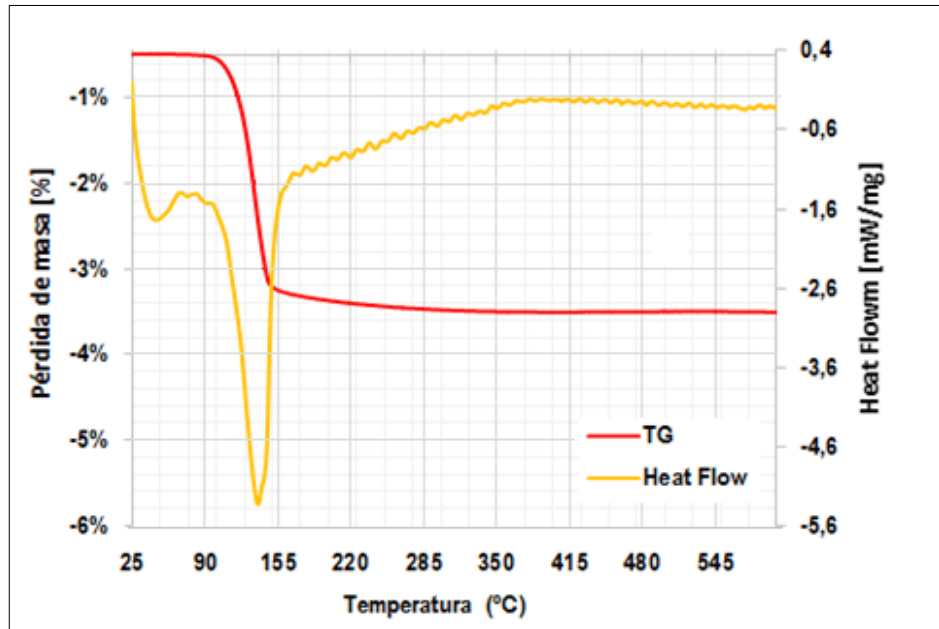
Tabla 4. Tiempo de fraguado para las diferentes mezclas chamota/yeso.

a) Pasante malla 200			
Proporción (Chamota/ Yeso)	Proporción agua/polvo (mL:g)	Inicio del fraguado (min)	Fin del fraguado (min)
75/25	57:100	11	22
	55:100	10	20
80/20	55:100	12,3	37
	52:100	12	32,15
	50:100	12	30
85/15	50:100	15	43
	45:100	14,3	30
b) Pasante malla 140			
Proporción (Chamota/ Yeso)	Proporción agua/polvo (mL:g)	Inicio del fraguado (min)	Fin del fraguado (min)
70/30	60:100	15	28
75/25	50:100	13	21
80/20	50:100	15	38
	45:100	13	26
85/15	40:100	15	22
	38:100	13	20

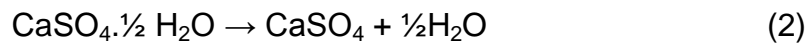
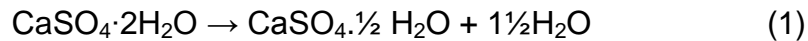
4.2.3 Análisis térmico de la mezcla chamota/yeso Los resultados del análisis térmico de la mezcla chamota/yeso se muestran en la Gráfica 5. El análisis termogravimétrico muestra una pérdida de masa significativa (3,3%) en el intervalo de temperaturas comprendido entre 90°C y 155°C, correspondiente a la pérdida de humedad, que obedece a la eliminación de agua libre, ya que la composición después de 155 °C sigue perdiendo una cantidad mínima de masa hasta

aproximadamente los 300°C, correspondiente al resto de agua de constitución presente en el yeso, para luego estabilizarse a partir a esta temperatura (300 °C).

Gráfica 5. Curva termogravimétrica y de flujo de calor (DSC) de la mezcla refractaria chamota/yeso.



Por su parte la curva DSC muestra un pico endotérmico entre 100°C y 155°C en el que se solapan los dos picos correspondientes a las reacciones de deshidratación del yeso:



4.3 ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS CHAMOTA/YESO

Durante esta etapa se descartaron las composiciones correspondientes a las mezclas refractarias 85/15 de las tablas 4(a) y 4(b), consecuencia de una calidad

superficial defectuosa, la cual mostro grandes poros después de realizar el desmolde de la misma (Figura 6); tales poros se originaron debido a que la mezclas contenían cantidades de agua inferiores comparadas con otras composiciones, dando lugar a una mezcla lo suficientemente viscosa, que impidió la adecuada eliminación de aire durante la etapa de vacío.

Figura 6. Probetas elaboradas para la composición refractaria 85/15 a) malla #140, b) malla #200.



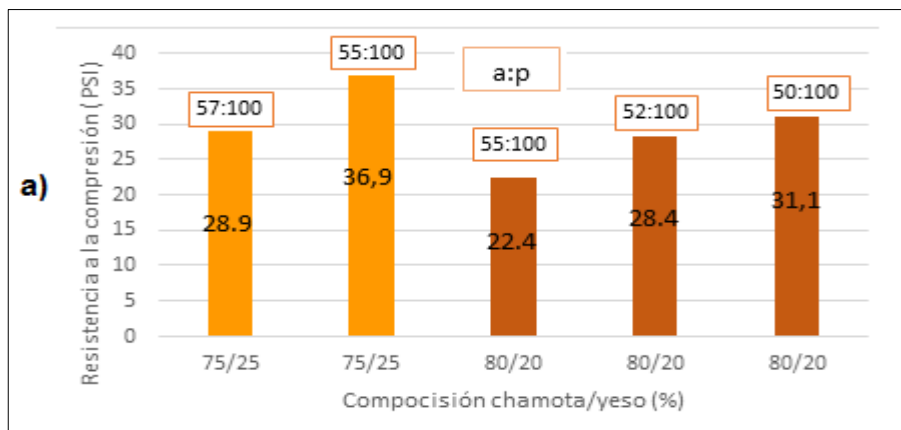
4.3.1 Resistencia a la compresión Esta prueba permitió establecer la resistencia máxima que soporta el revestimiento refractario bajo esfuerzos de compresión, esto una vez, las probetas alcanzaron la temperatura ambiente luego de ser sometidas al respectivo tratamiento térmico.

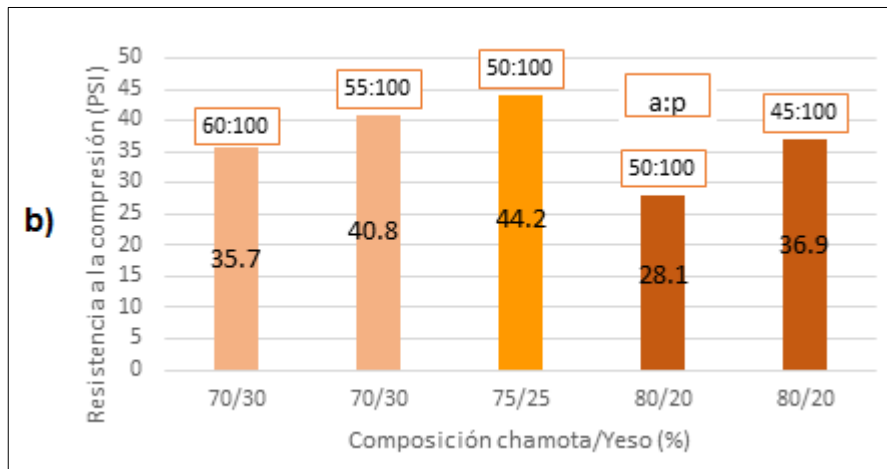
En la Gráfica 6 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, de los revestimientos correspondientes a las dos granulometrías estudiadas. Se puede observar que la cantidad de yeso, con una relación a:p constante, modifica proporcionalmente la resistencia del revestimiento. A manera de ejemplo se tiene que para granulometrías finas (Gráfica 6a) y para una relación de a:p 55:100, la resistencia del revestimiento con 20% yeso es de 22.4 psi, caso parecido se observa para la relación a:p de 50:100 con la granulometría más gruesa (Gráfica 6b), donde la resistencia a la compresión se aumenta de 28.1 psi a

44.2 psi al incrementar la cantidad de yeso de 20% a 25%. Tal tendencia era de esperarse teniendo en cuenta que el yeso es el aglomerante/cementante que permite la unión de las partículas refractarias y le confiere la resistencia al cerámico. En lo que respecta a la adición de agua a la mezcla, los resultados también son muy claros para las dos granulometrías, al disminuir la cantidad de agua, manteniendo la relación chamota/yeso constante, se aumenta la resistencia a la compresión del revestimiento. Este comportamiento se explica por el hecho de que al aumentar el porcentaje de agua a la suspensión cerámica, se alcanza menos compactación de las partículas en el revestimiento luego del fraguado de la mezcla, y por ende se disminuye la resistencia.

Finalmente, el efecto de la distribución granulométrica en la resistencia del revestimiento se aprecia al comparar los resultados obtenidos para las mezclas 80/20 con relación a:p de 50:100. La resistencia disminuye de 31 psi a 28 psi al aumentar la distribución granulométrica de pasante #200 a pasante #140 mallas. Tal resultado se relaciona con el hecho al cual las partículas más finas dejan menos espacios vacíos, lo que se refleja en una mayor densidad del cerámico, y por tanto mayor resistencia a la compresión.

Gráfica 6. Resistencia a la compresión para el revestimiento refractario chamota/yeso, a) pasante de malla #200 y b) pasante malla #140.

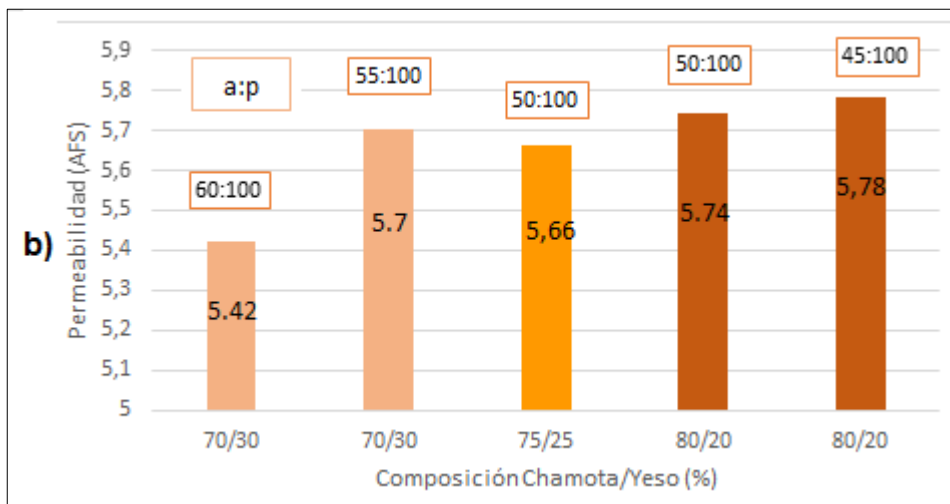
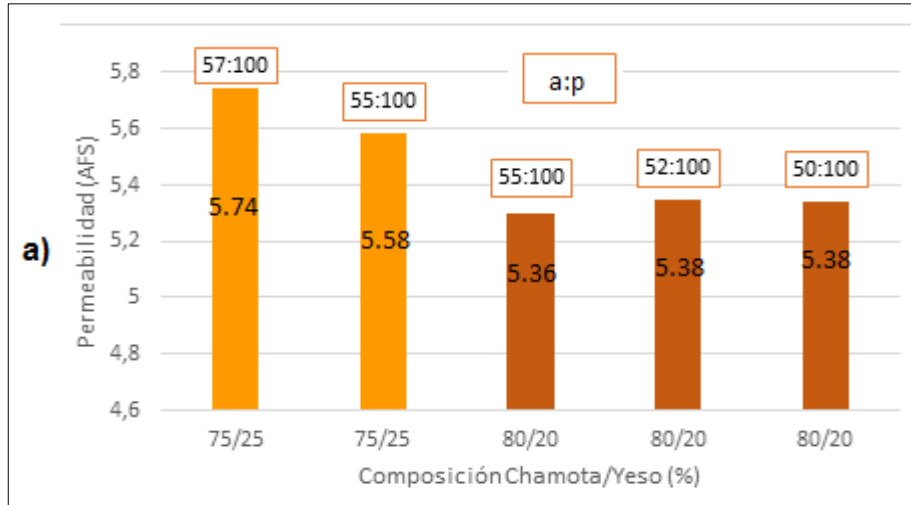




Teniendo en cuenta el valor de resistencia a la compresión de la mezcla comercial, que oscila en el rango de 50 a 60 psi, se observó que ninguna de las composiciones chamota/yeso iguala o supera estos valores, es decir, todos los revestimientos obtenidos tienen menor resistencia que el tradicional.

4.3.2 Medición de la permeabilidad Esta prueba permitió establecer el valor de permeabilidad para cada revestimiento refractario, teniendo en cuenta las cantidades de agua y yeso utilizados en su elaboración. Los resultados se presentan en las gráficas 7a y 7b.

Gráfica 7. Permeabilidad (AFS) para los revestimientos refractarios chamota/yeso, a) pasante malla #200 y b) pasante malla #140.



Tal como se aprecia en las gráficas 7a y 7b, la permeabilidad de los revestimientos es poco afectada por las variaciones de los niveles de los parámetros de estudio: relación chamota/yeso, relación agua:polvo, y distribución granulométrica del refractario. No obstante, de los resultados se puede inferir que el efecto de las variables chamota/yeso y agua:polvo es contrario para las dos granulometrías, en este sentido mientras que en la fracción fina la permeabilidad aumenta con el incremento tanto de la cantidad de yeso como de la cantidad de agua; en el material grueso ocurre lo contrario, es decir la permeabilidad

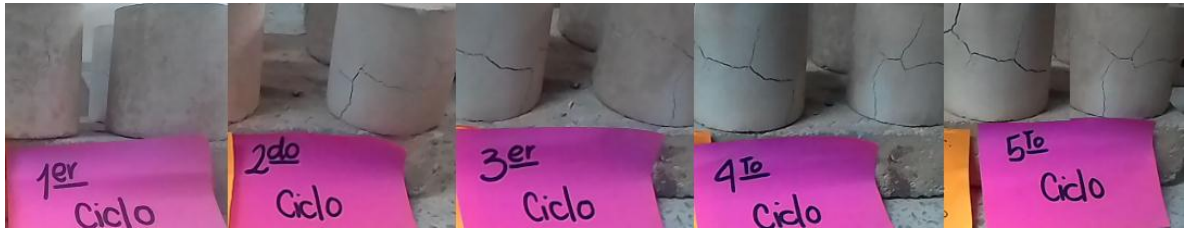
disminuye con el aumento del nivel de las dos variables. Tal comportamiento indicaría que el yeso y el agua favorecen la formación de poros abiertos durante el tratamiento de los revestimientos con granulometrías finas, lo cual tiene sentido teniendo en cuenta que en tal proceso se elimina tanto agua libre como de constitución, generándose tal porosidad. Por su parte, en los revestimientos con distribuciones granulométricas más amplias, las partículas finas se acomodan de mejor manera en los espacios entre las partículas más gruesas durante el tratamiento térmico generándose poros cerrados y no abiertos.

Finalmente, se concluye que la permeabilidad es mayor en los revestimientos con granulometrías más amplias (pasante malla #140) que en aquellos con granulometrías más finas (pasante malla #200), tal resultado concuerda con la mayor resistencia a la compresión de los revestimientos con granulometrías más finas (Ver Gráfica 6a), dado que los poros constituyen zonas concentradoras de esfuerzos que disminuyen la resistencia mecánica de los materiales.

4.3.3 Resistencia al choque térmico Tal como se mencionó en el apartado metodológico, para esta prueba se sometieron las probetas cerámicas a cinco (5) ciclos de calentamiento (700°C)-enfriamiento, según la norma ASTM C1171-05, pasados los cuales se determinó la disminución de la resistencia a la compresión de las mismas.

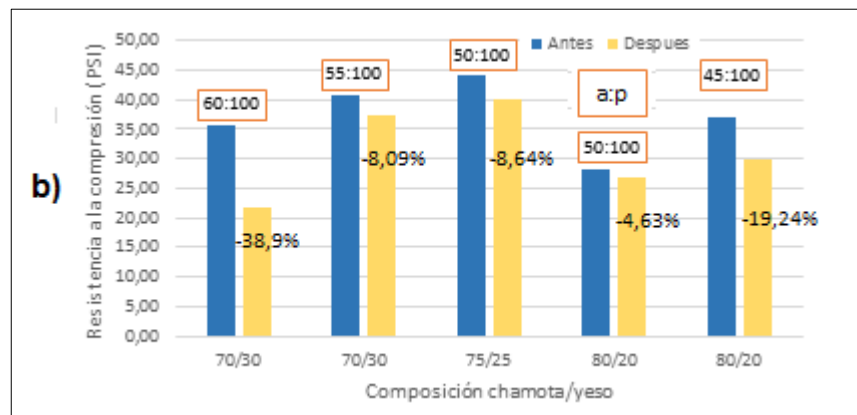
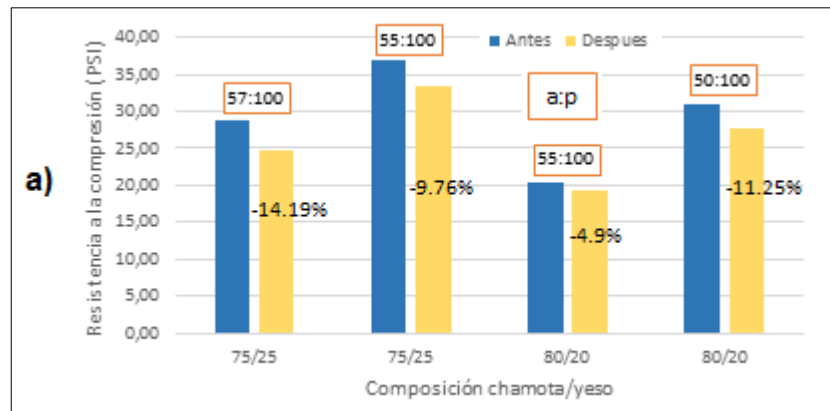
Como se observa en la Figura 7, desde el primer ciclo las probetas se agrietaron, además de tornarse friables y deterioradas en todas las mezclas estudiadas. La formación y crecimiento de las grietas desde la superficie hacia el interior de las probetas, en este tipo de ensayo, son debidos a los esfuerzos térmicos generados por los cambios bruscos de temperatura y la baja conductividad térmica de los materiales cerámicos.

Figura 7. Agrietamiento progresivo durante choque térmico a 700 °C de una mezcla refractaria chamota/yeso.



En las gráficas 8 (a) y 8 (b) se muestran las variaciones en la resistencia máxima a la compresión que soporta el revestimiento refractario por efecto de su exposición a 5 ciclos repetitivos de calentamiento y enfriamiento a una temperatura de 700°C.

Gráfica 8. Variación de la resistencia a la compresión de los revestimientos por choque térmico. a) Pasante Malla 200, b) Pasante Malla 140.



En concordancia con el agrietamiento de las probetas, las mezclas refractarias ensayadas, tanto para la granulometría fina como para la gruesa, presentan una disminución en la resistencia a la compresión al ser expuestas al choque térmico, tales disminuciones de la resistencia fluctúan entre un 5% y un 39% aproximadamente. Para ambas granulometrías, la mayor pérdida de la resistencia se observó en la mezcla con la mayor cantidad de agua.

Una vez realizados los ensayos de resistencia a la compresión, permeabilidad y resistencia al choque térmico, se escogieron las composiciones que tuviesen las mejores propiedades en conjunto respecto a las variables estudiadas anteriormente. Por ello se hizo un análisis teniendo en cuenta un criterio de selección respecto a las propiedades de la mezcla comercial KERR (sílice/yeso), en este sentido en primer lugar fueron escogidas las composiciones con la menor cantidad de agua, teniendo en cuenta que presentaron los valores más altos de resistencia a la compresión, ya que ninguno alcanzo a igualar o superar el rango de 50 a 60 (psi) de la mezcla KERR, seguidamente se estudió la permeabilidad, para lo cual no hubo necesidad de eliminar ninguna composición debido a que todas presentaron un valor más alto al de la mezcla comercial equivalente a 4,8 AFS, la cual era una de las variables a mejorar. Finalmente, teniendo en cuenta la resistencia a la compresión después de choque térmico, fueron escogidas las composiciones que presentaron un menor % de disminución de la resistencia a la compresión, para cada granulometría.

En la Tabla 5 se presenta el consolidado de las propiedades obtenidas para cada uno de los revestimientos desarrollados. En letra roja se resaltan las mezclas que fueron descartadas por no cumplir con los criterios de selección antes mencionados.

Tabla 5: Consolidado de propiedades físico-mecánicas de las mezclas chamota/yeso estudiadas.

Pasante malla	Proporción (chamota/yeso)	Relación Agua: Polvo (mL:g)	Permeabilidad (AFS)	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la compresión después de choque térmico (psi)	% de disminución de la resistencia a la compresión
200	75/25	57:100	5,74±0,04	28,9±0,97	24,8±0,51	14,19%
		55:100	4,78±0,04	36,9±0,49	33,3±2,18	9,76%
	80/20	55:100	5,36±0,04	20,4±0,58	19,4±0,49	4,90%
		50:100	5,38±0,04	31,1±0,49	27,6±0,58	11,25%
140	70/30	60:100	5,42±0,07	35,7±1,08	21,8±0,81	38,93%
		55:100	5,7±0,08	40,8±0,68	37,5±3,12	8,09%
	75/25	50:100	5,66±0,10	44±0,83	40,2±1,17	8,64%
	80/20	50:100	5,78±0,04	28,1±0,66	26,8±0,51	4,63%
		45:100	5,74±0,04	36,9±1,20	29,8±0,75	19,24%

4.3.4 Efecto de la velocidad de agitación de las mezclas en las características de los revestimientos. Para finalizar esta parte de la investigación, se evaluó el efecto de la velocidad de agitación de la pasta cerámica a 1200 rpm, sobre las propiedades físico-mecánicas del revestimiento. Este estudio se realizó con dos mezclas, con relación chamota/yeso 75/25 y las dos granulometrías, utilizando para ellas relaciones a:p de 55:100 y 50:100 para la granulometría fina y gruesa, respectivamente. Los resultados son presentados en la Tabla 6.

Tras aumentar la velocidad de agitación a 1200 rpm se obtuvo una mezcla más homogénea y fluida tanto para la malla #140 como para la #200.

Tabla 6: Caracterización físico-mecánica de los revestimientos obtenidos con diferentes velocidades de agitación.

PASANTE	Proporción (chamota/ yeso)	Relación Agua: Polvo (mL:g)	Denominación	Velocidad de agitación (rpm)	Permeabilidad (AFS)	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la compresión después de choque térmico (psi)	% de disminución de la resistencia a la compresión
200	75/25	55:100	M3	647	4,78±0,04	36,9±0,49	33,3±2,18	9,76%
			M0	1200	5,08±0,07	35,4±0,89	26±0,49	26,55%
140		50:100	M2	647	5,66±0,10	44±0,83	40,2±1,17	8,64%
			M1	1200	5,72±0,07	39,2±0,75	30,6±0,75	21,94%

El incremento en la permeabilidad por efecto de una mayor velocidad de agitación, se evidenció principalmente en la composición con componente refractario pasante malla #200, debido a una mayor cantidad de aire atrapado y dispersado en toda la mezcla, con lo que se favoreció la formación de poros en las probetas. Por otro lado, el aumento de la permeabilidad indica que los poros formados son abiertos, es decir interconectados unos con otros. En este mismo sentido, se infiere que en los revestimientos obtenidos con la granulometría del refractario más gruesa (-140 mallas) se generan poros principalmente cerrados, por lo que la permeabilidad no es afectada de manera significativa.

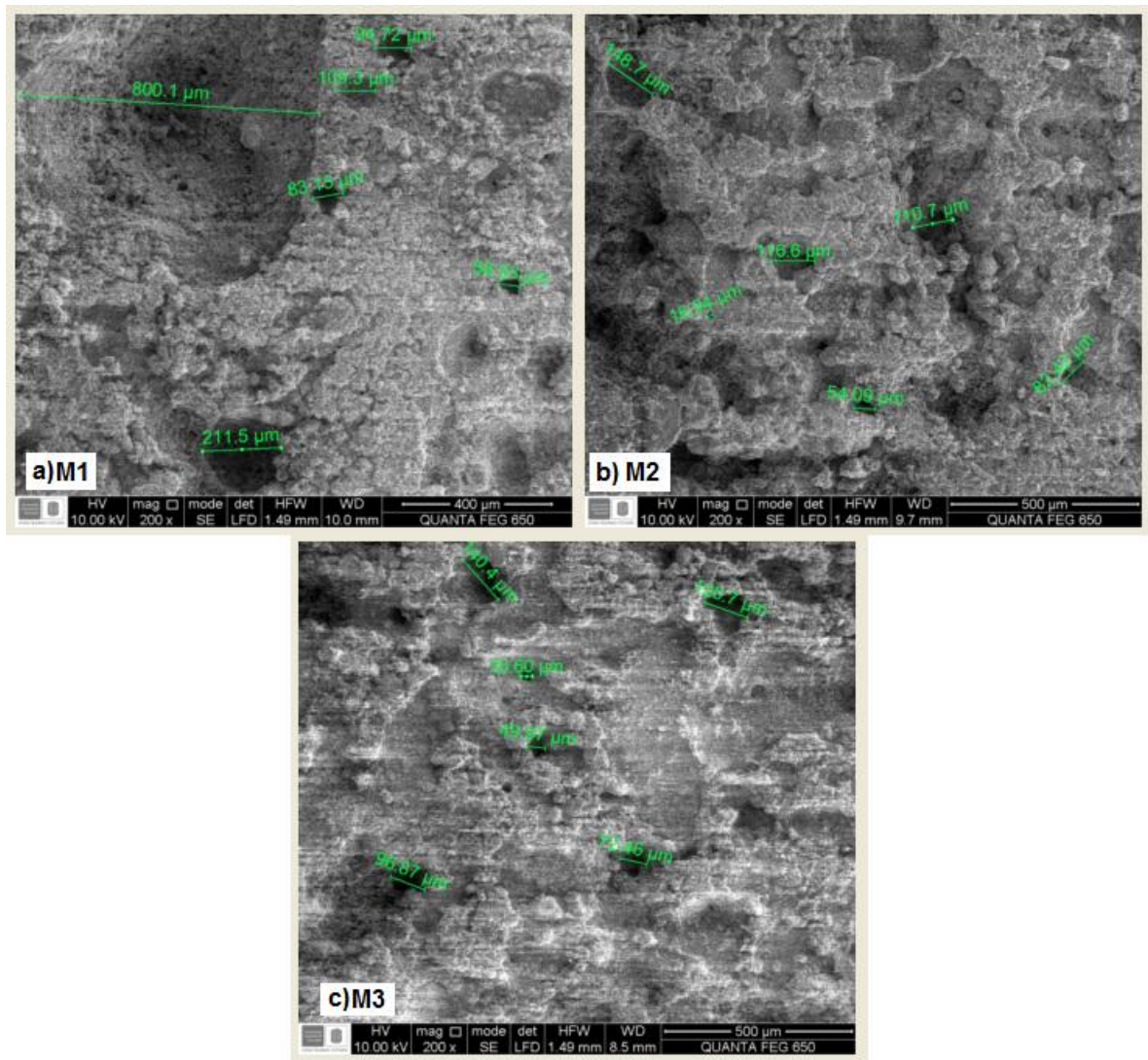
Como se esperaba, la resistencia a la compresión disminuyó con el aumento de la velocidad de agitación, ya que los poros formados en este caso sirven como concentradores de esfuerzos, los cuales llevan a la probeta a fracturar con mayor facilidad. La resistencia a la compresión después del choque térmico disminuyó a pesar de presentar mayor cantidad de poros, siendo estos inhibidores en la propagación de las grietas. Esto podría deberse a dos factores, en primer lugar, los poros formados disminuyen de manera significativa la conductividad térmica del material, o también podría deberse a la liberación brusca de agua de constitución del cerámico. Para corroborar esta última hipótesis se obtuvieron los

difractogramas de un revestimiento antes y después del tratamiento térmico (Ver Anexo H), observándose que efectivamente durante el tratamiento térmico el yeso no se deshidrató completamente, dado que el difractograma del revestimiento, luego del tratamiento térmico, demuestra la presencia de sulfato de calcio en su forma hemihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4).

4.3.5 Evaluación del tamaño de poros y fases presentes. Para obtener una medida de los poros en los revestimientos y comparar el efecto sobre ellos de la velocidad de agitación, se utilizó la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), ver Figura 8. En esta figura, la muestra M1 fue obtenida con una velocidad de agitación de la mezcla de 1200 rpm y la fracción granulométrica más gruesa (pasante malla #140), mientras que las muestras M2 y M3 corresponden a los revestimientos obtenidos a baja velocidad de agitación (647 rpm) y las granulometrías gruesa y fina, respectivamente. Se observa que la agitación a bajas revoluciones (Figuras 8b y 8c) genera poros medianos ($19 \mu\text{m}$ a $149 \mu\text{m}$) y con distribución más homogénea que con altas velocidades de agitación, la Figura 8a muestra que para este caso (1200 rpm) se generaron poros de tamaños extremos, o muy pequeños (menos de $1 \mu\text{m}$) o muy grandes (mayores de $800 \mu\text{m}$). Aunque los poros pequeños son favorables para obtener buen acabado superficial de las piezas fundidas, los macroporos conllevan a defectos inaceptables en las mismas tales como burbujas de metal sobre la superficie de la pieza fundida.

De manera general, al observar los análisis EDS (Ver Anexo I) se evidencia la presencia de partículas densas rodeadas o inmersas en una matriz porosa, tal como era de esperarse, para las fases correspondientes a chamota y yeso, respectivamente. Esto se deduce por elementos presentes en cada una de las dos zonas analizadas.

Figura 8. a) Micrografía SEM del revestimiento chamota/yeso. a) M1; b) M2; c) M3.



4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL REVESTIMIENTO EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN

4.4.1 Coladas preliminares A partir de los resultados obtenidos durante la investigación, se procedió a realizar coladas preliminares sin esmeralda, con el objetivo de evaluar la calidad superficial, la capacidad de copiado y el correcto

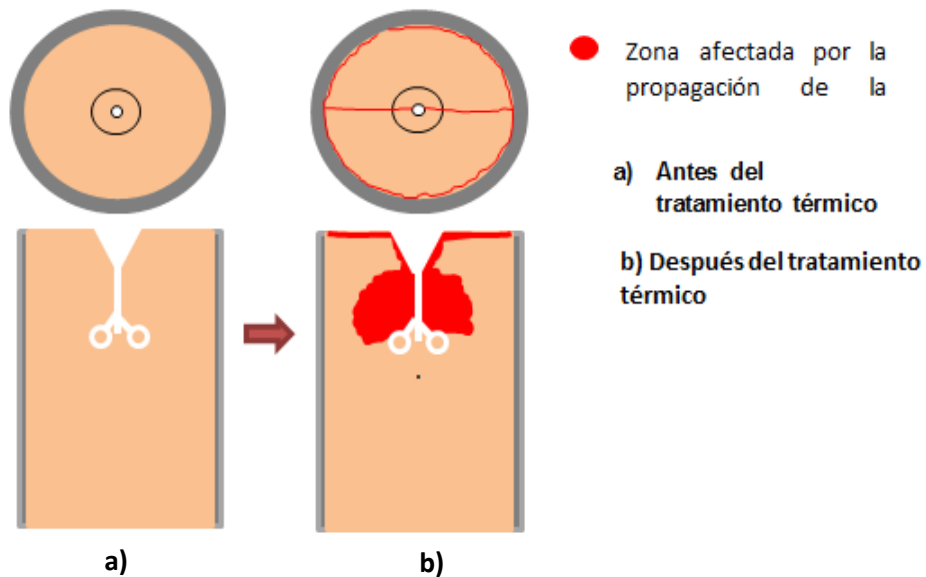
llenado, así de esta manera para el desarrollo del proceso se seleccionaron las mezclas refractarias M1, M2 y M3 (Tabla 6), las cuales presentaron los mejores resultados en las pruebas físico-mecánicas, descartando a M0 debido a su alto % de disminución de la resistencia a la compresión. Todas las fundiciones se realizaron con un árbol en cera con tres elementos: un anillo de forma sencilla, un anillo de forma compleja y una platina para evaluar el acabado superficial alcanzado en el proceso, utilizando una aleación ligera de 30%Al-70%Zn colada a una temperatura de 650°C.

4.4.1.1 Análisis del revestimiento después del tratamiento térmico Una vez finalizó el correspondiente tratamiento térmico del revestimiento, se observó que estos no soportaron dicho proceso al cual fueron sometidos, dando a lugar a la formación de grietas en la superficie del molde en contacto con cilindro metálico. Tales grietas se abrían con una trayectoria directa al canal de distribución principal; esto se debió a la concentración de esfuerzos de compresión en la interface entre la pared del cilindro y el revestimiento, ocasionando la formación de fisuras que con el aumento de la temperatura y la fluctuación del material tras las transformaciones del yeso, generó grietas que luego se propagaron fácilmente a otros concentradores de esfuerzos geométricos, en este caso circulares, tal como lo es el canal de distribución del árbol, de esta manera, una vez allí se propagó por la pared del árbol hasta ingresar por los canales de distribución secundarios que conducen al anillo, llegando incluso de nuevo a las paredes del cilindro (figuras 9 y 10).

Figura 9: Revestimiento y modelo del refractario, granulometría pasante malla #200, a:p 55:100 y velocidad de agitación a 647 rpm después de ser sometido al tratamiento térmico.



Figura 10: Vista superior y frontal en corte longitudinal, correspondientes al cilindro metálico con el revestimiento.



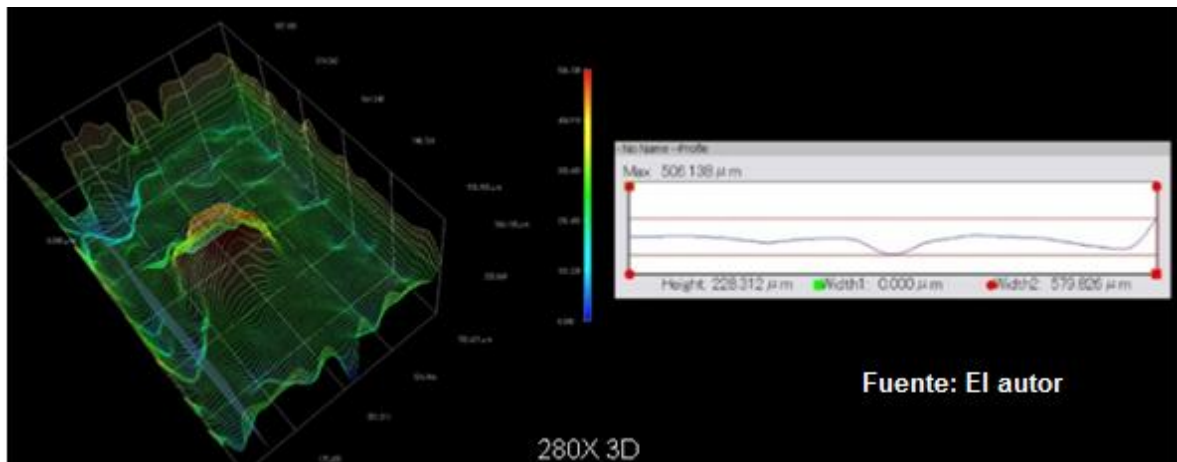
4.4.1.2 Fundición preliminar M1: La primera colada fue realizada con el revestimiento M1 (ver Tabla 6), con granulometría pasante malla 140, composición chamota/yeso 75/25, a:p 50:100, a una velocidad de agitación de 1200 rpm. La calidad de la superficie se evaluó en la superficie de la placa obtenida del mismo árbol de anillos (Ver Figura 11), con ayuda del microscopio Hirox y mediante la

reconstrucción 3D de la superficie (Figura 12), se determinó su rugosidad promedio. Para la fundición con el revestimiento M1 se observó una calidad superficial media, con rugosidad promedio de $141,76 \pm 9,72 \mu\text{m}$ y algunos defectos provenientes de los macroporos del revestimiento (ver Figura 8a), que se muestran como salientes de metal en la superficie de la placa. Por otro lado, se presentó un llenado total del molde, es decir, no se presentó ninguna pieza con alguna parte faltante, lo que indicaría que la permeabilidad del molde fue adecuada para el proceso. Otra característica observada, fue una particular deformación de los anillos probablemente debido a un exceso de material agregado para llenar el cilindro contenedor, aplicando de esta manera una carga superior a la soportada por el árbol de cera. (Ver Figura 11).

Figura 11: Resultado obtenido en la primera fundición preliminar M1.



Figura 12. Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M1.

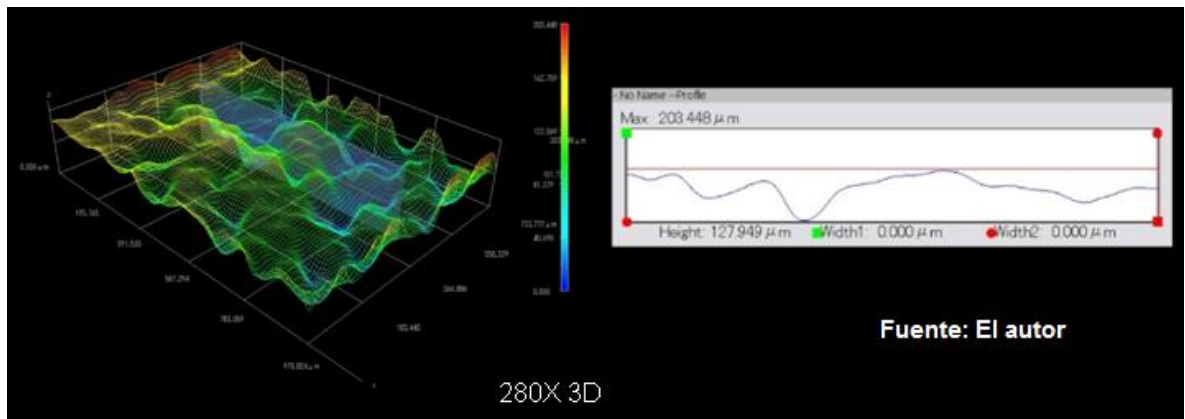


4.4.1.3 Fundición preliminar M2: La segunda colada (ver Figura 13) fue realizada con el revestimiento M2, con granulometría pasante malla 140, composición chamota/yeso 75/25, a:p 50:100 y una velocidad de agitación de 647 rpm. La superficie de esta muestra tuvo un mejor acabado superficial, donde se disminuyó el valor de rugosidad promedio a $63,341 \pm 7,2 \mu\text{m}$ respecto a la primer colada (ver Figura 14), obteniendo de esta manera mejor copiado de detalles del modelo original en cera. Este resultado concuerda con el menor tamaño de poro encontrado para el revestimiento M2, comparado con el M1 (ver Figura 8). Con los datos obtenidos de la primera y segunda colada se descartó el revestimiento M1, dado que los macroporos generados en este se reflejan en grandes defectos superficiales en las piezas fundidas. Es decir, se concluye que es más favorable para el acabado superficial de la joya, realizar el mezclado de la pasta cerámica a 647 rpm. Sin embargo, las piezas obtenidas con M2 presentaron otros defectos como deformaciones geométricas, como con M1, igualmente se presentó un agrietamiento del revestimiento durante el tratamiento térmico, el cual dio origen a que el metal se filtrará entre las fisuras generadas, dejando como resultado rebabas del mismo. (ver Figura13).

Figura 13: Resultado obtenido en la segunda fundición preliminar M2.



Figura 14: Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M2.



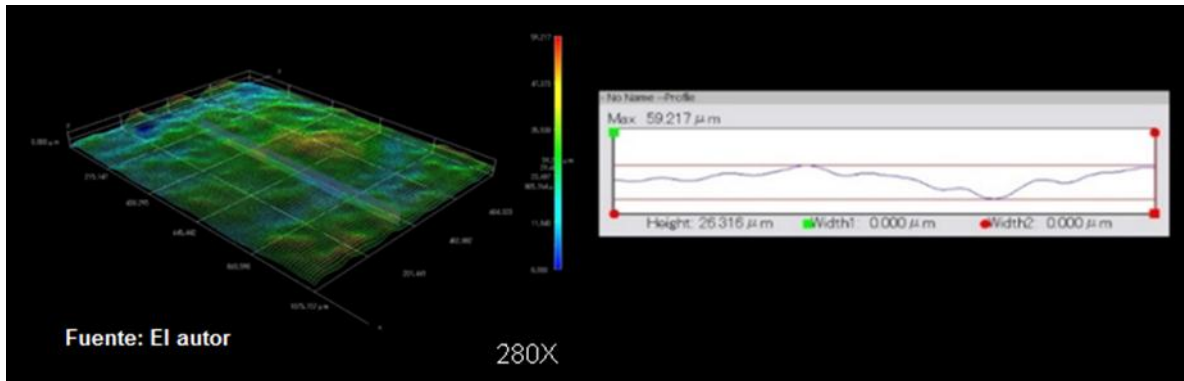
4.4.1.4 Fundición preliminar M3: Finalmente y teniendo en cuenta los resultados de copiado y acabado superficial, obtenidos al variar la velocidad de agitación, se realizó una tercera colada con el revestimiento M3, con granulometría fina (pasante malla 200), composición 75/25, a:p 55:100 y velocidad de agitación a 647 rpm. Nuevamente, el revestimiento refractario sufrió agrietamiento durante el tratamiento térmico, lo que condujo al material metálico desplazarse y llenar dichas fisuras (ver Figura 15). El acabado superficial aumentó, con un decremento notable de la rugosidad de la superficie metálica, $14,981 \pm 6.4 \mu\text{m}$ (ver Figura 16),

valor que es bastante inferior a los obtenidos en las coladas anteriores, esto se debe a que el revestimiento presentó poros más pequeños y una distribución entre partículas más homogénea.

Figura 15: Resultado obtenido en la tercera fundición preliminar M3.



Figura 16: Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M3.



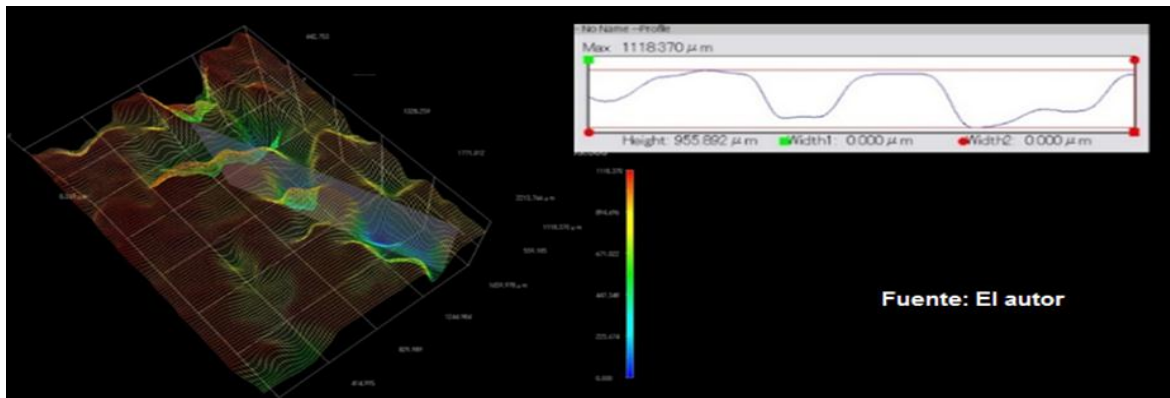
4.4.2 Fundición con el revestimiento comercial KERR (Muestra M4): Para efectos comparativos también fue realizada una colada utilizando como revestimiento la mezcla comercial KERR, denominada M4 (ver Figura 17). Se obtuvo una baja calidad debido a una rugosidad excesiva que marcó un valor

promedio de $546,195 \pm 6.8 \mu\text{m}$ (Ver Figura 18), también se presentó la formación de óxidos, lo cual indicaría una probable reacción entre el revestimiento y el metal; se debe tener en cuenta que esta mezcla es utilizada para aleaciones de metales preciosos y altos puntos de fusión, por tanto no se asegura los mismos resultados en condiciones diferentes a las tratadas normalmente en un proceso de microfundición.

Figura 17: Resultado obtenido utilizando como revestimiento la mezcla comercial KERR.



Figura 18: Reconstrucción 3D de la superficie y medida promedio de rugosidad, para el revestimiento M4.



4.4.3 Fundición final con pre-engaste de esmeraldas M5: Con el fin de aplicar la técnica de gemas pre-engastadas con esmeraldas colombianas, se realizó una última colada con el revestimiento M2, elaborado con pasante malla 140,

composición chamota/yeso 75/25, a:p 50:100 y una velocidad de agitación de 647 rpm; siendo el revestimiento que presentó en conjunto las mejores propiedades físico-mecánicas y bajos defectos de fundición (M2=M5).

Teniendo en cuenta los resultados de las coladas anteriores, y el análisis de DRX del revestimiento (chamota/yeso) después del tratamiento térmico, en donde se evidenció la presencia de bassanita (Anexo H), se decidió prolongar el tiempo de sostenimiento a 350°C de 4 h a 8 h, en el tratamiento térmico del revestimiento, con el fin de alcanzar una temperatura homogénea en todas las zonas del molde, garantizando la eliminación total del agua de constitución presente y así mejorar la resistencia al choque térmico.

Realizada la colada final con los parámetros anteriormente mencionados (revestimiento M5), se evidenció que el molde tras el tratamiento térmico, no sufrió un agrietamiento excesivo (ver figura 19) como el presentado en la colada previa sin la esmeralda (Figura 9), confirmando la hipótesis expuesta anteriormente.

Figura 19: Revestimiento M5 después del Tratamiento Térmico (TT) con 8 h de sostenimiento a 350°C.

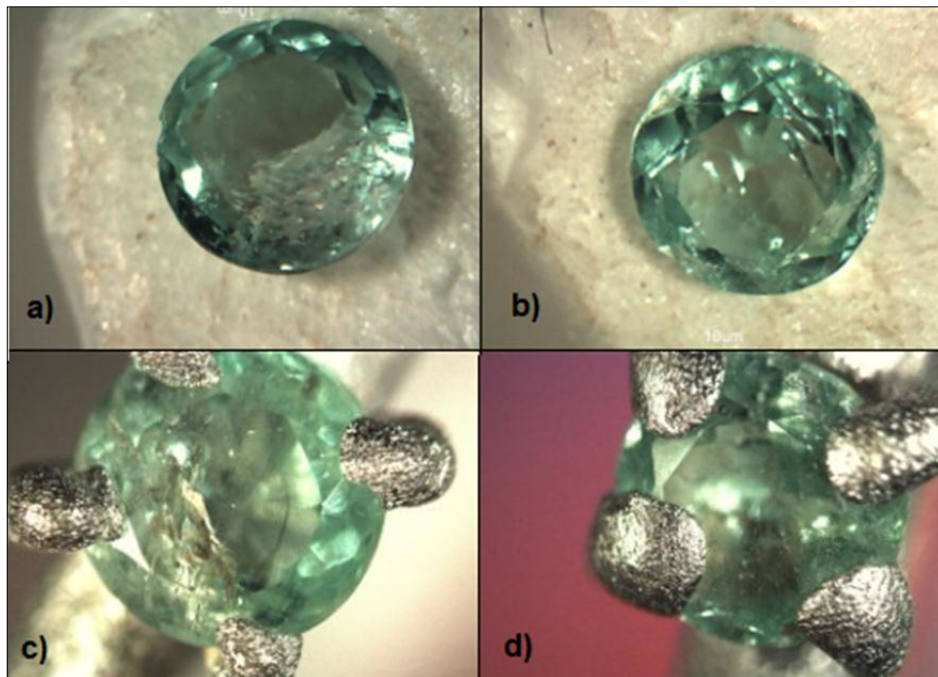


En la Figura 20, se aprecia el resultado obtenido implementando el revestimiento M5, al cual se le realizó una observación cualitativa del árbol de anillos con esmeraldas engastadas, evidenciando un aumento en la calidad superficial y disminución en los defectos de fundición; además la piedra preciosa conservó a simple vista sus propiedades ópticas de color y brillo a pesar de superar la temperatura máxima registrada en la teoría, en la cual la esmeralda pierde estas propiedades a 400°C. Una hipótesis para los resultados anteriores es la pérdida de temperatura durante el llenado del molde con el metal y el bajo contacto entre la aleación y la gema, la cual es asegurada por medio de pequeños salientes sin cubrirla totalmente (ver Figura 21).

Figura 20: Resultado obtenido en la fundición final con pre-engaste de esmeraldas M5.



Figura 21: Fotografías de las esmeraldas antes (a y b) y después (c y d) del proceso de microfundición con el pre-engaste de las gemas.



5. CONCLUSIONES

- El revestimiento desarrollado chamota/yeso, composición 75/25, relación a:p equivalente a 50:100, granulometría de refractario pasante malla 140 y una velocidad de agitación de 647 rpm fue la composición elegida tras obtener las mejores propiedades durante los ensayos realizados y la microfundición con pre-engaste de las esmeraldas.
- Utilizar una granulometría de pasante malla 200 de componente refractario en lugar de pasante 140, aumenta significativamente el acabado superficial de la joya, sin embargo la resistencia mecánica después del choque térmico es mayor para la segunda granulometría, lo que genera discrepancia en la selección precisa de una composición entre las dos mallas, dado que ambos factores son de gran relevancia para la obtención de piezas de alta calidad.
- La chamota, como componente refractario, en sustitución de la sílice (cuarzo, cristobalita) necesita adiciones de yeso similares a las utilizadas en la mezcla comercial KERR, en un rango entre 20% y 30% del mismo, pero mayor cantidad de agua, aun así alcanza propiedades físico-mecánicas similares a esta mezcla tradicional.
- Los ensayos de microfundición con los nuevos revestimientos, chamota/yeso, demostraron la importancia de asegurar la total deshidratación del sulfato de calcio di-hidratado para favorecer la resistencia al choque térmico de los mismos y evitar defectos en las piezas fundidas por efecto del agrietamiento del revestimiento.

- Finalmente, se concluye que la chamota es un potencial material para su uso como componente refractario del revestimiento en el proceso de microfundición a la cera perdida con pre-engaste de esmeraldas, con aleaciones de bajo punto de fusión para evitar el daño de la gema.

6. RECOMENDACIONES

- Estudiar a profundidad el efecto de las variables velocidad de calentamiento y tiempo de sostenimiento a la máxima temperatura, durante el tratamiento térmico de los revestimientos chamota/yeso, para encontrar las condiciones más adecuadas para garantizar la total deshidratación del yeso, sin exponer a la esmeralda a calentamientos muy prolongados.
- Profundizar el estudio del efecto de la distribución granulométrica del refractario y de la velocidad de agitación de la mezcla, para determinar las condiciones óptimas de dichas variables, ya que en el presente proyecto sólo se estudiaron en dos niveles cada una.
- Realizar las prueba de choque térmico utilizando las matrices como contenedores del revestimiento, con el fin de reproducir los esfuerzos generados durante el tratamiento térmico y de esa manera garantizar resultados que simulen las condiciones normales del proceso.
- Evaluar el efecto que las variables de diseño del prototipo de la joya tienen sobre la afectación de la esmeralda durante el proceso de microfundición.

REFERENCIAS

- [1]. Director, D. H. (s.f.). SRS SETTING THE STANDARD. Recuperado el 23 de Agosto de 2014, de SRS SETTING THE STANDARD: http://www.srs-ltd.co.uk/support/downloads/datasheets/datasheets_problem_causes.pdf

- [2]. Menon, A. (s.f.). SRS SETTING THE STANDARD. Recuperado el 22 de Agosto de 2014, de SRS SETTING THE STANDARD: <http://www.srs-ltd.co.uk/clickset/Further/Further%20Info/Casting%20Gemstones%20in%20Place%20by%20Ajit%20Menon.pdf>

- [3]. CASTAÑO, D. C. (2014). PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REVESTIMIENTO DE YESO CON AGENTES REFRACTARIOS DIFERENTES A LA SÍLICE PARA SU APLICACIÓN AL MÉTODO DE PRE-ENGASTE DE ESMERALDAS. Bucaramanga, Santander, Colombia.

- [4]. Yun Jong-kim, S.-B. K.-H.-D.-C.-A.-N.-B. (2008).Effect of Cristobalite and Quartzon the Properties of Gypsum Bonded Investment ELSEVIER, 1-2.

- [5]. G. M. Ingoa *, G. C. (1998). Caracterizaciones térmicas y microquímicos de revestimientos CaSO4-SiO2 para fundición de aleaciones de joyería. ELSEVIER, 6.

- [6]. S. Jones*, C. Y. (2002).Advances in shell moulding for investment casting. ELSEVIER, 1-2.

- [7]. R.2, C. M. (Abril de 2006). Scielo. Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de Scielo: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092006000100014&script=sci_arttext
- [8]. (ASTM INTERNATIONAL, 2014)
- [9]. SCHUSTER, H., RASELLI, M., Stone-in-Place Casting for High-End Jewelry. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Mayo 2008. pp. 283-294.
- [10]. SCHWARTZ, C. Chemical and physical properties of investment. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. pp. 99-106.
- [11]. SBORNICCHIA, P., Et al. Advances in JewelleryMicrocasting. En: ThermochemicaActa, Vol. 419. 2004. pp. 195-204.
- [12]. KERR. Sybron Dental Specialties. Jewelry / Industrial Products. Disponible en: <<http://www.kerrcasting.com>>
- [13]. LEGISCOMEX. (21 de AGOSTO de 2007). Legiscomex. Recuperado el 26 de JULIO de 2014, de Legiscomex:http://www.legiscomex.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/estudio_joyeriacol.pdf
- [14]. Patrick Sbornicchiaa *, G. M. (2004). Los avances en microfundición joyería. ELSEVIER, 15-16.
- [15]. DIETER, O. Properties of investment En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. pp. 47-62.´

- [16]. Patrick Sbornicchia *, G. M. (2004). Los avances en microfundición joyería. ELSEVIER, 15-16.
- [17]. FUNDICIÓN. Fundición a la cera perdida [En línea] [Consulta: 28 de junio de 2014]. < <http://dc276.4shared.com/doc/UJ7KckoB/preview.html>>
- [18]. Riie. (s.f.). Riie. Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de Riie: <http://riie.com.ar/?a=31599>
- [19]. LONDOÑO MONTES, Carlina. Diseño de un procedimiento de fabricación del revestimiento refractario para adaptar el método de gemas pre-engastadas a las esmeraldas colombianas. Esmeraldas naturales. Bucaramanga, 2014, 49 p. Trabajo de maestría (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas.
- [20]. R.2, C. M. (Abril de 2006). Scielo. Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de Scielo:http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012056092006000100014&script=sci_arttext.
- [21]. FACULTAD INGENIERÍA INDUSTRIAL. Laboratorio de producción. Julio Garavito. Curso de procesos de manufactura [En línea] [Consulta: 28 de junio de 2014]. <http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9627_fundicion.pdf>
- [22]. Aluminio – Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta: 11 de Julio de 2014]. Disponible en: http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html

- [23]. EL YESO (redactado por Ana MaoradVidegain, a 12 de Febrero de 2003). Disponible en línea: <http://www.aragob.es/edycul/patrimo/etno/tecnicas/yesopropiedades.htm>
- [24]. MENON, A. y MARTIN, J. Casting gemstones in place. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1996. pp. 69-81.
- [25]. Riie. (s.f.). Riie. Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de Riie: <http://riie.com.ar/?a=31599>
- [26]. CENDRES + MÉTAUX SA. Técnica de precalentamiento rápido y convencional. Revestimiento sin grafito a base de cuarzo y cristobalita para aleaciones preciosas y no preciosas [En línea] <http://www.cmsa.ch/SiteCollectionDocuments/CM-20_Instr_sp_WEB.pdf>
- [27]. ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- [28]. ASTM C472-99(2014), Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- [29]. ASTM C1171-05(2011), Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Shock and Thermal Cycling on Refractories, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- [30]. Aluminio – Zinc de estado sólido. [Consulta: 11 de Julio de 2014]. Disponible en línea: <http://depts.washington.edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html>

[31]. AMERICAN DENTAL ASSOCIATION. Investment materials [Consulta: 28 de Junio de 2014]. Disponible en línea:<<http://es.slideshare.net/indiadentalacademy/investment-materials>>.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN DENTAL ASSOCIATION. Investment materials [Consulta: 28 de Junio de 2014]. Disponible en línea:<<http://es.slideshare.net/indiadentalacademy/investment-materials>>.

ASTM INTERNATIONAL, 2014

ASTM C1171-05, Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Shock and Thermal Cycling on Refractories, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.

ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.

ASTM C472-99, Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.

CASTAÑO, D. C. Preparación y evaluación de un revestimiento de yeso con agentes refractarios diferentes a la sílice para su aplicación al método de pre-engage de esmeraldas. Bucaramanga, Santander, Colombia. 2014

CENDRES + MÉTAUX SA. Técnica de precalentamiento rápido y convencional. Revestimiento sin grafito a base de cuarzo y cristobalita para aleaciones preciosas y no preciosas [En línea] <http://www.cmsa.ch/SiteCollectionDocuments/CM-20_Instr_sp_WEB.pdf>.

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

Director, D. H. SRS SETTING THE STANDARD. Recuperado el 23 de Agosto de 2014, de SRS SETTING THE STANDARD: http://www.srs-ltd.co.uk/support/downloads/datasheets/datasheets_problem_causes.pdf

EL YESO (redactado por Ana MaoradVidegain, a 12 de Febrero de 2003). Disponible en línea: <http://www.aragob.es/edycul/patrimo/etno/tecnicas/yesopropiedades.htm>

FACULTAD INGENIERÍA INDUSTRIAL. Laboratorio de producción. Julio Garavito. Curso de procesos de manufactura [En línea] [Consulta: 28 de junio de 2014].

<http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9627_fundicion.pdf>

FUNDICIÓN. Fundición a la cera perdida [En línea] [Consulta: 28 de junio de 2014]. < <http://dc276.4shared.com/doc/UJ7KckoB/preview.html>>

G. M. Ingoa *, G. C. Caracterizaciones térmicas y microquímicos de revestimientos CaSO₄-SiO₂ para fundición de aleaciones de joyería. ELSEVIER, 6. 1998

KERR. Sybron Dental Specialties.Jewelry / Industrial Products.Disponible en: <<http://www.kerrcasting.com>>

LEGISCOMEX. Legiscomex. Recuperado el 26 de JULIO de 2014, de Legiscomex:http://www.legiscomex.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/estudio_joyeriacol.pdf

LONDOÑO MONTES, Carlina. Diseño de un procedimiento de fabricación del revestimiento refractario para adaptar el método de gemas pre-engastadas a las esmeraldas colombianas. Esmeraldas naturales. Bucaramanga, 2014, 49 p. Trabajo de maestría (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicoquímicas.

MENON, A. Srs Setting The Standard. Recuperado el 22 de Agosto de 2014, de SRS SETTING THE STANDARD: <http://www.srs-ltd.co.uk/clickset/Further/Further%20Info/Casting%20Gemstones%20in%20Place%20by%20Ajit%20Menon.pdf>

MENON, A. y MARTIN, J. Casting gemstones in place. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1996. pp. 69-81.

PATRICK SBORNICCHIAA *, G. M. Los avances en microfundición joyería. ELSEVIER 2004, 15-16.

R.2, C. M. Scielo. Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de Scielo: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092006000100014&script=sci_arttext

R.2, C. M. Scielo. Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de Scielo:http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012056092006000100014&script=sci_arttext.

RIIE. Riie. Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de Riie: <http://riie.com.ar/?a=31599>

S. Jones*, C. Y. Advances in shell moulding for investment casting. ELSEVIER, 1-2. 2002

SBORNICCHIA, P., Et al. Advances in Jewellery Microcasting. En: Thermochimica Acta, Vol. 419. 2004. pp. 195-204.

SCHUSTER, H., RASELLI, M., Stone-in-Place Casting for High-End Jewelry. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Mayo 2008. pp. 283-294.


SCHWARTZ, C. Chemical and physical properties of investment. En: The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1987. pp. 99-106.

WASHINGTON Aluminio – Zinc de estado sólido [En línea]. [Consulta: 11 de Julio de 2014]. Disponible en: http://depts..edu/mti/1999/labs/metals/al_zn_alloy.html

YUN JONG-KIM, S.-B. K.-H.-D.-C.-A.-N.-B 2008. Effect of Cristobalite and Quartz on the Properties of Gypsum Bonded Investment ELSEVIER, 1-2.

ANEXOS

Anexo A: Ficha técnica de referencia para la chamota, suministrada por el vendedor ERECOS.



ERECOS
empresa de refractarios colombianos s.a.

LADRILLOS REFRACTARIOS SILICO-ALUMINOSOS

U-33

Clasificación NTC - 773, ASTM C-27	Super Refractarios Super Duty
Análisis Químico (%)	
Al ₂ O ₃	42.5
SiO ₂	52.5
Fe ₂ O ₃	1.5
TiO ₂	2.0
CaO	0.3
MgO	0.3
Alcalis	0.5
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	34
Temperatura equivalente (°C) NTC -706, ASTM C-24	1763
Porosidad aparente (%) NTC -674, ASTM C-20	20.0 - 24.0
Densidad aparente (g/cm³) NTC -674, ASTM C-20	2.13 - 2.23
Resistencia a la compresión en frío. Mpa (kg/cm²) NTC -682, ASTM C-133	25.0 - 37.0 (250 - 370)
Módulo de ruptura en frío. Mpa (kg/cm²) NTC -682, ASTM C-133	7.5 -13.5 (75 - 135)
Cambio lineal permanente a 1600 ° C (%) NTC - 688, ASTM C - 113	0.5C - 2.0 C
Deformación bajo carga en caliente a 1450 ° C (%) NTC - 1107, ASTM C - 16	2.0 - 3.5

Los datos anteriores se basan en los resultados promedios de las pruebas de control sobre lotes de producción industrial de ladrillos normales prensados de 9" utilizando los procedimientos descritos en las Normas Técnicas Colombianas y ASTM donde ellas sean aplicables y no deben emplearse para efectos de especificaciones garantizadas. Pueden presentarse variaciones de los resultados dependiendo del tamaño, forma o proceso de fabricación.
C= Contracción
1993-01-17

Todos los derechos reservados © ERECOS

Anexo B: Ficha técnica de referencia para el yeso mexicano.



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

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

FICHA DE DATOS TÉCNICOS

1. Producto Químico e Identificación

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

2. Especificaciones

CONSISTENCIA TIPO (por cada 100 g polvo)	40 cc	
TIEMPO DE FRAGUADO "VICAT"	2.5 – 5 min	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	WET (1 hr)	DRY (48 hrs)
	250	500
EXPANSIÓN LINEAL DE FRAGUADO	0.1 – 0.5 %	

3. Propiedades Físicas y Químicas

Aspecto:	Blanco
Estado Físico:	Sólido (polvo)
pH @ 25°C:	~ 7
Contenido de Humedad:	6.5 ± 0.5 %
Agua de Cristalización:	6.0 ± 1.0 %
Tamaño de partículas:	74 micras
Densidad :	2.3 – 2.6 g/cm ³
Pureza Química:	≥ 98.0 %
Punto de fusión:	No Aplicable

4. Presentación

Cubeta hermética con 23 Kg.

Anexo C: Resultados de composición según Análisis de Fluorescencia de Rayos-X. a) Yeso ortopédico (sulfato de calcio hemihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), b) chamota sílico – aluminosa.

a) Yeso Ortopédico:

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

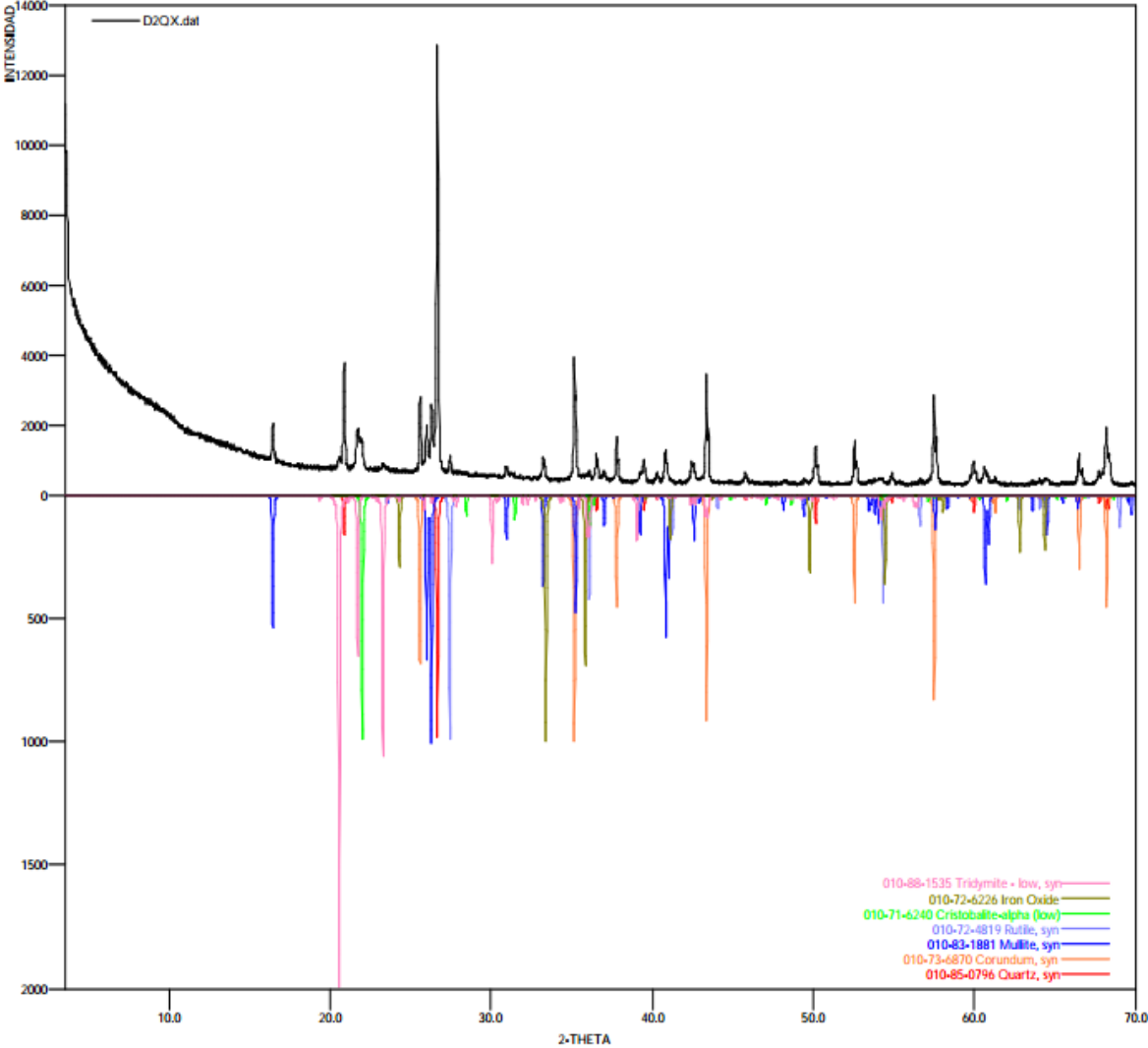
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Sr	38	0,18%
Na	11	0,10%
Mg	12	0,08%
Al	13	0,06%
Fe	26	0,04%
As	33	96 ppm
K	19	50 ppm
Cu	29	17 ppm
<i>Balance (C,H,O)</i>		---

b) Chamota sílico–aluminosa

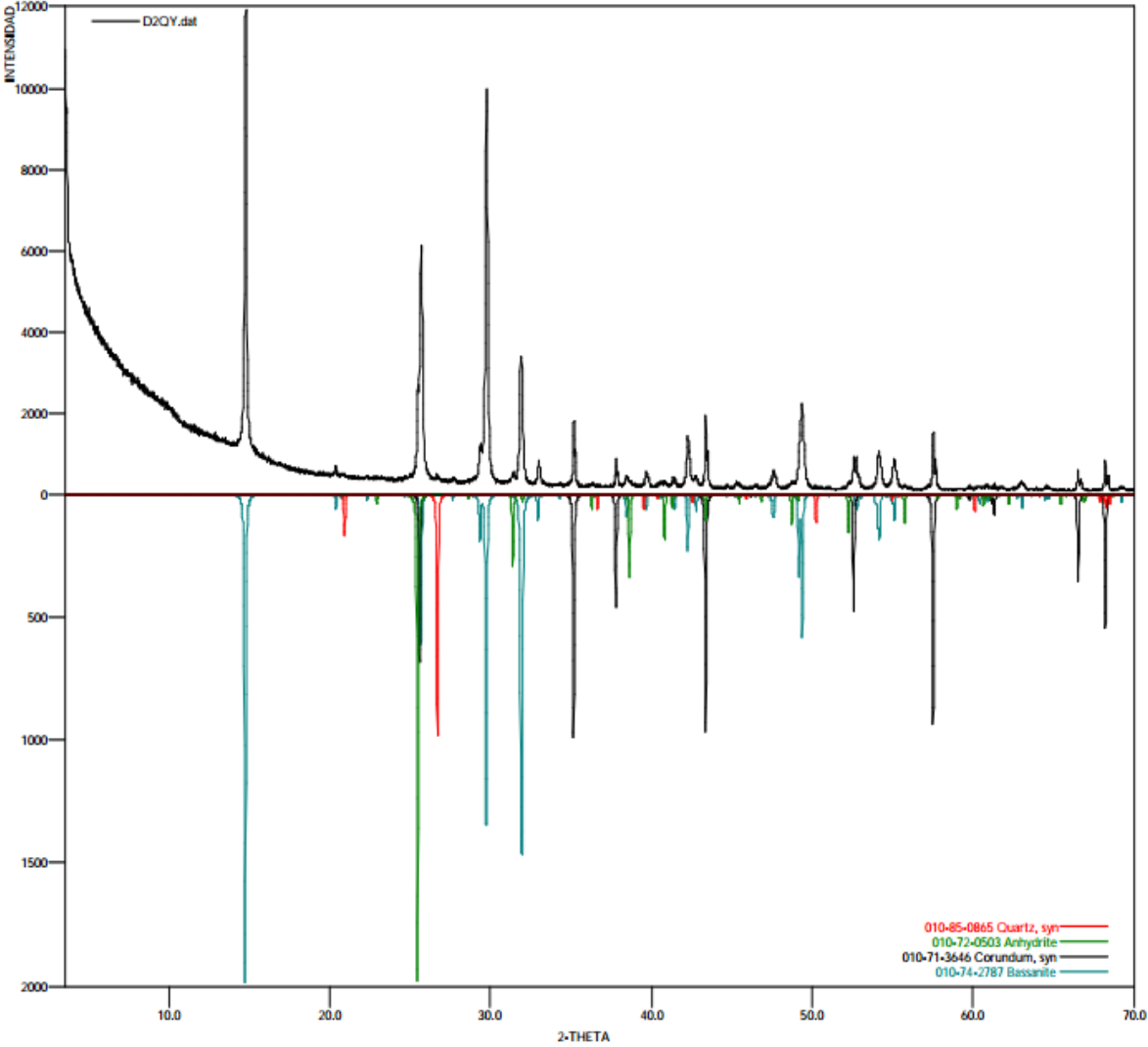
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Si	14	26,93%	SiO_2	57,61%
Al	13	16,81%	Al_2O_3	31,76%
K	19	2,26%	K_2O	2,72%
Fe	26	1,80%	Fe_2O_3	2,57%
Ti	22	1,32%	TiO_2	2,20%
Na	11	0,49%	MgO	0,69%
Ca	20	0,44%	Na_2O	0,65%
Mg	12	0,41%	CaO	0,62%
Ba	56	0,09%	P_2O_5	0,12%
Zr	40	0,07%	BaO	0,10%
P	15	0,05%	ZrO_2	0,09%
Sr	38	0,03%	V_2O_5	0,05%
V	23	0,03%	Cr_2O_3	0,04%
Cr	24	0,02%	SrO	0,03%
Mn	25	0,02%	MnO	0,03%
Cu	29	0,02%	CuO	0,02%
Zn	30	0,02%	ZnO	0,02%
Rb	37	0,02%	SO_3	0,02%
Ni	28	96 mg/Kg	Rb_2O	0,02%
S	16	82 mg/Kg	NiO	0,01%
Pb	82	67 mg/Kg	PbO	72 mg/Kg
Y	39	55 mg/Kg	Y_2O_3	70 mg/Kg
Ga	31	42 mg/Kg	Sc_2O_3	64 mg/Kg
Sc	21	42 mg/Kg	Nb_2O_5	57 mg/Kg
Nb	41	40 mg/Kg	Ga_2O_3	56 mg/Kg
<i>Balance (C,H,O)</i>		---	<i>L.O.I</i>	0,6%

Anexo D: Difractogramas de rayos-x para las materias primas chamota y yeso

a) Chamota



b) Yeso



Anexo E: Equipos utilizados durante la investigación.

EQUIPOS	APLICACIÓN
Molino de bolas. Cap. 25 Tn. Laboratorio de Beneficio de minerales. Planta de aceros.	Reducción de tamaño de partícula
Tamizador mecánico. Lab. Caracterización de materiales. Planta de aceros.	Clasificador mallas #200 y #140
Balanza digital TRAVELER OHAUS. Laboratorio de Micro fundición.	Pesaje de material
Batidora Industrial de pedestal Mixmaster. OSTER. Lab.de Micro fundición. Planta de aceros.	Mezclado
EquipoVicat. HUBBOLDT MFT. CO. Pertenece a Lab. Caracterización de materiales. Escuela de Ingeniería Civil.	Medición tiempo de fraguado
Máquina de vacío. LAMICOL	Vacío de probetas
Mufla programable. VULCAN 3-550. Laboratorio Micro fundición. Planta de Aceros	Tratamiento Térmico
Máquina de pulir MECATECH 334. Laboratorio Micro fundición. Planta de Aceros.	Preparación superficial de las muestras de cada revestimiento.
Bañoultrasónico ULTRASONIC LC 30 H	Limpieza de muestras de cada revestimiento.
Permeámetro eléctrico de lectura directa. DIETERT DETROIT. Ref. 338	Medida de la permeabilidad.
Máquina universal de ensayos AFS. DIETERT Co. SERIE 33624	Medida de la resistencia a la compresión en seco.
Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650 del Lab. de Microscopia en la Sede de Guatiguará	Caracterización física de las probetas.
Microscopio digital marca HIROX KH-7700	Caracterización física de de la fundición colada

Anexo F: Procedimiento De Fabricación De Probetas Para Ensayos.

Nota: Se Realizaron 6 probetas por cada composición, utilizando 750 g de mezcla húmeda equivalentes a tres probetas (solo tres moldes de vacío).

1. Pesar la cantidad de chamota, yeso y agua destilada necesaria para obtener 750 g de mezcla húmeda en las proporciones deseadas (65/35, 70/30, 75/25, 80/20 y 85/15).
2. Mezclar manualmente el polvo refractario hasta conseguir homogeneidad del mismo
3. Preparar la mezcla húmeda yeso-chamota y agua con una velocidad de agitación de 647 RPM durante 30 segundos.
4. Verter en un recipiente plástico y realizar un vacío durante 45 seg.
5. Verter en 3 moldes de acero inoxidable y realizar un vacío por 1 min.
6. Dejar correr el tiempo de fraguado quitar exceso y nivelar
7. Dejar secar una hora mas
8. Desmoldar
9. Meter al horno
 - 9.1 Calentar 3°C por cada min hasta completar 150 °c
 - 9.2 Sostener a 150°C por 3 horas
 - 9.3 Subir 3°C por cada min hasta completar 350 °c
 - 9.4 Sostener a 350°C por 4 horas
 - 9.5 Apagar horno y dejar enfriar.

Anexo G: Mezclas descartadas durante el tiempo de fraguado.

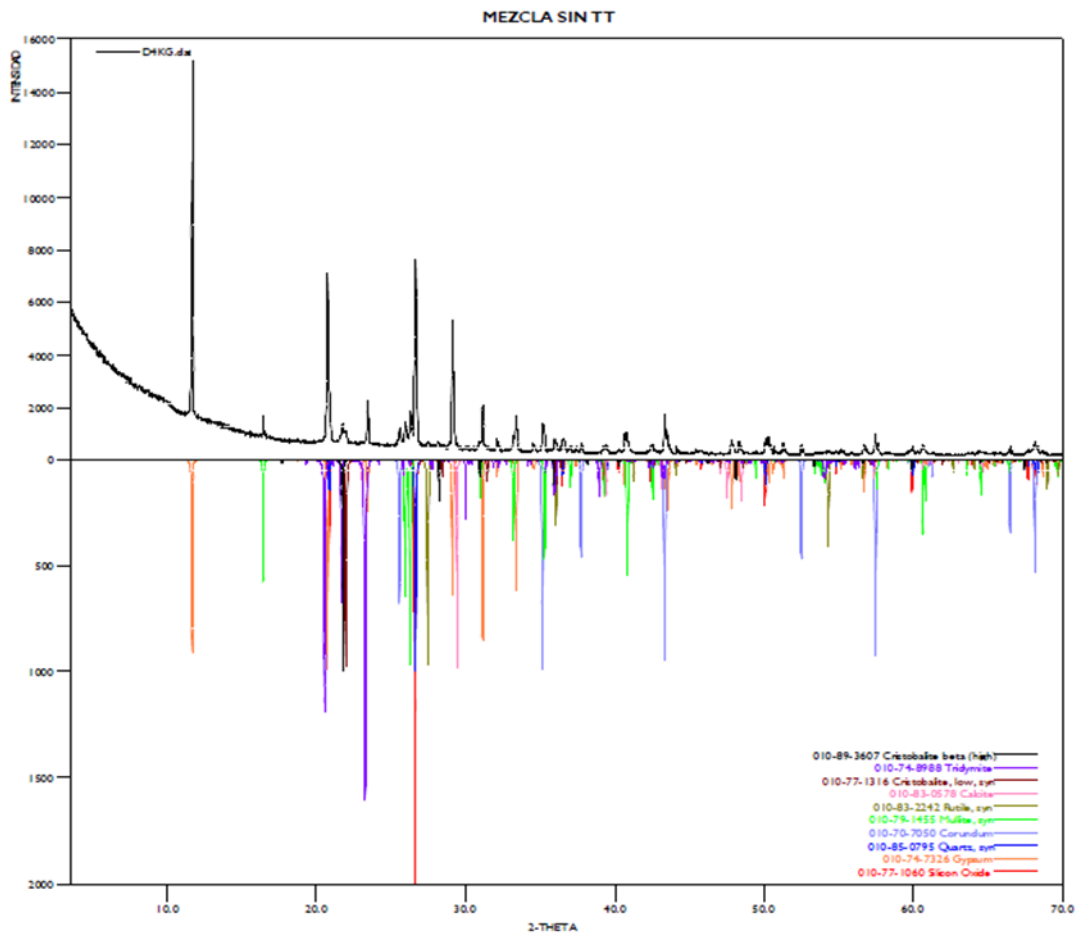
Pasante malla 200:			
Proporción (Chamota/Yeso)	Proporción agua/polvo (mL:g)	Inicio del fraguado (min)	Fin del fraguado (min)
65/35	100:100	37	>300
	90:100	35	> 300
70/30	100:100	35	>300
	80:100	27	>300
75/25	100:100	30	>300
	80:100	25	>300
	60:100	22	>300
80/20	60:100	20	>300
85/15	55:100	25	>300
	52:100	17,15	>300

Pasante malla 140:			
Proporción (Chamota/Yeso)	Proporción agua/polvo (mL:g)	inicio del fraguado (min)	fin del fraguado (min)
65/35	70:100	30	>300
75/25	60:100	20	>300
	57:100	16	>300
	55:100	15	>300
80/20	57:100	20	>300
	55:100	15	>300
	52:100	15	>300
85/15	45:100	15	>300

Anexo H: Resultados de Difracción de rayos X para la mezcla refractaria chamota-yeso antes y después del tratamiento térmico.

I. MEZCLA SIN TT (D4KG)

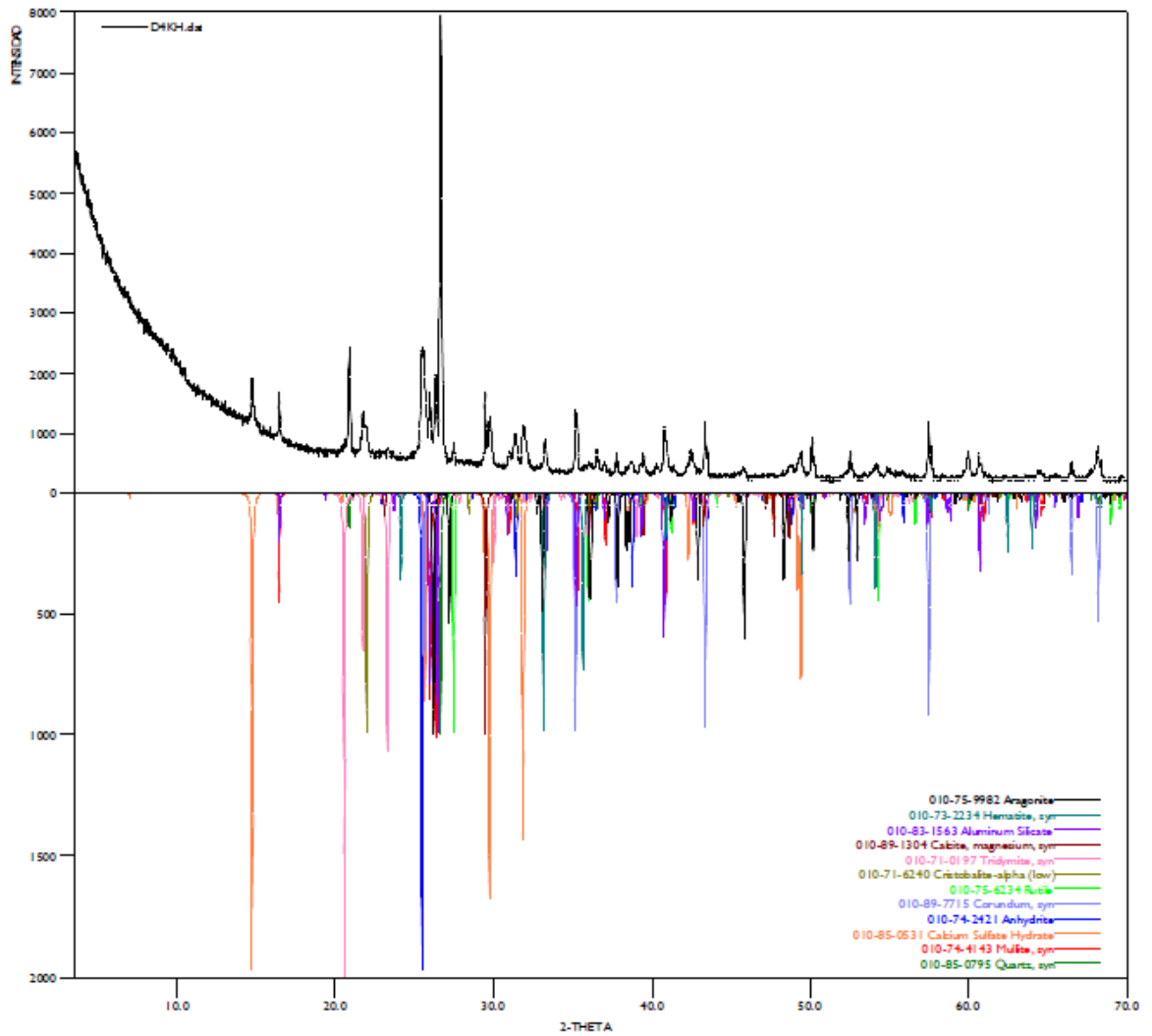
	FASE	NOMBRE
Cristalinos	Si O ₂	Cuarzo
	Al ₂ O ₃	Corindón
	Ca (S O ₄) (H ₂ O) ₂	Yeso
	Ti O ₂	Rutilo
	Al _{4.59} Si _{11.41} O _{9.7}	Mullita
	Si O ₂	Cristobalita Baja
	Si O ₂	Cristobalita Alta
	Ca (C O ₃)	Calcita
	Si O ₂	Cuarzo
	Si O ₂	Tridimita



2. MEZCLA CON TT (D4KH)

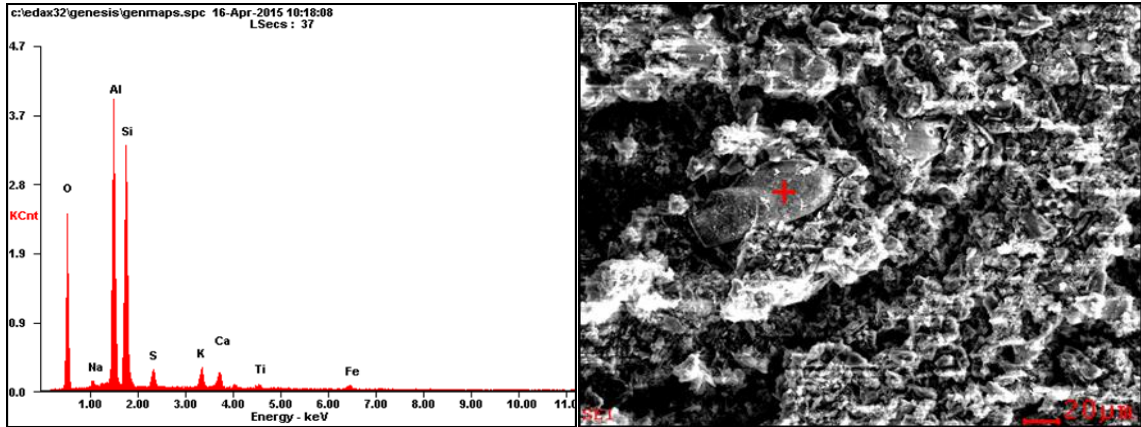
	FASE	NOMBRE
Cristalinos	Si O ₂	Cuarzo
	Al _{4.44} Si _{1.56} O _{9.78}	Mullita
	Ca S O ₄ (H ₂ O) _{0.67}	Bassanita
	Ca (S O ₄)	Anhidrita
	Al ₂ O ₃	Corindón
	Ti O ₂	Rutilo
	Si O ₂	Cristobalita Baja
	Si O ₂	Tridimita
	Ca (C O ₃)	Aragonita
	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (C O ₃)	Calcita Magnesiana
	Al ₂ Si O ₅	Sillimanita
	Fe ₂ O ₃	Hematita

MEZCLA CON TT

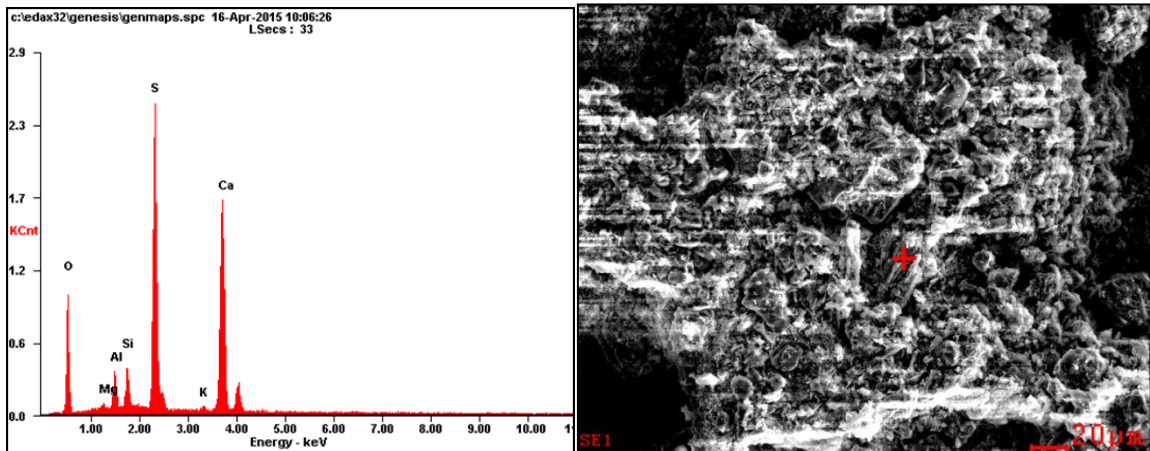


Anexo I: Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) para las muestras M1, M2 y M3.

a) M1



b) M2



c) M3

