

**APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS A GEMAS DE ESMERALDA EN EL
PROCESO DE MOLDEO EN CERA PÉRDIDA. MÉTODO PRE-ENGASTE.**

ANA GABRIELA ACEVEDO VILLAMIZAR

DAYANA ANDREA VÉLEZ PEÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2012

**APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS A GEMAS DE ESMERALDA EN EL
PROCESO DE MOLDEO EN CERA PÉRDIDA. MÉTODO PRE-ENGASTE.**

ANA GABRIELA ACEVEDO VILLAMIZAR

DAYANA ANDREA VÉLEZ PEÑA

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Metalúrgico**

DIRECTOR

Ing. ARNALDO ALONSO BAQUERO

CODIRECTORA

Dra. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

A DIOS por mi vida, por la maravillosa familia que me dio, por las infinitas oportunidades que a diario me permite aprovechar con la ternura, el apoyo y la incondicionalidad que solo un padre puede brindar. Es a él a quien en primer lugar todo le debo.

A MI MADRE AMPARO VILLAMIZAR por su incondicional amor, paciencia, sabiduría y liderazgo que siempre me ha logrado enseñar con su ejemplar modo de vivir, por enfrentar la vida a cualquier costo en pro de mi bienestar, es por ella que esta meta no es el límite sino la apertura para millones de bendiciones mas, te amo.

A MI PADRE IGNACIO ACEVEDO: Por ser mi amor, mi mejor amigo, mi cómplice, por ser ese hombre paciente, responsable, trabajador y amoroso que me animo en cada etapa de mi carrera y espero con orgullo el momento de compartir este gran triunfo.

A MI FAMILIA por su incondicional apoyo.

A MIS MEJORES AMIGAS KAREN BARRERA Y SILVIA GALVIS por ser mis hermanas, compartir conmigo cada situación de mi vida y enseñarme que solo aquello que se ama puede permanecer para siempre.

A DAYANA VELEZ por su valiosa amistad, por compartir esta meta junto a mi, por ser mi compañera de estudio, aventuras y anhelos, por enseñarme que nuestra amistad fue cultivada no solo para un ciclo universitario, a **LINA GAITAN** por su comprensión, incondicionalidad, por su valiosa amistad y por hacer de su casa y su familia la nuestra y a **CARLOS TOLOZA Y DAVID VELASCO** por ser mis mejores amigos y mi apoyo desde hace ya tantos años.

A quienes no nombro pero hacen parte de mi formación humana y profesional.

Ana Gabriela Acevedo Villamizar

DEDICATORIA

A **DIOS** por ser quien ilumino mi camino, el que puso cada logro en mi vida y nunca me dejo sola, gracias por darme la vida y demostrarme que todo te lo debo a ti.

A mi madre **GLORIA YANETH PEÑA**, que la amo gracias por ser mi motor, por enseñarme que no debo dejarme vencer, por amarme, ser incondicional y por estar en cada meta que consigo.

A mi padre **OMAR JOSE VÈLEZ VIDUAL**, por siempre inculcarme que debo estudiar, por apoyarme en el transcurso de mi carrera y por confiar en mis capacidades.

A mis hermanos **VALERY VÈLEZ, OMAR VÈLEZ y MARGARETH GARZÒN**, que fueron mi impulso para sacar esta carrera adelante, este logro es de ustedes, los amo.

A mi amiga **GABRIELA ACEVEDO**, por ser mi amiga, por cada momento que compartimos, por ser mi compañera de proyecto, por escucharme y estar siempre ahí para mí, te quiero mucho.

A mi amiga **LINA GAITÁN**, te quiero mucho, gracias por la amistad que me has brindado y por cada situación que hemos vivido.

Dayana Andrea Vélez Peña

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	19
2.1. CARACTERÍSTICAS BASICAS DE LA ESMERALDA.....	20
2.2. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA ESMERLADAS COLOMBIANAS.....	21
2.2.1. Composición y color.....	22
2.2.2. Inclusiones y fracturas.....	23
2.3. PROCESO DE PREPARACIÓN DE LA ESMERALDA.....	24
2.4. PRINCIPAL TIPO DE ENGASTE.....	24
2.5. RECUBRIMIENTOS O UNTOS.....	25
2.5.1. Materiales utilizados en la elaboración de los recubrimientos usados en este proyecto.....	25
2.5.1.1. Chamota.....	25
2.5.1.2. Grafito.....	27
2.6. CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE UNA SUSPENSIÓN.....	28
2.6.1. Viscosidad.....	29
2.6.2. Densidad.....	31
2.6.3. Adherencia de los recubrimientos.....	31
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DE LAS GEMAS.....	33
3.2. PREPARACIÓN Y ESTUDIO REOLÓGICO DE LAS SUSPENSIONES SELECCIONADAS.....	35
3.2.1. Preparación de las suspensiones.....	35
3.2.2. Estudio reológico de las suspensiones.....	36
3.3. DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	37
3.3.1. Desarrollo de los recubrimientos.....	37
3.3.2. Caracterización física de los recubrimientos.....	38
3.4. PROCESO DE PRE- ENGASTE DE LAS GEMAS	

RECUBIERTAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MOLDE Y TRATAMIENTO TÉRMICO DEL MISMO.....	39
3.5. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS GEMAS DE ESMERALDAS LUEGO DE SER SOMETIDAS AL TRATAMIENTO TÉRMICO DEL MOLDE.....	41
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	42
4.1. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LAS SUSPENSIONES SELECCIONADAS.....	42
4.1.1. Determinación de la densidad de las suspensiones seleccionadas.....	42
4.1.2. Ensayo de viscosidad.....	43
4.2. DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	43
4.2.1. Análisis ópticos de los recubrimientos (morfología).....	43
4.2.2. Espesor de los recubrimientos seleccionados.....	50
4.2.3. Ensayo de adherencia.....	51
4.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECUBRIMIENTOS EN LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ESMERALDAS.....	54
4.3.1. Recubrimiento chamota – alcohol – ácido bórico.....	54
4.3.2. Recubrimientos chamota – alcohol.....	55
5. CONCLUSIONES.....	58
6. RECOMENDACIONES.....	59
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
8. ANEXOS.....	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para distintos fluidos....	30
Figura 2. Metodología experimental del presente proyecto.....	33
Figura 3. Expansión térmica de diferentes arenas.....	34
Figura 4. Tratamiento térmico del yeso en el proceso de moldeo en cera perdida.....	40
Figura 5. Viscosidad (cP) vs velocidad de corte (rpm) de las suspensiones con alcohol como disolvente.....	43
Figura 6. Viscosidad (cP) vs velocidad de corte (rpm) de las suspensiones con agua como disolvente.....	44
Figura 7. Viscosidad (cP) vs velocidad de corte (rpm) de los recubrimientos chamota- alcohol, chamota- agua y polvo de grafito – agua.	45
Figura 8. Esfuerzo de corte (1lb/100ft ²) vs velocidad de corte de chamota – alcohol.....	46

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Pequeña inclusión de lodolita en una esmeralda de Coscuz	23
Fotografía 2. Inclusión de carácter trifásico.....	23
Fotografía 3. Método de engaste en garras.....	24
Fotografía 4. Prueba de adherencia según la norma ASTM D 3359.....	38
Fotografía 5. Esmeralda pre-engastada en el modelo en cera.....	39
Fotografía 6. Molde de yeso con la esmeralda pre- engastada en el modelo en cera perdida.....	40
Fotografía 7. Esmeralda natural antes del tratamiento térmico (recubrimiento chamota – alcohol – ácido bórico).....	55
Fotografía 8. Esmeralda natural después del tratamiento térmico (recubrimiento chamota – alcohol – ácido bórico).....	55
Fotografía 9. Esmeralda natural con presencia de agrietamiento antes del tratamiento térmico (recubrimiento chamota – alcohol).....	56
Fotografía 10. Esmeralda natural con presencia de agrietamiento después del tratamiento térmico (recubrimiento chamota – alcohol).....	56
Fotografía 11. Esmeralda natural sin presencia de agrietamiento antes del tratamiento térmico (recubrimiento chamota – alcohol).....	57
Fotografía 12. Esmeralda natural sin presencia de agrietamiento después del tratamiento térmico (recubrimiento chamota – alcohol).....	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales variedades del berilo y el color generado.....	19
Tabla 2. Principales características de las esmeraldas en relación con su composición.....	21
Tabla 3. Principales propiedades de la esmeralda.....	21
Tabla 4. Color de la esmeralda dependiendo del sector minero.....	22
Tabla 5. Propiedades del grafito.....	28
Tabla 6. Composición sólida y líquida de las suspensiones utilizadas.....	34
Tabla 7. Densidades (lb/gal) de las suspensiones seleccionadas.....	42
Tabla 8. Morfología de los recubrimientos seleccionados.....	48
Tabla 9. Espesor de los recubrimientos.....	51
Tabla 10. Ensayo de adherencia de los recubrimientos utilizados.....	51

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Materiales y equipos.....	60
ANEXO B Montajes.....	65
ANEXO C Norma ASTM D 3359.....	66

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS A GEMAS DE ESMERALDA EN EL PROCESO EN CERA PÉRDIDA. MÉTODO PRE-ENGASTE.*

AUTORES: ACEVEDO VILLAMIZAR, Ana Gabriela y VÉLEZ PEÑA, Dayana Andrea.**

PALABRAS CLAVES: Suspensión, Recubrimiento, Esmeralda, Chamota, Engaste.

A nivel nacional solo el 1% de las esmeraldas logran ser engastadas, esto se debe a la falta de personal altamente calificado que logre sobre llevar las limitaciones existentes en este tipo de proceso, como parte de un macro proyecto se encuentra lograr el engaste de la piedra desde el momento de solidificación de la aleación de la cual estará compuesta la joya. En este proyecto se busca lograr que la esmeralda inicialmente logre resistir las temperaturas del tratamiento térmico del molde, sin sufrir ninguna variación en sus principales características como color, brillo y ausencia de fractura. Para dar cumplimiento a esto, se elaboraron una serie de suspensiones a base de chamota y polvo de grafito como cargas, ácido bórico y ácido cítrico como aditivos para evaluar el poder aglutinante y dispersante respectivamente y agua y alcohol etílico como disolventes, después de su elaboración fueron caracterizadas reológicamente mediante ensayos de densidad y viscosidad, permitiendo ser clasificadas como fluidos no newtonianos, pseudoplásticos y tixotrópicos, de igual manera se desarrollaron los recubrimientos aplicados a las gemas de esmeralda y se caracterizaron físicamente mediante ensayo de análisis óptico, medida de espesor y ensayo de adherencia y por último se analizó por medio de un estereoscopio el cambio de propiedades que sufrieron las esmeraldas después de ser sometidas al tratamiento térmico del molde de yeso. De lo anterior se concluyó que el recubrimiento chamota-alcohol por su alta viscosidad y adherencia cumplió con el objetivo de proteger la esmeralda al ser sometida a las temperaturas del tratamiento térmico del molde.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Director Ing. ALONSO BAQUERO, Arnaldo. Codirector Dra. CORDOBA TUTA Elcy María.

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF GEMS EMERALD COATINGS IN THE PROCESS LOST WAX. METHOD PRE- SETTING.*

AUTHORS: ACEVEDO VILLAMIZAR, Ana Gabriela y VÉLEZ PEÑA, Dayana Andrea.**

KEYWORDS: Suspension, Coating, Esmeralda, Chamotte, Setting.

Nationally only 1% of emeralds manage to be crimped, this is due to the lack of highly qualified personnel that achieves about taking existing limitations in this type of process, as part of a macro project is achieving the crimping stone from the time of solidification of the alloy to be constituted the jewel. This project seeks to achieve that emerald achieved initially resist the heat treatment temperature of the mold, without undergoing any change in their main characteristics as color, brightness and absence of fracture. To comply with this, they developed a series of suspensions based on chamotte and graphite powder as fillers, boric acid and citric acid as additives to evaluate binder and dispersing power and water respectively and ethyl alcohol as solvent, after processing rheologically were characterized by testing density and viscosity allowing it to be classified as non-Newtonian fluids, pseudoplastic and thixotropic equally applied coatings were developed to emerald gems and physically characterized using optical analysis assay, assay and measurement of thickness adhesion and finally analyzed by means of a stereoscope change suffered emeralds properties after being subjected to heat treatment plaster mold. From the above it was concluded that the grog-alcohol coating for its high viscosity and adhesion achieved the objective of protecting the emerald when subjected to the heat treatment temperature of the mold.

* Graduation Project

**Faculty Physical Chemistry of Engineering. School of metallurgical engineering and materials science. Direct Engineer Alonso Baquero, Arnaldo. Dr.CORDOBA TUTA, Elcy Mary.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las piedras preciosas se han convertido en unos de los mayores atractivos en la actividad comercial, lo cual permite no solo mayor expansión en lo que a su explotación se refiere, sino también un gran avance en la joyería.

A nivel nacional se puede resaltar que el 97% de la exportación de esmeraldas sale del país bajo la forma de piedras talladas, con lo cual se esta perdiendo el alto valor agregado que la joyería podría conferirle a la materia prima extraída. Si se toma en cuenta que la nación cuenta con significativos yacimientos de esmeraldas, oro, plata y platino, es realmente paradójica la circunstancia que se presenta en Colombia en relación con el insignificante aporte que la joyería hace al producto interno bruto nacional.

Para lograr un avance significativo en el sector joyero nacional se requiere abordar dos problemas, la falta de personal altamente calificado, así como desarrollar tecnología que rompa con las limitaciones de los procesos de engaste de las piedras preciosas. Las esmeraldas en alguna proporción se degradan al ser expuestas a altas temperaturas, lo cual se refleja en variaciones de color y brillo, debido a alteración en el estado de oxidación de elementos presentes en la red o eliminación de agua contenida en los mismos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente proyecto es encontrar un recubrimiento aislante que proteja la esmeralda durante el tratamiento térmico del molde, en el proceso de obtención de joyas pre-engastadas. De esta manera se espera contribuir en la búsqueda del proceso adecuado para el montaje de la piedra preciosa en el momento de la solidificación de la aleación.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Seleccionar un recubrimiento aplicable a la esmeralda que permita la conservación de las propiedades (brillo, color, ausencia de fracturas), al ser sometido a la temperatura del tratamiento térmico del molde.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar y caracterizar reológicamente las suspensiones cerámicas a usar en la obtención de los recubrimientos de las gemas.
- Desarrollar los recubrimientos cerámicos sobre las gemas y determinar sus características físicas (morfología, espesor y adherencia).
- Evaluar el efecto de los recubrimientos en la resistencia de las gemas pre-engastadas al tratamiento térmico del molde.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Desde el punto de vista mineralógico se puede considerar que la esmeralda natural es la variedad verde del mineral berilo, denominado así por incluir en su composición un elemento escaso: el berilio. Como este mineral pertenece al grupo de los “silicatos”, se deben conocer las características básicas y las relaciones existentes entre los silicatos y berilos. Todos los grupos que integran la familia de los silicatos se conforman a partir de las diferentes maneras como se ordenan tridimensionalmente múltiples tetraedros de SiO_4 , el berilo es un ciclosilicato y la disposición de los tetraedros de SiO_4 se encuentra en forma de anillos.

Los silicatos son los constituyentes básicos de las rocas ígneas, las cuales transportan desde las zonas profundas de la tierra hasta su superficie elementos metálicos, entre ellos el berilio, el cual al combinarse con el aluminio, el silicio y el oxígeno llega a construir el mineral de “berilo”, cuya fórmula es $\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})$. La estructura del berilo es compleja, en ella se alternan láminas planares de tetraedros básicos de Si_6O_{18} con láminas también planares donde se ubican exclusivamente los iones de Al y Be.

El berilo puro es incoloro, pero las diversas variedades del mismo, obtenidas mediante la incorporación de iones de diferentes elementos dentro de su trama cristalina, hace que sus variedades presenten diversas coloraciones como se observa en la tabla 1[1]

Tabla 1. Principales variedades del berilo y el color generado

Elementos cromóforos	Color generado.	Nombre de la variedad.
Cr y/o V	VERDE VIVO	Esmeralda
Fe	VERDE OPACO	Berilo Verde
Fe	AZUL	Aguamarina
Mn	ROJO	Bixbita

Fuente: VICTOR MANUEL CARRILLO LOMBANA. Esmeraldas en Colombia patrimonio geológico de la humanidad. 1ª Edición. Edit. Sociedad Colombiana de geología. 2009 [1]

Los gemólogos solo clasifican como esmeraldas a los berilos cuyo color verde proviene exclusivamente de los elementos Cr y V, ya que cuando este color es generado por iones de Fe la variedad se clasifica como berilo verde, perdiendo por este hecho gran parte de su valor comercial ya que las tonalidades verdosas así obtenidas resultan bastante opacas por presentar un brillo mate, carente de “vida”. De acuerdo con lo expuesto se concluye que la esmeralda es una variedad del berilo en la cual se han incorporado dentro de su estructura cristalina algunos iones de Cr y /o V, por lo que su composición general se debe expresar mediante dos términos: **$\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18}) + (\text{Cr}, \text{V})$** .

La primera parte de la suma, la expresión de la izquierda, corresponde a la fórmula del mineral “berilo” la cual es de naturaleza cuantitativa, o dicho en otras palabras, completamente exacta; conociendo el peso de un cristal de berilo puro se puede calcular cuántos átomos de Al, o, Be y si existen en él. En cambio, el término de la derecha es solamente de naturaleza cualitativa, en un cristal de esmeralda solamente se sabe que existe Cr y/o V, pero no se puede calcular su número exacto con solo conocer su peso.

En teoría se puede pensar que a mayor cantidad de elementos cromóforos mayor intensidad del color, lo que es parcialmente cierto. Sin embargo, en la práctica son relativamente poco los iones de Cr y V que entran a formar parte de la estructura del cristal, se ha encontrado que las cantidades máximas de estos elementos en las gemas nacionales no superan el 3% del peso total del mineral. Cuando el porcentaje de Cr y V es muy bajo, las esmeraldas presentan tonalidades muy pálidas por lo cual tendrán poco valor comercial. [1]

2.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA ESMERALDA

Además de su estructura compleja, las esmeraldas naturales poseen otra serie de características que facilitan a los gemólogos su clasificación, certificación y valoración, tal como se resume en las tablas 2 y 3[2]

Tabla 2. Principales características de las esmeraldas en relación con su composición.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Composición básica.	Silicato de aluminio y berilio con algunas sustituciones de Al por Cr y/o V: $(\text{Si}_6\text{O}_{18}) \text{Al}_2 \text{Be}_3 + (\text{Cr}, \text{V})$
Otras sustituciones elementales.	De manera muy ocasional el Al puede ser sustituido por Mg, Fe o Mn y el Be por Li.
Inclusiones.	Corresponden a porciones sólidas (cristales de sal o fragmentos de roca), líquidas o gaseosas, transportadas desde el entorno hasta el interior del cristal y que por una u otra razón han quedado atrapadas dentro de su estructura.

Fuente: EGOR GAVRILENKO. Tesis doctoral, Esmeraldas de los Urales (Rusia): Condiciones de formación y propiedades características. Universidad politécnica de Madrid. 2003. [2]

Tabla 3. Principales propiedades físicas de la esmeralda.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA EN LA ESMERALDA
Fragilidad.	Muy alta.
Densidad.	2.63-2.8 g/cm ³ .
Dureza.	7.5-8 (mohs).
Fractura.	Concoidea.
Raya.	Blanca.
Color.	Verde, verde-amarillento o verde azulado en respuesta a la luz día.
Brillo y lustre.	Vítreo.

Fuente: EGOR GAVRILENKO. Tesis doctoral, Esmeraldas de los Urales (Rusia): Condiciones de formación y propiedades características. Universidad politécnica de Madrid. 2003. [2]

2.2. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LAS ESMERALDAS COLOMBIANAS

Las esmeraldas de Colombia presentan múltiples características especiales en cuanto a composición, color, inclusiones y asociaciones con minerales de tierras raras.[1]

2.2.1. Composición y color

Se caracterizan por tener los contenidos de Ca y K más bajos del mundo y por qué en la definición de sus elementos cromóforos no entra el Fe; su color se debe exclusivamente a la presencia de Cr y /o V. En la tabla 4 se describen las tonalidades manejadas en el comercio de esmeraldas, dependiendo del sector minero del cual son extraídas, considerándose de mayor valor las encontradas en Muzo, debido a la transparencia y profundidad de su tono verde, además de la alta calidad que estas poseen. [1]

Tabla 4. Color de las esmeraldas dependiendo de su sector minero.

ZONAS.	SECTOR MINERO.	COLOR.
Occidental	Muzo	Verde hierba profundo y buena transparencia por la poca presencia de inclusiones.
	Coscuez	Verde amarillento típico, denominado “cebolludo de Coscuez”. Pocas inclusiones.
Oriental	Chivor	Generalmente azulado muy característicos de estos yacimientos. La diafanidad de algunas de ella es excelente, en otras se presentan inclusiones, microfracturas, fisuras y cavidades difíciles de disimular.
	Chagala	Verde pálido. Ausencia de impurezas o fracturas reconocibles a simple vista.

Fuente: VICTOR MANUEL CARRILLO LOMBANA. Esmeraldas en Colombia patrimonio geológico de la humanidad. 1ª Edición. Edit. Sociedad Colombiana de geología. 2009 [1]

2.2.2. Inclusiones y fracturas.

Con frecuencia las esmeraldas presentan diversos minerales diminutos o fragmentos de lodolitas (inclusiones de roca constituidas por minerales de arcilla) negras, atrapadas dentro de su estructura cristalina como se observa en la flecha roja encontrada en la fotografía 1.

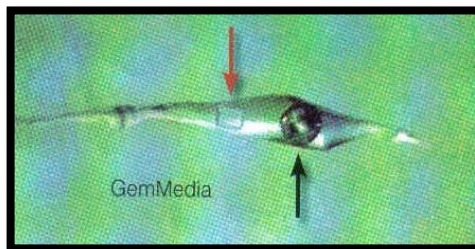
De igual manera son muy abundantes en las esmeraldas colombianas las inclusiones de carácter trifásico (sólido, líquido y gas), como se evidencia en la fotografía 2, la flecha negra señala una burbuja de gas y la flecha roja un cristal de cloruro de sodio, los cuales se encuentran inmersos en una solución líquida.[1]

Fotografía 1.Pequeña inclusión de lodolita en una esmeralda de Coscuez.



Fuente:VICTOR MANUEL CARRILLO LOMBANA. Esmeraldas en Colombia patrimonio geológico de la humanidad.1ªEdición. Edit. Sociedad Colombiana de geología. 2009 [1]

Fotografía 2. Inclusión de carácter trifásico.



Fuente: VICTOR MANUEL CARRILLO LOMBANA. Esmeraldas en Colombia patrimonio geológico de la humanidad. ARCHEOPTERYX imprenta 2007. [1]

2.3. PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS ESMERALDAS

El proceso de preparación de la esmeralda consiste en la obtención de un cristal tallado comúnmente en forma de poliedro.

El proceso para obtener una esmeralda tallada se puede sintetizar así:

- Evaluación, forma y calidad del producto.
- Corte inicial y cortes de pre-formado.
- Tallado o facetado de la piedra.
- Pulimento y limpieza de manera opcional.
- Embellecimiento” natural” o aplicación de tratamientos superficiales.[1]

2.4. PRINCIPAL TIPO DE ENGASTE DE LA ESMERALDA EN LA JOYA

En la actualidad existen diferentes tipos de engaste para que la piedra permanezca en la joya, el de mayor uso a nivel comercial el engastado en garras.

Las garras es un tipo de engaste donde la piedra va cogida por cuatro salientes que la sujetan. Es el más antiguo y el que más enganches tiene. También se utiliza para resaltar una piedra preciosa, como la esmeralda, según se observa en la fotografía 3.[3]

Fotografía 3.Método de engaste en garras



Fuente: ALEJANDRO CUELLAR. Módulo de engaste. Tipos de engaste. (17/05/2008). Disponible en: <http://moduloengaste.blogspot.com/2008/05/garras.html>[3]

2.5. RECUBRIMIENTOS O UNTOS

Mezcla caracterizada principalmente por su refractariedad, alta adherencia y finura de las partículas suspendidas, que le otorga la capacidad de proteger las gemas de temperaturas que afecten su estructura.

La composición básica de un recubrimiento es:

- Las cargas: Son en general, de naturaleza inorgánica, aportan cuerpo, materia sólida, y dan estructura, viscosidad y reología al recubrimiento.
- Aditivos: No son componentes esenciales de la mezcla, se hace uso de ellos de ser necesario modificar las propiedades de las suspensiones.
- Los disolventes: Se llama así al agua y otros productos de naturaleza orgánica cuya misión es la de dar al recubrimiento una viscosidad óptima según el método de aplicación que debe utilizarse. [4]

2.5.1. Materiales utilizados en la elaboración de los recubrimientos a usar en el presente proyecto

2.5.1.1. Chamota

La chamota es una mezcla de arena sintética refractaria de grano grueso que se prepara a partir de arcilla calcinada (utilizada como material inerte) y ladrillos molidos y mezclados con una arcilla cruda para dar plasticidad. Su característica principal es que es muy refractaria y conserva la resistencia mecánica a elevadas temperaturas de 700 a 800 °C.

Se utiliza principalmente en la industria de la fundición. Sus cualidades van a depender principalmente de la elección de la arcilla y si esta va a ser utilizada en la industria de la fundición debe ser elaborada a partir de arcillas lo mas refractarias posibles.[5]

Estructura de la chamota

- Está formada principalmente por mullita, la cual contiene porcentajes de alúmina que varían del 72 al 74%, esta fase le da la refractariedad al producto, cristobalita, la cual limita la refractariedad de la chamota y disminuye la temperatura adecuada de cocción.

Propiedades de la chamota

- Refractariedad: Determinada por la temperatura a la que puede someterse sin presentar signos de fusión o ablandamiento (temperatura de sinterización y piroscópica). La forma de los granos influye de tal manera que granos angulares se vitrifican más que los granos esféricos y los finos más que los gruesos. La chamota posee una excelente refractariedad.
- Dilatación: Es el aumento de tamaño de los granos, a menudo por el aumento de temperatura. Esta va a depender de la arcilla utilizada para la fabricación de la chamota y del grado de cocción; cuanto más alúmina tenga menor será la dilatación. La chamota posee una dilatación perfectamente lineal, es decir tiene poca dilatación.
- Porosidad o permeabilidad: Es la capacidad que tiene la arena para dejarse atravesar por los gases, este es el mayor inconveniente que presenta la chamota, debido a que una buena chamota tiene una porosidad abierta del 15 al 20% la cual va a absorber el aglomerante. Por tal razón la chamota exige alrededor de un 1 a 1,2% más de aglomerante que la arena silico arcillosa para la misma granulometría y para desarrollar la misma resistencia.
- Reacción ante los ácidos: Las chamotas bien cocidas no reaccionan ante la presencia de los ácidos como si lo hace la arena silícea, porque son materiales inertes.

- Dureza: Capacidad de los granos para resistir la deformación o abrasión de su superficie. Esta depende de la calidad de la chamota. Se sitúa alrededor de 7 en la escala de Mosh.
- Difusividad térmica: Es la capacidad que tiene una arena de moldeo de absorber el calor y sacarlo al medio ambiente.[5]

2.5.1.2. Grafito

El grafito natural es una forma alotrópica del carbón. Es un mineral suave, de color gris a negro, brillo metaloide, peso específico de 2.23, dureza de 1-2. Cristaliza en el sistema hexagonal estable y químicamente inerte a temperatura normal, inodoro, no tóxico, resistente al calor y excelente conductor de calor y electricidad. Es refractario, siendo poco afectado por temperaturas superiores a los 3,000°C en atmosferas no oxidantes; tiene alta resistencia a las condiciones ambientales y a los ácidos.

Es compresible y maleable; resiste el ataque químico, el choque térmico, la contracción y la oxidación; tiene bajos coeficientes de fricción y de expansión térmica; flexible en un amplio rango de temperaturas y excelente lubricante.

Se encuentra en la naturaleza en pequeños cristales hexagonales en forma de agregados compactados, escamosos, terrosos y esféricos. El grafito frecuentemente se encuentra asociado con minerales como: cuarzo, feldespato, micas, calcita, piritita y óxidos de hierro.[6]

Las principales propiedades del grafito como son la temperatura de fusión, sublimación, oxidación térmica y combustión, se encuentran enunciadas en la tabla 5 junto con las características que estas presentan.

Tabla 5. Propiedades del grafito.

Propiedad	Características
Temperatura de fusión	Tiene dos puntos triples (punto en que coexisten en equilibrio tres fases): 3,550°C bajo una presión de 88 kg/cm ² y 3,726°C a las 100.000 atmósferas de presión
Sublimación	Entre 3,300° y 3,550°C a una presión de 1.033 kg/cm ²
Oxidación térmica	En presencia de oxígeno comienza a 300°C
Combustión	A 620° y 670°C es combustible en presencia de oxígeno

Fuente: CORNELIS KLEIN. Manual de Mineralogía Vol 2. 4ª Edición. Basado en la obra de J. D. DANA. Editorial Reverte S.A. 2003[6]

2.6. CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE UNA SUSPENSIÓN

La reología describe el complejo mecanismo de fluidez de líquidos y abarca el criterio de viscosidad y su relación al cizallamiento.

Las suspensiones tienen una exigencia compleja a la reología, en la cual la viscosidad depende del amplio rango de cizallamiento al que están expuestas durante su manipulación.

- El cizallamiento es un índice para la agitación a la que está expuesta el material y equivale prácticamente a las revoluciones en un agitador; el rango de cizallamiento es muy amplio. La viscosidad equivale a la inercia que presenta un líquido a una fuerza externa de cizallamiento.
- La viscosidad es la relación entre la fuerza de tensión de cortadura o esfuerzo de cizallamiento y el cizallamiento. [7]

2.6.1. Viscosidad

La viscosidad es el grado de fluidez de un líquido, o sea, la facilidad de fluir a una temperatura determinada. Un líquido espeso tiene elevada viscosidad mientras que un líquido fluido tiene baja viscosidad.

La viscosidad de un fluido definida por Newton es “la resistencia que ofrece el fluido al movimiento entre dos placas paralelas separadas por una distancia unidad, una de ellas fija y la otra móvil que se mueve con la unidad de velocidad”. Esta resistencia se expresa como cociente entre el esfuerzo cortante por unidad de área y la velocidad cortante por unidad de espesor de la capa de fluido.

La propiedad que define el comportamiento reológico es la viscosidad. La viscosidad de un líquido no siempre es constante, suele estar relacionada con otras variables como:

- Temperatura: La viscosidad de un líquido depende de la temperatura. A alta temperatura los líquidos son más fluidos mientras que a baja temperatura son más viscosos. Esto es debido a que la energía térmica hace más débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van der Waals.
- Presión: Existe una relación entre la viscosidad que presenta un fluido y la compresión a la que está sometido.
- Vibración: Mediante un mecanismo parecido a lo que sucede en el comportamiento pseudoplástico, algunos geles sometidos a vibración o sacudidas se tornan más fluidos.[8]

Fluidos newtonianos

Existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Esto es debido a que la viscosidad es constante independiente del esfuerzo de corte al cual se somete el fluido.

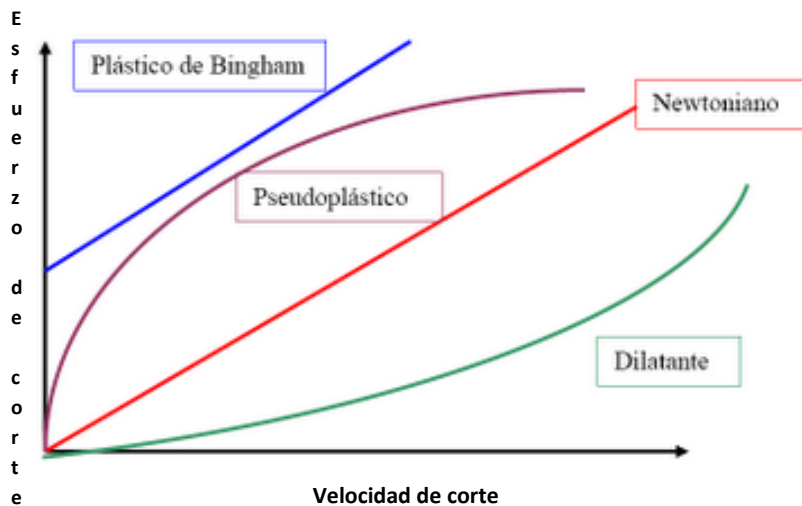
Fluidos no newtonianos

Son aquellos en los que la relación esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. La viscosidad depende del esfuerzo de corte aplicado (velocidad de cizalla).

Los fluidos no newtonianos se dividen principalmente en función de la velocidad de corte(ver figura 1) en:

- Fluido pseudoplástico: Se caracteriza porque la viscosidad disminuye a medida que aumenta el esfuerzo de corte sobre el fluido.
- Fluido dilatante: La característica de comportamiento de un flujo dilatante es el aumento de la viscosidad a medida que aumenta el esfuerzo de corte al cual es sometido el fluido.[9]

Figura 1. Esfuerzo de Corte vs Velocidad de corte para distintos fluidos



Fuente: RP CHHABRA & JF RICHARDSON. Non- newtonian flow in the process industries. Fundamentals and EngineeringApplications. Ed.Butterworth – Heinemann. (1999)[9]

Dependiendo de la variación de la viscosidad con el tiempo se clasifican en:

- Tixotropía: Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por sufrir un cambio estructural al aplicarle un esfuerzo cortante. La viscosidad va disminuyendo al aplicarle un esfuerzo. Por ejemplo una suspensión de arcillas.

- Reopexía: Propiedad que muestran variaciones dependientes con el tiempo de su viscosidad. Cuanto mayor tiempo se encuentra el fluido bajo el efecto de esfuerzos cortante, aumenta su viscosidad. Este comportamiento es opuesto a la tixotropía. Un ejemplo tintas de impresión.[9]

2.6.2. Densidad

La densidad nos determina el peso de un volumen líquido, la densidad de una suspensión puede expresarse en libras por galón tal como se hizo en este proyecto. Se utiliza una balanza de lodos generalmente para realizar su medición. [10]

El principal objetivo del estudio reológico en el desarrollo de los recubrimientos, en este caso para gemas de esmeraldas, es analizar los comportamientos que presentan las diferentes suspensiones de acuerdo a los mecanismos de fluidez que se evidencian, con el fin de lograr una caracterización de estos, eligiendo los que presentan las propiedades de viscosidad y densidad aptas para la elaboración de los recubrimientos aplicados a las piedras preciosas.

2.6.3. Adherencia de los recubrimientos.

Es la capacidad del recubrimiento de agarrarse a la gema. Depende del tipo de superficie y de las características propias del recubrimiento.

Este es un parámetro muy importante en la investigación de este proyecto, debido a que el recubrimiento debe estar altamente adherido a la superficie de la esmeralda, evitando que en algún momento del proceso este se desprenda dejando expuesta la gema a la temperatura del tratamiento térmico del molde y por consiguiente, ocasionando alteraciones en la estructura y propiedades que esta posee.[4]

Existen diferentes maneras de determinar la adherencia de un recubrimiento, principalmente se hace uso de la normas ASTM D4541- 09e1 Método de prueba

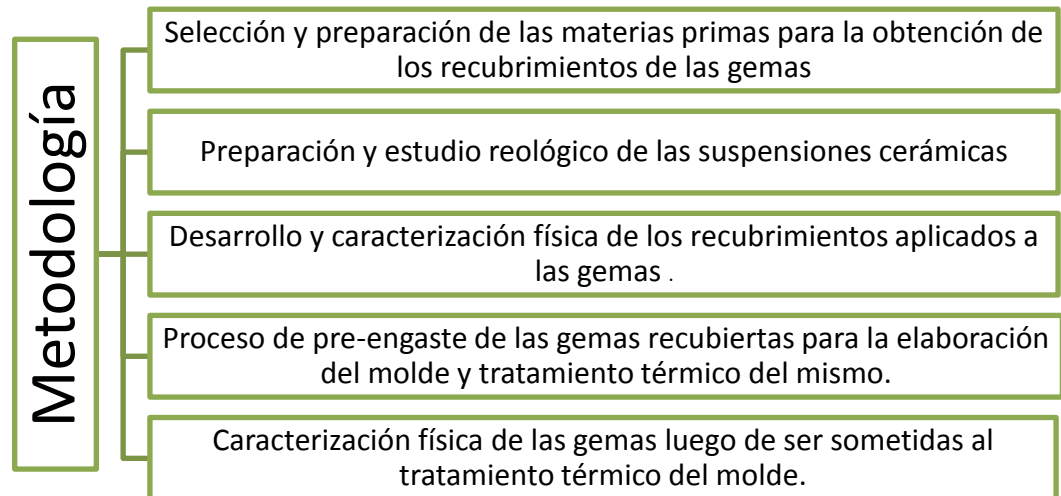
estándar para Pull-Off[12] fuerza de recubrimientos usando comprobadores portátiles de adhesión y la norma ASTM D3359 - 09e2 Métodos de prueba estándar para la medición de adherencia mediante la prueba de la cinta. [13]

En el desarrollo de este proyecto la prueba de adherencia se realizó bajo la norma ASTM D3359 - 09e2 Métodos de prueba estándar para la medición de adherencia mediante la prueba de la cinta, teniendo en cuenta la facilidad para llevarla a cabo sobre la superficie de las gemas, debido a la forma y tamaño que estas presentan.

3. METODOLOGÍA

La metodología experimental de este proyecto se divide en 5 etapas (figura 2), tal como se describe a continuación.

Figura 2. Metodología experimental del presente proyecto



Fuente: Autores

3.1. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DE LAS GEMAS

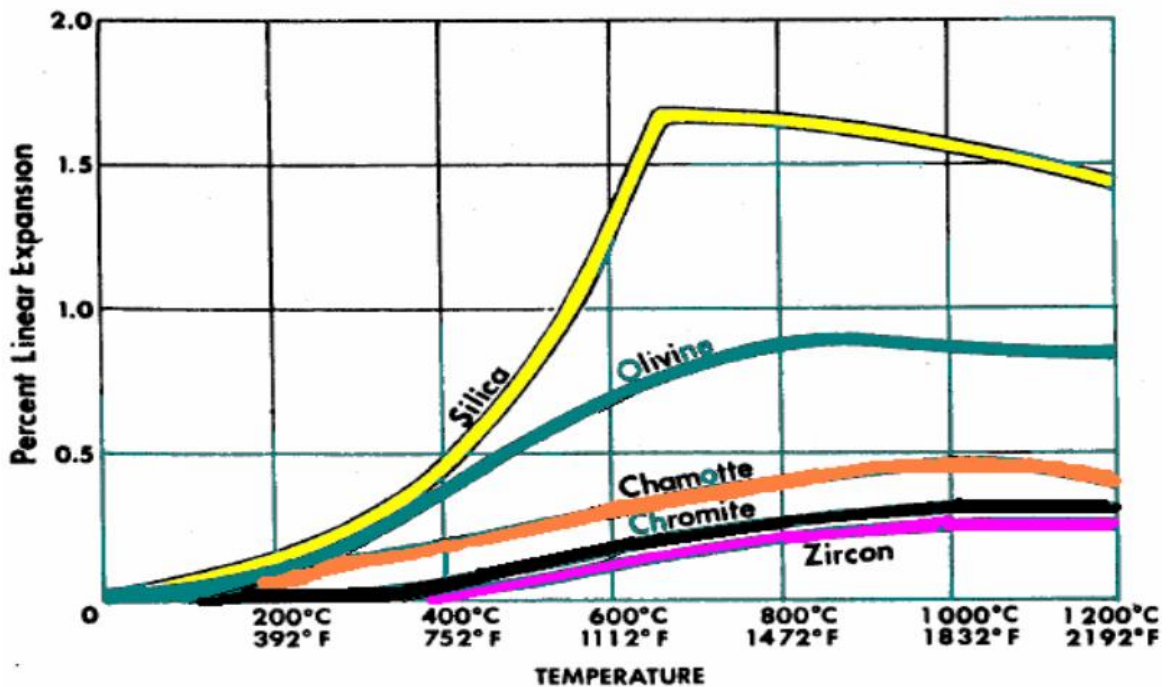
A continuación se describe los materiales usados como carga para la preparación de los recubrimientos.

- **Chamota**

Inicialmente se conto con ladrillos de chamota provenientes de ERECOS empresa de refractarios colombianos s. a, constituidos químicamente por 70% alúmina, 24% sílice y 6% de óxidos, que en etapas posteriores fueron triturados (trituradora de mandíbulas), molidos (molino de bolas) y tamizados (malla -200), con el fin de obtener un polvo de fina granulometría para la realización de la suspensiones (ver anexo A).

Para la selección de la chamota se tuvo en cuenta el comportamiento de diferentes arcillas al ser expuestas a altas temperaturas. Como se observa en la figura 3, la chamota es un tipo de arcilla caracterizada por su baja dilatación térmica y su alta refractariedad, esta no es la arcilla que presenta los menores porcentajes de dilatación, por debajo se halla la zirconita y la cromita, pero la chamota a diferencia de estas se encuentra como un recurso de mayor abundancia en nuestro país y con costos de fácil adquisición.

Figura 3. Expansión térmica de diferentes arenas



Fuente: P.P BUDNIKOV. The technology of ceramics and refractories. Ed The Massachusetts Institute of Technology. (1964)

- **Polvo de Grafito**

Se hizo uso de este material proveniente de la empresa quintal s. a, debido a las propiedades que deben presentar los componentes que serán usados como parte del recubrimiento de la gema, destacando su alta refractariedad, su gran resistencia al choque térmico, su bajo coeficiente de expansión térmica y adicional a esto, el conseguirlo de manera fácil y a costos módicos.

- **Piedras utilizadas en las pruebas preliminares**

Antes de realizar el recubrimiento de la esmeralda natural, se llevaron a cabo pruebas preliminares con piedras que presentan características similares a la esmeralda (ver anexo A), con el fin de encontrar las composiciones aproximadas de las suspensiones, de manera que fuese posible un total recubrimiento de la gema y adquirir experiencia en este proceso de recubrimiento. Las piedras usadas se eligieron de acuerdo a dos factores, su alta similitud con la esmeralda y su módico precio de venta, seleccionando las siguientes:

- Turmalina: Compuesta por una base cristalina de silicato de aluminio, el cual tiene incorporado sustancias adicionales como boro, litio, flúor, óxido de hierro, manganeso y otros elementos. [6]
- Granate: Cuenta con una amplitud química mayor que otras gemas, se refleja en la diversidad del color y otras propiedades físicas de sus distintas variedades. [6]
- Esmeraldas sintéticas.
- Esmeraldas Naturales (Muzo/ Boyacá)

3.2. PREPARACIÓN Y ESTUDIO REOLÓGICO DE LAS SUSPENSIONES SELECCIONADAS

3.2.1. Preparación de las suspensiones

Se prepararon diversas suspensiones con las dos materias primas y los solventes (agua y alcohol) a diferentes relaciones sólido/líquido (ver tabla 6). Algunas de las mezclas se acondicionaron con ácido cítrico con el fin de evaluar el efecto de la dispersión de la suspensión y ácido bórico, destacando su poder aglutinante, la disminución del coeficiente de dilatación térmica que genera y el efecto contrario al ácido cítrico que presenta en la suspensión.

Se hizo uso de dos aditivos con efecto contrario, de manera que exista mayor posibilidad de encontrar un recubrimiento que logre el cumplimiento del objetivo principal de este proyecto.

Los aditivos ácido cítrico y ácido bórico se usaron en una proporción del 5% del valor total de la mezcla.[11]

Tabla 6. Composición sólida y líquida de las suspensiones utilizadas.

Suspensiones	Composición
Chamota-Alcohol	64% Sólido
	36% Líquido
Chamota-Alcohol-Ácido cítrico	66.5% Sólido
	33.5% Líquido
Chamota-Alcohol-Ácido Bórico	65% Sólido
	35% Líquido
Chamota-Agua	63% Sólido
	37% Líquido
Chamota-Agua-Ácido cítrico	65 % Sólido
	35% Líquido
Chamota-Agua-Acido Bórico	64% Sólido
	36 % Líquido
Polvo de grafito-Agua	52% Sólido
	48% Líquido

Fuente: Autores

3.2.2. Estudio reológico de las suspensiones

La caracterización de las mezclas consistió en la determinación de su densidad y de las curvas reológicas, con el fin de evaluar el efecto de la composición y acondicionamiento de las suspensiones en su viscosidad y la calidad de los recubrimientos obtenidos a partir de ellas.

Densidad

Esta propiedad se determinó con la ayuda de una balanza de lodos (ver anexo A) que arrojaba los resultados de densidad en unidades de lb/gal para cada uno de las suspensiones. Fue necesario hacer uso de un agitador (ver anexo A) con el fin de mantener la suspensión en sus condiciones originales.

Viscosidad

Haciendo uso de un viscosímetro de cilindro concéntrico (ver anexo A), se obtuvieron los valores de viscosidad y esfuerzos de corte, usados para la realización de las curvas reológicas de las suspensiones.

Los ensayos de viscosidad y densidad se realizaron bajo la norma API 13B1 Procedimiento recomendado práctica estándar para fluidos de perforación de pozos de prueba de campo [14], teniendo en cuenta la similitud de las suspensiones de este proyecto con los lodos extraídos de campos de perforación, además la facilidad para arrojar resultados certeros por medio de estos equipos.

3.3. DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RECUBRIMIENTOS

Teniendo en cuenta las suspensiones seleccionadas como se observó en la tabla 6, se realizaron los recubrimientos sobre las gemas de esmeralda y las piedras granate, turmalina y esmeralda sintética (ver anexo B), las cuales presentan alta similitud con la esmeralda y tamaños que permiten la caracterización física del recubrimiento al estar sobre la superficie de la piedra, pues las esmeraldas adquiridas son de un tamaño demasiado reducido, dificultando el análisis del recubrimiento adherido.

3.3.1. Desarrollo de los recubrimientos

Con las suspensiones anteriormente preparadas, se obtuvieron los recubrimientos aplicados a las gemas de esmeralda sobre las cuales se centra este proyecto y

que en etapas posteriores fueron sometidas al tratamiento térmico del molde, sin embargo se hizo necesario realizar recubrimientos para piedras de turmalina por lo explicado anteriormente.

Las esmeraldas utilizadas en este proyecto se recibieron talladas y no fue necesario ningún tipo de procedimiento adicional para recubrirse.

3.3.2. Caracterización física de los recubrimientos

La calidad física de los recubrimientos se evaluó mediante un análisis óptico (morfología), medida de espesor y adherencia de los mismos.

Para el estudio óptico se utilizó un estereoscopio Olypnum SZ61 (ver anexo A), mientras que el espesor se determinó con ayuda de un calibrador, por otra parte la adherencia se evaluó siguiendo la norma ASTM D3359- 09e2 Métodos de prueba estándar para la medición de adherencia mediante la prueba de la cinta, en la cual se especifica realizar 6 cortes sobre el recubrimiento en posición vertical y horizontal formando una rejilla(ver fotografía 4), posteriormente se adhiere una cinta con las características mencionadas en la norma y se procede a retirarla de la superficie del recubrimiento, observando la cantidad de material desprendido. Este ensayo es determinante, debido a la necesidad de que el recubrimiento no se desprenda de la esmeralda en los diferentes procesos a los cuales estará sometida.

Fotografía 4. Prueba de adherencia según la norma ASTM D 3359



Fuente: Autores

3.4. PROCESO DE PRE-ENGASTE DE LAS GEMAS RECUBIERTAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MOLDE Y TRATAMIENTO TÉRMICO DEL MISMO

Anteriormente las gemas de esmeralda fueron recubiertas y en esta etapa pre-engastadas en un modelo en cera como se observa en la fotografía 5.

Fotografía 5. Esmeralda pre-engastada en el modelo en cera.



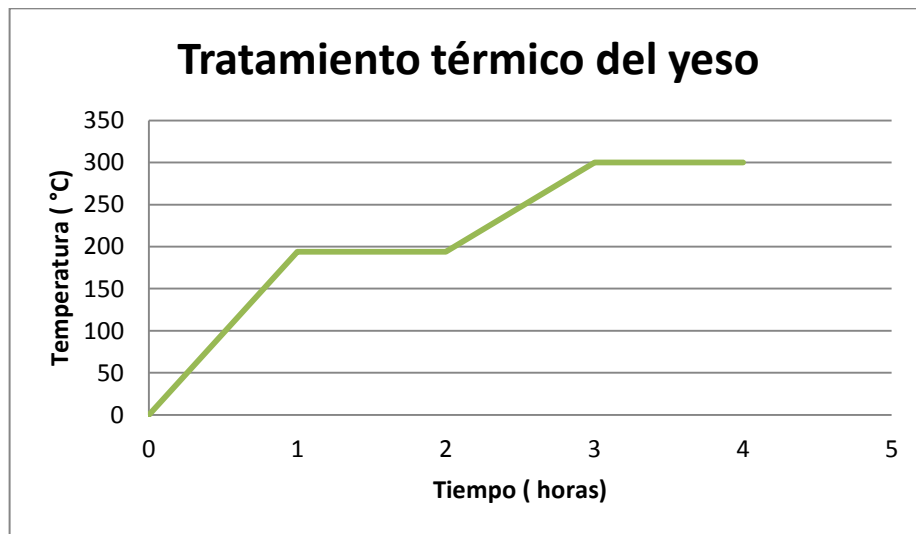
Fuente : Autores

Teniendo la esmeralda pre-engastada, se elaboró el molde compuesto de yeso, agua y una adición del 0,2% de espumante (ver fotografía 6), con el fin de aumentar la porosidad del molde y lograr una disminución en las temperaturas del tratamiento térmico de aproximadamente 300°C en comparación al ya existente que supera los 600°C. Este se lleva a cabo con un aumento escalonado de temperaturas hasta lograr un valor máximo de 300 °C , con unos tiempos de sostenimiento de mínimo una hora (ver figura 4), según lo establecido en un proyecto de grado realizado por los estudiantes, Yehimy Guerrero y Hernando Escobar.

El proyecto desarrollado por estos estudiantes, es parte del macro proyecto Innovación del método de gemas pre-engastadas en el proceso de microfundición, para su implementación en la joyería con las esmeraldas

colombianas, contribuyendo en sus investigaciones a los tratamientos térmicos del molde, a diferencia del presente proyecto que basa su investigación en la conservación de la gema de esmeralda como tal.

Figura 4. Tratamiento térmico del molde de yeso en el proceso de moldeo en cera pérdida.



Fuente: Autores

Fotografía 6. Molde de yeso con la esmeralda pre-engastada en el modelo de cera.



Fuente: Autores

3.5. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS GEMAS DE ESMERALDA LUEGO DE SER SOMETIDAS AL TRATAMIENTO TÉRMICO DEL MOLDE

Luego de ser retiradas las gemas del molde ya elaborado y sometido a la temperatura del tratamiento termico, fueron analizadas por medio de un estereoscopio OLYMPU SZ61 a 0.67x(aumento total 13.4), en donde se analizaron y compararon las estructuras obtenidas antes y después del tratamiento térmico, evidenciando cambios en propiedades .

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LAS SUSPENSIONES SELECCIONADAS

Al realizar la preparación de las diferentes suspensiones, se corroboró el efecto de los aditivos, presentándose mayor fluidez en las suspensiones que contenían ácido cítrico y mayor aglutinación en las que contenían ácido bórico.

4.1.1. Determinación de la densidad de las suspensiones seleccionadas

Se tomaron las medidas de densidad de las diferentes suspensiones, obteniéndose los resultados presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Densidades (lb/gal) de las suspensiones seleccionadas

Suspensiones	Densidad (Lb/gal)
Chamota – Alcohol	14,9
Chamota – Alcohol – Ácido Cítrico	16,5
Chamota – Alcohol – Ácido Bórico	15,4
Chamota – Agua	14,2
Chamota – Agua – Ácido Cítrico	15,5
Chamota – Agua – Ácido Bórico	14,7
Polvo de grafito – Agua	9

Fuente: Autores

Como se observa, las suspensiones que tienen como disolvente el alcohol, presentan valores de densidad altos en comparación con los que tienen como disolvente el agua; teniendo en cuenta que en la práctica al hacerse uso del alcohol como disolvente, era menor la cantidad requerida de este para la preparación de la mezcla respecto a los elaborados con agua.

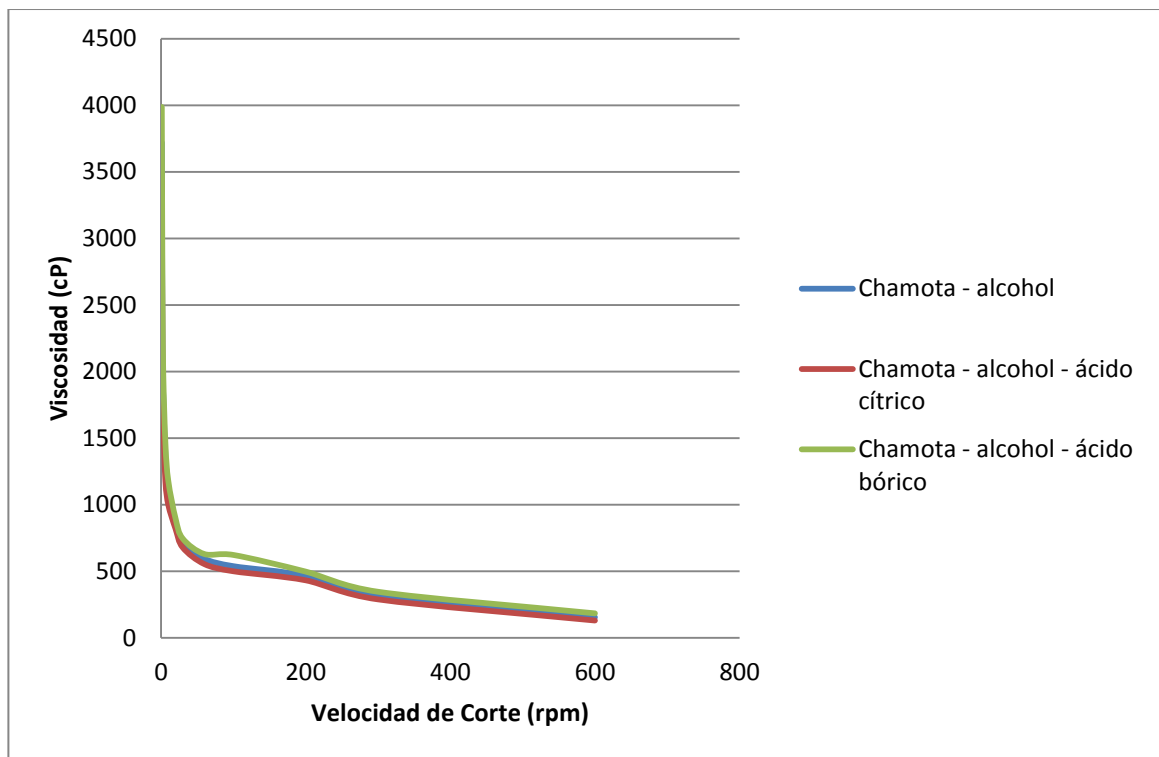
Como se evidencia, los valores de densidad establecen el porcentaje de sólidos que se encuentra presente en la suspensión, dando indicio de la posibilidad que las partículas de arcilla interactúen unas con otras, esta interacción entre

partículas también dará lugar a otros factores que influirán en la viscosidad que presenta esta misma.

4.1.2. Ensayo de viscosidad

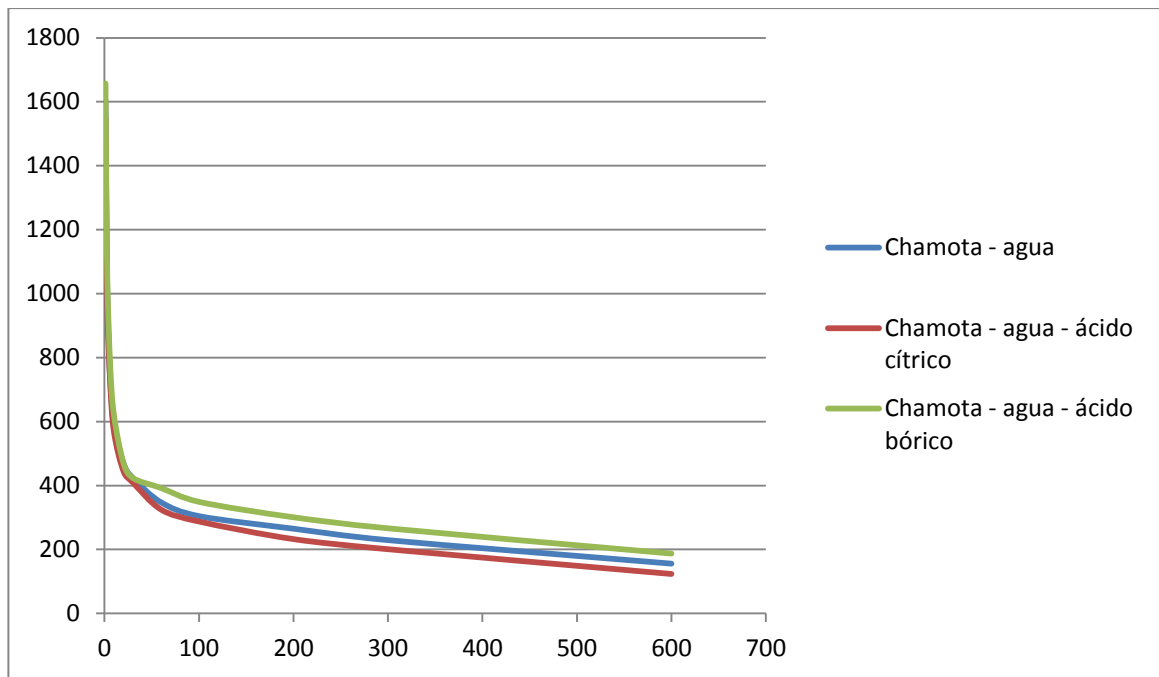
Con el fin de evaluar el comportamiento presentado por las diferentes composiciones de las suspensiones, se realizaron las tomas de viscosidad generadas a diferentes velocidades de corte, como se observa en el figura5 y 6.

Figura 5. Viscosidad (cP) vs velocidad de corte(r.p.m) de las suspensiones con alcohol como disolvente.



Fuente: Autores.

Figura 6. Viscosidad (cP) vs velocidad de corte(r.p.m) de las suspensiones con agua como disolvente.



Fuente: Autores

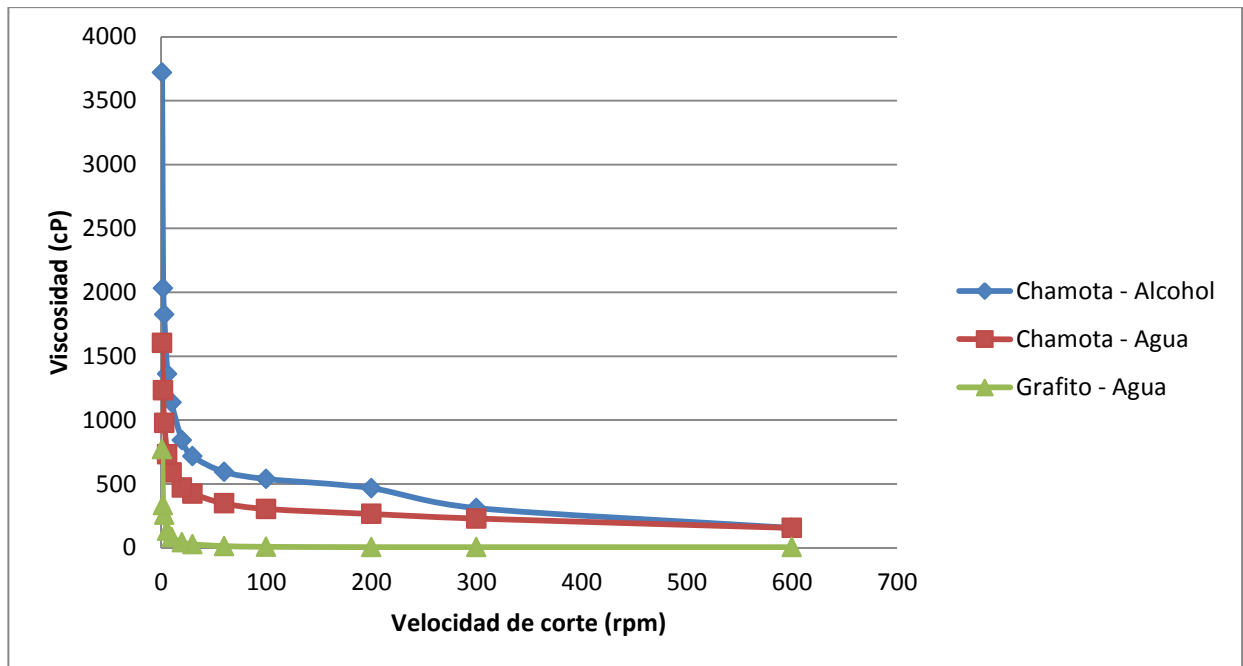
En la figura 5 y 6 se observa que a mayor velocidad de corte, se presentan menores valores de viscosidad. Al mismo tiempo existe un comportamiento común en ambas, sin importar el tipo de disolvente usado.

En orden de mayor a menor valores de viscosidad, se encuentra la suspensión con ácido bórico como aditivo, seguido por la suspensión sin uso de aditivos y en ultimo lugar la suspensión con ácido cítrico en su composición.

De este modo se corroboró el efecto de los aditivos mencionados. El ácido bórico por su capacidad aglutinante, mantienen las partículas firmemente unidas, impidiendo que la suspensión fluya con facilidad, de manera contraria, la adición de ácido cítrico incrementa la fuerza de repulsión entre las partículas de arcilla, haciendo que exista más distancia ó más espacio entre ellas; dicho espacio es ocupado por el disolvente que sirve como medio de lubricación entre las

partículas, facilitando que estas se “deslicen” unas sobre otras con mayor facilidad lo que da lugar a una menor viscosidad.

Figura 7. Viscosidad (Cp) vs velocidad de corte (r.p.m) de las suspensiones chamota-alcohol, chamota-agua, polvo de grafito-agua.



Fuente: Autores

Debido a que el efecto de los aditivos en las suspensiones es similar, independientemente del disolvente usado, se decidió comparar los valores de viscosidad de las suspensiones seleccionadas sin tener en cuenta los aditivos, de manera tal que solo se evidencie el efecto de la diferencia de carga y disolvente.

Como se observa en la figura 7, la suspensión chamota-alcohol presenta mayores valores de viscosidad en comparación a la suspensiones chamota- agua y polvo de grafito-agua.

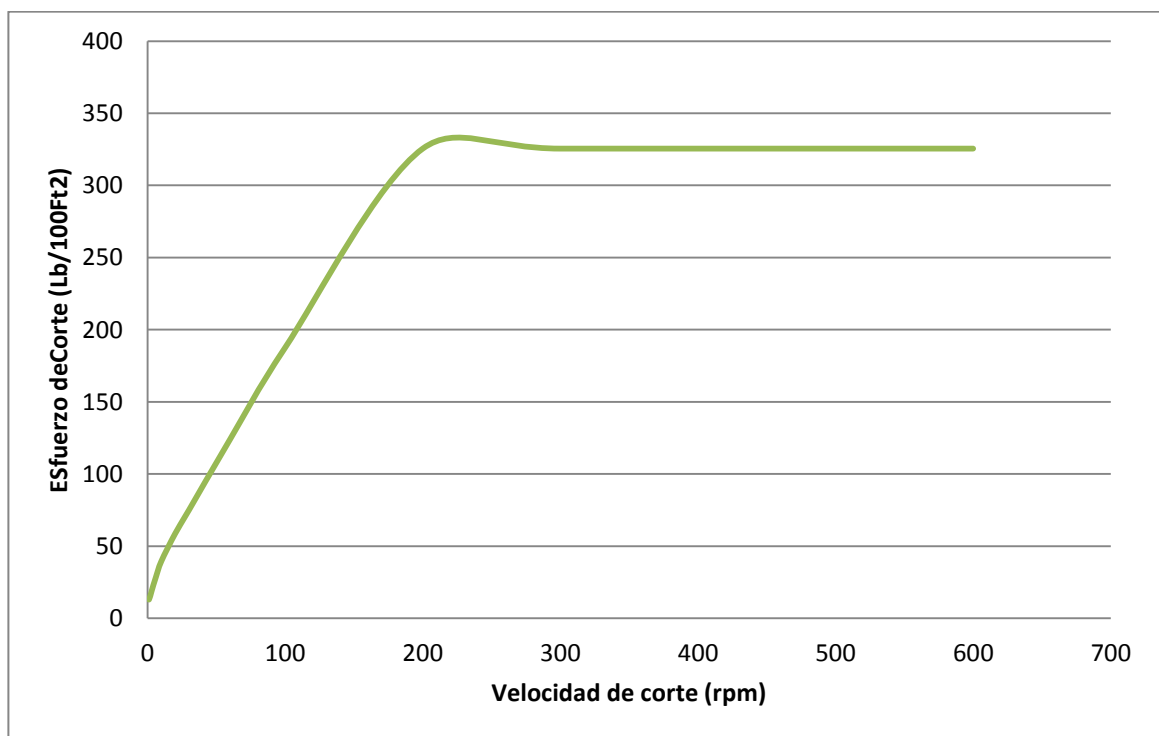
Los principales factores que tienen influencia sobre la viscosidad, son la concentración y la granulometría de las partículas, teniendo en cuenta que el último factor permanece constante en todas las suspensiones, se le atribuye la variación de la viscosidad, a la concentración de sólidos que se encuentran en la mezcla; a

mayor cantidad de sólidos, mayor posibilidad de interacción de las partículas, más resistencia a fluir y por ende menores valores de viscosidad.

Modelo reológico

Con el fin de encontrar un modelo reológico que se adaptará a las suspensiones usadas en este proyecto y teniendo que en cuenta que el comportamiento de estas es similar, se realizó la gráfica esfuerzo de corte vs velocidad de corte, tomando una sola suspensión (chamota-alcohol) como medio de caracterización de los diferentes fluidos.

Figura 8. Esfuerzo de corte (lb/100ft²) vs Velocidad de corte (rpm) de la suspensión chamota – alcohol.



Fuente: Autores

Analizando la figura 8, podemos clasificar este tipo de fluidos como no newtonianos, sus viscosidades no permanecen constantes al ser evaluadas en

diferentes esfuerzos de corte, adicionalmente se puede observar un mismo patrón de comportamiento de las diferentes suspensiones usadas, a medida que la velocidad y el esfuerzo de corte disminuyen, se evidencia un aumento en la viscosidad arrojada, permitiendo clasificarlo dentro del grupo de fluidos pseudoplásticos , obteniendo así, una gráfica de caracterización similar a la planteada en el fundamento teórico(figura 1) .

Evaluando la dependencia de la variación de la viscosidad con el tiempo, es posible clasificarlo como un fluido tixotrópico, caracterizado por una disminución en la viscosidad al ser aplicado un esfuerzo, como suele suceder en las suspensiones de arcillas.


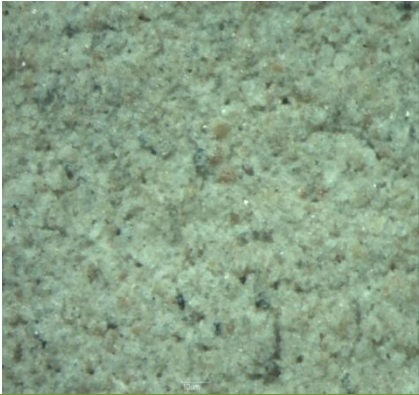


4.2. DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RECUBRIMIENTOS

Debido a la dificultad de realizar la caracterización física de los recubrimientos sobre gemas de esmeralda, se hizo uso de piedras con alta similitud a esta(ver anexo B), de manera adicional, las suspensiones que contenían ácido cítrico debido a su fluidez, presentaron dificultad en el recubrimiento de las piedras, al igual que la elaboradas con polvo de grafito-agua, pues la baja mojabilidad del polvo de grafito no permite la aglomeración de sus partículas con el disolvente.

4.2.1. Análisis óptico de los recubrimientos (morfología)

Con el fin de analizar la homogeneidad de los recubrimientos elaborados, se observó con la ayuda de un estereoscopio Olympus SZ61 (ver anexo A) a diferentes aumentos, obteniéndose los siguientes resultados (ver tabla 8).

Tabla 8. Morfología de los recubrimientos seleccionados

Recubrimientos	
Recubrimiento chamota-alcohol. 0.67x (13.4 aumentos totales) 	Recubrimiento chamota-alcohol. 4.5x (90 aumentos totales) 
Recubrimiento Chamota-alcohol-acido cítrico. 0.67x (13.4 aumentos totales) 	Recubrimiento Chamota-alcohol-acido cítrico. 1.5x (30 aumentos totales) 

Recubrimiento Chamota-alcohol-acido bórico.
0.67x (13.4 aumentos totales)



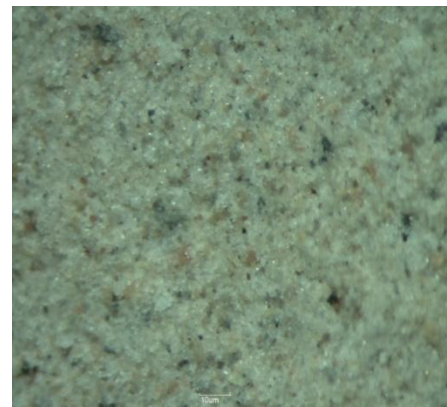
Recubrimiento Chamota-alcohol-acido bórico.
4.5x (90 aumentos totales)



Recubrimiento Chamota-agua. 0.67x (13.4
aumentos totales)



Recubrimiento Chamota-agua. 4.5x (90
aumentos totales)

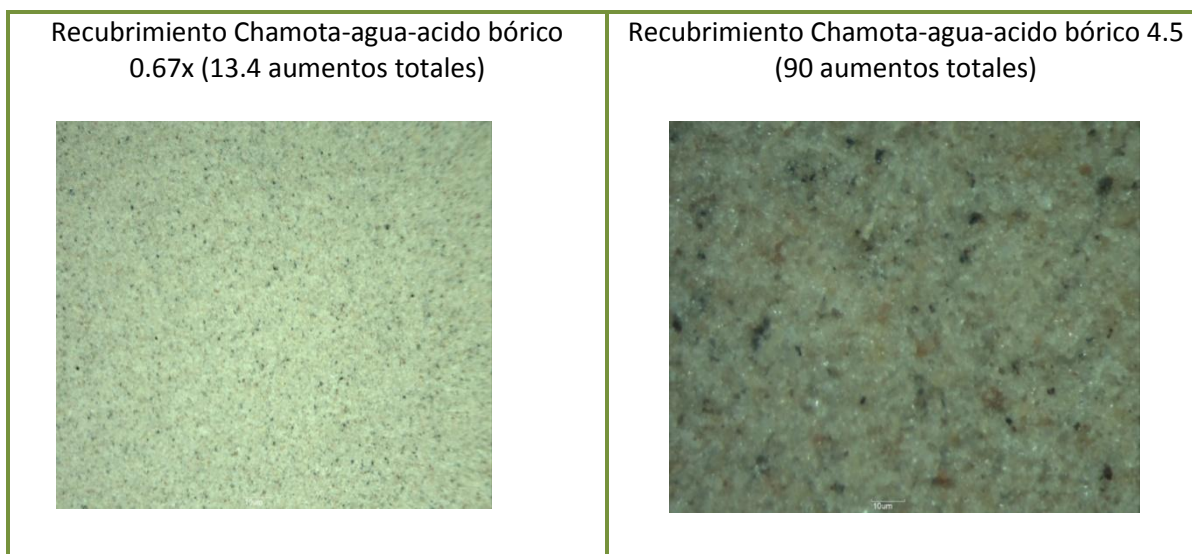


Recubrimiento Chamota-agua-acido cítrico
0.67x (13.4 aumentos totales)



Recubrimiento Chamota-agua-acido cítrico.
1.5x (30 aumentos totales)





Fuente: Autores

Según lo observado en la tabla 8, los recubrimientos elaborados con chamota sin aditivo, y chamota-acido bórico, presentan mayor homogeneidad en la distribución de sus granos sobre la superficie, teniendo en cuenta el poder aglutinante de la arcilla y el ácido bórico, que le permite mantener los granos más unidos y obtener mayor compactación de estos; los recubrimientos con adición de ácido cítrico debido a el poder dispersante de este, ocasionan poros sobre la superficie, por los espacios existente entre partícula y partícula de arcilla.

De acuerdo a lo analizado anteriormente, el recubrimiento elaborado con acido cítrico como aditivo, se descartó, no es conveniente debido a la presencia de porosidades que dejan la gema de esmeralda al descubierto, siendo puntos potenciales de daños y modificación de las propiedades que esta posee.

4.2.2. Espesor de los recubrimientos

Haciendo uso de un calibrador (Ver anexo A) se realizaron las medidas de los espesores de los recubrimientos como medio de caracterización física, exceptuando el elaborado con ácido cítrico como aditivo, pues su uso fue descartado en la etapa anterior de análisis óptico, de tal manera se obtienen los datos presentados en la tabla 9.

Tabla 9. Espesor de los recubrimientos

Recubrimiento	Espesor (mm)
Chamota-alcohol	0.7
Chamota-alcohol-ácido bórico	0.7
Chamota-agua	0.5
Chamota-agua-ácido bórico	0.6
Polvo de grafito-agua	-

Fuente: Autores


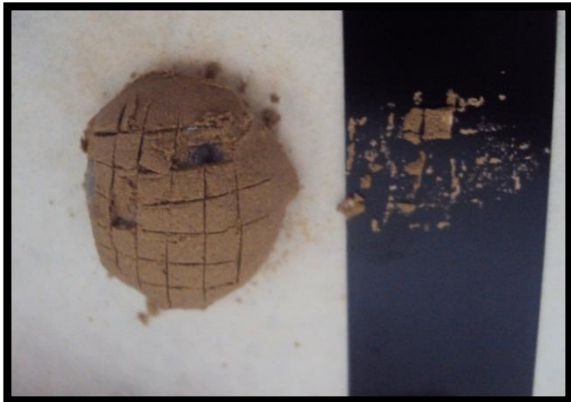

El espesor de los recubrimientos depende en gran medida de la cantidad de disolvente y la fluidez de la suspensión como tal, en este caso, los recubrimientos con alcohol como disolvente presentan mayores espesores, en ellos era menor la fluidez de la suspensión y por lo tanto se iba adhiriendo en capas de mayor grosor que los elaborados con agua como disolvente.

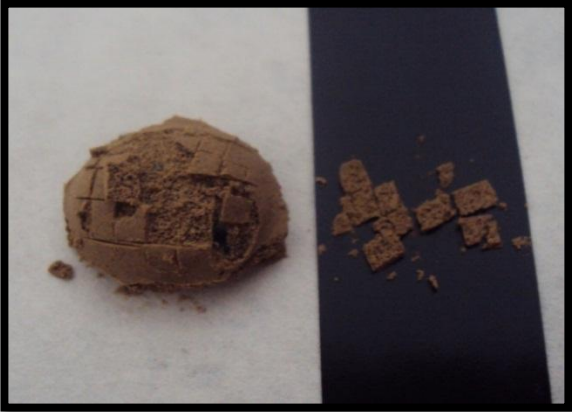
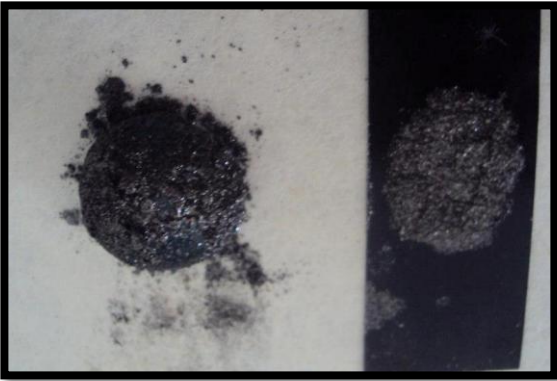
El espesor del recubrimiento polvo de grafito-agua no pudo ser determinado debido a su poca capacidad para recubrir, a medida que transcurría el tiempo, era menor la cantidad de recubrimiento presente en la superficie de la piedra.

4.2.3. Ensayo de adherencia

La clasificación del grado de adherencia se hizo a través de una comparación con los patrones proporcionados por la norma ASTM D3359- 09e2 Métodos de prueba estándar para la medición de adherencia mediante la prueba de la cinta (Anexo C), de acuerdo a esto los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Ensayo de adherencia recubrimientos seleccionados

Recubrimientos	Fotografía	Clasificación según la norma ASTM D 3359
Chamota - alcohol		<p>Clasificación: 4B Porcentaje de área removida: aproximadamente 4%</p>
Chamota – alcohol – ácido bórico		<p>Clasificación: 2B Porcentaje de área removida: aproximadamente 15%</p>
Chamota - agua		<p>Clasificación: 3B Porcentaje de área removida: aproximadamente 5%</p>

<p>Chamota – agua – ácido bórico</p>		<p>Clasificación: 2B Porcentaje de área removida: aproximadamente 25%</p>
<p>Polvo de grafito - agua</p>		<p>Clasificación: 1B Porcentaje de área removida: aproximadamente 60%</p>

Fuente: Autores

Como se observa, los recubrimientos elaborados con alcohol como disolvente presentan menor porcentaje de área de recubrimiento removida a diferencia de los desarrollados con agua.

Uno de los factores que se encuentra principalmente relacionado con la adherencia es la tensión superficial del disolvente, si el disolvente tiene una tensión superficial baja, moja la superficie de la piedra y facilita la formación de la película. Si la formación de la película es buena hay mayor humectación de la superficie, lo que es esencial para una buena adherencia. Esto se debe a que las moléculas se

aproximan lo suficiente para que se formen enlaces de adherencia (enlaces intermoleculares entre la superficie y las moléculas de recubrimiento).

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 10, se descartó el uso de los recubrimientos que tenían agua como disolvente debido a que su baja adherencia ocasiona la pérdida de gran parte del recubrimiento, dejando la esmeralda expuesta en el momento de someterse a las temperaturas del tratamiento térmico del molde.

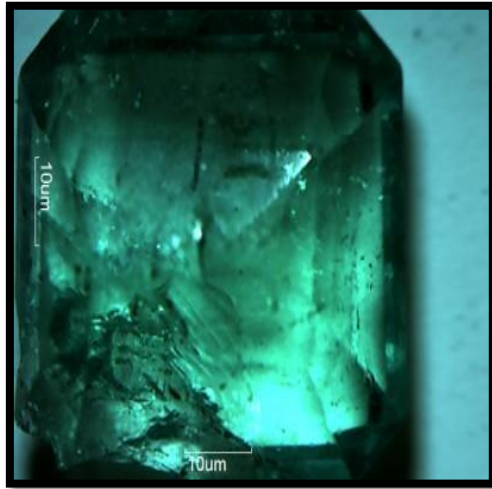
4.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECUBRIMIENTOS EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS ESMERALDAS

Los recubrimientos utilizados para aplicar sobre la esmeralda y someterla al tratamiento térmico del molde fueron: chamota-alcohol-acido bórico y chamota-alcohol, debido a que en los ensayos anteriores se explico el porque se descartaba el uso de los recubrimientos elaborados con acido cítrico como aditivo y agua como disolvente.

4.3.1. Recubrimiento Chamota – alcohol – ácido bórico

Inicialmente se eligió una esmeralda natural que al observarla en el estereoscopio presentaba en su interior inclusiones y grietas prolongadas. En la fotografía 7 se muestra la estructura de la gema antes de ser sometida al tratamiento térmico del molde y en la fotografía 8 después de ser expuesta a las temperaturas de este.

Fotografía 7.Esmeralda natural antes del tratamiento térmico



Fotografía 8. Esmeralda natural después del tratamiento térmico



Fuente: Autores

Se analizó la estructura de la gema con el fin de evidenciar los cambios ocasionados, encontrando mayor número de grietas no solo en la zona agrietada inicialmente, si no en todo su interior. Realizando un análisis de lo ocurrido, se le atribuye el agrietamiento total al sector que ya presentaba esta clase de defectos, siendo un concentrador potencial de otro tipo de heterogeneidades, adicionalmente es posible que el ácido bórico reaccione con los elementos internos de la esmeralda (inclusiones, contaminación, láminas de sal, entre otros), disminuyendo la resistencia que esta puede presentar en determinadas condiciones.

Por lo anterior este recubrimiento es descartado por no lograr la protección de la gema durante el tratamiento térmico del molde.

4.3.2. Recubrimiento Chamota – alcohol

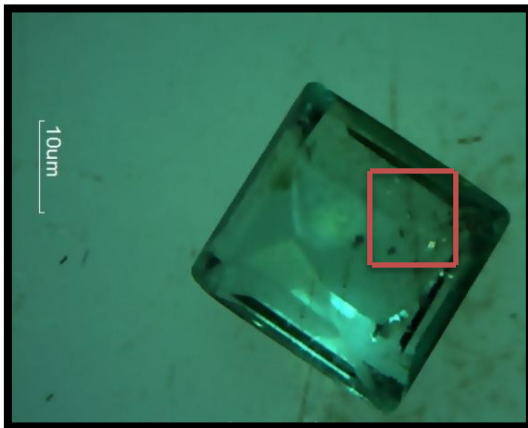
Se realizaron dos pruebas con esmeraldas de diferente calidad e igual recubrimiento con el fin de evaluar la influencia de la calidad de la gema en su resistencia.

- Primera prueba

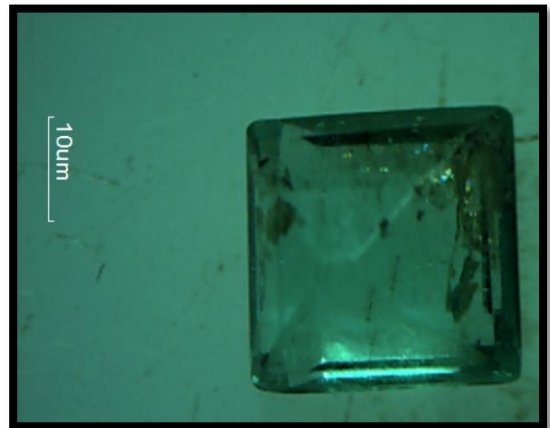
Destacando la capacidad de recubrir de manera homogénea, la alta adherencia presentada y la no presencia de ácidos que posiblemente afecten la gema, se evaluó la resistencia de este recubrimiento sobre una esmeralda natural de mejor calidad a la usada anteriormente,

En la fotografía 9 se muestra la esmeralda antes de ser sometida al tratamiento térmico del molde, destacando en un cuadro rojo la zona de agrietamiento inicial y en la fotografía 10 la gema después de ser expuesta a las temperaturas de este.

Fotografía 9.Esmeralda natural antes del tratamiento térmico



Fotografía 10. Esmeralda natural después del tratamiento térmico



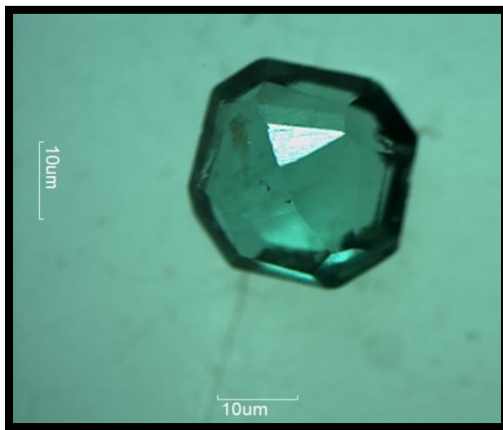
Fuente: Autores

En la observación posterior al tratamiento térmico (Fotografía 10), fue evidente un aumento de grietas en la zona que contaba con este tipo de defectos inicialmente, de manera poco esperada la otra zona interna que presentaba homogeneidad en su estructura la conservo sin ningún tipo de daño, confirmando la atribución del aumento de agrietamiento en la fotografía 8 a la presencia de ácidos que generan posibles reacciones con la estructura interna de la esmeralda.

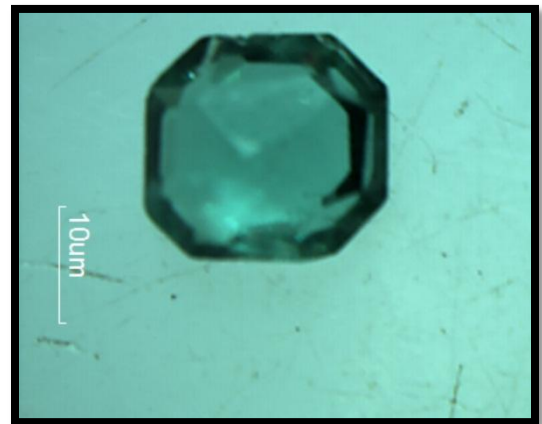
- Segunda prueba

Evaluando lo ocurrido en la prueba anterior y destacando la gran resistencia a altas temperaturas del recubrimiento chamota- alcohol, se decidió hacer uso de una gema con una pureza superior a las ya ensayadas, teniendo control de la no presencia de grietas

Fotografía 11. Esmeralda natural antes del tratamiento térmico



Fotografía 12. Esmeralda natural después del tratamiento térmico



Fuente: Autores

Como procedimiento consecutivo a la realización del tratamiento térmico, se observó que la esmeralda conservaba su estructura, homogeneidad y sus características que le confieren su alto valor en el mercado como brillo y color, a pesar de haber sido sometida a las temperaturas ya mencionadas, lo cual permitió consolidar este recubrimiento como el de mejor desempeño.

5. CONCLUSIONES

- Por medio de la caracterización reológica, fue posible clasificar las suspensiones seleccionadas como fluidos no newtonianos y de comportamiento pseudoplástico; teniendo en cuenta variables como velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad.
- Las suspensiones con mayores valores de viscosidad lograron un recubrimiento homogéneo de la gema sin zonas desprotegidas.
- Los recubrimientos elaborados con ácido cítrico como aditivo, presentaron un bajo rendimiento debido a la alta fluidez de la suspensión, baja adherencia del recubrimiento y la presencia de porosidades, lo cual no lo hace apto para resistir las temperaturas del tratamiento térmico del molde.
- Los recubrimientos desarrollados con agua como disolvente presentaron bajos valores de adherencia, impidiendo su uso, pues la gema queda expuesta sin suficiente protección durante el tratamiento térmico del molde.
- Los recubrimientos con ácido bórico como aditivo presentaron alta adherencia y homogeneidad en su morfología, sin embargo no es viable su uso por las posibles reacciones que este tiene con las inclusiones internas de la gema.
- El recubrimiento chamota - alcohol presentó el mejor desempeño a la hora de proteger la esmeralda, evidenciando los mayores valores de adherencia y espesor que permitieron establecer una alta resistencia a las temperaturas del tratamiento térmico del molde y la conservación de sus propiedades a nivel de mercado como color, brillo y ausencia de fracturas.

6. RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar una clasificación previa de las esmeraldas que serán sometidas al tratamiento térmico del yeso evitando la presencia de zonas de agrietamiento que pueden ser fuente de aparición de nuevas heterogeneidades.
- Para resultados de mayor confiabilidad y facilidad en el proceso se sugiere encontrar formas diferentes para recubrir la gema, evitando posibles errores al realizar el proceso de forma manual.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


- [1]. VICTOR MANUEL CARRILLO LOMBANA. Esmeraldas en Colombia patrimonio geológico de la humanidad. 1° Edición. Edit Sociedad Colombiana de geología (2009)
- [2].EGOR GAVRILENKO. Tesis doctoral, Esmeraldas de los Urales (Rusia): Condiciones deformación y propiedades características. Universidad Politécnica de Madrid (2003)
- [3]. ALEJANDRO CUELLAR. Modulo de engaste. Tipos de engaste. (17/05/2008). Disponible en la página web: moduloengaste.blogspot.com/2008/05/garras.html
- [4]. JORDI CALVO CARBONELL. Pinturas y recubrimientos Introducción a su tecnología. Edit. Díaz de Santos (2009)
- [5]. P.P BUDNIKOV. The technology of ceramics and refractories Edit. The Massachusetts Institute of Technology (1964)
- [6].CORNELIS KLEIN. Manual de MineralogíaVol 2.4° Edición. Basado en la obra de J. D. DANA. Edit.Reverte S.A. (2003)
- [7]. ENRIQUE SCHWEIGGER. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. Edit. Diaz de Santos (2005)
- [8]. RODRIGO MORENO BOTELLA. Reología de suspensiones cerámicas. Vol 17 Biblioteca de Ciencias. Edit Consejo Superior de Investigaciones Científicas. CSIC- Dpto. de Publicaciones. (2005)
- [9]. RP CHHABRA & JF RICHARDSON. Non- newtonian flow in the process industries. Fundamentals and Engineering Applications. Edit Butterworth–Heinemann. (1999)
- [10]. ANÓNIMO. Controlling refractory coatings.MODERNCASTING.(Marzo2010).
- [11]. JANETH ACELAS SALAZAR, JAIRO ANDRES GÓMEZ PEÑA. Tesis de pregrado. Desarrollo de refractarios aislantes de mullita a partir de arcillas caoliniticas usando la tecnología adaptada del concreto aireado.(2009)
- [12].AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.ASTM D4541 (Reapproved 2009)

[13]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. ASTM D3359 (Reapproved 2009)

[14]. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids. API 13B1 (2° Edición 1997).

ANEXOS

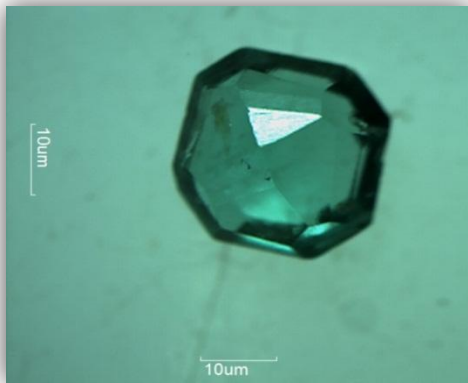
ANEXO A

MATERIALES	
	Chamota
	Ácido cítrico
	Ácido bórico

	<p>Grafito</p>
	<p>Turmalinas</p>
	<p>Granate</p>



Esmeraldas sintéticas



Esmeraldas naturales



Cinta usada para realizar la prueba de adherencia.

EQUIPOS



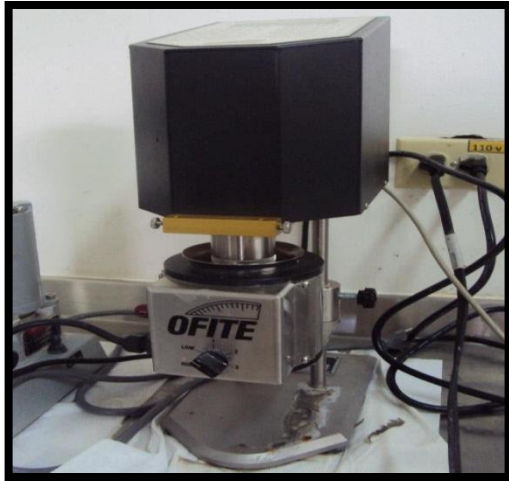
Estereoscopio OLYMPUM. SZ61.
Model SZ2 – ILST
100-120/220-240 V
0,15 / 0,1 A 50/60 Hz



Agitador Fann
Fann Instrument
Company Houston Texas



Balanza de lodos



**Viscosímetro de cilindro concéntrico
OFITE**

OFI Testingequipmentinc
Houston, Texas USA
Part No 130 – 76
Serial No 11 1471 – 003
Model – 900 Viscometer

ANEXO B

	<p>Piedras sintéticas recubiertas para ser sometidas a pruebas preliminares.</p>
	<p>Granates recubiertos con las suspensiones a base de chamota, pruebas iniciales de adherencia,</p>
	<p>Granates recubiertos para ser sometidos a las temperaturas necesarias en el tratamiento térmico del yeso.</p>

ANEXO C

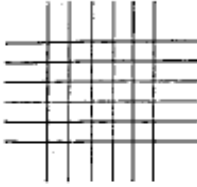
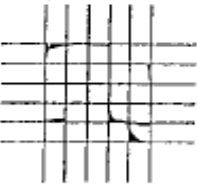


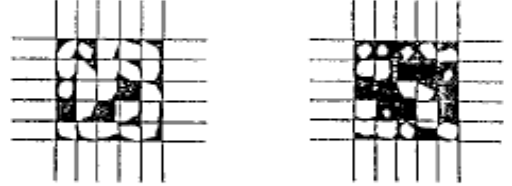
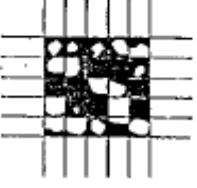
CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT AREA REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

FIG. 1 Classification of Adhesion Test Results