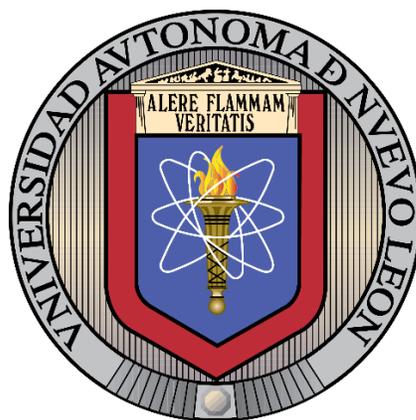


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



**ESTABILIZACIÓN DE TURQUESA GRADO GIS  
EMPLEANDO SONOQUÍMICA**

Por:

**LQI JUAN DE DIOS RUIZ JARAMILLO**

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS con  
Orientación en Química de los Materiales

Junio, 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



ESTABILIZACIÓN DE TURQUESA GRADO GIS  
EMPLEANDO SONOQUÍMICA

Por:

LQI JUAN DE DIOS RUIZ JARAMILLO

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS con  
Orientación en Química de los Materiales

Junio, 2024

**ESTABILIZACIÓN DE TURQUESA GRADO GIS  
EMPLEANDO SONOQUÍMICA**

**Aprobación de la Tesis:**

---

**DR. TOMÁS CONSTANTINO HERNÁNDEZ GARCÍA**

Presidente

---

**DR. BORIS ILDUSOVICH KHARISSOV**

Vocal

---

**DRA. SALOMÉ M. DE LA PARRA ARCINIEGA**

Secretario

---

**DRA. MARÍA ELENA CANTU CARDENAS**

Sub-Directora de Estudios de Posgrado

**ESTABILIZACIÓN DE TURQUESA GRADO GIS  
EMPLEANDO SONOQUÍMICA**

**Revisión de Tesis:**

---

**DR. TOMÁS CONSTANTINO HERNÁNDEZ GARCÍA**

Director

---

**DR. FRANCISCO JAVIER GARZA MÉNDEZ**

Co-Director

---

**DRA. MARÍA IDALIA DEL CONSUELO GÓMEZ DE LA FUENTE**

Revisor

---

**DRA. SALOMÉ DE LA PARRA ARCINIEGA**

Revisor

---

**DR. BORIS ILDUSOVICH KHARISOV**

Revisor

## DEDICATORIA



Cuando pienso en una dedicatoria, en realidad se vienen un montón de personas a mi mente y me cuesta organizar mis palabras porque hay tanto que quiero decir.

No creo que haya persona más feliz de que obtenga mi grado de maestro en ciencias (incluyéndome) que mi madre, Patricia, por lo que creo es muy adecuado iniciar esta dedicatoria con ella. Jamás me faltó su gran amor incondicional, nunca me faltes.

Este grado, así como mi licenciatura me tomó mucha perseverancia y esfuerzo cualidades que me hacen recordar a mi padre, José Pablo. Estoy orgulloso de ti padre, gracias por convertirte en una mejor persona.

Esta tesis también la dedico a mi abuelo Juan de Dios, desde siempre me ha hecho reír y por más gruñón y quejoso que es así lo amo, cuando sea grande quiero ser como él.

Ahora bien, esta tesis va para los tarugos, los forzados, a la familia LQI, a los de meta, los mandalorianos, a Danny Vallejo, al Jasso, a Abigail; resumidamente a todos mis amigos. La vida del científico es algo dura y fría, pero ustedes lo hacen todo más llevadero. Gracias por estar ahí.

Gracias también a ti Alexandra.

Finalmente, le dedico esta tesis a la Wera, mi hermosa mascota que amo tanto y desde que tengo memoria me ha acompañado en mi regazo, apoyándose silenciosamente, dormida, pero siempre conmigo.

Nos vemos en Francia.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al CONAHCYT por la beca otorgada durante la realización de mis estudios.

Le doy mis más profundos agradecimientos al Dr. Francisco Garza y al Dr. Tomás Hernández por su valiosa ayuda, orientación y esfuerzo durante todo el proyecto de tesis.

A la Facultad de Metalurgia en la Universidad Autónoma de Coahuila, por recibirme en el intercambio académico, impartirme sus módulos y permitirme usar los equipos de dureza y tribometría, así como su orientación y apoyo durante las pruebas hechas.

Agradecemos al Sr. Carlo Muñiz por confiar en nosotros y proveernos las turquesas necesarias para desarrollar este proyecto industrial.

## FINANCIAMIENTO

El presente trabajo de investigación fue financiado:

Por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) con una beca de investigación para el proyecto titulado: **“Estabilización de turquesa grado gis empleando sonoquímica” (No. De Folio: 03-91691QMT-22-097).**

El apoyo brindado a la investigación científica de este trabajo se llevó a cabo por parte del Laboratorio de Materiales I ubicado en el Centro de Laboratorios Especializados, UANL bajo la dirección de mi director de tesis el Dr. Tomás C. Hernández, así como de mi co-director de tesis el Dr. Francisco J. Garza.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 La turquesa	1
1.2 La turquesa en la minería	2
1.3 Estabilización de turquesa	4
1.4 Estudio del proyecto	6
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	8
2.1 Marco teórico	8
2.2 Análisis crítico	15
2.3 Aportación científica	16
2.4 Hipótesis	16
2.5 Objetivos	16
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	18
3.1 Análisis previos a la estabilización	18
3.1.1 Análisis de difracción de rayos X	18
3.1.2 Análisis de fluorescencia de rayos X	18
3.2 Estabilización de turquesa grado gis	19
3.3 Análisis posteriores a la estabilización	20
3.3.1 Impacto tipo Charpy	20
3.3.2 Microdureza	21
3.3.3 Tribometría	22
3.3.4 Análisis por microscopía electrónica de barrido	24
3.4 Disposición de residuos generados	24
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	25
4.1 Difracción de rayos X	25
4.2 Fluorescencia de rayos X	29

4.3 Estabilización de turquesa grado gis	32
4.4 Impacto tipo Charpy	33
4.5 Microdureza	36
4.6 Tribometría	39
4.7 Análisis de morfología SEM	41
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b>	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>47</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
Tabla 1. Valores de tensión obtenidos por Latif <i>et al.</i>	9
Tabla 2. Índices de Miller ( $h,k,l$ ) de los planos comparados	27
Tabla 3. Lecturas de impacto en Joules	35
Tabla 4: Resultados de los ensayos de VH	38
Tabla 5: Resultados de los ensayos de tribometría	40

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1: Cabujón de turquesa persa y estabilizada	3
Figura 2: Esquema de la propagación de la fractura en materiales frágiles	7
Figura 3. Gráficas de tensión axial por Ghazesade <i>et al.</i>	11
Figura 4. Dureza de Brinell en mezcla de resina-epiclorhidrina y fibra natural de panal de abeja	12
Figura 5: Mapa de tenacidad a la fractura por Stephan Sprenger	14
Figura 6: Resultados de DRX en 4 gemas individuales de turquesa	26
Figura 7: Difractómetro de turquesa obtenida de la base de datos	28
Figura 8. Resultados de <i>FRX</i> en 4 muestras del polvo	30
Figura 9. Histograma de los ensayos de impacto tipo Charpy	34
Figura 10: Imagen x100 de turquesa estabilizada.	41
Figura 11: Imagen x5000 de turquesa estabilizada	42
Figura 12: Imagen x10,000 de turquesa estabilizada	42
Figura 13: Imagen x1,000 de turquesa estabilizada, enfocando una esfera de especie desconocida	43
Figura 14: Imagen x1,000 de turquesa estabilizada, enfocando esferas aglomeradas	44

## NOMENCLATURA

<b>Abreviatura</b>	<b>Definición</b>
ZP	Proceso Zachery
U	Coeficiente de energía almacenada
$\sigma$	Tensión aplicada
E	Módulo de Young
ED-XRF	Fluorescencia dispersiva de rayos X
g	Gramos
kg	Kilogramos
mL	Mililitros
cm <sup>2</sup>	Centímetros al cuadrado
UCS	Resistencia a la compresión uniaxial
K-PVAc	Caolinita-Polivinil acetato
K-MBA	Caolinita-poli(metacrilato de metilo-co-acrilato de butilo)
K-STBA	Caolinita- poli(estireno-co-acrilato de butilo)
kPa	Kilopascales
HB	Dureza de Brinell
GIC	Tenacidad a la fractura modo 1
DGEBA	Diglicidil-éter de bisfenol A
BSE	Electrones retrodispersados
DRX	Difracción de rayos X
FRX	Fluorescencia de rayos X
PSI	Libra sobre pulgada cuadrada
mm	Milímetros
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales

HV	Dureza de Vickers
F	Carga aplicada
d	Diámetro promedio de la huella
cm	Centímetro
V	Volumen
K	Constante
$F_N$	Fuerza normal
L	Distancia recorrida
H	Dureza
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
TQI	Índice de Calidad de Turquesa
E	Energía
J	Joules

## RESUMEN

LQI Juan de Dios Ruiz Jaramillo

Fecha de graduación: Junio 2024

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ciencias Químicas

**Título del estudio: ESTABILIZACIÓN DE TURQUESA GRADO GIS EMPLEANDO SONOQUÍMICA**

**Número de páginas: 67**

**Candidato para el grado de Maestría en ciencias con Orientación en Química de Materiales**

**Área del Estudio:** Química de Materiales y propiedades avanzadas de los materiales.

**Propósito y Método de estudio:** El objetivo central de este estudio es la estabilización mecánica de la turquesa de grado gis, es decir, turquesa no densificada. Se empleó una estrategia metódica y multifacética. Primero, se utilizó una mezcla de polímeros, seleccionados por su capacidad para interactuar con la estructura de la turquesa. A esta mezcla se le añadió un catalizador químico en una proporción del 10% de la cantidad habitual. Este catalizador fue esencial para iniciar la estabilización. Posteriormente, se introdujo el ultrasonido de baja frecuencia como catalizador final. El ultrasonido, con su capacidad para generar vibraciones de alta energía, complementó eficazmente al catalizador químico. Para garantizar la penetración de la mezcla de polímeros en la turquesa, se recurrió al vacío. Este permitió extraer el aire de la estructura mesoporosa de la turquesa, creando espacio para que el polímero se infiltrara. Luego, se aplicó más vacío, seguido de una presión hidrostática de 40 psi, manteniendo el polímero dentro de la turquesa. Finalmente, se llevó a cabo el fraguado con ultrasonido, proporcionando una contracción en el polímero que contribuyó a la estabilización de la turquesa.

**Contribuciones y conclusiones:** La contribución más significativa de este estudio es el desarrollo de un proceso de manufactura a escala que permite estabilizar la turquesa de grado gis. El resultado es un material que, visualmente, es similar a una gema. A diferencia de las gemas, que suelen tener bordes curvos y suaves, la turquesa estabilizada tiene el color y la resistencia mecánica necesarios para ser pulida y emular una gema. Además de su apariencia, la turquesa estabilizada tiene un valor añadido. A diferencia de las gemas, que son susceptibles a las manchas, la turquesa estabilizada es resistente a este problema, manteniendo su belleza y atractivo por más tiempo. En conclusión, este estudio ha demostrado que es posible estabilizar mecánicamente la turquesa de grado gis utilizando una combinación de polímeros, catalizadores y ultrasonido. El resultado es un material estéticamente agradable, duradero y resistente a las manchas. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para la industria de la joyería y abren nuevas posibilidades para el uso de la turquesa.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_



## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 La turquesa

La turquesa es un mineral natural de composición química  $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  cuya coloración se encuentra en un estrecho rango de longitud de onda de 490–500 nm [1-3]. El color azul turquesa es desarrollado por el catión  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$  y cambia a color verde por sustitución de iones  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$  [4]. El mineral de turquesa posee una estructura criptocristalina, se compone de grupos muy finos y orientados aleatoriamente de cristales pseudo-rombohédricos apilados paralelamente [1]. En términos geológicos, un arreglo criptocristalino (del griego *kryptos* “oculto” y *krystallinos* “hecho de hielo”) es aquel que dentro del rango de la luz visible es un monolito, pero bajo una gran resolución en realidad consta de pequeñas partículas aglomeradas con poros menores al tamaño de las partículas.

La turquesa es un mineral relativamente estable; esto es, no cambia su coloración con el paso del tiempo; sin embargo, el constante contacto con el cuerpo humano la va manchando poco a poco, oscureciendo un poco su coloración y brillo debido a que es porosa; sus propiedades dependen del

tamaño de grano y el grado de porosidad afecta el color y la durabilidad. Cuantos más poros, menor es la durabilidad y la turquesa absorbe agua con facilidad, provocando decoloración o dispersión de la luz de los poros [1].

## **1.2 La turquesa en la minería**

En la región comprendida entre el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos, la minería es la industria primaria por excelencia. Las minas y los asentamientos mineros han otorgado a esa vasta región mucho de su carácter sociohistórico y cultural distintivo. La actividad minera es muy importante en todos los niveles de organización comercial entre dicha región y el resto del mundo, exportando oro y mineral turquesa principalmente a Europa y China. Entre la larga lista de minerales obtenidos en el norte, la turquesa sobresale como elemento de importancia. De las minas se extrae la turquesa con diferentes grados de dureza en la escala de Mohs, cuando es mayor que 5, se considera al mineral como una gema; ya que, es lo suficientemente dura y tenaz para darle forma mediante procesos de desbaste y pulido, sin embargo, una parte del mineral es grado gis; esto es, que su dureza está entre 2 y 3 de la escala de Mohs, por lo que carece prácticamente de tenacidad. El término gis significa precisamente que es fácil de “desmoronar”, debido a la falta de densidad y cohesión. Ya que la principal aplicación del mineral turquesa es ornamental, sólo se pueden comercializar las gemas.

La figura 1 muestra una gema pulida (cabujón) de turquesa persa [1]. Una cara de la gema muestra un lado muy liso sin porosidades (a), mientras que la otra cara muestra pequeñas cavidades (b), así como una gran cavidad en su base.

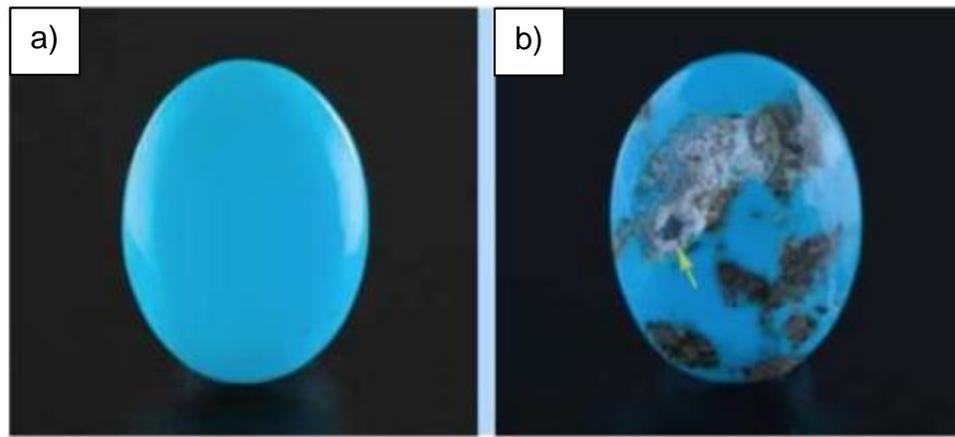


Figura 1. (a) Cabujón de turquesa de “persa” sin revelar ningún tratamiento. (b) Una gran cavidad visible en la base está parcialmente rellena con un polímero transparente y se puede ver un residuo blanquecino en el resto de la cavidad; la flecha apunta a un pequeño bulto transparente del polímero, a través del cual se puede ver el color azul de la turquesa.

El tratamiento que se llevó a cabo con el fin de proteger el cabujón contra futuras manchas se trata de turquesa grado gema que fue impregnada de un polímero en un proceso llamado estabilización [1].

### 1.3 Estabilización de turquesa

Para compensar las inconveniencias de su porosidad, más del 95% de la turquesa es sometida a un tratamiento para mejorar el color y la durabilidad. Los métodos de tratamiento incluyen tratamiento con cera, estabilización plástica y teñido [5]. El tratamiento con cera es el método de tratamiento más antiguo y se aplica la cera en la superficie; la inyección de plástico polimérico es el método de tratamiento de la mayoría de las turquesas que se producen actualmente. Aunque estos tratamientos mejoran el color y la durabilidad al rellenar los poros de la turquesa, tienen la desventaja de no ser permanentes y vulnerables al calor [6-7]. El método de tratamiento con teñido tampoco se usa de forma común porque se decolora fácilmente. Los métodos mencionados no podrán ofrecer las características que se busca en una turquesa grado gema.

Por otro lado, el proceso Zachery (desarrollado a finales de la década de 1980), no sólo mejora el color y la durabilidad de la turquesa, sino que tampoco provoca oxidación ni decoloración, lo que lo hace el método por excelencia para estabilizar turquesas grado gis [4].

El proceso Zachery incluye:

- Tratamiento general para mejorar la durabilidad
- Tratamiento superficial para mejorar el color

-Tratamiento general de la superficie para mejorar el color y durabilidad al mismo tiempo.

Sólo se aplica en turquesas naturales de calidad media o superior y se sabe que este proceso no es efectivo para mejorar el valor de las turquesas de baja calidad. Se considera una turquesa de baja calidad aquella que esté contaminada con cobre, hierro, pigmentos orgánicos o inorgánicos [4].

Para aumentar las utilidades y reducir la merma, los mineros optan por enviar a Estados Unidos, el mineral turquesa grado gis para convertirlo en gema, esto se lleva a cabo mediante un proceso considerado como secreto industrial intitulado "Zachery Process" (ZP). Este trabajo tiene como fin principal producir gemas a partir de gises de turquesa empleando química suave y resina de índice de refracción adaptable, para obtener un compósito o material compuesto con las características mecánicas y ópticas propias de la gema, para desarrollar así una propuesta de un proceso tecnológico, lo cual permitirá que la cadena de producción se centre en territorio nacional.

## 1.4 Estudio del proyecto

En este proyecto se propone utilizar sonoquímica con la finalidad de afectar la contracción durante su curado o fraguado del polímero que se utiliza para estabilizar turquesa grado gis. La resistencia teórica de un material frágil es entre 3 y 4 ordenes de magnitud mayor a la resistencia real; es decir, la resistencia real de los materiales frágiles es entre 1,000 y 10,000 veces menor a la predicha por los potenciales interatómicos. El primero en explicar esa discrepancia fue Griffith, quien propuso que, estos materiales poseen grietas superficiales, que actúan como concentradores de esfuerzos. En la figura 2 se aprecian las líneas de fuerza de tensión, y cómo cerca del vértice de la grieta, el esfuerzo es mayor; esto es, hay más líneas de fuerza por unidad de área. Bajo estas condiciones, es muy sencillo propagar la grieta, solo se requiere tensión. Un ejemplo de ello es el reforzamiento del vidrio que se basa en este principio, se generan campos de compresión ya sea por medio de templado o, intercambio iónico (templado químico). [8-9]

De acuerdo con Griffith (Ecuación 1.1), la grieta se propagará cuando la energía en la punta de la grieta alcance un valor de:

$$U = \frac{1}{2} \sigma E = \frac{1\sigma^2}{2E} \quad (1.1)$$

Donde “U” es el coeficiente de energía almacenada, “ $\sigma$ ” es la tensión aplicada y “E” es el módulo de Young.

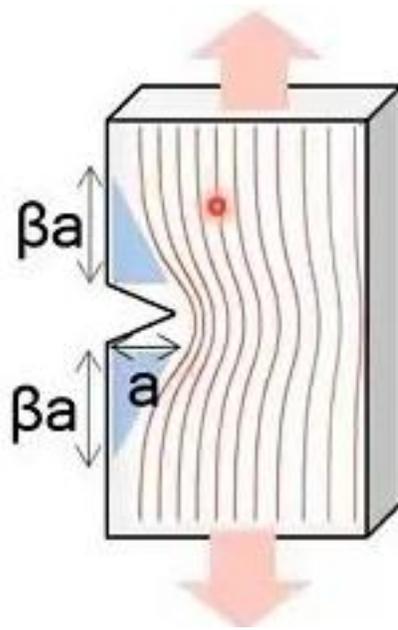


Figura 2. Esquema de la propagación de la fractura mediante tensión en materiales frágiles

Se espera que el polímero que se contrae más por el empleo de ultrasonido genere más campos de compresión, los cuales tienen que ser vencidos por tensión para que se propaguen las grietas, dando como resultado un incremento en la resistencia mecánica del compuesto, dicho nivel de contracción se controlará por sonoquímica [7,10-11].

Además de lo anterior, se pretende estudiar la correlación que existe entre el tamaño de poro del gis y las propiedades mecánicas obtenidas del material compuesto.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes**

En 2008, Kwon *et al.* analizaron las características de una turquesa tratada por el proceso Zachery, sus resultados apuntan a que las propiedades son muy similares a las de la turquesa natural y es muy difícil distinguirlas por un método general de identificación de piedras preciosas. La única forma de diferenciar la turquesa tratada con la estabilizada es a través de análisis químico de fluorescencia dispersiva de rayos X (ED-XRF). En este estudio, la diferencia entre la turquesa natural y la turquesa tratada es la distribución de potasio en la superficie; en la turquesa natural se puede confirmar la distribución no uniforme del potasio debido a las impurezas, mientras que en la turquesa tratada es una distribución uniforme, lo cual es considerada como una característica del proceso Zachery. También se corrobora la presencia de  $\text{SiO}_2$  en forma de cristales columnares en los poros de la turquesa tratada, mejorando así su durabilidad y estabilidad [5].

En el ámbito académico, la literatura específica sobre estabilizaciones de gemas de grado gris con resina es inexistente. No obstante, existen estudios sobre la estabilización de otros materiales.

Por ejemplo, la investigación efectuada por Latif *et al.* se enfocó en el fortalecimiento del subsuelo mediante la técnica de "Grouting" o lechado. Este método se aplica para optimizar las propiedades del subsuelo inyectando un material aún líquido bajo presión, permitiendo que este rellene cualquier fisura o cavidad presente. Los componentes utilizados en esta mezcla incluyen una pasta de suelo originaria de Kalimantan, cemento portland y resina epóxica, cuyo comportamiento y contribución al incremento de la resistencia del suelo se monitorearon a intervalos de 7, 14 y 28 días. De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio representados en la tabla 1, se registró un incremento significativo en la rigidez del suelo, reflejado en los valores máximos de tensión alcanzados [13].

Tabla 1. Resultados de valores máximos de tensión obtenidos por Latif *et al.*

Días	Resina (g) / Agua (mL)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )
7	Sin tratamiento	0.66
	80 / 130	1.16
	80 / 150	2.06
	80 / 180	2.92
14	80 / 130	0.81

	Sin tratamiento	1.93
	80 / 150	2.83
	80 / 180	3.81
28	80 / 130	0.92
	Sin tratamiento	2.82
	80 / 150	3.72
	80 / 180	4.14

Ghasemzade y colaboradores realizaron una serie de pruebas de laboratorio para examinar las propiedades geotécnicas de una composición de caolinita y polímeros vinílicos, incorporando distintos tipos de monómeros. Se seleccionaron tres polímeros para su combinación con la caolinita: un poli(estireno-co-acrilato de butilo) sintetizado, un poli(metacrilato de metilo-co-acrilato de butilo) sintetizado y un acetato de polivinilo de tipo comercial. Los resultados de la figura 3 evidenciaron que, de los tres agentes estabilizadores probados, el acetato de polivinilo comercial proporcionó la mayor resistencia a la compresión uniaxial (UCS) en las muestras estabilizadas.

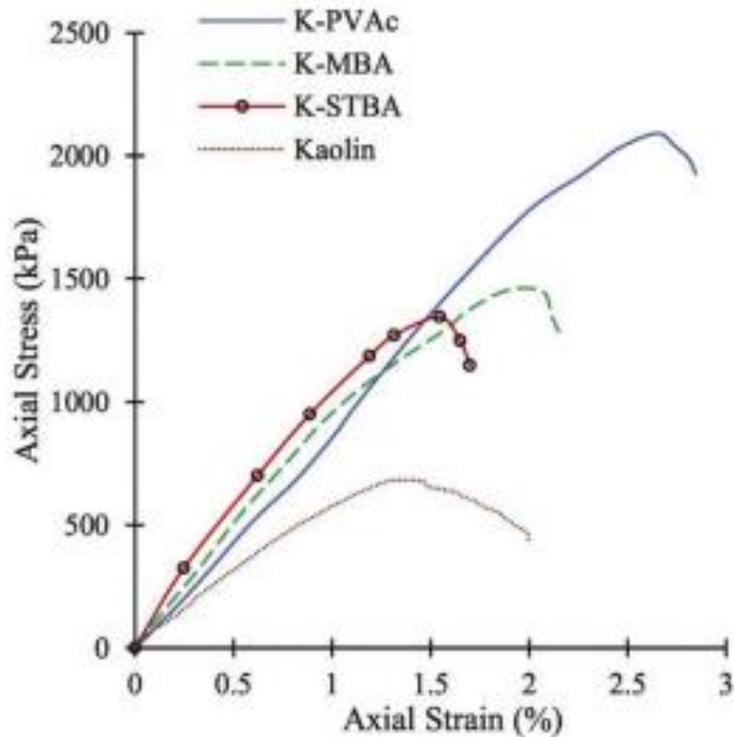


Figura 3. Gráficas de tensión axial. Comparación entre Caolinita-Polivinil acetato, Caolinita-poli(metacrilato de metilo-co-acrilato de butilo), Caolinita-poli(estireno-co-acrilato de butilo) y Caolinita únicamente.

En el caso de la muestra estabilizada con PVAc, el valor correspondiente aumentó aproximadamente tres veces (equivalente a 2100 kPa) en comparación con el suelo no estabilizado, que tenía un valor UCS de 691 kPa [14].

La utilización de resinas para la estabilización no se ha limitado únicamente a suelos, gemas o piedras. Un ejemplo presentado por Atiqah *et al.* en donde describe el desarrollo de compuestos epoxi reforzados con fibras naturales de panal de abeja. Estos polímeros reforzados con fibras naturales están ganando

terreno tanto en aplicaciones industriales como en investigaciones fundamentales. Estos compuestos, que tienen una baja densidad y coste, así como propiedades mecánicas satisfactorias, resultan atractivos para su uso en automóviles, vagones de ferrocarril y aplicaciones aeroespaciales. Al emplear una proporción de 2:1 p/p de resina epóxica y endurecedor de epiclorhidrina, los compuestos que contienen un 9% en peso de fibra natural de panal de abeja exhibieron la mayor dureza, alcanzando un valor de 58.09 en la escala de dureza de Brinell. Los resultados en la figura 4 demuestran las posibilidades potenciales de utilizar un panal de cera de abejas como relleno en compuestos reforzados [15].

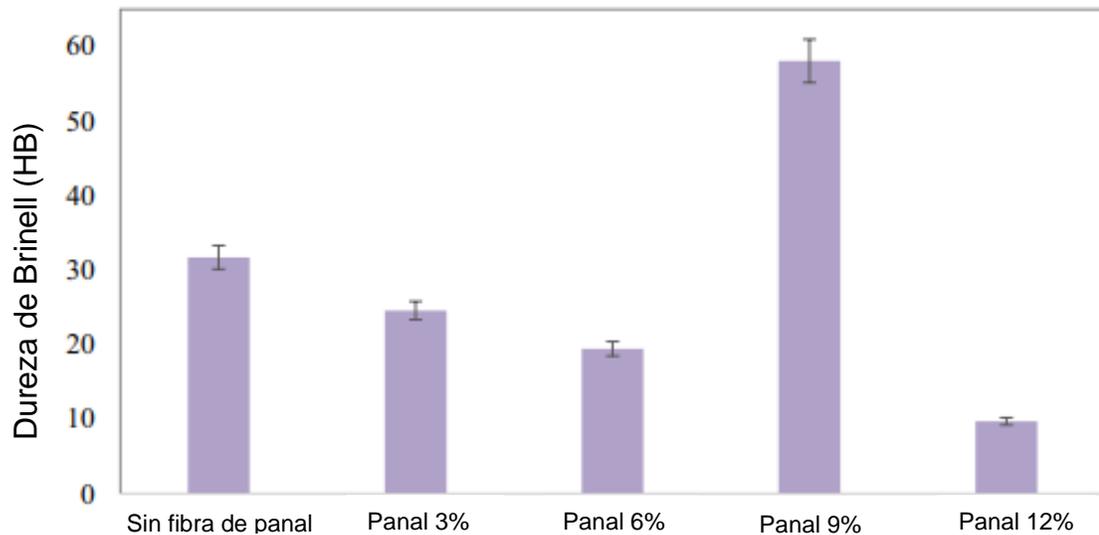


Figura 4. Dureza de Brinell en mezcla de resina-epiclorhidrina y fibra natural de panal de abeja.

El proceso de estabilización de turquesa no sólo consta de resina, endurecedor y diluyente, una parte importante también es el uso de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Stephan Sprenger en 2020 realizó una recopilación de artículos donde se habla de diferentes nanocompuestos que han sido añadidos a resinas epóxicas.

Enfocando la atención en la sección morada del mapa, es interesante ver en la Figura 5 que el mayor aumento en la tenacidad se puede lograr con la adición de nanosílice a un 4%, obteniendo un máximo de tenacidad a la fractura del 2.8 normalizado. Las nanopartículas de sílice están disponibles comercialmente desde hace 20 años. Tienen una superficie modificada para suprimir la aglomeración y aumentar la compatibilidad con la matriz, así como para permitir la unión a la matriz tras el curado. Al ser tan pequeñas, no interfieren con la luz visible y parecen transparentes. Esto es muy importante para todos los sistemas curados por radiación [16].

La resistencia a la compresión y el módulo de compresión aumentan hasta un 30 % con un nivel de adición de nanopartículas del 10 % en peso [17-18].

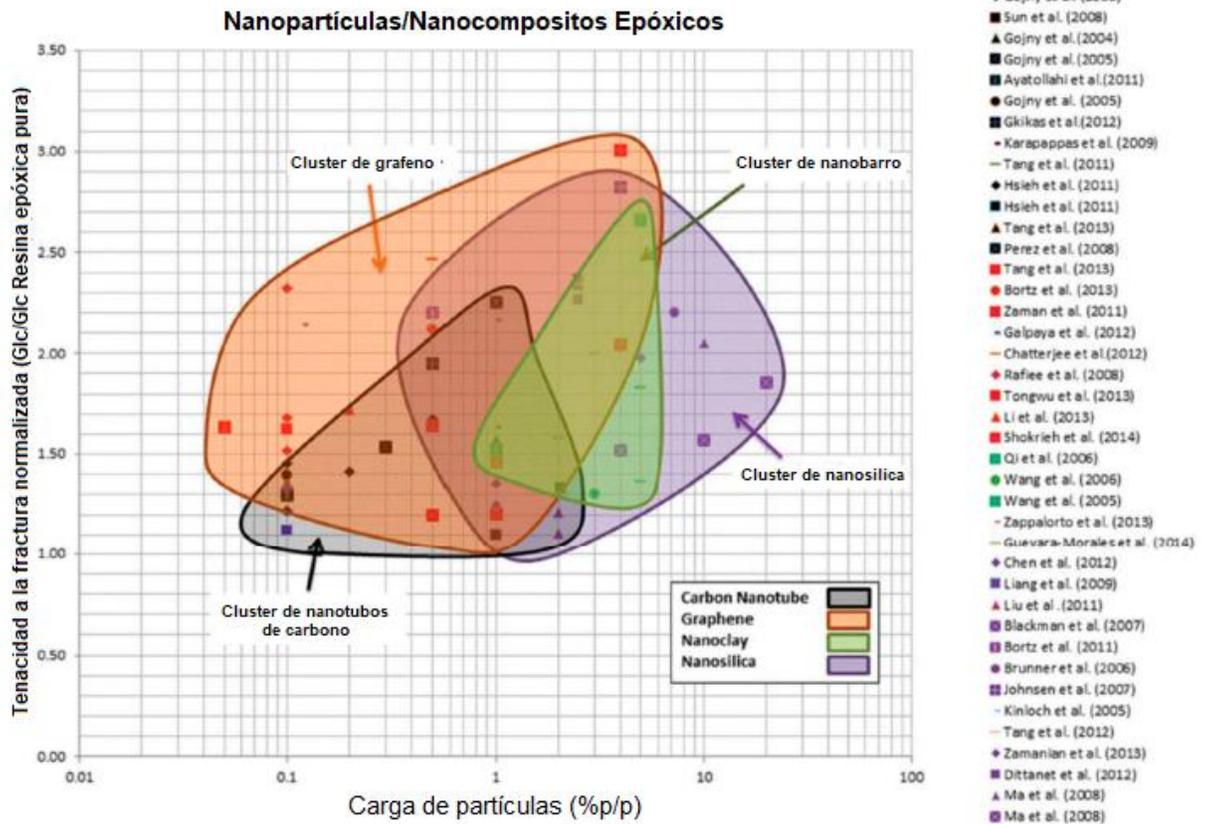


Figura 5. Mapa de tenacidad a la fractura de nanopartículas/nanocompuestos epoxi con respecto a la carga de partículas.

Otra mejora interesante de la propiedad lograda mediante la adición de nanosílice fue reportada por Zhang *et al.* donde investigaron las propiedades de desgaste y fricción de una DGEBA (Diglicidil-éter de bisfenol A) curada con anhídrido que contiene microcápsulas de cera y nanosílice. Se encontraron propiedades tribológicas óptimas con una reducción en la tasa de desgaste de tres órdenes de magnitud y una reducción diez veces mayor en el coeficiente de

fricción para microcápsulas de cera con un 10 % en peso en combinación con un 23 % en peso de nanopartículas de sílice [19].

## **2.2 Análisis crítico**

Kwon y su equipo estudiaron la turquesa tratada con el proceso Zachery en 2008, encontrando similitudes con la turquesa natural, especialmente en la distribución de potasio. Aunque hay poca literatura sobre la estabilización de gemas con resina, se han hecho estudios sobre la estabilización en otros materiales. Latif y su equipo usaron la técnica de “Grouting” para fortalecer el suelo. Ghasemzade y su equipo estudiaron la caolinita y polímeros vinílicos, encontrando que el acetato de polivinilo comercial aumentó la resistencia a la compresión. Se menciona el desarrollo de compuestos epoxi reforzados con fibras naturales de panal de abeja, útiles en varias aplicaciones debido a su baja densidad, coste y buenas propiedades mecánicas. Esto nos lleva a proponer la aplicación de ultrasonido en el fraguado final de la resina, algo que no ha sido reportado en la literatura.

El uso de nanopartículas de sílice en resinas epóxicas es un tema que se lleva estudiando desde hace 20 años. La modificación de resinas epóxicas con nanopartículas de sílice mejora varias propiedades de las resinas al fraguar, como resistencia a la fractura, resistencia a la compresión y mayor resistencia a la fatiga.

### **2.3 Aportación científica**

La estabilización, caracterización mecánica y óptica de un compuesto de matriz cerámica hecha a partir de turquesa grado gis.

### **2.4 Hipótesis**

Es posible controlar la resistencia mecánica de un compuesto de matriz cerámica mediante sonoquímica, alterando el nivel de contracción del polímero de refuerzo variando la potencia del ultrasonido.

### **2.5 Objetivos**

1. Estabilizar turquesa grado gis.
2. Desarrollar un compuesto de matriz cerámica.
3. Estudiar el comportamiento óptico y mecánico del compuesto resultante, mediante luz reflejada, transmitancia y absorbancia, además de estudio comparativo de colorimetría antes y después de la estabilización.
4. Caracterizar las propiedades mecánicas tales como dureza y tenacidad.
5. Estudiar mediante fluorescencia de rayos X por energía dispersiva la microestructura final, sobre todo observando las fases formadas por la sílice.

Observar mediante Electrones Retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) las fases matriz y refuerzo aprovechando el factor de retrodispersión, lo cual dará imágenes contrastantes.

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Análisis de muestras previo a la estabilización**

##### **3.1.1 Análisis de difracción de rayos X**

Se seleccionaron cuatro piedras de turquesa grado gis y se molieron individualmente, de cada molienda individual se tomó una muestra para llevarse a analizar por XRD en polvos. Se utilizó un mortero de ágata para cada molienda.

Cada molienda fue analizada mediante la técnica de DRX en polvos, se empleó un difractómetro marca PANalytical, modelo X'PERT PRO.

##### **3.1.2 Análisis de fluorescencia de rayos X**

Se seleccionaron cuatro piedras de turquesa grado gis y se molieron utilizando un mortero de ágata. Cada molienda fue analizada mediante la técnica de XRF en el equipo marca PANalytical modelo epsilon1.

### **3.2 Estabilización de turquesa grado gis**

Las turquesas de grado gris fueron sometidas a un proceso de vacío medio, extendiéndose por un periodo de treinta minutos dentro de un recipiente sellado herméticamente. Luego, estas piedras fueron inmersas en una solución compuesta por ocho partes de Resina PP Cristal y dos partes de Metacrilato, en una proporción ponderada, mientras se mantenía una agitación constante. Al mismo tiempo, se añadió el catalizador K-2000 a razón de una gota por minuto, hasta un máximo de veinte gotas, para garantizar una mezcla adecuada.

Las muestras de turquesa sumergidas en esta solución fueron nuevamente expuestas a un vacío medio, prolongado durante sesenta minutos para la extracción de gases. Después de este proceso, las muestras de turquesa fueron retiradas de la solución utilizando una red metálica y posteriormente colocadas nuevamente dentro del recipiente hermético. Se aplicó una presión constante de 40 PSI sobre las muestras hasta que la resina alcanzó una viscosidad específica debido al proceso de fraguado, el cual puede extenderse entre 24 y 48 horas, dependiendo del grosor de la muestra.

Luego de este periodo, las muestras fueron sometidas a vibraciones ultrasónicas utilizando un equipo de ultrasonido marca FIME, modelo IMM. Estas vibraciones ultrasónicas provocaron un endurecimiento adicional de la

resina, lo cual se evidencia por la ausencia de una sensación "pegajosa" en la muestra. Este tratamiento ultrasónico culminó el proceso de fraguado de la resina. Este estudio se enfoca en analizar el impacto de estas vibraciones en ciertas propiedades mecánicas de la turquesa estabilizada.

### **3.3 Análisis de muestras posterior a la estabilización**

#### **3.3.1 Impacto tipo Charpy**

Se procedió a conformar muestras de turquesa de grado gris en forma de prismas rectangulares, con dimensiones específicas de 10x10x55 mm. Este proceso de conformación se llevó a cabo mediante el uso de una combinación de técnicas, que incluyeron corte, aspiración con un filtro de partículas finas y acabado mediante lijado fino.

Posteriormente, estas muestras fueron sometidas al proceso de estabilización detallado en la sección 3.2 del presente estudio. Una vez completada esta etapa, las muestras fueron sujetas a pruebas de impacto, siguiendo las pautas establecidas por la norma ASTM D7522/D7522M-21. [20]

Es importante destacar que el equipo de corte utilizado en el laboratorio de materiales 2, específicamente el Minitom modelo Struers, demostró limitaciones

significativas en la formación de estas muestras a partir de una roca estabilizada. Estas limitaciones se atribuyen principalmente a restricciones de índole geométrica, más que dimensional, lo que puede afectar la precisión y uniformidad de las muestras resultantes.

Se empleó una máquina INSTRON 9050.

### 3.3.2 Microdureza

Las muestras de turquesa estabilizada fueron sometidas a un proceso de pulido con el objetivo de crear una superficie plana en la base y en la cara seleccionada para el análisis. Este procedimiento se llevó a cabo meticulosamente para garantizar la uniformidad y precisión de las mediciones realizadas en cada muestra.

Para evaluar la dureza de las muestras, se utilizó la técnica de Microdureza tipo Vickers, empleando un indentador de punta de diamante y un analizador de imágenes. El equipo utilizado para estas mediciones fue el Zwick Roell Indentec, modelo ZHV $\mu$ . Se establecieron cargas máximas y mínimas de 500 y 50 gramos, respectivamente, de acuerdo con los estándares de la norma ASTM E384 – 17 para el análisis de durezas Vickers.

La dureza Vickers se puede leer en tablas que se basan en la fuerza aplicada y el diámetro de la huella. Si no se tienen tablas, la ecuación para calcularla es la ecuación 3.1:

$$HV = \frac{2 \sin 68 F}{d^2} \quad (3.1)$$

Donde  $HV$  es la dureza Vickers,  $F$  es la carga aplicada en Kg,  $d$  es el diámetro promedio de la huella; i.e.,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ , el 68 representa  $68^\circ$ ; ya que, la base del indentador tiene un ángulo de  $136^\circ$ . [21-22]

Es importante señalar que, conforme a lo estipulado por la norma, se descartaron tanto las mediciones de dureza máxima como las de dureza mínima, centrándose en los valores intermedios como representativos de la dureza de las muestras de turquesa analizadas.

### 3.3.3 Tribometría

Se procedió a seleccionar una muestra representativa de turquesa de grado gris, la cual fue moldeada con precisión para adquirir la forma de un cilindro con un diámetro de 1 cm. Posteriormente, este cilindro fue seccionado longitudinalmente en piezas de 2 cm de altura, las cuales fueron sometidas al proceso de estabilización detallado en la sección 3.2 del presente estudio.

Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo utilizando un equipo de la marca Anton Paar, modelo TRN, el cual garantizó la reproducibilidad y precisión necesarias para obtener resultados confiables. Estas pruebas se realizaron bajo condiciones controladas y estandarizadas, según las siguientes especificaciones: Balín de acero inoxidable, carga entre 1-3 Newtons, velocidad 2-10 mm/s durante una distancia 10 metros.

En esta técnica, el volumen desgastado se calcula con la ecuación 3.2:

$$V = \frac{K.F_N.L}{H} \quad (3.2)$$

Donde  $V$  es el volumen del material desgastado,  $K$  es la constante que depende de las condiciones de operación, el equipo selecciona esta  $K$  de acuerdo a la programación de la prueba.  $F_N$  es la fuerza normal,  $L$  es la distancia total recorrida por el balón, y  $H$  es la dureza Vickers del material.

Cabe recalcar que esta prueba no estaba estimada al momento de realizar el protocolo de investigación, sin embargo al tomar en cuenta el único uso actual de la turquesa (que es la ornamental) y siendo que la turquesa se utiliza en diferentes accesorios, el compuesto estará sujeta a un constante rozamiento entre diferentes materiales para lo cual, un análisis de desgaste coincide con los objetivos de este proyecto que es a su vez determinar y mejorar las propiedades mecánicas de la turquesa estabilizada.

El desgaste es una respuesta del material debido a la fricción, se ha demostrado que el 75% de las fallas mecánicas son debido al desgaste de las superficies cuando estas rozan entre sí. [23-24]

El coeficiente de desgaste que proporciona el equipo de tribometría es usado para comparar la resistencia de los materiales ante el desgaste. [25-26]

### 3.3.4 Análisis por microscopía electrónica de barrido

Se estabilizaron turquesas con dimensiones no mayores a 10x10x10 mm y se analizaron por SEM.

### **3.4 Disposición de residuos generados**

La disposición de residuos generados se llevó a cabo según lo que dicta la “Guía de Sustentabilidad para Talleres y Laboratorios”, hecho en 2023 por la UANL.

Polvo de turquesa → Colector B

Resina fraguada → Colector G

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Difracción de rayos X

La turquesa, un mineral de renombre por su distintiva tonalidad azul-verdosa, exhibe una serie de fases polimórficas, cada una vinculada intrínsecamente a un compuesto químico específico. Es bien sabido que el matiz característico de la turquesa se debe primordialmente a la presencia de minerales de cobre (Cu), sin embargo, es imperativo destacar que la concentración de hierro (Fe) en la matriz mineral también ejerce una influencia significativa en la variabilidad cromática del espécimen. En aras de una comprensión más profunda de estas interacciones químicas, se procedió a la caracterización del mineral mediante difracción de rayos X (DRX) en polvos. El rango angular seleccionado para el análisis se extendió de 5 a 45 grados, correspondiente a un intervalo de 10 a 90 grados en la escala  $2\theta$ .

La figura 6 ilustra los patrones de difracción obtenidos como resultado del análisis de cuatro muestras de polvo de turquesa, las cuales fueron previamente homogeneizadas en un mortero de ágata utilizando acetona como medio dispersante. Un examen detallado de los difractogramas revela la presencia de 'ruido' en las señales obtenidas. Dado que la turquesa es un mineral cristalino, se deduce que tanto la pendiente observada en los

difractogramas como el 'ruido' inherente a estos, pueden ser atribuidos a un fenómeno de fluorescencia inducido por la interacción de la radiación incidente con los elementos constituyentes del mineral.

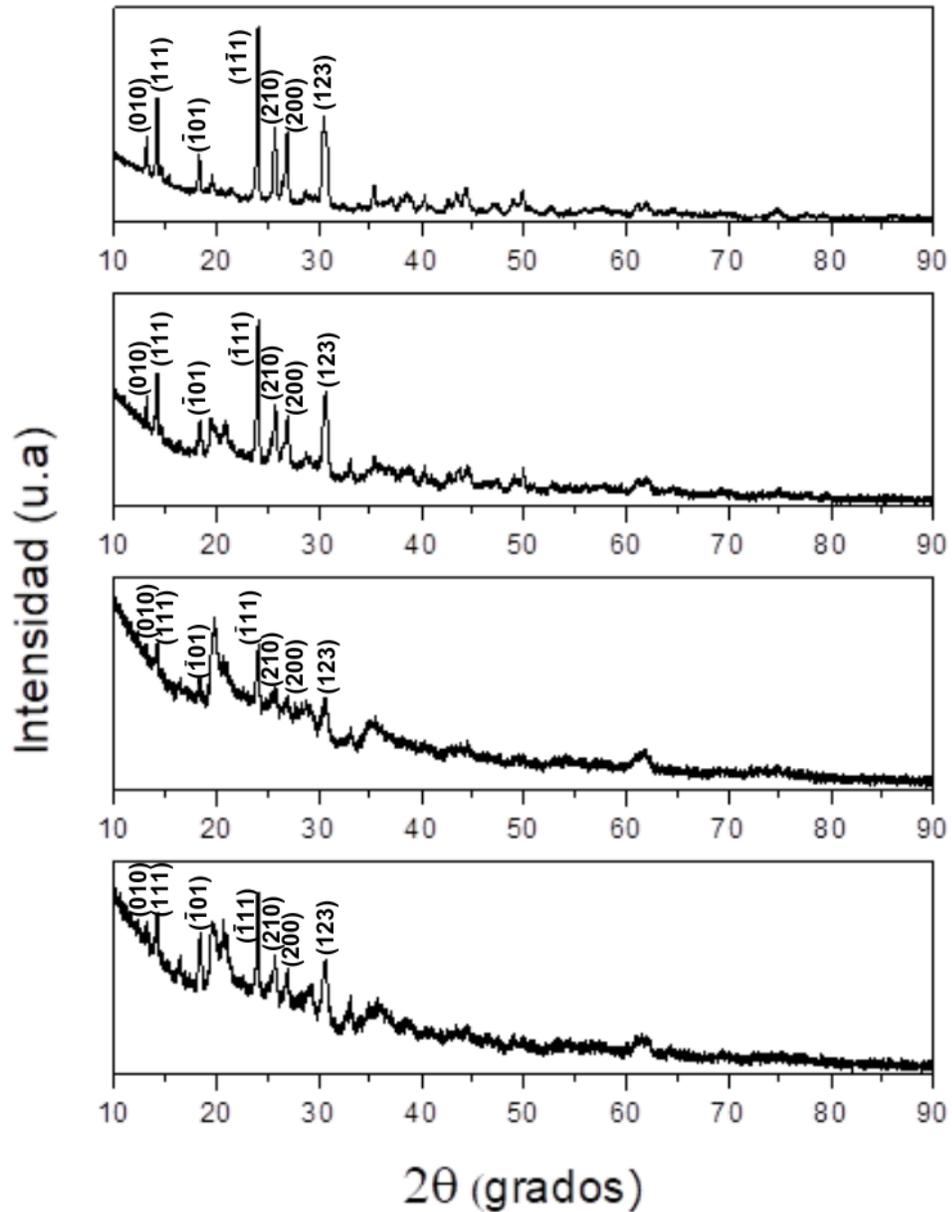


Figura 6. Resultados de DRX en 4 gemas individuales de turquesa

Procediendo con la identificación de las señales características en los difractogramas, se emprendió un meticuloso análisis de los datos recabados. La correlación de las señales observadas con las bases de datos cristalográficos permitió la determinación precisa de las fases presentes en las muestras. Este proceso reveló no solo la presencia de la fase principal de la turquesa, sino también de fases secundarias que podrían estar contribuyendo al fenómeno de fluorescencia antes mencionado.

Comparando los resultados con el difractograma proveniente de la base de datos en la figura 7 se observa que las señales de los siguientes planos coinciden perfectamente (ver tabla 2):

Tabla 2. Señales identificadas con sus respectivos índices de Miller ( $h,k,l$ ) de los planos correspondientes.

$2\theta$	$h$	$k$	$l$
13.17	0	1	0
14.33	1	1	1
18.53	-1	0	1
24.15	1	-1	1
25.97	2	1	0
27.33	2	0	0
30.75	1	2	3

La rigurosidad en la comparación de los patrones de difracción de rayos X es fundamental para la confirmación de las fases cristalinas presentes en una muestra mineral. En este estudio, cada difractograma obtenido fue meticulosamente cotejado con registros de la base de datos RRUFF. La figura 7 destaca el difractograma de referencia para la turquesa, tal como se presenta en la mencionada base de datos. La identificación de las señales difractivas se llevó a cabo utilizando el software integrado al difractómetro, lo cual permitió una comparación directa y precisa con los patrones teóricos.

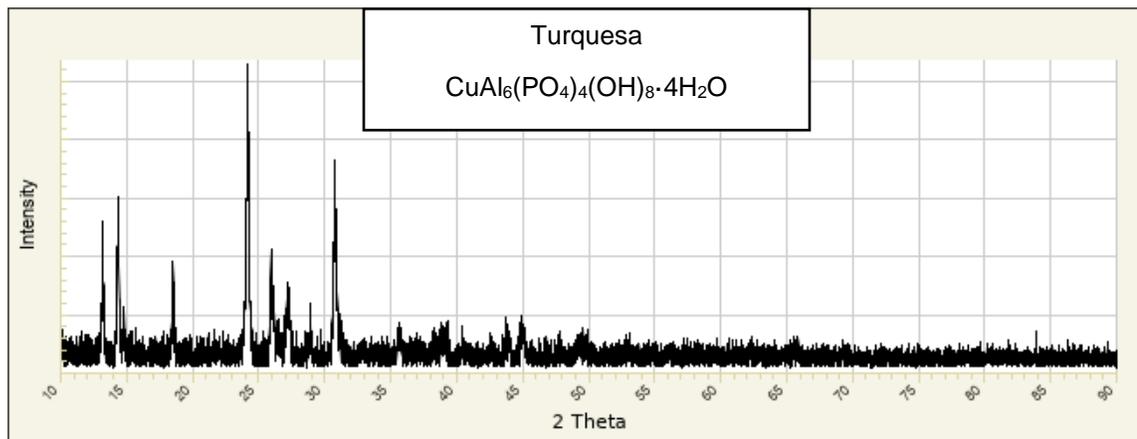


Figura 7. Difractómetro de turquesa obtenida de la base de datos RRUFF (RRUFF ID: R050554.1)

La concordancia entre las señales experimentales y las consignadas en la base de datos fue notable, corroborando así la presencia de la estructura cristalina triclinica característica de la turquesa. Las señales difractivas se identificaron en posiciones angulares específicas, con valores de  $2\theta$  correspondientes a  $13.17^\circ$ ,  $14.33^\circ$ ,  $18.53^\circ$ ,  $24.15^\circ$ ,  $25.97^\circ$ ,  $27.33^\circ$  y  $30.75^\circ$ . Estos resultados no solo validan

la metodología empleada, sino que también refuerzan la identificación de la turquesa como un mineral con una estructura cristalina bien definida, triclinica.

Además, la precisión en la determinación de las señales es de suma importancia, ya que permite discernir entre diferentes polimorfos y posibles impurezas o inclusiones minerales que podrían alterar las propiedades ópticas y físicas del mineral. Por ende, el análisis detallado de las señales difractivas y su correspondencia con los registros de la base de datos es un paso crítico en la caracterización mineralógica de la turquesa.

De acuerdo con los difractogramas, aún después de presentar ruido por fluorescencia, presentan las señales características de la turquesa; i.e., se confirma la presencia de la estructura triclinica de turquesa y teniendo coincidencia perfecta con el difractograma obtenido de la base de datos RRUFF.

La presencia de otros compuestos son mejor demostrados en los resultados de Fluorescencia de Rayos X.

#### **4.2 Fluorescencia de rayos X**

La turquesa, cuya fórmula química es  $[\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ , es un mineral que se encuentra comúnmente en venas o nódulos dentro de rocas. En otras palabras, se puede encontrar en sólidos cohesionados de minerales, lo que significa que se encuentra en estructuras sólidas y unidas de diversos

minerales. En la figura 8 se muestran los resultados de FRX de 4 muestras de turquesa grado gis:

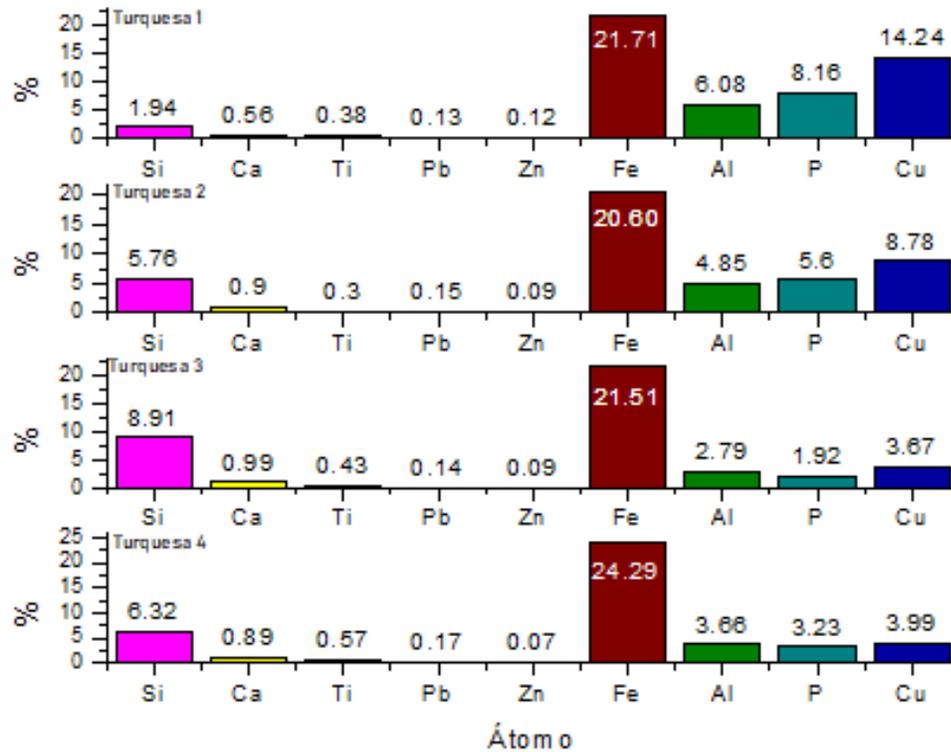


Figura 8. Resultados de FRX en 4 muestras del polvo.

Los resultados obtenidos a través de la Fluorescencia de Rayos X (FRX), una técnica analítica no destructiva que permite determinar la composición elemental de los materiales, demuestran una considerable concentración de hierro en las muestras de turquesa. Esto se ve corroborado por los resultados obtenidos a través de la Difracción de Rayos X, otra técnica analítica que permite determinar la estructura cristalina de los materiales. En las muestras de turquesa, la DRX denota fluorescencia y se observa una fase de color naranja, lo que nos permite afirmar con seguridad que el hierro está presente en forma

de óxidos. Siendo que es improbable encontrar hierro elemental dada la naturaleza de la muestra, en una de ellas, al momento de reducir el tamaño se empleó un disco de corte para cerámicos, el cual produjo “chispas” características de un metal ferroso, dicha muestra no es representativa de la mina de la cual fue extraída, esta muestra será estudiada más adelante para elucidar la factibilidad de encontrar hierro reducido entre la turquesa de grado gis; ya que, la turquesa grado gema evidentemente presenta capas de hierro en forma de óxidos, i.e., es correcto asumir que el hierro está en forma de óxidos, los óxidos de hierro producen dichos efectos en los difractogramas.

La presencia de silicio se da en forma de silicatos, algo completamente esperado por la piedra de turquesa, siendo que los silicatos conforman la mayor parte de la corteza terrestre.

Cabe mencionar que el análisis corroboró que el material efectivamente es turquesa, el color “lechoso” (*milky tone*) en la turquesa grado gis, tiende más hacia el blanco que hacia el verde.

Debido a la presencia de estos distintos compuestos minerales, el valor de la turquesa puede decaer. Esto se debe a que no es una gema pura, lo que conlleva a restarle valor en el Índice de Calidad de Turquesa (TQI). A pesar de que las muestras de turquesa no sean gemas puras, aun así, pueden ser sometidas al proceso de estabilización y posteriormente a la lapidación<sup>1</sup>. Estos procesos no representan ningún obstáculo para los resultados de experimentos

---

<sup>1</sup> En este sentido, el verbo lapidar (del latín *lapidarius*, trabajar con piedras), se emplea como la acepción del proceso de corte y pulido de las muestras, según la geometría conveniente.

físicos, lo que significa que la turquesa, a pesar de no ser una gema pura, aún tiene un valor significativo en el campo de la gemología y la mineralogía.

#### **4.3 Estabilización de turquesa grado gis**

Se trataron un gran número de piedras de turquesa en el proceso de estabilización, implicando la adición de una resina epóxica, diluido en monómero de metil metacrilato, y aplicando catalizador comercial. Se probaron y descartaron diez formulaciones, dentro de las cuales se encuentra resina óptica, la cual presentó poca penetración en la turquesa, aunque nos dio una tonalidad propia de la gema, comparada bajo luz blanca y luz roja. Este material fue descartado porque aumentaría significativamente el costo de la estabilización, no sólo por el costo de la resina Opticon, sino porque la misma requiere de alto vacío para penetrar la turquesa.

Tras el proceso de estabilización, cada gema estabilizada fue sometida a un tratamiento de ultrasonido. Nuestras observaciones indicaron que, dentro del espectro de baja frecuencia del ultrasonido, la gema adquiriría una dureza considerable. Desde un punto de vista teórico, el ultrasonido induce una coalescencia molecular que genera esfuerzos de compresión durante el proceso de fraguado. En este tipo de materiales, la fractura se origina en las grietas superficiales, las cuales necesitan un componente de tensión para propagarse. Este componente de tensión debe ser suficientemente fuerte para

superar un campo de esfuerzos de compresión. Tal y como detallan las referencias, el uso de ultrasonido genera más compresión al momento de fraguar, lo que conlleva a que esto beneficie sus propiedades físicas, tales como dureza y tenacidad.

El proceso de fraguado de nuestros compósitos sin ultrasonido tarda entre 24-48 horas, sin embargo, cuando se usa ultrasonido fragua de 3-5 minutos. Un cambio notorio es el calor que emite el compósito al terminar de fraguar; el compósito está mucho más caliente al terminar el proceso de ultrasonido que al dejarlo fraguar sin él.

Las reacciones de polimerización son exotérmicas; el uso de ondas sonoras acelera la reacción de polimerización de la resina, lo cual al llevarse a cabo en minutos genera más calor que al dejarse fraguar sólo con catalizador. Esta aceleración de reacción y el calor que desprende son pruebas de cómo la sonoquímica actúa en nuestros compósitos.

#### **4.4 Impacto tipo Charpy**

Debido a que estabilizar “gemas” es un proceso industrial que no tiene impacto en la seguridad humana, no existe una norma ASTM para analizar la tenacidad de dichos materiales, en nuestro caso, adecuamos la norma D7522/D7522M-21, empleando un método sugerido por el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM) sugiere las siguientes dimensiones: La sección transversal mínima sugerida es de 25.8 cm<sup>2</sup> y la máxima de 232 cm<sup>2</sup>. La altura

mínima puede ser de 25.4 mm, con una máxima no mayor que el ancho o el diámetro de la muestra.

Esta técnica mide directamente la energía absorbida por el material, por una diferencia de alturas del péndulo que contiene la carga, el cálculo para determinar la energía se detalla en la ecuación 3.3:

$$E = U_{h1} - U_{h2} \quad (3.3)$$

Donde  $U_{h1}$  es la energía potencial antes de dejar caer el balón a una altura  $h1$ ,  $U_{h2}$  es la energía potencial a la altura  $h2$ , que es la máxima altura que alcanza el péndulo luego del impacto. Se suele medir en Joules.

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos de impacto, debido a la resolución de la INSTRON 9050, los valores enteros provienen de un redondeo directo de una décimal. La figura 9 muestra el histograma de los ensayos.

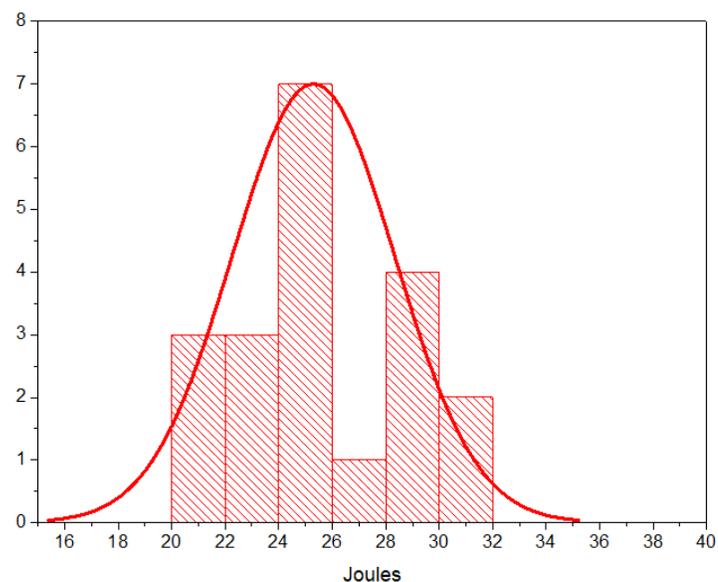


Figura 9. Histograma de los ensayos de impacto tipo Charpy.

Tabla 3. Lecturas de impacto en Joules (J)

Energía en Joules J	25
	24
	28
	30
	27
	25
	21
	23
	21
	30
	24
	22
	29
	25
	29
	29
	23
25	
25	
21	

Usando de referencia un acero comercial el cual sus lecturas de impacto rondan los 150 J, los análisis realizados mediante la metodología de Charpy han revelado una notable tenacidad en los compósitos examinados.

Los análisis realizados mediante la metodología de Charpy han revelado una notable tenacidad en los materiales examinados, el promedio de los resultados

obtenidos es equivalente a 25.3 J. Tal hallazgo sugiere una cohesión excepcionalmente alta entre la estructura porosa inherente a la turquesa (la matriz) y la fase dispersa (polimérica) que constituye el compuesto. Aunque la utilización actual del material no se considera para aplicaciones estructurales, se vislumbra un potencial significativo para su empleo en futuras implementaciones de carácter estructural. Uno de los objetivos a largo plazo consiste en la fabricación de láminas compuestas a partir de este material, cuya resistencia indica que son capaces de soportar impactos y caídas sin sufrir daños irreparables, es decir, sin incurrir en fracturas que comprometan su integridad.

#### **4.5 Microdureza**

Se llevaron a cabo pruebas en diez muestras de turquesa estabilizada, y los resultados se expresaron en términos de la dureza de Vickers (VH). Es importante destacar que la dureza de la turquesa de grado gris se aproxima a cero.

Es esencial aclarar que todas las muestras fueron sometidas al mismo proceso de estabilización, bajo idénticos parámetros. Esto garantiza la consistencia en las condiciones experimentales y permite una comparación justa de los resultados.

La Tabla 4 presenta los resultados de los ensayos de indentación. Es notable que las muestras 1, 2 y 3 no fueron lijadas antes del ensayo de microdureza. Como resultado, estas muestras exhiben los promedios más bajos. La indentación es más profunda y amplia ya que se realiza sobre la resina superficial, un material considerablemente más blando, y no tanto sobre el compuesto lo que conlleva a lecturas menores al promedio.

Tabla 4: Resultados de los ensayos de VH

Muestra	Carga (gf)	Indentación			Promedio	Desviación estándar
		1	2	3		
1	200	23.2	22.7	31.6	<b>25.8</b>	<b>5.0</b>
2	50	23.0	41.4	43.4	<b>35.9</b>	<b>11.2</b>
3	100	15.1	13.3	21.2	<b>16.5</b>	<b>4.1</b>
4	200	112.5	97.7	44.3	<b>84.8</b>	<b>35.9</b>
5	50	44.3	110.1	121.0	<b>91.8</b>	<b>41.5</b>
6	50	99.7	155.5	136.6	<b>130.6</b>	<b>28.4</b>
7	50	36.6	39.3	24.0	<b>33.3</b>	<b>8.2</b>
8	50	24.0	21.1	120.2	<b>55.1</b>	<b>56.4</b>
9	100	36.9	14.9	44.0	<b>31.9</b>	<b>15.2</b>
10	100	94.6	56.1	60.7	<b>70.5</b>	<b>21.0</b>

Los promedios de dureza indican una mejora de la turquesa estabilizada en comparación con la turquesa gris, cumpliendo así el objetivo principal de este proyecto industrial. Siendo que los promedios varían y las desviaciones estándar son en algunos casos muy altas para lo que se esperaría de las muestras, es prudente realizar un promedio de promedios y un promedio de las desviaciones estándar.

Según nuestros cálculos, este valor es de 71.13 HV y 29.51 de desviación estándar. Este valor servirá como una referencia útil para futuros estudios y aplicaciones industriales de la turquesa estabilizada. Cabe aclarar que los

resultados de las turquesas que no fueron lijadas previa a la medición no fueron agregadas a estos valores de promedios.

El tratamiento de datos sugiere realizar una prueba Q o una prueba de Grubbs para eliminar el dato que más altera el promedio. Sin embargo, en este caso, se debe abstener de hacerlo. La razón detrás de esto radica en las diferentes fases presentes en la turquesa estabilizada, como ya se discutió en la sección de FRX. Al realizar la indentación, es posible que se haga en una fase de turquesa, silicato, apatita, etc. Esto explica los datos que presentan imprecisión.

#### **4.6 Tribometría**

Todos los pesos se dan en gramos, la velocidad en cm/s y la distancia en metros.

Entre menor sea el coeficiente de desgaste, menor es la probabilidad que nuestro material haya sido desgastado. También se debe tomar en cuenta la diferencia de peso antes y después de hacer las pruebas.

Considerando que se utilizó un balín de acero inoxidable, comparar los resultados obtenidos en la tabla 5 con la literatura nos da una idea de la resistencia de nuestro material. Aunque no hay resultados de tribometría para compósitos, aún así podemos compararla con algún otro material, para ello seleccionamos el valor del acero/balín de acero que su resultado en el coeficiente de fricción dinámico es equivalente a 0.57. [27-28]

Tabla 5: Resultados de los ensayos de tribometría

Muestra	Peso inicial	Velocidad	Carga	Distancia	Peso final	Diferencia	K
1	1.655	0.2	1	458	1.653	0.002	0.3932
2	2.383	0.2	3	10	2.379	0.004	0.4082
3	2.442	0.5	1	10	2.438	0.004	-0.075
4	1.655	0.5	3	9.6	1.654	0.001	0.1126
5	1.577	1	1	10	1.576	0.001	0.1125
6	1.559	1	1	10	1.558	0.001	0.1638
7	2.372	5	1	10	2.370	0.002	0.011
8	2.301	2	1	10	2.300	0.001	-0.137

Los resultados de tribometría demuestran un bajo desgaste por parte de la turquesa estabilizada. Existen dos posibles justificaciones para este fenómeno. La primera es que el compuesto posee una resistencia mecánica considerable que no se ve afectada por los efectos de desgaste frente a un balín de acero inoxidable. La segunda explicación podría ser el resultado de un efecto Hertziano, en el que el calor generado por la fricción provoca que la resina del compuesto se suavice y funcione como lubricante, evitando así el desgaste.

Se necesitan pruebas más extenuantes para determinar con certeza la resistencia al desgaste que presenta el compuesto, sin embargo, los resultados basados en el coeficiente de fricción únicamente demuestran una resistencia al desgaste, perfecto para el uso ornamental de los compósitos.

#### 4.7 Análisis de morfología SEM

En la micrografía mostrada en la figura 10 se puede observar dos fases, a la izquierda está la fase mineral y a la derecha el compuesto de mineral turquesa-resina. Esta imagen fue tomada en una fractura hecha intencionadamente para observar el compuesto desde adentro.

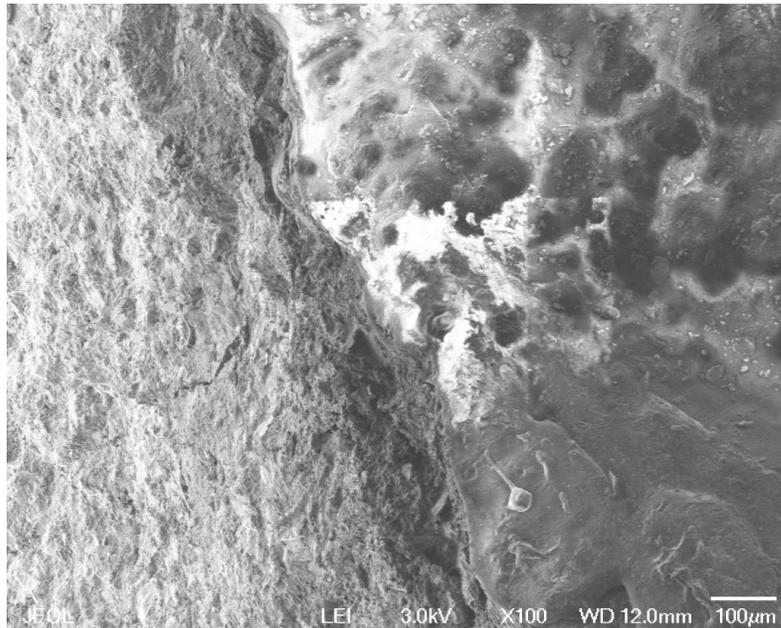


Figura 10. Imagen x100 de turquesa estabilizada.

En la figura 11 se observa la morfología de la turquesa en forma de lajas u hojas, absolutamente todas orientadas al azar. Tal y como la criptocristalinidad de la turquesa lo indica, las celdas triclinicas están ordenadas al azar y de forma paralela unas con otras; esta definición se observa perfectamente en la figura 11 y consecuentemente la figura 12.

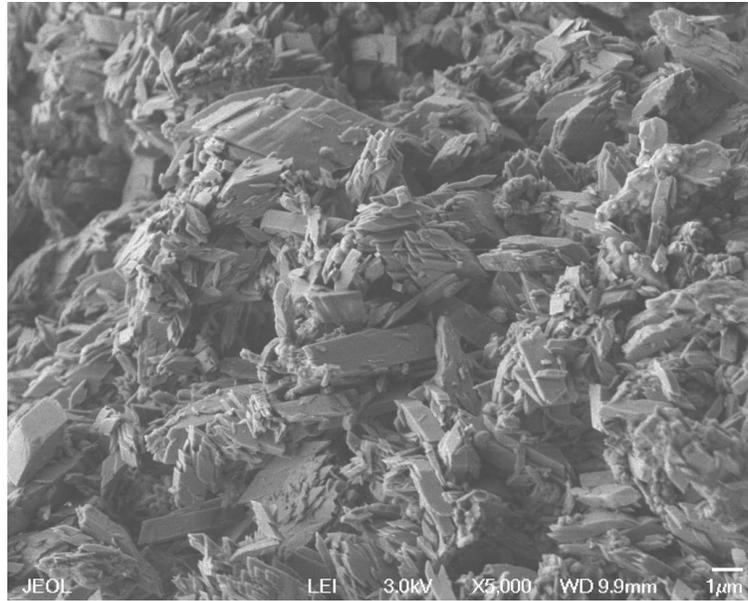


Figura 11. Imagen x5000 de turquesa estabilizada

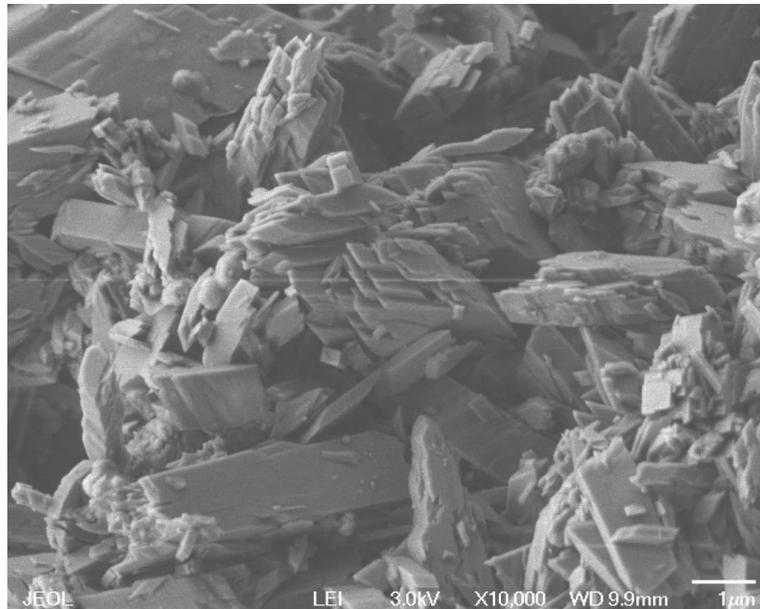


Figura 12. Imagen x10,000 de turquesa estabilizada

La morfología de la turquesa se presenta en forma de lascas, sin embargo, distintas esferas fueron encontradas dentro de las muestras de turquesa tal como se presentan en la figura 13 y la figura 14. Siendo que son de una morfología completamente diferente a la esperada y dada la presencia de hierro

en los análisis de fluorescencia de rayos X, se presume que dichas esferas son hierro elemental; sin embargo, pueden ser nucleaciones del polímero al añadirle la sílice producto del proceso de sol-gel.

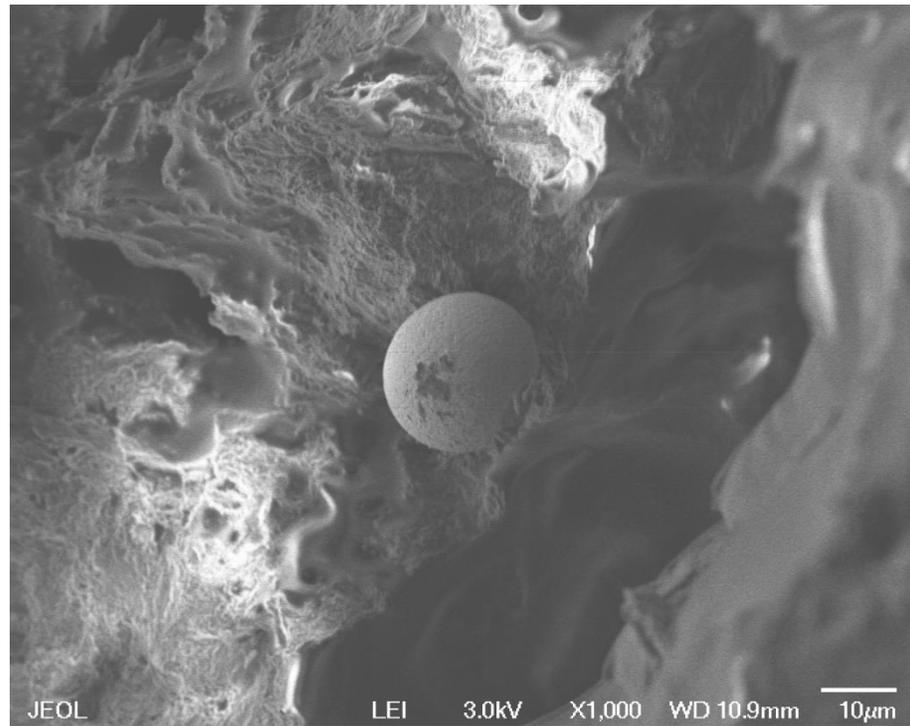


Figura 13. Imagen x1,000 de turquesa estabilizada, enfocando una esfera de especie desconocida

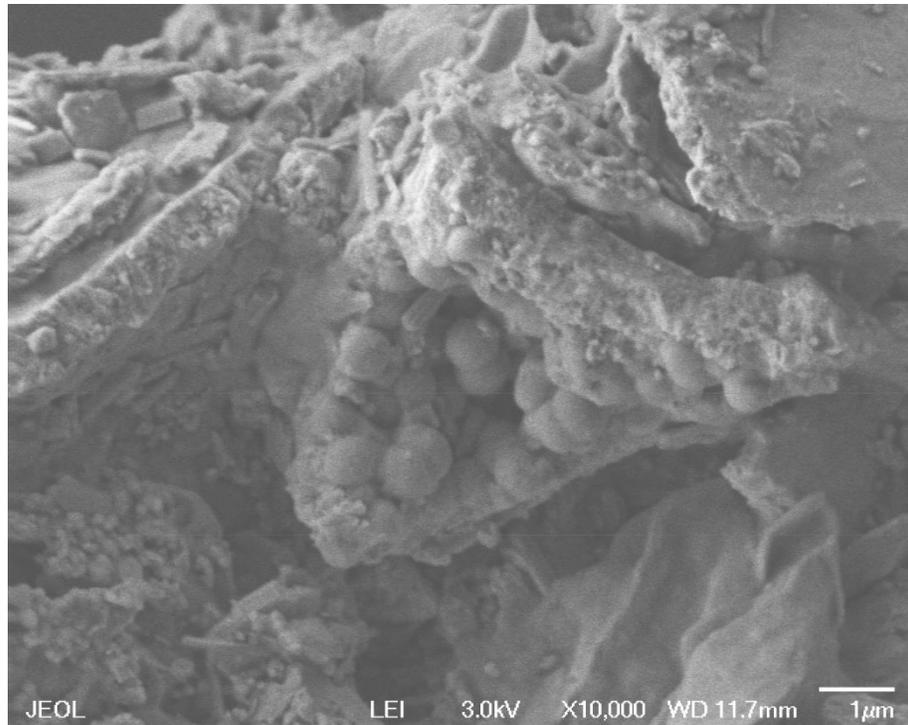


Figura 14. Imagen x1,000 de turquesa estabilizada, enfocando esferas aglomeradas.

El análisis SEM muestra la morfología de la turquesa en forma de lascas. También se observó una morfología en forma de esferas, las cuales son ajenas completamente a la turquesa. Tal y como las pruebas de XRF demuestran, nuestras muestras de turquesa contienen otros compuestos. Se requieren análisis EDS para determinar la composición de estas esferas.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

El análisis de DRX realizado en las muestras de turquesa grado gis previo a la estabilización permitió identificar únicamente la estructura triclinica, propia de la turquesa.

Los análisis de FRX comprobaron la presencia de hierro y sílice en las muestras de turquesa grado gis. El hallazgo de hierro en las muestras se da en forma de óxidos, tal presencia explica el ruido y fluorescencia en los análisis de DRX.

El uso de ondas sonoras durante la estabilización de turquesa acelera la reacción de polimerización de la mezcla de resina, disminuyendo así el tiempo de fraguado de 24-48 horas a sólo 3 minutos.

Los resultados de los análisis de impacto tipo Charpy de turquesa indican una notable tenacidad del compósito, el promedio de los resultados obtenidos es equivalente a 25.3 J.

La microdureza de los compósitos analizados presentó una mejora comparándolos con la turquesa grado gis, obteniendo un promedio de valor 71.13 HV y 29.51 de desviación estándar.

Los resultados de tribometría demuestran un bajo desgaste por parte de la turquesa estabilizada, los coeficientes de fricción oscilan entre -0.137 y 0.4082.

Los análisis realizados a través de SEM demostraron la morfología de la turquesa en forma de lascas. También se observaron morfologías en forma de esfera, completamente ajenas a la turquesa.

**Trabajo a futuro:**

Realizar más pruebas en tribometría, se necesitan pruebas más extenuantes para determinar con certeza la resistencia al desgaste que presenta el compósito y elucidar si dicho desgaste es propio del compósito o se debe al efecto Hertziano.

Se requieren análisis EDS para determinar la composición de las esferas presentes en los análisis morfológicos SEM.

## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

1. Kyaw Soe Moe, Thomas M. Moses, Paul Johnson (2007), Polymer-Impregnated Turquoise, GEMS & GEMOLOGY, vol. 43, No. 2, pp. 149
2. Pavese A., Prospero L., Dapiaggi M. (2005), Use of IR-Spectroscopy and Diffraction to Discriminate Between –Natural, Synthetic and Treated Turquoise, and its Imitations. Australian Gemmologist Vol. 22, No. 8, pp. 366-371.
3. Cagan Choundhary (2010), A new Type of Composite Turquoise, GEMS & GEMOLOGY, Vol. 46, No.2, pp. 106-113.
4. McClure S., Owens P. (2010), Treated Green Turquoise, GEMS & GEMOLOGY, vol. 46, No. 1, pp. 56-57.
5. Ki Ran Kwon, Sin Young Bang, Jong Wan Park, Kwang Bo Shim (2009), Structural Characteristics of Zachery Treated Turquoise, Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 95-101.
6. Shruti Sakarkar, Shobha Muthukumran, Veeriah Jegatheesan (2020), Factors Affecting the Degradation of Remazol Turquoise Blue Dye by Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) entrapped photocatalytic membrane, Journal of Environmental Management, Vol. 272, pp. 1-8.

7. Muhammad Asif Tahir, Haq Nawaz Bhatti, Irshad Hussain, Ijaz Ahmad Bhatti, Irhad, Muhammad Asghar (2019), Sol-Gel Synthesis of Mesoporous Silica-Iron Composite: Kinetics, Equilibrium and Thermodynamics Studies for the Adsorption of Turquoise-Blue X-GB Dye, Z. Phys. Chem, pp. 2-21.
8. Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2008). Mechanical behavior of materials. Cambridge university press.
9. Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (2012). Theory of elastic stability. Courier Corporation.
10. Lionetto, F., & Maffezzoli, A. (2013). Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound. Materials, 6(9), 3783-3804.
11. Hamid Saggaghi (2018), A Combinative Technique to Recognise and Discriminate Stone, Vibrational Spectroscopy, 2018 pp. 93-99.
12. Méndez, F. G., Vanegas, A. J., Vázquez, B. A., & Paz, J. G. (2013). Síntesis de whiskers de SiC asistida por microondas. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 52(3), 132-136.
13. Latif, D. O., Kumala, S. N., Purnama, A. Y., Haryanto, I., Aini, R. A., & Kaluku, Z. H. A. M. (2024). EFFECT OF EPOXY RESIN AND CEMENT AS GROUT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SILT. GEOMATE Journal, 26(115), 116-123.
14. Ghasemzadeh, H., Mehrpajouh, A., & Pishvaei, M. (2021). Laboratory analyses of Kaolinite stabilized by vinyl polymers with different monomer types. Engineering Geology, 280, 105938.

15. Atiqah, A., Ansari, M. N. M., & Premkumar, L. (2020). Impact and hardness properties of honeycomb natural fibre reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 29, 138-142.
16. Sprenger, S. (2020). Nanosilica-toughened epoxy resins. *Polymers*, 12(8), 1777.
17. Sapiai, N., Jumahat, A., Manap, N., & Usoff, M. A. I. (2015). Effect of nanofillers dispersion on mechanical properties of clay/epoxy and silica/epoxy nanocomposites. *J. Teknol*, 76, 107-111.
18. Tian, Y., Zhang, H., Zhao, J., Li, T., Bie, B. X., Luo, S. N., & Zhang, Z. (2016). High strain rate compression of epoxy based nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 62-70.
19. Imani, A., Zhang, H., Owais, M., Zhao, J., Chu, P., Yang, J., & Zhang, Z. (2018). Wear and friction of epoxy based nanocomposites with silica nanoparticles and wax-containing microcapsules. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 107, 607-615.
20. ASTM D7522/D7522M-21; Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2021.
21. Ghorbal, G. B., Tricoteaux, A., Thuault, A., Louis, G., & Chicot, D. (2017). Comparison of conventional Knoop and Vickers hardness of ceramic materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(6), 2531-2535.
22. Wardzala, W. (2013). The Vickers Hardness Test. *Quality*, 52(11), 28.
23. Rabinowicz, E. (1961). Influence of surface energy on friction and wear phenomena. *Journal of Applied Physics*, 32(8), 1440-1444.

24. Davis, J. R. (Ed.). (2001). Surface engineering for corrosion and wear resistance. ASM international.
25. Amiri, M., & Khonsari, M. M. (2010). On the thermodynamics of friction and wear—A review. *Entropy*, 12(5), 1021-1049.
26. Kato, K. (2005). Classification of wear mechanisms/models. *Wear—materials, mechanisms and practice*, 9-20.
27. Serway, R. A. (1996). *Physics for Scientist and Engineers*, 4th edition 2nd printing.
28. Young, H. D. (2009). *Física Universitaria: Sears-Zemansky*.

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Juan de Dios Ruiz Jaramillo

Candidato para el Grado de

Maestro en Ciencias con orientación a Química de los Materiales

Tesis: ESTABILIZACIÓN DE TURQUESA GRADO GIS EMPLEANDO SONOQUÍMICA

Campo de estudio: Mineralogía, Química de los materiales.

Biografía: Nacido en Monclova, Coahuila. Hijo de Patricia Jaramillo y José Pablo Ruiz.

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en la carrera de Licenciatura en Química Industrial, Facultad de Ciencias Químicas en 2022

Experiencia profesional: Asistente de investigación en el grupo de investigación de Dr. Francisco Garza, desde el 2020.

Correo: [juan.dd.ruiz.j@gmail.com](mailto:juan.dd.ruiz.j@gmail.com)