

**CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS A  
GEMAS DE ESMERALDAS COLOMBIANAS PARA SU PROTECCIÓN EN EL  
PROCESO DE MOLDEO EN CERA PERDIDA. MÉTODO PRE-ENGASTE**

**KATRINA MICHELL RIVERA ARIZA**

**JUAN SEBASTIAN VILLAMIZAR DÍAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

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

**BUCARAMANGA**

**2014**

**CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS A  
GEMAS DE ESMERALDAS COLOMBIANAS PARA SU PROTECCIÓN EN EL  
PROCESO DE MOLDEO EN CERA PERDIDA. MÉTODO PRE-ENGASTE**

**KATRINA MICHELL RIVERA ARIZA**

**JUAN SEBASTIAN VILLAMIZAR DÍAZ**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR:**

**M. Sc. ARNALDO ALONSO BAQUERO**

**CODIRECTORA:**

**PhD. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS**

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

**BUCARAMANGA**

**2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su principal agradecimiento al profesor y director del proyecto ING. ARNALDO ALONSO BAQUERO por su colaboración, acompañamiento y ayuda incondicional, además de brindar sus conocimientos y experiencias durante la realización de la investigación.

A COLCIENCIAS por la financiación del proyecto a través del macro proyecto “Innovación del método de gemas pre-engastadas en el proceso de micro-fundición, para su implementación en la joyería con esmeraldas colombianas”, identificado en la UIS con el código 9418 y por Colciencias con el código 1102-521-28875.

También se presentan agradecimientos a las empresas ORO&ARTE JOYEROS y a COLOMBIAN E.U, por su apoyo y aportes frente a inquietudes presentadas referentes al método pre-engaste durante el transcurso de la investigación.

## CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN.....	17
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2. OBJETIVOS.....	19
1.2.1. Objetivo General.....	19
1.2.2. Objetivos Específicos.....	19
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1. FUNDAMENTACIÓN.....	23
2.1.1. Esmeraldas colombianas.....	23
2.1.2. Recubrimientos refractarios.....	24
2.1.3. Caracterización reológica.....	24
2.1.4. Zirconita.....	25
2.1.5. Chamota.....	25
2.1.6. Corindal.....	26
2.1.7. Sistema CIELAB.....	26
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	28
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.1.1. FASE DE ESTUDIO.....	29
3.2. SELECCIÓN DE CONDICIONES.....	29
3.2.1. Selección de materias primas, ensayos y equipos a utilizar.....	29
3.2.2. Selección de tratamientos térmicos.....	32
3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	32
3.3.1. Diseño, elaboración y caracterización de recubrimientos cerámicos.....	32
3.3.2. Caracterización de las esmeraldas.....	34
3.3.3. Selección del tratamiento térmico y aplicación a las gemas recubiertas.....	34

3.3.4. Realización del proceso de moldeo en cera perdida, método pre-engaste con las esmeraldas colombianas recubiertas .....	34
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	35
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS .....	35
4.1.1. Caracterización óptica de los recubrimientos.....	35
4.1.2. Medida de espesor.....	45
4.1.3. Prueba de adherencia .....	45
4.1.4. Caracterización reológica.....	47
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS GEMAS Y APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS A LAS PIEDRAS RECUBIERTAS.....	50
4.2.1. Pruebas térmicas con aguamarinas .....	50
4.2.2. Pruebas térmicas con esmeraldas .....	54
4.3. ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS .....	55
4.3.1. Prototipo con aguamarinas.....	55
4.3.2. Prototipo con esmeraldas colombianas.....	57
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS.....	61
BIBLIOGRAFIA.....	63

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características y propiedades de las esmeraldas.....	23
Tabla 2. Propiedades térmicas de la zirconita.....	25
Tabla 3. Parámetro de Resistencia al choque térmico $R_o$ de la alúmina.....	25
Tabla 4. Valores típicos de expansión térmica, calor específico y conductividad térmica de la alúmina según su grado.....	26
Tabla 5. Composición de las suspensiones hechas a base de corindal – chamota – zirconita con alcohol como disolvente.....	33
Tabla 6. Composición de las suspensiones hechas a base de corindal – chamota con agua como disolvente.....	33
Tabla 7. Composición de las suspensiones hechas a base de corindal – chamota – zirconita, agua o alcohol como disolvente y con presencia de aditivo.....	33
Tabla 8. Espesor de los recubrimientos seleccionados.....	45
Tabla 9. Clasificación de los resultados de la prueba de adherencia.....	46
Tabla 10. Densidad de las suspensiones seleccionadas.....	47
Tabla 11. Caracterización de las aguamarinas antes - después de recubrir y de aplicar el choque térmico a 450°C por cinco minutos. Fotografías a 0.67X	51
Tabla 12. Caracterización de las aguamarinas antes y después de recubrir con zirconita-alcohol 60/40 y de aplicar el choque térmico a 450°C por cinco minutos.....	53
Tabla 13. Caracterización de la aguamarina antes y después de recubrir con zirconita-alcohol 60/40 y de someterla al tratamiento térmico que se le aplica al molde. Fotografías a 0.67X.....	53
Tabla 14. Caracterización de las esmeraldas colombianas antes y después de recubrir con zirconita-alcohol 60/40 y de ser sometidas a un tratamiento	54

térmico. Fotografías a 0.67X.....

Tabla 15. Caracterización de las aguamarinas antes y después de la colada.

Fotografías a 0.67X..... 56

Tabla 16. Caracterización de las esmeraldas colombianas antes y después

de la colada. Fotografías a 0.67X..... 58

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Tipos de engastado, (a) Engastado en garra; (b) Engastado en carril; (c) Engastado calibrado.....	21
Figura 2. (a) Diagrama de cromaticidad de $a^*$ y $b^*$ ; (b) Cromaticidad frente a la luminosidad $L^*$ .....	27
Figura 3. Representación gráfica de la metodología del proyecto.....	28
Figura 4. Zircones recubiertos con corindal y agua a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X.....	35
Figura 5. Zircones recubiertos con corindal y alcohol a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X.....	36
Figura 6. Granates recubiertos con chamota y alcohol a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X y 2.5X.....	37
Figura 7. Granates recubiertos con chamota y agua a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X.....	38
Figura 8. Granates recubiertos con zirconita y alcohol a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X y 3X.....	39
Figura 9. Zircones recubiertos con zirconita, chamota, corindal y ácido bórico (aditivo) como carga sólida y alcohol o agua como carga líquida, misma relación sól/líq. Fotografías a 0.67X.....	41
Figura 10. Granates recubiertos con zirconita, chamota, corindal y bentonita sódica o silicato de sodio (aditivo) como carga sólida y alcohol o agua como carga líquida, misma relación sól/líq. Fotografías a 0.67X.....	42
Figura 11. Aguamarina después de ser sometida durante cinco minutos a a) 300°C, b) 400°C y c) 600°C.....	50
Figura 12. Figura 12. Representación gráfica del choque térmico aplicado a las gemas.....	51
Figura 13. Prototipo a) con aguamarinas recubiertas pre-engastadas, b) después de la colada.....	56

Figura 14. Prototipo a) con esmeraldas colombianas recubiertas pre-  
engastadas, b) después de la colada, c) pieza final..... 57

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Tratamiento térmico aplicado al molde.....	32
Gráfica 2. Viscosidad de las suspensiones seleccionadas en función de la velocidad de corte.....	48
Gráfica 3. Esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte para la suspensión zirconita-alcohol 60/40.....	49

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS A GEMAS DE ESMERALDAS COLOMBIANAS PARA SU PROTECCIÓN EN EL PROCESO DE MOLDEO EN CERA PERDIDA. MÉTODO PRE-ENGASTE.<sup>1</sup>

### **AUTORES:**

VILLAMIZAR Díaz Juan Sebastián

RIVERA Ariza Katrina Michell<sup>2</sup>

### **PALABRAS CLAVES:**

Recubrimientos cerámicos, pre-engaste, zirconita, chamota, corindal, esmeraldas colombianas.

### **DESCRIPCIÓN:**

Las esmeraldas colombianas son deseadas y consideradas como las más bellas del mundo debido a características particulares como: la transparencia, tonalidad verde intenso, tamaño, brillo y pureza, dadas por las condiciones únicas del subsuelo. Desafortunadamente, dentro de estas se encuentran la presencia interna de inclusiones, en estado líquido, sólido y/o gaseoso, siendo la principal dificultad para someter las gemas al método pre-engaste, debido a que durante el tratamiento térmico que se le realiza al molde y el choque térmico producido durante la colada, se encuentra expuesta a sufrir los cambios bruscos de temperatura, induciendo a la salida de las inclusiones de la piedra lo que causa su fractura además de la pérdida de sus propiedades que le confieren su gran valor y calidad mencionadas anteriormente.

Esta investigación busca diseñar, elaborar y caracterizar recubrimientos utilizando arenas con propiedades refractarias (zirconita, chamota y corindal) como carga sólida y alcohol y agua como carga líquida, además de algunos aditivos o agregados como el ácido bórico o la bentonita sódica con el fin de mejorar las propiedades aglomerantes de la suspensión y poder obtener un óptimo recubrimiento.

Debido a las características termo físicas de estos recubrimientos, permitirán generar un barrera térmica, la cual protegerá a las esmeraldas colombianas de los cambios bruscos de temperatura generados durante el tratamiento térmico del yeso y en el proceso de la colada, usando el método pre-engaste en micro fundición para la joyería, conservando las características y propiedades que hacen a estas piedras preciosas tan llamativas en el mercado nacional e internacional.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales  
Director, Ing. ALONSO Baquero Arnaldo. Codirectora, PhD. CÓRDOBA Tuta Elcy.

## ABSTRACT

### TITLE:

CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF CERAMIC COATINGS ON COLOMBIAN EMERALD GEMS FOR THEIR PROTECTION IN LOST WAX CASTING PROCESS. PRE-SETTING METHOD.<sup>1</sup>

### AUTHORS:

VILLAMIZAR Díaz Juan Sebastian  
RIVERA Ariza Katrina Michell<sup>2</sup>

### KEY WORDS:

Ceramic Coatings, pre-setting, zirconita, chamotte, corindal, Colombian emeralds.

### ABSTRACT:

Colombian emeralds are desired and considered as the most beautiful in the world due to particular characteristics such as transparency, intense green hue, size, brilliance and purity, given by the unique subsoil conditions. Unfortunately, within these, there are the internal presence of inclusions in liquid, solid and/or gaseous state, be the main difficult to submit the gems to pre-setting method, in which during the thermal treatment that is applied to the mold and thermal shock producing during casting, the emerald is at risk to suffer sudden changes in temperature, leading to the departure of the inclusions of the stone causing the fracture as well as having lost their properties that give great value and quality mentioned previously.

This research aims to design, develop and characterize coatings using sands with refractory properties (zirconita, chamotte and corindal) as solid filler and alcohol and water as liquid part, plus some additives or added as boric acid or sodica bentonite in order to improve the agglomerate properties of the suspension and to obtain an optimal coating.

Due to the thermo-physical properties oh these coatings, allow generating a thermal barrier which will protect the Colombian emeralds from sudden temperature changes generated during heat treatment of the mold and in the casting process, using the pre-setting method in micro casting in jewelry, preserving the characteristics and properties, that make these gemstones so striking in the national and international market.

---

<sup>1</sup> Thesis Grade

<sup>2</sup> Faculty of Physics and Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science Director, Ing. ALONSO Baquero Arnaldo. Co-director PhD. CORDOBA Tuta Elcy.

## INTRODUCCIÓN

En la industria de la joyería colombiana, al proceso de moldeo a la cera perdida se le ha venido implementando el método pre-engaste, para elaborar piezas que contengan dentro de su diseño gemas caracterizadas por su gran valor en el mercado nacional, pero desafortunadamente aún no ha podido ser aplicado a gemas de origen propio, como lo son las esmeraldas.

Los principales problemas para producir joyas que contengan estas piedras por el método pre-engaste, es la presencia de inclusiones en estado líquido, sólido y/o gaseoso, las cuales al someter la gema a este proceso tienden a salir por las temperaturas utilizadas ocasionando su fractura; la otra dificultad es la baja resistencia al choque térmico y a las altas temperaturas generando durante la colada la pérdida de las propiedades y características particulares que hacen atractivas a las esmeraldas colombianas.

Gracias al conocimiento científico y sin dejar atrás las necesidades tecnológicas de la industria se estudió una posible solución del problema anteriormente citado, partiendo del hecho de proporcionar una barrera térmica entre el metal de la colada y la gema. Para lograr este objetivo y verificar dicha hipótesis se fabricaron recubrimientos cerámicos a partir de zirconita, chamota y corindal como carga sólida, alcohol o agua como carga líquida y algunos aditivos con el fin de mejorar las propiedades aglomerantes o que se comporten como agentes tenso activos en la suspensión.

En la presente investigación se detallan los criterios de la selección del recubrimiento cerámico que ofrece la mejor barrera térmica, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en diferentes pruebas de caracterización física y los resultados obtenidos en la elaboración de un anillo por el proceso de moldeo a la cera perdida, método pre-engaste.

# 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las esmeraldas colombianas son excepcionales, deseadas y consideradas como las más bellas del mundo, debido a características particulares como: resistencia, transparencia, tonalidad verde intenso profunda, tamaño, brillo y pureza, dadas por las condiciones únicas del subsuelo. Desafortunadamente dentro estas características se encuentran la presencia interna de inclusiones, en estado líquido, sólido y/o gaseoso, siendo la principal dificultad para someter las piedras al método de pre-engaste donde la gema se encuentra expuesta a sufrir cambios bruscos de temperatura y las inclusiones tienden a salir de ella, lo que causa su fisuración además de haber perdido sus características que le confieren su gran valor y calidad.

Al igual que cualquier área de trabajo, la joyería ha venido actualizándose en su forma operacional con el fin de aumentar la relación costo-beneficio en las empresas dedicadas a esta actividad. Uno de los nuevos métodos utilizados para la fabricación de joyas es el método pre-engaste; presentando ventajas como mayor producción por tiempo de ejecución del proceso, disminución de la mano de obra y la elaboración de piezas más sanas que las obtenidas por cualquier otro método utilizado en la joyería. Este es un tema de inversión en prospección para lograr la sostenibilidad de la joyería en la que se utilicen esmeraldas colombianas en el país. Por estas razones se hace necesario lograr adaptarlas al proceso de moldeo de cera perdida, método pre-engaste, logrando proteger adecuadamente a la piedra preciosa del tratamiento térmico del molde y del choque térmico producido durante la colada con la aplicación de recubrimientos cerámicos, caracterizados por soportar altas temperaturas.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Conservar y proteger mediante la aplicación de recubrimientos cerámicos las características físicas y químicas de las esmeraldas colombianas durante el proceso de micro fundición a la cera perdida, método pre-engaste.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Diseñar y elaborar recubrimientos cerámicos con características termo físicas que permitan proteger las gemas en el método pre-engaste.
- ✓ Caracterizar los recubrimientos cerámicos que posean altas propiedades de refractariedad.
- ✓ Evaluar el comportamiento práctico generado por la aplicación de los recubrimientos cerámicos a las gemas de esmeralda colombianas después de ser sometidos a los tratamientos térmicos.
- ✓ Colar prototipos usando el proceso de cera perdida, método pre-engaste con gemas de esmeraldas recubiertas.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

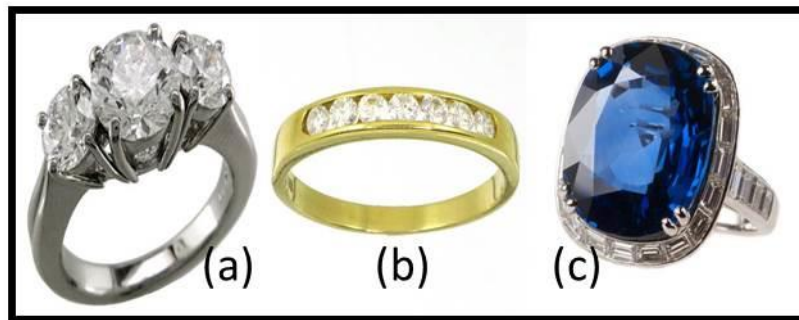
La referencia más antigua conocida por escrito de un proceso de fundición a la cera perdida proviene de la ciudad babilónica de Sippar y está fechada en el año 1789 A.C., durante el reinado del gran rey Hammerabi [1], pero fue hasta en 1907 que se realizaron las primeras investigaciones de aplicar este método a la industria de la joyería, manteniéndose como el principal hasta la fecha.

En este proceso lo que se hace de manera general es elaborar un modelo de cera, réplica del anillo o pieza que se quiera realizar y se deposita en un molde de yeso el cual es sometido a un tratamiento térmico para lograr características deseadas y poder hacer la colada del metal. Después de este procedimiento, sigue el engaste de la gema o engastado, definido por el gremio de joyeros, plateros y relojeros de Madrid, como el arte de fijar las piedras preciosas en el metal de las joyas buscando que muestren su máxima belleza [2]. Lo que sucede es que el joyero o engastador con ayuda de herramientas y de manera manual, fija las gemas a la pieza, necesitando precisión, experiencia y un vasto conocimiento.

Existen varios tipos de engastado, que dependen en su mayoría de las, propiedades, características y de la gema, en especial de la forma que presenta. Entre estos engastados se encuentra el denominado de garra, en el cual la piedra es sostenida por tres, cuatro o seis uñas de similar apariencia y tamaño, en forma plana, triangular o redonda. El método consiste en ubicar la gema dentro de estas garras y por medio de una fuerza ejercida por el engastador se cierran las uñas y se ajusta la gema. En este caso es de vital importancia la experiencia, porque si se realiza una fuerza más alta, la compresión en la piedra es muy grande y podría llegar a la fractura. Con este tipo se realza el brillo de las piedras al permitir el paso de luz a través de ellas. (Ver figura 1(a)).

Otro tipo es el engastado en carril, las piedras van una al lado de la otra al interior de un carril formando filas con medidas exactas para el ajuste de ellas. El engastador cierra los bordes, generando por medio de este tipo de engaste, una mayor protección de las gemas ya que sus aristas no están expuestas a esfuerzos externos, (ver figura 1 (b)). Y el siguiente engaste, se trata del engastado calibrado, en cual las gemas son talladas exclusivamente para su joya, buscando que no se presenten espacios entre las dos. Por medio de herramientas se cierra el metal circundante y se ajusta la gema; este tipo es el más utilizado para piedras de tamaños grandes. (Ver figura 1(c)).

**Figura 1.** Tipos de engastado, (a) Engastado en garra; (b) Engastado en carril; (c) Engastado calibrado. [2]



Estos engastados son los más comunes que se presentan en la industria de la joyería, sus acabados son muy buenos y como se mencionó dependiendo de la piedra y la experiencia del engastador se logran obras maestra. Pero el engaste tiene como desventaja sus mismas ventajas, es decir, la experiencia y el tipo de piedra hacen que el proceso sea único para cada una de ellas, algún error generado durante la realización, podría llevar a la fracturas de las piedras, implicando costos elevados en la producción, además, el tiempo en este tipo de procesos es un factor muy importante, el engaste de las piezas puede llegar a ser muy lento si no hay experiencia, demorando la fila de producción.

Aunque este procedimiento se realiza de manera eficaz según la experiencia del engastador, el proceso de fundición a la cera perdida sufrió una modificación muy importante y ha sido un gran avance porque se pudo aplicar en el método de pre-engaste, que consiste en engastar la piedra preciosa en el modelo de cera y no luego de finalizar el proceso. Este método se ha implementado en los últimos años, siendo utilizado en el ajuste industrial a gran escala en piedras sintéticas, principalmente óxido de circonio cúbico, donde el costo de ajuste manual no era justificable. Más tarde su uso se extendió a las piedras naturales como el diamante, rubí y zafiro. [3]

Si se refiere al diamante, esta piedra preciosa se adaptó fácilmente al proceso por sus altas características de resistencia al choque térmico. Luego de ver los grandes resultados obtenidos aplicando el proceso de fundición a la cera perdida junto al método pre-engaste en la fabricación de joyas de diamantes; se han venido desarrollando estudios para implementar el mismo modo de operación a gemas que en el mercado representen igual interés para los compradores. El gran problema está en que muchas de las gemas de interés como el caso particular de las esmeraldas, no presentan las mismas características y propiedades que el diamante, y por lo tanto para aplicar este método se requiere que la piedra preciosa posea gran resistencia al choque térmico.

La alta resistencia al choque térmico es una propiedad que carecen las esmeraldas naturales colombianas, pero es una característica propia de los materiales cerámicos debido a propiedades intrínsecas de los mismos. Este proyecto busca mediante la aplicación de recubrimientos refractarios, realizar el proceso con gemas de esmeraldas colombianas, a partir de la investigación realizada por Acevedo y Vélez [4] en su trabajo de pregrado.

## 2.1. FUNDAMENTACIÓN

### 2.1.1. Esmeraldas colombianas

La esmeralda es una variedad del mineral de Berilio, los geólogos identifican a la esmeralda a los minerales de Berilio que presentan un color verde vivo debido a la presencia de cromo y vanadio, con fórmula química:  $Al_2Be_3(Si_6O_{18}) + (Cr, V)$ .

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

Las principales características de las esmeraldas, la composición básica, inclusiones o propiedades como la fragilidad, densidad, dureza, fractura, raya, color y brillo pueden variar según el tipo de yacimiento donde se encuentren las esmeraldas, pero en rasgos generales en la tabla 6 se reflejan las características y propiedades de las esmeraldas.

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

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA EN LA ESMERALDA
Fragilidad	Alta
Densidad	2.63-2.8 g/cm <sup>3</sup>
Dureza	7.5-8 (mohs)
Fractura	Concoidea
Raya	Blanca
Color	Verde
Brillo	Vítreo

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

### 2.1.2. Recubrimientos refractarios

La utilización de recubrimientos refractarios para proteger la esmeralda, va ligada a la resistencia de los materiales refractarios a los cambios bruscos de temperatura. El calor que atraviesa un material cuando se somete a altas temperaturas, puede originar un calentamiento súbito que dilata el material, lo que produce tensiones que lo deterioran; este fenómeno se conoce por choque térmico [5].

### 2.1.3. Caracterización reológica

La reología describe la deformación de un cuerpo bajo la influencia de tensiones. La naturaleza de la deformación depende de las condiciones materiales del cuerpo [6]. Para la caracterización reológica de los recubrimientos se determinan propiedades como la viscosidad, densidad y adherencia.

- **Viscosidad** Es una propiedad de los líquidos y gases newtonianos que caracteriza su resistencia de fluir. La viscosidad dinámica es la relación entre la tensión de cizalladura de un fluido y el gradiente de velocidad originado perpendicular al plano de cizalladura, esta es la propiedad que define el comportamiento reológico, pero esta depende de condiciones y variables como la temperatura, la presión y la vibración.
- **Densidad** Se define como densidad a la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia, lo que quiere decir que entre más masa tenga un cuerpo en un mismo volumen, mayor será su densidad. Esta propiedad depende de la presión y la temperatura.
- **Adherencia** Es la capacidad que posee el recubrimiento de agarrarse a la superficie a la que es aplicado. Si un recubrimiento presenta buenas características de adherencia es un indicador de que cumplirá a cabalidad la función para la cual fue aplicado, en este caso, la protección de la gema.

#### 2.1.4. Zirconita

Químicamente, la zirconita es un silicato de circonio ( $ZrSiO_4$ ), esta es una arena especial que presenta densidades más altas, mayor resistencia a la flexión y la tenacidad a la fractura que las demás arenas especiales refractarias [7]. Entre otra de sus propiedades principales, la arena de Circonio presenta excelentes propiedades refractarias, baja dilatación térmica y elevada conductividad térmica.

**Tabla 2.** Propiedades térmicas de la zirconita.

<b>Coefficiente de expansión térmica <math>\times 10^{-4}/^{\circ}C</math></b>	10
<b>Conductividad térmica [W/mK]</b>	2-2.5
<b>Resistencia al choque térmico [DT<math>^{\circ}C</math>]</b>	250-350
<b>Capacidad calorífica [J/KgK]</b>	400

**Fuente:** <http://www.dynacer.com/wp-content/themes/devvine/PDF/Material%20Properties%20datasheet.pdf>

#### 2.1.5. Chamota

Es producida por calcinación de arcilla a elevadas temperaturas aproximadamente  $1100^{\circ}C$  y conminución al tamaño de grano requerido. La composición química sobre una base de peso seco es: 40%  $Al_2O_3$  mínimo, 30%  $SiO_2$ , 4%  $Fe_2O_3$  máximo, 2%  $CaO$  y  $MgO$  máximo y pérdidas por ignición del 0,5% máximo. El punto de fusión de estos refractarios esta alrededor de  $1780^{\circ}C$ , tienen capacidad de absorber agua del 7% como máximo y su expansión térmica es muy baja [8]. El principal componente de la chamota es la alúmina, confiriéndole la mayor de sus propiedades refractarias, pero varían de acuerdo al porcentaje que se tenga de  $Al_2O_3$ , como se observa en las siguientes tablas.

**Tabla 3.** Parámetro de Resistencia al choque térmico  $R_0$  de la alúmina.

<b>GRADO</b>	<b><math>R_0 \times 10^{-4}</math> [m<sup>2</sup>K/s]</b>
A1-A5 (>99%)	10 $\pm$ 4
A6-A7 (>94.5%)	7.5 $\pm$ 3
A8-A9 (>80%)	6.5 $\pm$ 3

**Fuente:** Auerkari P. Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. VTT Manufacturing Technology

**Tabla 4.** Valores típicos de expansión térmica, calor específico y conductividad térmica de la alúmina según su grado.

GRADO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %min	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA 10 <sup>-6</sup> [1/K]	Calor específico [J/gK]	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/mk]
A1	99.6	5.4	0.775	30-40
A2	99.8	5.4	0.775	30-41
A3	99.5	5.4	0.775	30-42
A4	99.6	5.4	0.775	25-35
A5	99	5.4	0.78	30-40
A6	96.5-99	5.1-5.4	0.78	25-30
A7	94.5- 96.5	5.1-5.5	0.760-0.780	20-30
A8	86-94.5	4.9-5.5	0.755-0.785	15-20
A9	80-86	4.5-5.5	0.750-0.785	15-20

**Fuente:** Auerkari P. *Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics.*  
VTT Manufacturing Technology

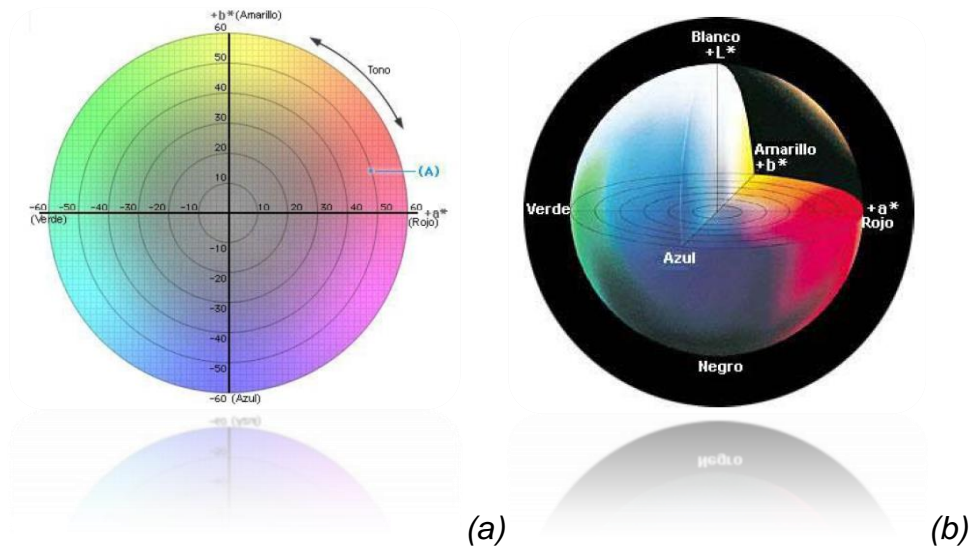
### 2.1.6. Corindal

Es un material refractario, con alto contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, superior al 90% de su composición, con presencia en pequeñas cantidades de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaO y MgO. Sus propiedades refractarias son conferidas por la alúmina, siendo el componente de mayor presencia en su composición y al igual que la chamota, estas propiedades varían de acuerdo a la cantidad que se tenga de esta. (Ver tablas 3 y 4).

### 2.1.7. Sistema CIELAB

El espacio de color L\*a\*b\* también llamado *CIELAB*, es actualmente uno de los espacios más populares para medir el color de los objetos y se utiliza ampliamente en casi todos los campos. En este espacio L\*, indica luminosidad, y a\* y b\* son las coordenadas de cromaticidad [9]. Los valores +a\* y +b\* positivos indican direcciones del color rojo y amarillo, y -a\* y -b\*, indican direcciones del color verde y azul respectivamente, (ver figura 2).

**Figura 2.** (a) Diagrama de cromaticidad de  $a^*$  y  $b^*$ ; (b) Cromaticidad frente a la luminosidad  $L^*$ . [9]

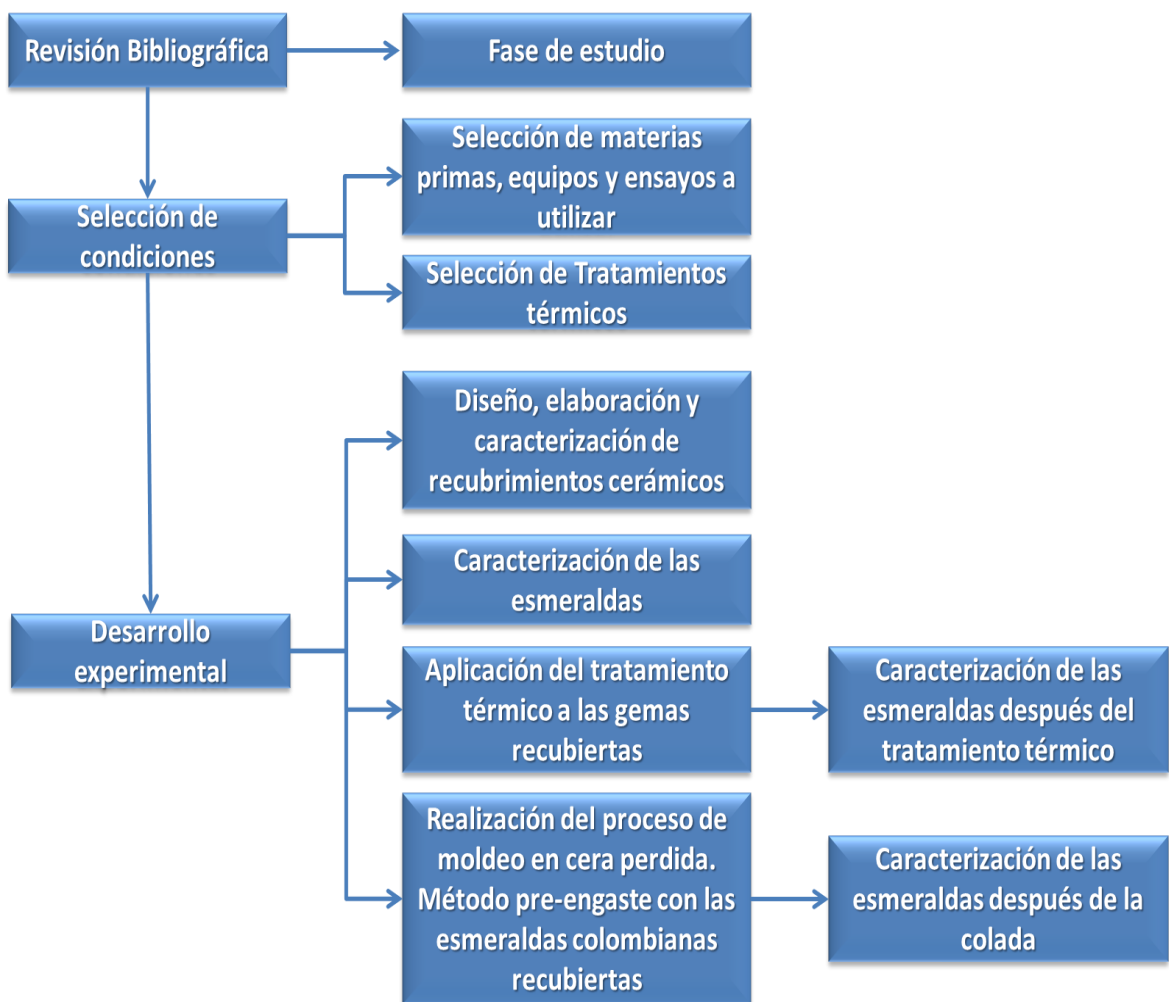


Con ayuda del espectrofotómetro Coloreye® XTH, serán medidos los valores de color y luminosidad mencionados anteriormente de las esmeraldas colombianas, se compararán antes y después de recubiertas y de sufrir algún tratamiento térmico, con el fin de determinar si se logró la protección y no hubo una variación en estas características físicas de las gemas que las hacen tan atractivas en el mercado.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La figura 3 corresponde al diagrama de flujo donde se indica el procedimiento que se llevó a cabo durante la investigación.

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



### **3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta etapa del proceso se realizó la búsqueda de información que proporcionara un conocimiento de todos los componentes que se necesitaban para la elaboración del proyecto, ya sean materiales, equipos, ensayos, entre otros.

#### **3.1.1. FASE DE ESTUDIO**

Comprenden los respectivos análisis realizados a la de libros, tesis de pregrado, posgrados, simposios, artículos o revistas con el fin de escoger correctamente los componentes y realizar de manera satisfactoria los pasos siguientes en la metodología.

### **3.2. SELECCIÓN DE CONDICIONES**

#### **3.2.1. Selección de materias primas, ensayos y equipos a utilizar**

**Gemas:** En cuanto a las piedras a utilizar, se decidió que se debían realizar pruebas con piedras de características similares a las esmeraldas colombianas y evaluar el comportamiento que presentaban los recubrimientos. Después se realizaron los ensayos con esmeraldas naturales evitando un gasto excesivo en compra de gemas, las piedras seleccionadas fueron:

- ✓ Zircón
- ✓ Granate
- ✓ Agua Marina
- ✓ Esmeraldas naturales colombianas

Ensayos con la aguamarina se desprenden por el hecho de tener la misma fórmula química  $Al_2Be_3(Si_6O_{18}) + (Fe)$  de la esmeralda, la única diferencia se debe a su color. Una pequeña cantidad de cromo le da a la esmeralda su intenso

color verde, mientras que el hierro se encarga de darle sus ligeros matices azulados a la aguamarina. [10]

**Untos:** Los materiales para realizar las cargas de los recubrimientos se escogieron por sus buenas propiedades de refractariedad, el buen servicio que demuestran cuando se trabajan en medios de altas temperaturas y por supuesto la conservación de su estructura y propiedades en estos mismos medios; las cargas sólidas fueron:

- ✓ **Chamota** ladrillo refractario con un porcentaje de alúmina del 85%, sílice 7.9%, 7.0% de óxidos y 0.1% alcalis; estos ladrillos se llevaron a un proceso de conminución con el fin de obtener una granulometría fina y por separación a través de un juego de tamices se obtuvo retenido malla 200, siendo el tamaño con el cual se trabajaron las cargas solidas de las suspensiones para formar los recubrimientos de esta investigación.
- ✓ **Zirconita** en forma de pasta con porcentaje de alcohol del 16%. Como no se conocía la granulometría del mineral, se dejó secar y se llevó a un proceso de separación por tamices determinándose que el mineral viene en presentación de finos y los mayores porcentajes fueron 12%, 11.53% y 46.35% para -200, -270 y +270 respectivamente (donde – es retenido y + es pasante de la malla especificada).
- ✓ **Corindal** con una porcentaje de alúmina del 92.7%, sílice 1.5%, 5.5% de óxidos y 0.3% alcalis. También se llevó a proceso de conminución y separación con el fin de obtener retenido malla 200 para realizar las suspensiones.

El aditivo, siendo aquel que modifica y en la mayoría de casos mejora las propiedades del recubrimiento. Se seleccionó debido a sus propiedades aglutinantes el ácido bórico y el silicato de sodio. También se utilizó la bentonita sódica para que actuara como agente tenso activo y mantuviera las partículas de

la carga sólida en suspensión evitando la pronta decantación de estas en el medio.

Por último, la carga líquida o los disolventes se refieren a productos de naturaleza orgánica cuya misión es dar a la pintura una viscosidad óptima según el método de aplicación que deba utilizarse [11], además de su fácil adquisición y economía. Se seleccionó agua y alcohol.

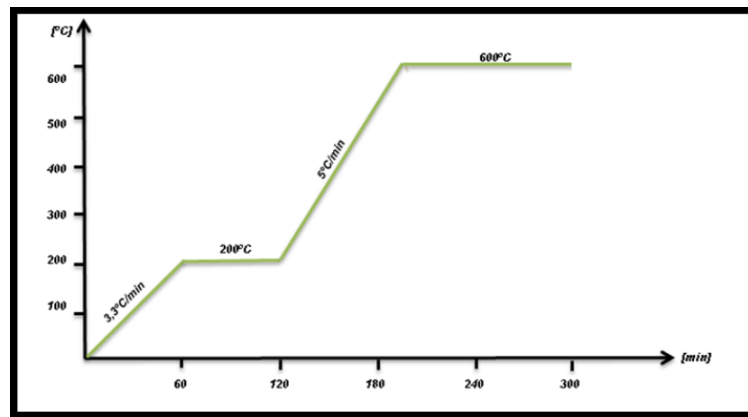
## **Equipos**

- ✓ **Caracterización de los recubrimientos** evaluándose la reología de ellos mediante el uso de una balanza de lodos para conocer las densidades siguiendo la norma API 13B1, procedimiento recomendado práctica estándar para fluidos de perforación de pozos de prueba de campo a base de agua [12] y el viscosímetro OFITE 900 para determinar la viscosidad. La prueba de adherencia se evaluó por medio de la prueba de la cinta, procedimiento establecido en la norma ASTM D3359-09 E2 Métodos de prueba estándar para la medición de adherencia mediante la prueba de la cinta [13]. El espesor se midió con ayuda de un calibrador digital UPM. También se realizó una caracterización óptica de los recubrimientos para observar su homogeneidad y morfología por medio del estereoscopio OLYMPUS SZ61.
  
- ✓ **Caracterización de las gemas** se realizó por medio de dos formas, la primera utilizando el espectrofotómetro Coloreye® XTH determinando las coordenadas CIELAB y la segunda, por caracterización óptica usando el estereoscopio OLYMPUS SZ61. Esto con el fin de evaluar las características de las piedras antes y después de ser sometidas a algún tipo de proceso, teniendo un estado de referencia y un estado final.

### 3.2.2. Selección de tratamientos térmicos

Se escogió el presentado en un artículo del simposio de Santa Fe en tecnología de fabricación de joyas [14]. La máxima temperatura alcanzada en este tratamiento térmico es de 600°C (ver gráfica 1).

**Gráfica 1.** Tratamiento térmico aplicado al molde. [14]



Antes de realizar la colada y con el fin de simular el choque térmico generado en esta, se decidió aplicar ciclos de calentamiento y enfriamiento durante cinco minutos cada uno, a la máxima temperatura en que se generan daños en las gemas.

### 3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 3.3.1. Diseño, elaboración y caracterización de recubrimientos cerámicos

Para el diseño y elaboración de los recubrimientos, se realizaron diversas suspensiones variando los porcentajes de las cargas sólidas y líquidas evaluando el mejor comportamiento presentado para generar un óptimo recubrimiento.

**Tabla 5.** Composición de las suspensiones hechas a base de corindal – chamota – zirconita con alcohol como disolvente.

Corindal – Alcohol	Chamota - Alcohol	Zirconita - Alcohol
Sólidos [%]		Líquidos [%]
30		70
40		60
50		50
60		40
70		30
80		20

**Tabla 6.** Composición de las suspensiones hechas a base de corindal – chamota con agua como disolvente.

Corindal – Agua	Chamota - Agua
Sólidos [%]	Líquidos [%]
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20

**Tabla 7.** Composición de las suspensiones hechas a base de corindal – chamota – zirconita, agua o alcohol como disolvente y con presencia de aditivo.

Suspensión	Composición		
	Carga sólida		Carga Líquida
	Carga	Aditivo	
Zirconita – Alcohol – Ácido Bórico	63%	2%	35%
Chamota – Alcohol – Ácido Bórico			
Chamota – Agua – Ácido Bórico			
Corindal – Alcohol – Ácido Bórico			
Corindal – Agua – Ácido Bórico			
Zirconita – Alcohol – Bentonita sódica			
Zirconita – Alcohol – Silicato de sodio			
Chamota – Alcohol – Bentonita sódica			
Chamota – Alcohol – Silicato de sodio			
Chamota – Agua – Bentonita sódica			
Chamota – Agua – Silicato de sodio			
Corindal – Alcohol – Bentonita sódica			
Corindal – Alcohol – Silicato de sodio			

La caracterización se realizó con el fin de conocer la densidad y viscosidad de las suspensiones; adherencia, espesor y evaluación óptica de los recubrimientos determinando sus características físicas; los ensayos y equipos para realizar esta caracterización ya fueron mencionados en el punto 3.3.1.

### **3.3.2. Caracterización de las esmeraldas**

Con el propósito de tener un estado de referencia y obtener las características iniciales que presentan las piedras antes de sufrir algún procedimiento que las pueda afectar, se analizaron por medio de las coordenadas CIELAB obtenidas a través del espectrofotómetro y por análisis óptico, ver 3.3.1.

### **3.3.3. Selección del tratamiento térmico y aplicación a las gemas recubiertas**

Después de la caracterización del estado inicial de las gemas, se recubrieron y sometieron a los tratamientos térmicos que se seleccionaron de acuerdo al objetivo que se quiso cumplir, ya sea para la protección de la gema a las temperaturas que sufre durante el tratamiento térmico del molde o para la protección durante el proceso de colada, sobre todo cuando se llega a la máxima temperatura dada en el momento en que el metal líquido hace contacto con la piedra en el método de pre-engaste, generando un cambio brusco de temperatura o choque térmico. Ver 3.3.2. Después de aplicar los tratamientos térmicos, se caracterizaron de nuevo las gemas, para evaluar sus características y compararlas con su estado inicial.

### **3.3.4. Realización del proceso de moldeo en cera perdida, método pre-engaste con las esmeraldas colombianas recubiertas**

Se evaluó el comportamiento práctico del recubrimiento realizando una colada con prototipos en un montaje a pequeña escala donde se pre-engastaron esmeraldas colombianas recubiertas en moldes de cera, llevándose a cabo el proceso de micro fundición, seguido de la caracterización de la esmeralda para corroborar que se pudo proteger durante la aplicación de este procedimiento.

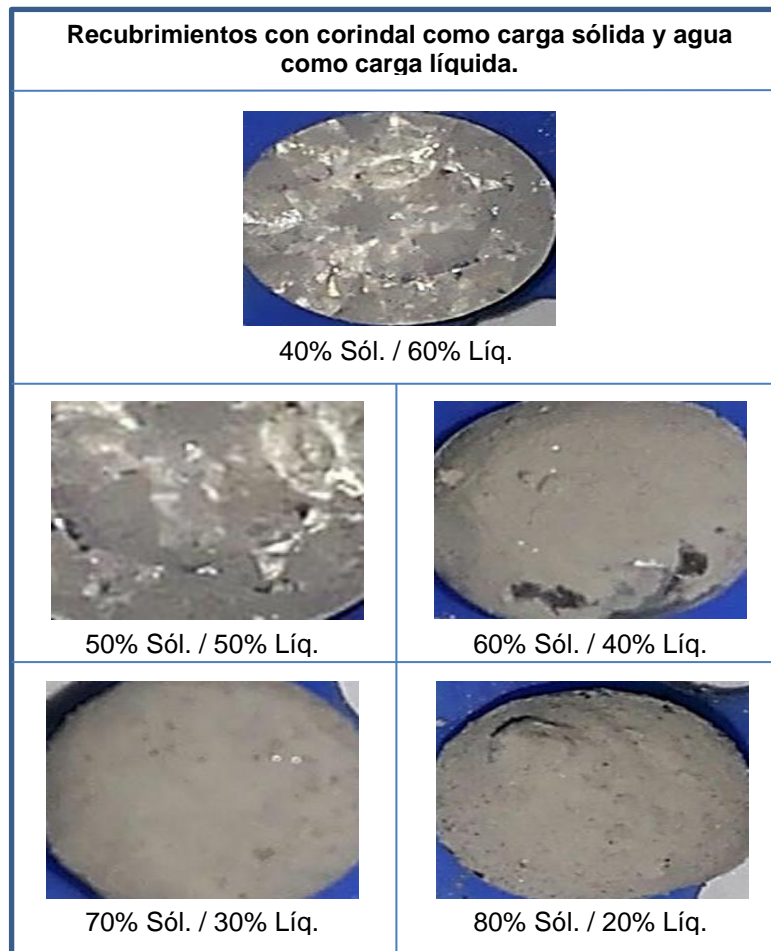
## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

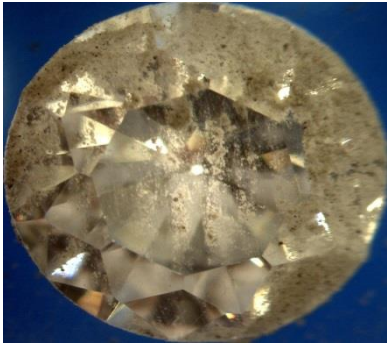



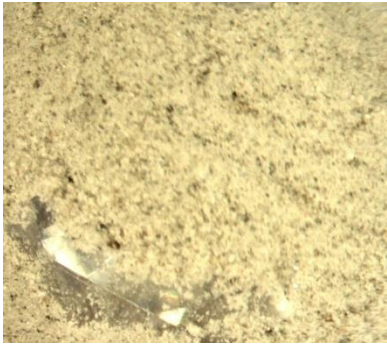
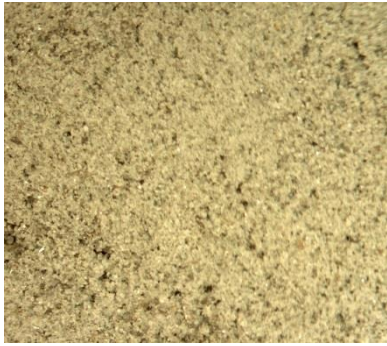
#### 4.1.1. Caracterización óptica de los recubrimientos

Como prueba inicial y con el fin de empezar a seleccionar los recubrimientos que mejor morfología presentan para generar la barrera y proteger las gemas, se recubrieron zircones y granates obteniéndose los siguientes resultados.

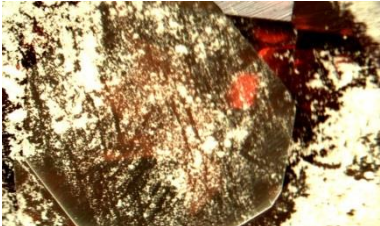







*Figura 4. Zircones recubiertos con corindal y agua a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X.*



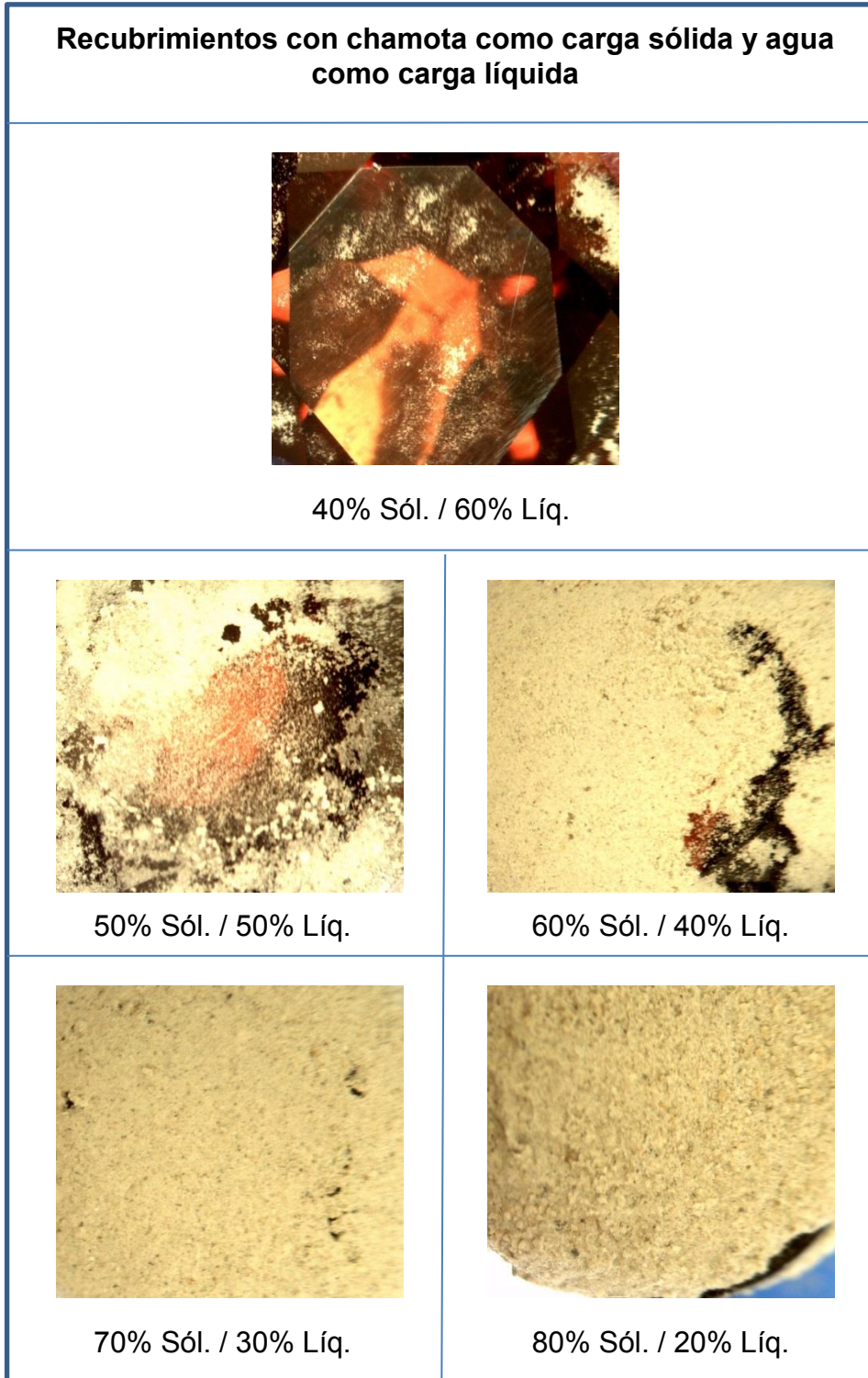
**Figura 5.** Zirrones recubiertos con corindal y alcohol a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X.

<b>Recubrimientos con corindal como carga sólida y alcohol como carga líquida</b>	
	
<p>30% Sól. / 70% Líq.</p>	<p>40% Sól. / 60% Líq.</p>
	
<p>50% Sól. / 50% Líq.</p>	<p>60% Sól. / 40% Líq.</p>
	
<p>70% Sól. / 30% Líq.</p>	<p>80% Sól. / 20% Líq.</p>

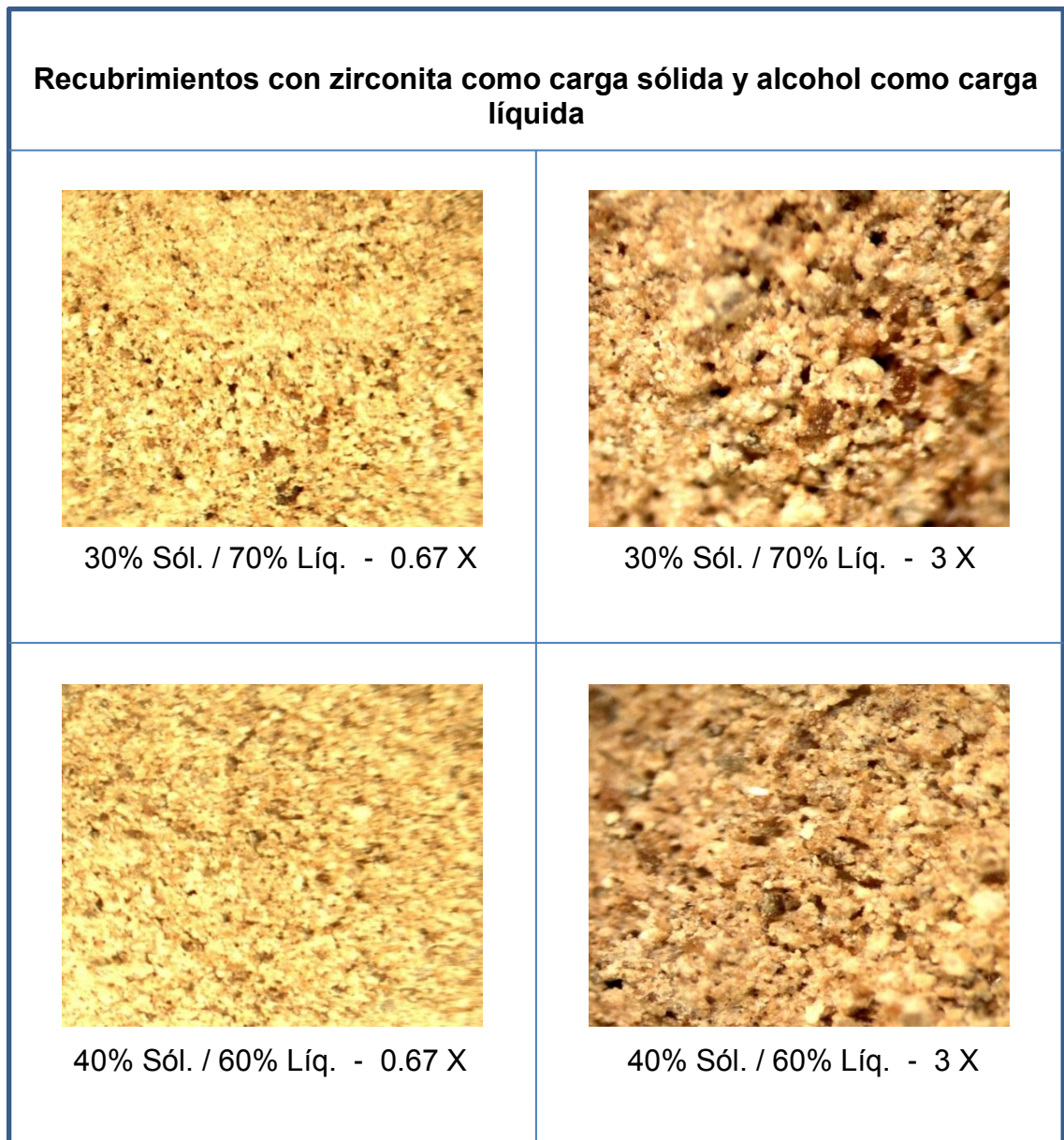
**Figura 6.** Granates recubiertos con chamota y alcohol a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X y 2.5X.



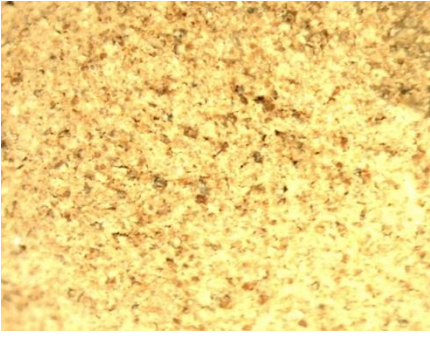

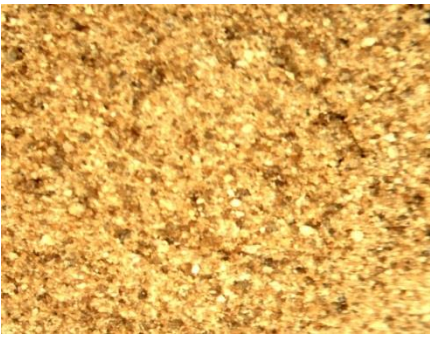

Recubrimientos con chamota como carga sólida y alcohol como carga líquida	
 <p>30% Sól. / 70% Líq. - 0.67 X</p>	 <p>40% Sól. / 60% Líq. - 0.67 X</p>
 <p>50% Sól. / 50% Líq. - 0.67 X</p>	 <p>60% Sól. / 40% Líq. - 0.67 X</p>
 <p>70% Sól. / 30% Líq. - 0.67 X</p>	 <p>70% Sól. / 30% Líq. - 2.5 X</p>
 <p>80% Sól. / 20% Líq. - 0.67 X</p>	 <p>80% Sól. / 20% Líq. - 2.5 X</p>

**Figura 7.** Granates recubiertos con chamota y agua a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X.



**Figura 8.** Granates recubiertos con zirconita y alcohol a diferente relación sólido/líquido. Fotografías a 0.67X y 3X.




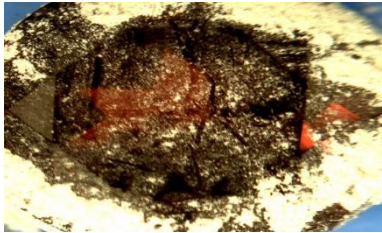
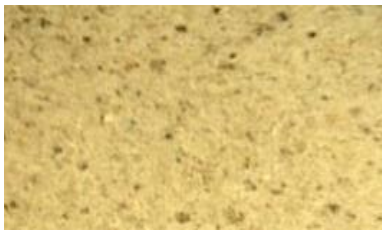


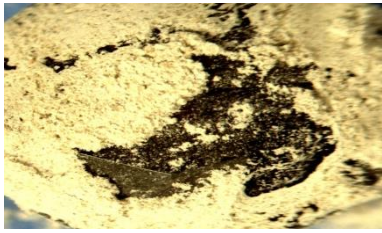
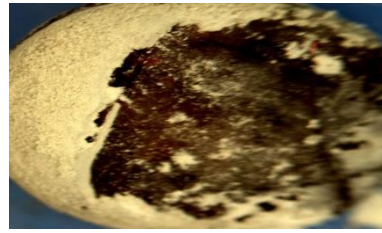
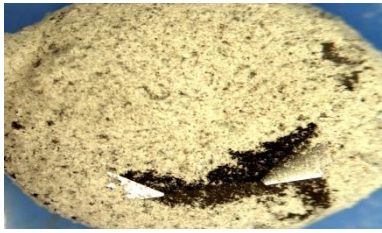
 <p>50% Sól. / 50% Liq. - 0.67 X</p>	 <p>50% Sól. / 50% Liq. - 3 X</p>
 <p>60% Sól. / 40% Liq. - 0.67 X</p>	 <p>60% Sól. / 40% Liq. - 3 X</p>
 <p>70% Sól. / 30% Liq. - 0.67 X</p>	 <p>70% Sól. / 30% Liq. - 3 X</p>

No aparece la fotografía para la relación 80/20 porque la suspensión no presenta la consistencia suficiente para formar un recubrimiento sobre la gema.

**Figura 9.** Zircones recubiertos con zirconita, chamota, corindal y ácido bórico (aditivo) como carga sólida y alcohol o agua como carga líquida, misma relación sól/líq. Fotografías a 0.67X.



**Figura 10.** Granates recubiertos con zirconita, chamota, corindal y bentonita sódica o silicato de sodio (aditivo) como carga sólida y alcohol o agua como carga líquida, misma relación sól/líq. Fotografías a 0.67X.

Recubrimientos con bentonita sódica o silicato de sodio como aditivo, todos se prepararon con 63% Carga/2%Aditivo/35%Disolvente.	
 <p>Zirconita-Alcohol-Bentonita Sódica</p>	 <p>Chamota-Alcohol-Bentonita Sódica</p>
 <p>Chamota-Agua-Bentonita Sódica</p>	 <p>Corindal-Alcohol-Bentonita Sódica</p>
 <p>Zirconita-Alcohol-Silicato de Sodio</p>	 <p>Chamota-Alcohol-Silicato de Sodio</p>
 <p>Chamota-Agua-Silicato de Sodio</p>	 <p>Corindal-Alcohol-Silicato de Sodio</p>

Los recubrimientos hechos a base de corindal como carga sólida y agua o alcohol como carga líquida, presentaron un mal comportamiento de protección al no cubrir por completo las gemas, dejándolas expuestas ya sea por una mala relación solido/líquido o porque aunque esta sea buena, el recubrimiento presentó porosidades después de secarse, creando canales por los cuales al momento de someter estas piezas a algún tratamiento térmico, entraría el calor y afectaría a la piedra. Durante el desarrollo de estos recubrimientos, se observó que el corindal tenía baja mojabilidad, evitando que se mantuviera la suspensión en un estado homogéneo y aunque se realizaba una agitación previa antes de recubrir, esta fue la principal causa en que al momento de secarse no presentara una buena morfología, se separaran las cargas y provocara los grandes espacios de exposición de la gema o las porosidades en algunos casos. De acuerdo a esto se descartan los recubrimientos presentados en las figuras 4 y 5.

Para el caso de la chamota como carga sólida y alcohol como carga líquida (ver figura 6), las suspensiones con bajo porcentaje de sólidos (30, 40 y 50%) no generaron un buen recubrimiento dejando secciones de las piedras expuestas. En el recubrimiento realizado a partir de la suspensión 70/30 se evidenciaron una serie de grietas las cuales no son recomendadas porque por ellas se puede introducir el calor y afectar la piedra. Por estas razones estos cuatro recubrimientos fueron descartados. Los que se realizaron con 60% y 80% de sólidos, mostraron una buena morfología y homogeneidad recubriendo totalmente la pieza, incluso sin presencia de porosidades.

Se descartaron las suspensiones realizadas con chamota y agua porque presentaron baja homogeneidad y mala morfología al momento de formar el recubrimiento (ver figura 7).

En la figura 8 se muestran las fotografías de los recubrimientos hechos a partir de las suspensiones con zirconita y alcohol, a 0.67X se observa una buena homogeneidad y morfología, pero a llevarlos a más aumentos (3X), se evidencia la

presencia numerosa de poros, incluso una grieta en el recubrimiento 70/30. Con la excepción del recubrimiento relación 60/40 donde se mantiene la morfología y la homogeneidad.

La adición de ácido bórico y silicato de sodio debido a sus propiedades aglutinantes en las suspensiones con relación sólido-líquido 65/35 (promedio de las que mejores resultados mostraron en las pruebas anteriores), no favoreció la formación de los recubrimientos. Cuando se usó como disolvente el agua, se presentaron espacios que quedaron sin recubrir ocasionando una gran exposición de la piedra sin embargo, cuando la carga líquida fue el alcohol, se logró recubrir la gema en su totalidad, pero provocó la aparición de porosidades (ver figuras 9 y 10) y como se mencionó anteriormente no es recomendable su presencia en los recubrimientos. Por estos motivos se descartaron las suspensiones con la presencia de estos dos aditivos.

Finalmente los recubrimientos fabricados con suspensiones a los que se adicionaron bentonita sódica mostraron una superficie homogénea (Ver figura 10)

#### 4.1.2. Medida de espesor

A los recubrimientos seleccionados anteriormente por su morfología y homogeneidad, se les midió el espesor haciendo uso de un calibrador digital UPM como medio de caracterización física. Tabla 8.

**Tabla 8.** Espesor de los recubrimientos seleccionados.

Recubrimiento	Espesor [mm]
Chamota-Alcohol 60/40	0.09
Chamota-Alcohol 80/20	0.17
Zirconita-Alcohol 60/40	0.08
Zirconita-Bentonita sódica-Alcohol 65(63carga, 2aditivo)/35	0.21
Chamota-Bentonita sódica-Agua 65(63carga, 2aditivo)/35	0.26

De la tabla 8 se puede decir que el espesor del recubrimiento depende de la relación sólido-líquido, a mayor cantidad de sólidos, mayor será el espesor. También se observa una marcada diferencia entre los recubrimientos que tienen aditivo y los que no, debido a que la bentonita sódica al actuar como agente tenso activo mantiene las partículas sólidas en suspensión generándole menor fluidez, esto a su vez, conlleva a que las capas de la suspensión para formar el recubrimiento sean más gruesas y por tanto el espesor sea mayor.

El recubrimiento con menor espesor fue el realizado a partir de zirconita y alcohol relación 60/40.

#### 4.1.3. Prueba de adherencia

Basada en la norma ASTM D3359-09 E2 Métodos de prueba estándar para la medición de adherencia mediante la prueba de la cinta, donde a través de un método comparativo con imágenes patrón presentadas en la norma, se establece un grado de adherencia para los recubrimientos seleccionados.

**Tabla 9.** Clasificación de los resultados de la prueba de adherencia.

Fotografía de la prueba	Clasificación del grado de adherencia según la norma ASTM D3359
 <p>Chamota-Alcohol 60/40</p>	<p>Clasificación: 1B Porcentaje de área removida: 35-65%</p>
 <p>Chamota-Alcohol 80/20</p>	<p>Clasificación: 2B Porcentaje de área removida: 15-35%</p>
 <p>Zirconita-Alcohol 60/40</p>	<p>Clasificación: 3B Porcentaje de área removida: 5-15%</p>
 <p>Zirconita, Bentonita sódica- Alcohol 65/35</p>	<p>Clasificación: 1B Porcentaje de área removida: 35-65%</p>
 <p>Chamota, Bentonita sódica- Agua 65/35</p>	<p>Clasificación: 2B Porcentaje de área removida: 15-35%</p>

Después de realizada la comparación, el recubrimiento con menor porcentaje de área removida fue el elaborado a partir de la suspensión zirconita-alcohol con relación 60/40, indicando que es aquel con mayor adherencia además de ser el que mejores resultados ha generado en las pruebas de caracterización realizadas.

La adherencia está ligada a la tensión superficial del disolvente utilizado; el agua a 25°C tiene una tensión superficial de 72.75 mN\*m<sup>-1</sup> y la del alcohol es 22.8 mN\*m<sup>-1</sup> [15], como el alcohol tiene un menor valor, va a permitir que la relación intermolecular entre la superficie de la gema con las moléculas líquidas y sólidas de la suspensión sea mejor; en caso de un alto valor de tensión superficial se genera una capa entre la superficie y la suspensión evitando que esta la moje y se adhiera a ella.

Se descartan los recubrimientos hechos a partir de chamota-alcohol 60/40 y zirconita + bentonita sódica-alcohol 65/35 por tener una baja adherencia y mayor porcentaje de área removida.

#### 4.1.4. Caracterización reológica

- **Densidad**

**Tabla 10.** Densidad de las suspensiones seleccionadas.

Suspensión	Densidad [lb/gal]
Chamota-Alcohol 80/20	15.051
Zirconita-Alcohol 60/40	12.814
Chamota-Bentonita sódica-Agua 65(63carga, 2aditivo)/35	14.307

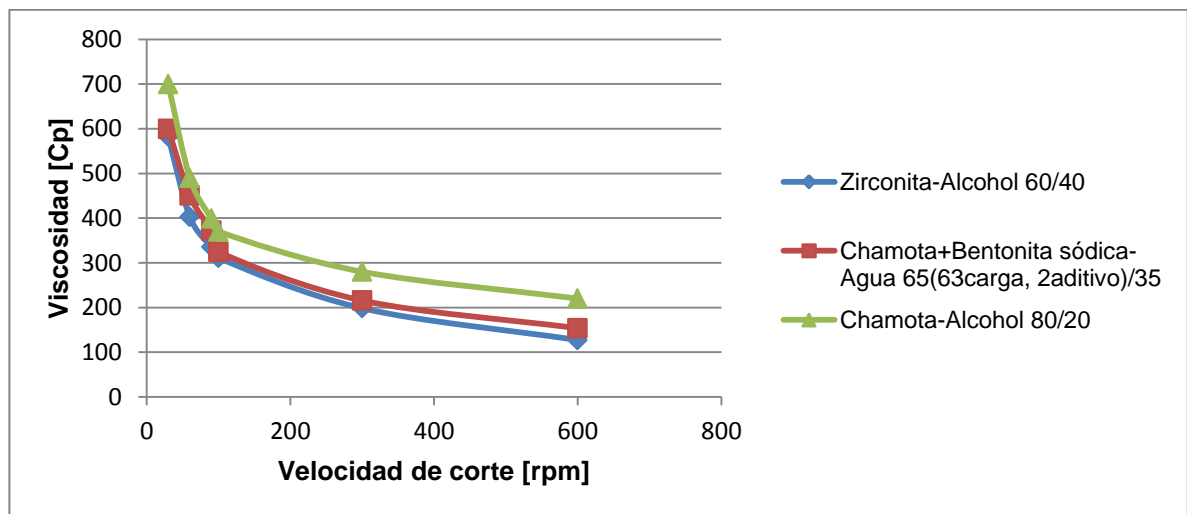
Estos valores de densidad fueron tomados por medio de una balanza de lodos siguiendo el procedimiento establecido en la norma API13B1 [12]. Se puede observar que al aumentar el porcentaje de sólidos se incrementa la densidad de la suspensión, al aumentar el componente líquido disminuye la densidad. Es importante mencionar que debido al método de aplicación del recubrimiento

(inmersión), la cantidad de sólidos no debe ser muy alta ya que al momento de realizar el procedimiento ocasionaría acumulación de la carga sólida y aglomeración en las películas. Así se evita una buena homogeneidad y adecuada morfología de la capa protectora; por esto se busca una suspensión con relación sólido-líquido que tenga baja densidad. El mejor resultado se obtuvo en la suspensión zirconita-alcohol con valor de 12.814 lb/gal.

- **Viscosidad**

Se midieron las viscosidades de las suspensiones seleccionadas utilizando el viscosímetro OFITE 900, variando las velocidades de corte, ver gráfica 2.

**Gráfica 2.** Viscosidad de las suspensiones seleccionadas en función de la velocidad de corte.

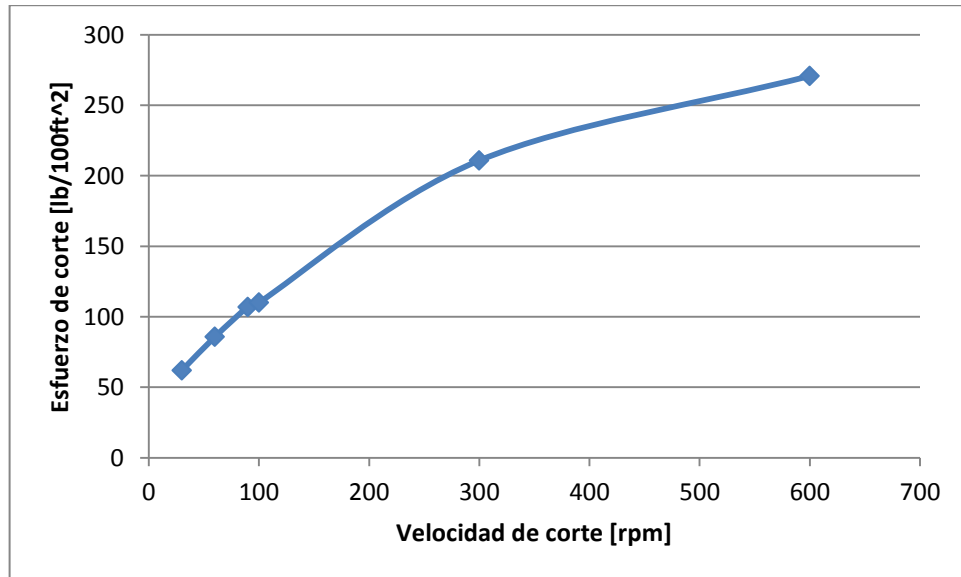


La viscosidad va a ser influenciada por la granulometría y la concentración de las partículas, independientemente del disolvente utilizado. Como se puede ver en la gráfica 2, la viscosidad no se ve afectada por la granulometría de las cargas, ya que esta fue la misma para todos los recubrimientos elaborados, pero si, por la cantidad de carga sólida, observando un aumento de la viscosidad cuando la cantidad de sólidos en las relaciones es mayor. La suspensión que presentó menor valor de viscosidad a diferentes velocidades de corte fue zirconita-alcohol

60/40, mostrando un comportamiento más fluido que la hace apta para realizar un recubrimiento homogéneo sobre las gemas por el método de inmersión.

Para determinar las características del fluido de las suspensiones se estableció la figura 3 en donde se representa el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte para la suspensión zirconita-alcohol, que fue la que mejores resultado se obtuvieron.

**Gráfica 3.** Esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte para la suspensión zirconita-alcohol 60/40.



La curva realizada describe el comportamiento típico de un fluido pseudoplástico, que se caracteriza por disminuir su viscosidad a medida que se aumenta el esfuerzo de corte aplicado. También se puede indicar que debido a que la viscosidad no permanece constante en las suspensiones al variar la velocidad de corte y al aplicar diferentes esfuerzos de corte, se determina que son fluidos no newtonianos. Esto concuerda con lo mencionado por Schweigger, E., los recubrimientos presentan generalmente una reología pseudoplástica donde el valor de la viscosidad disminuye con el cizallamiento [16].

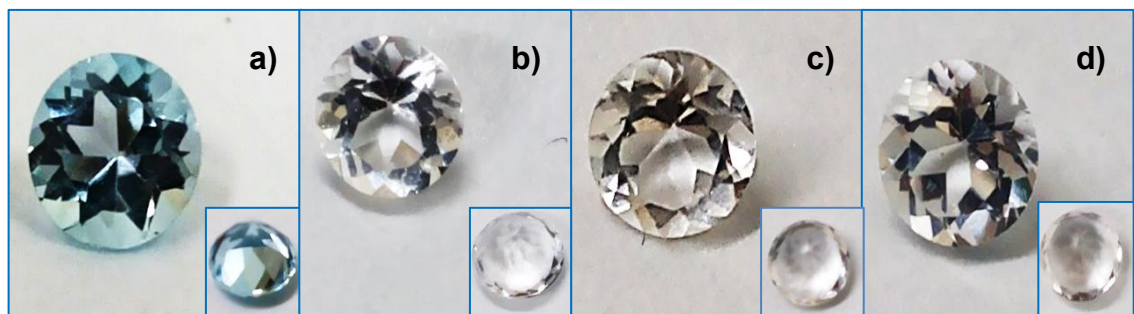
## 4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS GEMAS Y APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS A LAS PIEDRAS RECUBIERTAS

Primero se decidió aplicar estas pruebas a las aguamarinas siendo las gemas con las características y propiedades que más se asemejan a las esmeraldas, evitando un gasto excesivo en compra de piedras preciosas durante la investigación.

### 4.2.1. Pruebas térmicas con aguamarinas

Según la práctica, cuando una aguamarina es sometida a temperaturas superiores a 500°C pierde sus características físicas, su tonalidad azul que la hace particular y puede llegar a agrietarse. Se quiso corroborar este fenómeno sometiendo una aguamarina sin recubrir durante cinco minutos a 300, 400, 500 y 600°C. Se observó que a los 400°C ya perdía totalmente su tonalidad y se convertía en una piedra incolora y translúcida; además presentó tendencia a ser más opaca a medida que aumentaba la temperatura. Ver figura 11.

**Figura 11.** Aguamarina después de ser sometida durante cinco minutos a a) 300°C, b) 400°C, c) 500°C y d) 600°C .

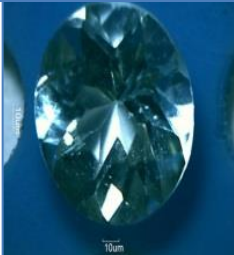

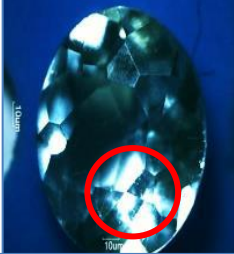

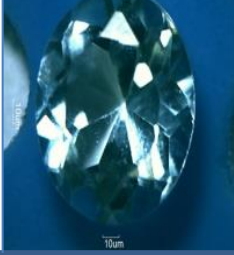



Una vez determinada la temperatura a la cual la aguamarina pierde su color se caracterizaron ópticamente tres aguamarinas y se les tomaron sus coordenadas CIELAB antes y después de recubrirlas aplicando un choque térmico de cinco minutos a una temperatura de 450°C.

**Figura 12.** Representación gráfica del choque térmico aplicado a las gemas.



**Tabla 11.** Caracterización de las aguamarinas antes - después de recubrir y de aplicar el choque térmico a 450°C por cinco minutos. Fotografías a 0.67X.





Recubrimiento	Fotografía antes del choque térmico	Coordenadas CIELAB antes del choque térmico	Fotografía después del choque térmico	Coordenadas CIELAB después del choque térmico
Chamota-Alcohol 80/20		L: 84.92 a: -7.03 b: -3.87		L: 92.51 a: -2.00 b: 1.13
Zirconita-Alcohol 60/40		L: 86.67 a: -6.26 b: -2.54		L: 87.20 a: -6.70 b: -1.82
Chamota, Bentonita sódica-Agua 65/35		L: 88.53 a: -5.50 b: -2.01		L: 91.61 a: -1.40 b: 1.89

Como se puede ver en la tabla 11, el único recubrimiento que logró cumplir con la finalidad de proteger la gema al evitar la pérdida de sus propiedades y características a 450°C (50°C por encima de la temperatura que se estableció como máxima) fue el elaborado a partir de la suspensión zirconita-alcohol relación 60/40, que además mostró los mejores resultados en la caracterización de los recubrimientos (ver 4.1). Aunque las gemas presentaban inclusiones gaseosas en forma de burbujas como se puede ver en las fotografías de la tabla 11, estas no mostraron tendencia a salir de la piedra lo que conllevaría al inminente agrietamiento o en el peor de los casos a una fractura total. Se puede deducir que el recubrimiento generó una barrera térmica logrando evitar que el gas atrapado dentro de la aguamarina se viera afectado por el choque térmico.

En la toma de todas las coordenadas CIELAB, se trabajó el equipo a cinco disparos del haz de luz, realizando él mismo el ajuste y dando como promedio los datos registrados en la tabla 11. Estos valores no marcaron mucha diferencia para la piedra recubierta con zirconita-alcohol, porque se conservó el brillo identificado por la coordenada  $L^*$  y el color por las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$ . Mostrando una ligera variación en el tono azul dado por la coordenada  $-b^*$ , haciéndose más positivo, lo que disminuye la tonalidad de la piedra y aumenta ligeramente el brillo como se observa en la coordenada  $L^*$ . Para confirmar el efecto protector de este recubrimiento se decidió realizar nuevamente la prueba con dos gemas más obteniéndose los resultados de la tabla 12.



Se observó una pequeña variación en las coordenadas CIELAB que indica una leve disminución de la tonalidad azul de la piedra. La diferencia del tono no es muy visible, pero gracias al uso del espectrofotómetro se pudo determinar. No se presentaron ni fracturas, ni grietas, ni diferencia en el brillo de las aguamarinas estudiadas; el recubrimiento logró nuevamente generar una barrera térmica y proteger a la gema conservando sus características físicas que la hacen llamativa al ojo humano.

**Tabla 12.** Caracterización de las aguamarinas antes y después de recubrir con zirconita-alcohol 60/40 y de aplicar el choque térmico a 450°C por cinco minutos. Fotografías a 0.67X.

Recubrimiento	Fotografía antes del choque térmico	Coordenadas CIELAB antes del choque térmico	Fotografía después del choque térmico	Coordenadas CIELAB después del choque térmico
Zirconita-Alcohol 60/40		L: 79.15 a: -14.90 b: -15.71		L: 80.01 a: -11.92 b: -9.58
		L: 78.27 a: -15.96 b: -15.78		L: 84.54 a: -8.09 b: 8.39

Confirmado el efecto protector del recubrimiento, la siguiente prueba térmica fue realizar el tratamiento térmico (ver 3.3.2) el cual se le aplica al molde donde adquiere las propiedades y características necesarias para poder soportar la colada. Una aguamarina fue recubierta con la suspensión zirconita-alcohol 60/40 y se llevó a la mufla VULCAN3-350 donde se sometió al tratamiento térmico seleccionado.

**Tabla 13.** Caracterización de la aguamarina antes y después de recubrir con zirconita-alcohol 60/40 y de someterla al tratamiento térmico que se le aplica al molde. Fotografías a 0.67X.




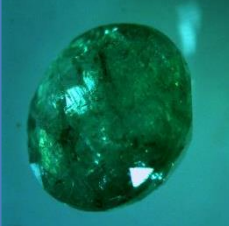
Recubrimiento	Fotografía antes del tratamiento térmico	Coordenadas CIELAB antes del tratamiento térmico	Fotografía después del tratamiento térmico	Coordenadas CIELAB después del tratamiento térmico
Zirconita-Alcohol 60/40		L: 83.05 a: -9.33 b: -11.57		L: 85.24 a: -7.63 b: -8.79

Nuevamente el recubrimiento zirconita-alcohol 60/40 logró proteger la gema, esta vez de las temperaturas generadas en este proceso. Antes y después del tratamiento térmico se observaron la presencia de inclusiones gaseosas (ver tabla 13) en la gema, pero gracias a la barrera de protección, estas no tuvieron tendencia a salir, manteniéndose dentro de ella sin causar ningún efecto. Se generó una pequeña variación de la tonalidad azul de las piedras (coordinadas a\* y b\*. Ver tabla 12), pero conservando su brillo.

#### 4.2.2. Pruebas térmicas con esmeraldas

El siguiente paso fue someter las esmeraldas colombianas a esfuerzos térmicos para su respectiva evaluación. Se usaron dos esmeraldas, una fue sometida a choque térmico a 400°C por cinco minutos (a 300°C pierden sus características). La segunda se sometió al tratamiento térmico que se le aplica al molde.

**Tabla 14.** Caracterización de las esmeraldas colombianas antes y después de recubrir con zirconita-alcohol 60/40 y de ser sometidas a un tratamiento térmico. Fotografías a 0.67X.

Recubrimiento	Tratamiento térmico	Fotografía antes del tratamiento térmico	Coordenadas CIELAB antes del tratamiento térmico	Fotografía después del tratamiento térmico	Coordenadas CIELAB después del tratamiento térmico
Zirconita -Alcohol 60/40	Choque térmico a 400°C durante 5 min		L: 78.29 a: -27.36 b: 8.45		L: 74.38 a: -26.51 b: 7.95
	Tratamiento térmico aplicado al molde		L: 73.96 a: -27.39 b: 8.42		L: 73.49 a: -27.15 b: 8.25

Como se puede ver en la tabla 14 el recubrimiento logró proteger las gemas de las altas temperaturas a las que estas pueden estar expuestas en el proceso de moldeo a la cera pérdida, método pre-engaste. Las esmeraldas utilizadas presentaban antes de los tratamientos térmicos zonas de grietas, las cuales aunque aumentaron su cantidad después de los tratamientos térmicos, no afectaron la integridad de las gemas. Las inclusiones en estado sólido que se ven como manchas de color oscuro se mantuvieron en las piedras sin ocasionar daño alguno. El brillo se mantuvo (dado por la coordenada  $L^*$ ), pero el tono disminuyó muy poco, mostrando variación en la coordenada  $a^*$ , donde entre más negativo sea este valor, mayor intensidad tendrá el color verde. Se puede pensar que si las gemas hubieran tenido mejor calidad, sin grietas, el recubrimiento hubiese podido proteger de manera eficiente conservando las características físicas de las piedras como se evidenció en la prueba.

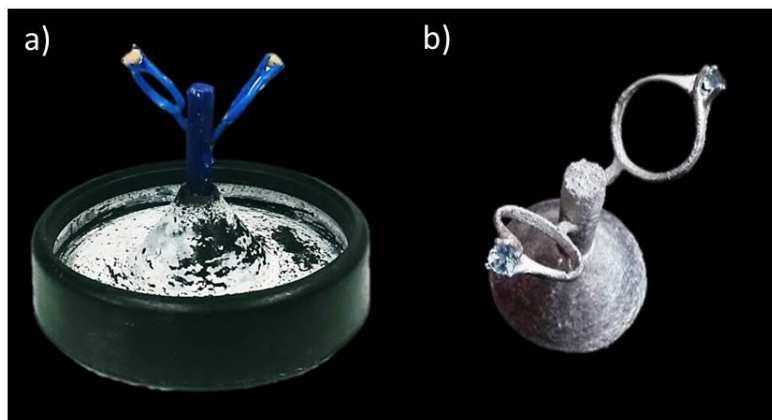
### **4.3. ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS**

Se realizaron los prototipos usando el molde propuesto por Guerrero, J. y Gómez, A. en su proyecto de grado [17] donde se evidenció una mejora en el acabado superficial de las piezas y un pre-engaste efectivo debido a la adición de lauril sulfato de sodio como agente formador de poros.

#### **4.3.1. Prototipo con aguamarinas**

A un árbol de cera de dos anillos, se le pre-engastaron dos aguamarinas recubiertas con zirconita-alcohol 60/40. La aleación utilizada fue la ILZRO12 debido a su alta colabilidad. La temperatura de colada fue 580°C para lograr un mejor llenado y se coló en un del molde con 300°C de temperatura. Se usó vacío durante el llenado.

**Figura 13.** Prototipo a) con aguamarinas recubiertas pre-engastadas, b) después de la colada.



El recubrimiento logró proteger las gemas, como se puede apreciar en la figura 12. No se presentaron ni grietas, ni fracturas.

**Tabla 15.** Caracterización de las aguamarinas antes y después de la colada.  
Fotografías a 0.67X.

Recubrimiento	Fotografía antes de la colada	Coordenadas CIELAB antes de la colada	Fotografía después de la colada	Coordenadas CIELAB después de la colada
Zirconita-Alcohol 60/40		L: 78.93 a: -16.81 b: -16.78		L: 82.15 a: -8.08 b: -6.26
		L: 79.81 a: -15.76 b: -15.67		L: 83.03 a: -11.41 b: -13.05

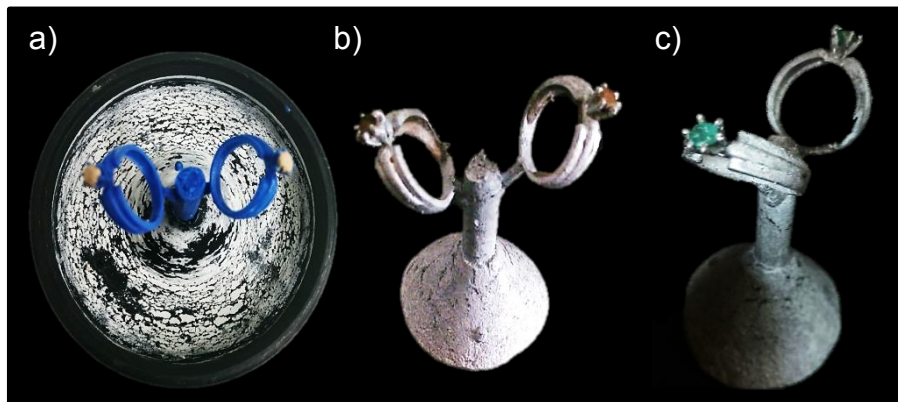
De acuerdo a las coordenadas CIELAB, el brillo aumento y se presentó una pequeña pérdida del color determinada por la disminución en los valores de cromaticidad. El tono azul está dado por la coordenada  $-b^*$ , después de la colada

este valor se hace más positivo (ver tabla 15), evidenciándose en una aguamarina más que otra, posiblemente ocasionado por algún desprendimiento de la capa protectora en alguna sección de la piedra durante el proceso de elaboración del molde, permitiendo la exposición de la aguamarina a las altas temperaturas en este punto.

#### 4.3.2. Prototipo con esmeraldas colombianas

Debido a los buenos resultados obtenidos con aguamarinas pre-engastadas, se realizó un segundo prototipo donde se pre-engastaron dos esmeraldas colombianas a cada anillo. Figura 13a. Las condiciones del proceso fueron las mismas del prototipo anterior (4.3.1.)

**Figura 14.** Prototipo a) con esmeraldas colombianas recubiertas pre-engastadas, b) después de la colada, c) pieza final.



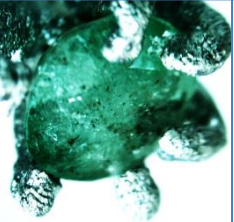
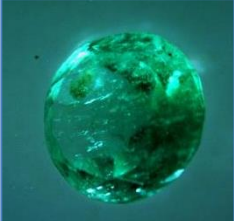
En la figura 13b se observa que el recubrimiento se mantuvo adherido a las piedras evitando el contacto directo con el metal en la colada. En la figura 13c se aprecia la ausencia de grietas superficiales y fracturas. De esta manera se

demuestra que el recubrimiento utilizado protegió efectivamente la gema durante todo el proceso.

De acuerdo con las coordenadas CIELAB, se evidenció una pequeña disminución del brillo posiblemente originado por un ligero aumento de la zona de grietas internas lo que provocó una opacidad de la piedra. Se indica que el ojo humano no alcanza a percibir estas variaciones. Se logró conservar el tono de las esmeraldas como se observa en la coordenada  $-a^*$  de la tabla 16.

**Tabla 16.** Caracterización de las esmeraldas antes y después de la colada.

*Fotografías a 0.67X.*

Recubrimiento	Fotografía antes de la colada	Coordenadas CIELAB antes de la colada	Fotografía después de la colada	Coordenadas CIELAB después de la colada
Zirconita-Alcohol 60/40		L: 75.62 a: -29.42 b: -7.84		L: 69.13 a: -28.12 b: -6.89
		L: 78.26 a: -28.71 b: -8.95		L: 71.17 a: -29.43 b: -7.48

## CONCLUSIONES

- Por medio de la caracterización reológica de las suspensiones que generaron mejores resultados en la pruebas de adherencia, espesor y una morfología homogénea se pudo determinar que se tratan de fluidos no newtonianos con comportamiento pseudoplástico, típico de los recubrimientos, presentando buena fluidez, cubrimiento total de la gema y evitando descuelgues.
- El recubrimiento elaborado a partir de zirconita-alcohol, relación 60/40, presentó una morfología homogénea sin presencia de poros, grietas o secciones expuestas; menores valores de viscosidad, densidad, espesor y mayor adherencia. Por estas razones fue seleccionado como unto protector.
- La efectividad del unto zirconita-alcohol 60/40 al someter las gemas al tratamiento térmico del molde y al choque térmico a 400°C por cinco minutos se constató logrando una protección adecuada al conservar el brillo y el color de la gema; sin embargo, se observó un ligero aumento en el tamaño de las grietas internas.
- Los prototipos colados usando gemas de aguamarina y esmeraldas colombianas recubiertas presentaron un pre-engaste rígido y una superficie de las piedras completamente integra sin ningún defecto perceptible.

## RECOMENDACIONES

- Para tener un control constante del espesor de los recubrimientos, reducir el tiempo de operación y lograr un trabajo continuo aumentando la producción y eficacia del proceso. Se recomienda para una producción industrial implementar una técnica de inmersión mecanizada, además, debe generarse el mínimo contacto entre la piedra y la pieza que la va a sostener para aplicar el recubrimiento evitando secciones de exposición.
- Diseñar y elaborar recubrimientos a partir de materiales aislantes (sílice coloidal – sílice fundida) en razón a que la zirconita es un material considerado conductor de calor.
- Se recomienda utilizar gemas de esmeraldas colombianas de muy buena calidad (sin presencia de grietas internas e inclusiones o cantidad mínima) para próximas investigaciones.

## REFERENCIAS

- [1] Hunt, L. The Long History of Lost Wax Casting, Over five thousand years of art and craftsmanship. In: Gold Bulletin (1980); 13. (2), pp 63-79.
- [2] Gremio de joyeros, plateros y relojeros de Madrid. El arte del engastado. Tomado de: [http://www.gremiomadrid.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2871&Itemid=336](http://www.gremiomadrid.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2871&Itemid=336)
- [3] Faccenda, V. Handbook on investment casting. The lost wax casting process for carat gold jewellery manufacture. World Gold Council (2003); p. 51.
- [4] Acevedo, A. Y Vélez, D. Aplicación de recubrimientos a gemas de esmeralda en el proceso de moldeo en cera perdida. Método pre-engaste. Trabajo de pregrado. Universidad Industrial de Santander. (2012).
- [5] Ferrer, L. Resistencia de los materiales cerámicos a los cambios bruscos de temperatura. En: Boletín Soc. Esp. Cerám. (1964); Vol. 3, pp 603-609.
- [6] Björn, A., et al. Rheological characterization. Biogas. In: Intech Publisher (2012); p. 64.
- [7] Corrêa, M., et al. Mechanical properties of Alumina-Zirconia Composites for Ceramic Abutments. Materials Research (2004); Vol. 7, No. 4, pp. 643-649.
- [8] Jain, P. Principles of Foundry Technology. Tata McGraw Hill (2003). Fourth edition, p. 82.
- [9] Konica Minolta Sensing, INC. Comunicación precisa del color, control del color: de percepción a instrumentación (2003); p. 10.
- [10] Flechas, G. Departamento de Boyacá. Secretaría de minas y energía de Boyacá. Gobernación de Boyacá; pp. 3-4.

- [11] Calvo, J. Pinturas y recubrimientos, introducción a su tecnología. Editorial: Díaz de Santos (2009); p. 4.
- [12] American Petroleum Institute. Recommended practice standard procedure for field testing water-based drilling fluids. API, 1997 (second edition). API13B1.
- [13] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for measuring adhesion by tape test. ASTM, reapproved 2009. ASTM D3359.
- [14] Loewen, R. Rapid elimination and reaction chemistry of sulfate-bonded investment. The Santa fe symposium on jewelry manufacturing technology, Nuevo Mexico (2002); p. 167.
- [15] Atkins, P. Y Jones, L. Principios de química: los caminos del descubrimiento. Editorial Panamericana (2006), tercera edición, p. 171.
- [16] Schweigger, E. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. Editorial Díaz de Santos (2005); p. 91.
- [17] Gómez, A. Y Guerrero J. Influencia del lauril sulfato de sodio como agente formador de poros en la permeabilidad de moldes de yeso para su aplicación en micro-fundición con esmeraldas colombianas. Trabajo de pregrado. Universidad Industrial de Santander. (2014).

## BIBLIOGRAFIA

Acevedo, A. Y Vélez, D. Aplicación de recubrimientos a gemas de esmeralda en el proceso de moldeo en cera perdida. Método pre-engaste. Trabajo de pregrado. Universidad Industrial de Santander. (2012).

American Petroleum Institute. Recommended practice standard procedure for field testing water-based drilling fluids. API, 1997 (second edition). API13B1.

American Society for Testing and Materials. Standard test methods for measuring adhesion by tape test. ASTM, reaproved 2009. ASTM D3359.

Atkins, P. Y Jones, L. Principios de química: los caminos del descubrimiento. Editorial Panamericana (2006), tercera edición, p. 171.

Björn, A., et al. Rheological characterization. Biogas. In: Intech Publisher (2012); p. 64.

Calvo, J. Pinturas y recubrimientos, introducción a su tecnología. Editorial: Díaz de Santos (2009); p. 4.

Corrêa, M., et al. Mechanical properties of Alumina-Zirconia Composites for Ceramic Abutments. Materials Research (2004); Vol. 7, No. 4, pp. 643-649.

Faccenda, V. Handbook on investment casting. The lost wax casting process for carat gold jewellery manufacture. World Gold Council (2003); p. 51.

Ferrer, L. Resistencia de los materiales cerámicos a los cambios bruscos de temperatura. En: Boletín Soc. Esp. Cerám. (1964); Vol. 3, pp 603-609.

Flechas, G. Departamento de Boyacá. Secretaría de minas y energía de Boyacá. Gobernación de Boyacá; pp. 3-4.

Gómez, A. Y Guerrero J. Influencia del lauril sulfato de sodio como agente formador de poros en la permeabilidad de moldes de yeso para su aplicación en

micro-fundición con esmeraldas colombianas. Trabajo de pregrado. Universidad Industrial de Santander. (2014).

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

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

Jain, P. Principles of Foundry Technology. Tata McGraw Hill (2003). Fourth edition, p. 82.

Konica Minolta Sensing, INC. Comunicación precisa del color, control del color: de percepción a instrumentación (2003); p. 10.

Loewen, R. Rapid elimination and reaction chemistry of sulfate-bonded investment. The Santa fe symposium on jewelry manufacturing technology, Nuevo Mexico (2002); p. 167.

Schweigger, E. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. Editorial Díaz de Santos (2005); p. 91.