

“CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL E IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS POR INFUSIÓN AL VACÍO”

BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. JORGE AARÓN CASTILLO HERNÁNDEZ

ASESOR:
DRA. ERIKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA

SINODALES:
DR. EDGAR ERNESTO VERA CÁRDENAS
DR. IRVIN ARMANDO MARTÍNEZ PÉREZ

Pachuca de Soto, Hgo. septiembre 2022
70 PÁGINAS



Instituto Tecnológico de Pachuca

ISO 9001:2015



2022 Flores
Año de **Magón**
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica ACTA

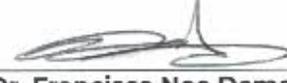
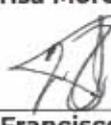
Siendo las 13:00 horas del 19 de febrero de 2022, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Caracterización microestructural e identificación de las propiedades mecánicas de materiales compuestos fabricados por infusión al vacío*, con el siguiente contenido:

- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1- Introducción
- 2- Estado del arte
- 3- Marco teórico
- 4- Procedimiento experimental
- 5- Resultados y discusión
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Jorge Aarón Castillo Hernandez obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección de la Dra. Erika Osiris Ávila Dávila.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®

 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Juan Serrano Arellano	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Ávila Dávila	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos
 Dr. Armando Irvin Martínez Pérez	 Dr. Francisco Noe Demesa	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



Instituto Tecnológico de Pachuca
EFO 90012018
Registro: RESC.1002
Vigencia: 2022.07.28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399

e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRELUDIO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



Pachuca, Hidalgo, **9/Septiembre/2022**
OFICIO No. DEPI-0123-22

**C. ING. JORGE AARÓN CASTILLO HERNÁNDEZ
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

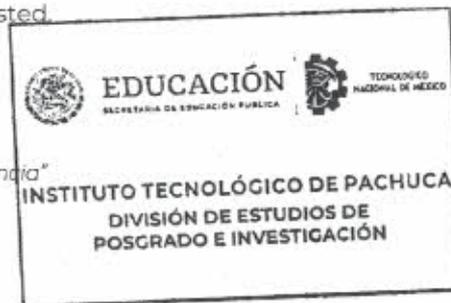
**Caracterización microestructural e identificación
de las propiedades mecánicas de materiales
compuestos fabricados por infusión al vacío**

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"



**M.A.C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo
ECCO/LMPP



Instituto Tecnológico de Pachuca
ISO 9001:2015
Registro: RSC-C-1002
Vigencia: 2022.07.28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante el periodo de estudios de maestría en el cual he desarrollado esta tesis de investigación.

A mi directora de tesis Dra. Erika Osiris Ávila Dávila por su dedicación, apoyo y guía como asesora para el desarrollo de esta investigación.

A mi codirector de tesis Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas por su guía y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A mi sinodal Dr. Armando Irvin Martínez Pérez por su guía y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A todo el cuerpo académico de la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) por haber colaborado en mi formación profesional.

A mi familia por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mis compañeros de estudios de maestría por la amistad generada durante este proceso.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema y justificación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
2. ANTECEDENTES O ESTADO DEL ARTE	4
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1. Materiales compuestos	12
3.2. Materiales compuestos reforzados.....	13
3.2.1. Reforzamiento con fibras.....	13
3.2.2. Características de los compuestos reforzados con fibras.....	13
3.2.3. Materiales de la matriz	17
3.2.4. Materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio.....	18
3.3. Manufactura de materiales compuestos.....	22
3.4. Fundamentos de tribología	24
3.5. Desgaste erosivo.....	24
3.5.1. Erosión por partículas sólidas.....	25
3.5.2. Propiedades de la partícula.....	25
3.5.2.1. Dureza.....	25
3.5.2.2. Forma.....	25

3.5.2.3.	Tamaño	26
3.5.2.4.	Ángulo de impacto.....	26
4.	MATERIAL Y MÉTODOS	27
4.1.	Preparación y análisis de especímenes	28
4.1.1.	Análisis morfológico del material de refuerzo	28
4.1.2.	Proceso de fabricación del material compuesto	28
4.1.3.	Caracterización por microscopía óptica, MEB, DR-X, FT-IR.....	29
4.1.3.1.	Preparación de muestras para visualización por MO y MEB.....	29
4.1.4.	Caracterización mecánica	32
5.	RESULTADOS	35
5.1.	Análisis morfológico del material de refuerzo	35
5.2.	Caracterización por microscopía óptica del material compuesto	36
5.3.	Caracterización por MEB del material compuesto.....	37
5.4.	Caracterización por DR-X y por FT-IR del material compuesto	38
5.5.	Caracterización mecánica del material compuesto.....	43
5.5.1.	Ensayos de Tensión	43
5.5.2.	Ensayos de Impacto	45
5.5.3.	Ensayos de Dureza.....	48
5.5.4.	Estudio de desgaste erosivo	49
5.5.5.	Estudio de Flexión	56
6.	CONCLUSIONES.....	57
7.	BIBLIOGRAFÍA	59
	ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Forma de fibra y formas de partículas [22].....	13
Fig. 2. Resistencia y módulo específicos en las fibras, en comparación con algunos metales y polímeros [23].....	16
Fig. 3. Componentes para el proceso de bolsa de vacío [24]	23
Fig. 4. Imagen de MEB de partículas de sílice: a) Partículas redondeadas; b) Partículas con bordes angulados o puntiagudos [27]	25
Fig. 5. Proceso de manufactura de placas de material compuesto	28
Fig. 6. Dimensiones de una placa de material compuesto, en este caso de aquella para el corte y preparación de especímenes del ensayo de tensión	29
Fig. 7. Preparación de especímenes para su caracterización por MO	30
Fig. 8. Microscopio Electrónico de Barrido del CNMN-IPN, Modelo JSM-7800F	31
Fig. 9. Difractómetro del Laboratorio de Ingeniería de Superficies y Manufactura Aditiva (LISMA).....	31
Fig. 10. Espectrómetro FT-IR de CINVESTAV, unidad Querétaro	32
Fig. 11. Dimensiones de probetas para los ensayos mecánicos de: a) tensión, b) impacto y c) flexión.....	33
Fig. 12. Equipo utilizado para el ensayo de desgaste erosivo por partícula sólida	34
Fig. 13. Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410	34
Fig. 14. Imágenes de la fibra de vidrio obtenidas por MO	35
Fig. 15. Micrografía y microanálisis de la fibra de vidrio obtenida por MEB	36
Fig. 16. Imágenes de compuestos obtenidas por MO secciones transversal y superficial: Material curado a 26, 40 y 60 °C	37
Fig. 17. Imágenes de compuestos obtenidas por MEB secciones transversal y superficial: Material curado a 26, 40 y 60 °C	38
Fig. 18. Difractogramas de materiales post curados a 26, 40 y 60 °C.....	39
Fig. 19. Espectros infrarrojos de a) Resina Epolam 2015 con endurecedor; compuestos post curados a: b) 26 °C, c) 40 °C y d) 60 °C	40
Fig. 20. Espectros de IR sobrepuestos de Resina Epolam 2015 y materiales post curados a 26, 40 y 60 °C obtenidos en un FT-IR Perkin Elmer	42

Fig. 21 Probetas ensayadas en máquina universal Shimatzu fabricadas a una temperatura de post-curado de 26, 40 y 60 °C	45
Fig. 22 Probetas ensayadas en máquina de impacto IZOD fabricadas a una temperatura de post-curado de 26, 40 y 60 °C	47
Fig. 23 Micrografías de probetas ensayadas en máquina de impacto IZOD.	48
Fig. 24 Resultados de ensayos de desgaste erosivo por partículas sólidas.....	49
Fig. 25 MO de probetas de desgaste de material curado a 26, 40 y 60 °C.....	51
Fig. 26 MEB de probetas de desgaste de material curado: a) 26, b) 40 y c) 60 °C.....	54
Fig. 27 Gráficas de perfil de cada espécimen después del estudio de desgaste erosivo, material curado a: a) 26 °C, b) 40 °C, c) 60°C	56
Fig. 28 Probetas de ensayo de flexión.	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de materiales de refuerzo y fibras seleccionadas [23]	15
Tabla 2. Criterios de selección para sistemas de resina epóxica [24].....	18
Tabla 3. Composición de las fibras de vidrio (peso, %) [24]	20
Tabla 4. Propiedades de las fibras de vidrio [24]	21
Tabla 5. Funciones de los componentes para el proceso de la bolsa de vacío [24].....	24
Tabla 6. Dimensiones de probetas para ensayo de tracción	33
Tabla 7 Asignación de bandas de espectros Infrarrojos de: Resina Epoxica Epolam 2015 y materiales post curados a 26, 40 y 60 °C.....	42
Tabla 8. Resultados del ensayo de tensión obtenidos según la norma ASTM D3039	44
Tabla 9. Resultados del ensayo de impacto obtenidos según la norma ASTM D256.....	46
Tabla 10 Valores de micro dureza Vickers	48
Tabla 11. Rugosidad promedio de cada espécimen antes del estudio de desgaste erosivo.....	54
Tabla 12.- Valores promedio de resistencia a la flexión	56

LISTA DE SÍMBOLOS

l : longitud de la fibra

l_c : longitud crítica de la fibra

d : diámetro de la fibra

σ_f : resistencia de la fibra

f_f : fracción volumétrica de fibra

τ_i : resistencia de la unión entre la fibra y la matriz

σ_m : esfuerzo en la matriz al romperse las fibras

f_m : fracción volumétrica de matriz

σ_y : esfuerzo de cedencia

ρ : densidad

E : módulo de elasticidad

RESUMEN

En este trabajo de investigación se analizaron los cambios producidos en la microestructura y en las propiedades mecánicas derivados de variaciones de temperatura en el proceso de post curado durante la fabricación, por medio del método de infusión de resina por bolsa al vacío, de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. Estos materiales son ampliamente utilizados como componentes estructurales en diferentes aplicaciones que requieren un buen desempeño en condiciones de cargas mecánicas complejas combinadas con requisiciones de ligereza, por ejemplo, en palas de aerogeneradores de eje vertical, en las cuales se requiere que sean ligeras pero que cuenten con buenas propiedades mecánicas, así como una buena resistencia al desgaste. Para llevar a cabo la caracterización microestructural se realizaron estudios de DR-X, FT-IR y se utilizó microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para observar los materiales. Para caracterizar mecánicamente los compuestos se realizaron pruebas, bajo normas ASTM, de dureza, resistencia al impacto, tensión, flexión y desgaste. Se concluye que, efectivamente, las variaciones de temperatura durante el proceso de post curado modifican la microestructura de los materiales derivando en cambios en sus propiedades mecánicas.

ABSTRACT

In this research work changes in the microstructure and in the mechanical properties were analyzed when making changes in the post curing temperature of fiber glass reinforced polymeric matrix composites fabricated by vacuum bagging technique. These materials are widely used as structural components in many applications that requires a good performance under mechanical stress that are combined with a lightweight need, for example, in the wind turbine blades of vertical axis, this part must be lightweight and must have good mechanical properties as well as a good wear resistance. Microstructural characterization was done using DR-X, FT-IR, optical microscopy and SEM to observe the materials. Mechanical characterization was done by measuring hardness, impact, tensile, flexural and wear strengths following ASTM standards. It was concluded that making changes in the post curing temperature of composites modifies the microstructure of materials which means changes in their mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema y justificación

Los materiales compuestos, en particular la fibra de vidrio reforzando una matriz polimérica, son ampliamente utilizados en la fabricación de álabes de aerogeneradores (tanto de eje vertical y horizontal). No están limitados a esta aplicación dentro de la industria y la vida cotidiana ya que también son utilizados en la industria automotriz, en los deportes, etc. Por lo general, para ello se usan solo cierto tipo de fibras de vidrio en base a experiencias de uso y seleccionando de una corta gama de fibra de vidrio de alta resistencia según la aplicación. Además, hay poca información confiable que garantice los valores exactos de propiedades mecánicas, químicas, etc., del material compuesto, en específico de matriz polimérica reforzado con fibra de vidrio. Es decir, sabiendo que su estructura interna puede ser modificada durante variaciones en las condiciones de operación de su proceso de fabricación, estudiar e identificar las características mecánicas y químicas de estos materiales controlando, o variando, parámetros del proceso de manufactura, infusión al vacío, es de gran interés para garantizar un tiempo de vida útil del material. En este estudio, específicamente, el compuesto se aplicará en la fabricación de palas o álabes de una turbina eólica de baja potencia. Es importante decir que, la falta de estos datos genera inseguridades en diseño como por ejemplo la adición de soportes, el uso de recubrimientos de protección, etc., que algunas veces pueden ser innecesarios considerando que para la aplicación en la fabricación de álabes de turbinas eólicas se requiere de ligereza, de un chasis simple, entre otros.

Los materiales compuestos de matriz polimérica tienen la ventaja de ser materiales con buenas propiedades mecánicas, y con baja densidad [1]. De lo anterior, este tipo de compuestos pueden aplicarse como componentes de automóviles, deportes, construcción civil y balística [2].

Ahora bien, existen diferentes métodos de fabricación de estos materiales, tales como: moldeo por contacto, técnicas asistidas por vacío, de moldeo por vía líquida y autoclaves [3]. No obstante, el uso de materiales compuestos fabricados por infusión al vacío ha incrementado considerablemente para la fabricación de, por ejemplo, partes automotrices y productos de la vida cotidiana como embarcaciones y partes de la industria aeronáutica. Una importante aplicación de los mismos es para fabricar palas o álabes de aerogeneradores [4]. La técnica de infusión al vacío destaca por la permisibilidad para obtener geometrías complejas, pero principalmente, por la relación tamaño/coste del producto [5,6]. Determinar las características físicas y químicas de compuestos

fabricados por infusión al vacío, basados en fibra de vidrio, modificando las condiciones de curado durante el proceso de fabricación del componente, permitirá establecer una metodología de fabricación de estructuras aplicadas como palas o álabes de aerogeneradores de eje vertical de baja potencia, cuya resistencia mecánica a la flexión oscila entre 253 MPa y 392 MPa, basados en estudios previos [7].

Así, en este estudio se espera que modificando las condiciones de curado del compuesto se logren incrementar, por una parte, la adherencia entre la fibra y la matriz polimérica, así como, modificar favorablemente la resistencia a la flexión del componente. No se omite mencionar que, a través de la identificación de la dureza, la resistencia a la tensión, al impacto y a la flexión de materiales compuestos fabricados por infusión al vacío, basados en fibra de vidrio, se promoverá el desarrollo y aplicación de una metodología de fabricación adecuada para mejorar el valor de las propiedades mecánicas del material objeto de estudio.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar la microestructura de materiales compuestos e identificar las variaciones de sus propiedades mecánicas para su aplicación en aerogeneradores de eje vertical cuando se modifica la temperatura de post-curado durante el proceso de fabricación por infusión al vacío.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Fabricar por infusión al vacío placas de material compuesto de matriz polimérica, Epolam 2015, reforzadas con fibra de vidrio, tipo E, con un arreglo bidireccional para analizar los cambios provocados por tres diferentes temperaturas en el proceso de post curado: 26, 40 y 60 °C
2. Determinar bajo norma (ASTM) la dureza, resistencia a la tensión, al impacto y a la flexión de las placas obtenidas a tres diferentes temperaturas de curado para caracterizar mecánicamente los materiales considerando que serán utilizados en la fabricación de palas de aerogenerador.

3. Identificar la resistencia al desgaste erosivo de cada placa curada a diferente temperatura para su aplicación en palas de aerogeneradores considerando que estos componentes sufren daño por partículas durante su vida útil.

2. ANTECEDENTES O ESTADO DEL ARTE

Desde hace años, se ha investigado el uso de materiales compuestos dentro de distintos ramos de la industria. A continuación, se muestran estudios previos relacionados con el tema de la presente investigación.

Wilson Webo, Leonard Masu y Maina Maringa [8] realizaron un estudio en el cual registraron los efectos de tres tratamientos químicos en compuestos fabricados con fibra de sisal (*Agave sisalana*) y resina epoxi (Epolam 2014 y Epolam 2015) como matriz. La principal razón de este estudio fue debido a la limitación de las propiedades mecánicas en compuestos basados en fibras naturales, cuyo principal problema es la incompatibilidad química entre las moléculas hidrofílicas de la fibra natural y las moléculas hidrofóbicas de la resina. Esta incompatibilidad conduce a dificultades para garantizar la unión de la interfaz fibra- matriz que, a su vez, causa ineficacia en la transferencia de carga entre el material de refuerzo y la matriz. Así, los autores analizaron los efectos de: mercerización, tratamiento superficial de silano e hidrólisis; y, luego de la aplicación de estos tratamientos en las fibras de sisal usaron el método de infusión al vacío para la fabricación de sus compuestos. Posteriormente, llevaron a cabo un proceso de curado al aire por 24 h y después calentaron el material por 4 h a 80°C en un horno. Para determinar la tenacidad a la fractura de los compuestos los autores realizaron pruebas de impacto Charpy basados en la norma ASTM D6110-10. Hicieron también pruebas de dureza usando la norma ASTM D 2583 con un Durómetro Barcol GYZJ-934-1. En su estudio, las superficies de los compuestos obtenidos (tratados y no tratados) se analizaron mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido en un Zeiss environmental SEM modelo ECO HD 15. Los resultados obtenidos en su trabajo mostraron que las dimensiones de la sección transversal de las fibras de sisal tratadas son más pequeñas (180.3µm) que las no tratadas (286.6µm). Estas reducciones de tamaño en las fibras tratadas mejoraron las propiedades mecánicas respecto a las no tratadas debido al incrementó en el número de fibras de refuerzo que pueden ser agregadas en la matriz. A partir de sus resultados, los autores concluyeron que los tratamientos químicos de las fibras de sisal incrementan la resistencia al impacto, así como la dureza de los compuestos fabricados.

Paul S. Veers *et al.* [9] analizaron las tendencias en el diseño, manufactura y el proceso evolutivo de álabes de turbinas eólicas mostrando la exploración de nuevos conceptos de diseño, así como la incorporación de nuevos materiales para la fabricación de aspas, pero también la utilización de

procesos de manufactura más eficientes. En su trabajo, mostraron las seis primeras etapas de investigación del programa europeo “Optimat blades”, las cuales consisten en: carga de amplitud variable; estados de tensión multiaxial; condiciones (ambientales) extremas; laminados gruesos y reparación; evaluación de la resistencia y condición residual; y recomendaciones de diseño. Así mismo, los autores analizaron la aplicación de 2 materiales de refuerzo diferentes y concluyeron que una elevada producción de éstos traería como consecuencia una disminución importante de su costo, logrando que por ejemplo la fibra de vidrio tipo S-glass, cuyo costo es aún muy elevado, compita para su utilización en la fabricación de álabes de turbinas eólicas contra la fibra ya utilizada E-glass.

E. E. Vera Cárdenas *et al.* [10] realizaron un estudio a compuestos fabricados con dos materiales de refuerzo distintos, fibra de carbono y fibra de vidrio. Estos se manufacturaron mediante el método de moldeo por transferencia de resina (RTM del inglés: Resin Transfer Molding) para su aplicación estructural como álabes de turbina. El material fabricado consistió de 4 mm de espesor. Cada composito se reforzó con fibras, como se mencionó antes, en uno se usó fibra de carbono y en el otro se usó fibra de vidrio. Como matriz se utilizó la resina Epolam 2015 y endurecedor 2015, mezclando 100 g de resina por 32 g de endurecedor. En su estudio el proceso de manufactura se llevó a cabo inyectando 17 cm³/min de resina/endurecedor a 50°C y aplicando una presión positiva de 70 psi durante 120 min con un tiempo de curado de 4.5 h a 60 °C. Los resultados que obtuvieron estos autores confirman que las condiciones de RTM son adecuadas para la obtención de composites para su aplicación en la manufactura de palas de turbinas eólicas.

Lijin Thomas y Ramachandra M. [11] hicieron un análisis sobre materiales avanzados utilizados en la fabricación de álabes de turbinas eólicas. En su estudio identificaron la necesidad del incremento de la eficiencia de la turbina, lo cual ha llevado a la innovación en el diseño de las palas con un sistema avanzado de materiales. En su trabajo muestran que los materiales alternativos con buenas propiedades como: baja densidad, amplia vida de servicio, facilidad de procesamiento, capacidad de reciclaje y mejor relación calidad/costo, se encuentran en constante investigación con el propósito de incrementar su rendimiento aerodinámico, de reducir el efecto de fuerzas gravitacionales sobre los álabes y de reducir su degradación durante el servicio (es decir, se pretende mejorar su ciclo de vida útil). Para solventar estas necesidades se busca desarrollar álabes con buena rigidez, con resistencia a esfuerzos mecánicos y con una elevada resistencia a la fatiga. Los autores destacan las buenas propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la

fabricación de palas, pero su falta de propiedades biodegradables afecta drásticamente al medio ambiente. Así, en su trabajo manifiestan los pros y los contras de la utilización de materiales compuestos basados en fibras naturales y de materiales compuestos híbridos. En su trabajo, los autores mencionan un estudio realizado por J.W. Holmes y colaboradores, en el cual fueron identificadas las propiedades mecánicas de la chapa de bambú y de laminados de madera contra laminados de abedul y vidrio. Los laminados de bambú y la madera manifestaron mayor resistencia a esfuerzos mecánicos, así como resistencia a la fatiga y a la fractura, respecto a la que posee el laminado de abedul. Con respecto a los laminados de bambú y de madera, los valores de las propiedades mecánicas identificados en su estudio fueron muy similares a aquellos del compuesto basado en fibra de vidrio de matriz polimérica. También, en este estudio los autores hicieron una importante mención a la Universidad de Nottingham sobre el desarrollo de un álabe de turbina fabricado con fibra de lino, la cual pasó la prueba IEC61400 indicando así un éxito en la utilización de este material. En contraste, un estudio realizado por A.A Abdul Nasir y colaboradores, mostró el efecto de un proceso de maquinado en fibra de lino, en el que ocurrió delaminación debido a la fractura de fibras frágiles. Ello, se identificó por los autores como una importante desventaja sobre usar fibras naturales en compuestos para la fabricación de álabes de turbinas eólicas.

Antoine Le Duigou, Peter Davies y Christophe Baley [12] estudiaron las propiedades interfaciales de un compuesto fabricado con fibra de lino embebida en una matriz de Poly ácido L-Láctico grado L9000 de la marca Biomer, PLLA, y las compararon con aquellas de compuestos de: poliéster reforzado con fibra de lino, epoxi reforzado con fibra de lino y poliéster reforzado con fibra de vidrio. El polímero epóxico utilizado en su estudio es el mismo que se usó para la fabricación de los compuestos de esta investigación, DGEBA-Axson Epolam 2015. En su trabajo, los autores utilizaron una relación de resina más endurecedor del 32% en peso de un endurecedor de amina alifática. Las resinas fueron curadas a 65 °C durante 14 h. También, consideraron importante identificar el diámetro de las fibras utilizadas. Finalmente, llevaron a cabo una prueba, de micro enlace, para identificar su efecto en la interface entre los materiales que conformaron sus compuestos. A su vez, esta prueba ayudó a estimar la resistencia al corte interfacial (del inglés Interfacial Shear Stress, IFSS) y también los esfuerzos por fricción de los micro enlaces en el material compuesto de fibras de Lino en PLLA. Los autores determinaron que las propiedades interfaciales del enlace Lino/PLLA son similares a aquellas identificadas en el Vidrio/Poliéster. Para intentar comprender el fenómeno que gobierna los mecanismos interfaciales del Lino/PLLA

fueron llevados a cabo diferentes tratamientos a los compuestos fabricados, obteniendo como resultado distintas microestructuras, así como diferentes estados de esfuerzos residuales dentro del material. Se concluyó que las propiedades interfaciales son controladas por dos mecanismos: esfuerzos térmicos residuales inducidos por cristalización y también fenómenos de cristalización. Tewari *et al.* [13] llevaron a cabo un estudio sobre la erosión de compuestos fabricados con fibra de carbono y con fibra de vidrio en una matriz epóxica usando partículas sólidas. Se fabricaron manualmente placas de 30 x 30 cm con un arreglo unidireccional utilizando fibra de carbono de la marca Celion G 30-500 con resina epóxica de la marca RIGIDITE 5212 y fibra de vidrio con resina epóxica de la marca RIGIDITE 5217. Las pruebas erosivas se hicieron con una presión de 4 bares utilizando una boquilla de 80 mm de largo y 8 mm de diámetro. La velocidad promedio fue de 45 ± 5 m/s a una distancia de 160 mm desde la punta de la boquilla a la probeta. El desgaste se midió por el método de pérdida de peso después de 15 segundos de erosión. Las probetas erosionadas fueron caracterizadas con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido. Los resultados de su estudio mostraron la influencia del ángulo de impacto en el desgaste erosivo de ambos compuestos, obteniendo mayor desgaste cuando el ángulo de impacto es de 60° . Finalmente, los autores determinaron que el fenómeno de erosión se caracteriza por múltiples microfracturas en la matriz y al desprendimiento entre las fibras y la matriz.

N. Yang y H. Nayeb-Hashemi [14] realizaron un análisis del efecto que tiene el uso de distintas partículas sólidas en el proceso de erosión de un compuesto fabricado con fibra de vidrio de matriz epóxica. Además, identificaron cómo se relaciona el desgaste producido con el deterioro de las propiedades de resistencia a la tensión y de resistencia a la fatiga del material. Así, los autores fabricaron probetas con un arreglo unidireccional de fibra de vidrio tipo E de matriz epóxica. A diferencia de otras investigaciones, en este trabajo pegaron tablillas de aluminio en los extremos de las probetas con la ayuda de adhesivo Hysol 9096 para crear la forma de hueso en sus especímenes. La erosión con partículas sólidas se llevó a cabo a diferentes tiempos, con ángulos de impacto de 30° , 60° y 90° . Para el estudio, se utilizaron partículas de carburo de silicio con un diámetro de 500 a 600 μm en una mezcla con aire y arena a través de una boquilla de 1 cm de diámetro a una distancia de la probeta de 11 cm. La velocidad de las partículas se mantuvo constante a 42 m/s (153 km/h) y el volumen de partícula-aire fue constante a 6 kg/m^2 para todas las pruebas. Solo un lado de las probetas fue erosionado. Para monitorear el material removido y la pérdida de la masa las probetas fueron pesadas antes y después de la simulación. Los especímenes

expuestos a 60 y 90° mostraron un gran daño, penetración completa en algunos casos. Para realizar las pruebas de tensión, los autores llevaron a cabo los ensayos a una velocidad de aplicación de carga de 0.00175 mm/s. Usaron tres probetas para cada condición de erosión. La pérdida de peso y la resistencia a la tracción contra el desgaste erosivo evidenciaron que el material se comportó de manera frágil. Las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido de los compuestos erosionados mostraron que ocurren los mismos mecanismos de daño a diferentes ángulos de impacto de partículas sobre el material.

Woobeom Han *et al.* [15] llevaron a cabo un estudio computacional de dinámica de fluidos (CFD por sus siglas en inglés) sobre la erosión en el borde de ataque de álabes de turbinas eólicas. El estudio se realizó a una turbina eólica de 5 MW del National Renewable Energy Laboratory- NREL por sus siglas en inglés. Los autores variaron intencionalmente el ambiente y las condiciones de erosión a las que se somete un álabe. Definieron tres condiciones de erosión: profundidad de erosión de 3.4, 3.6 y 4.8 mm (baja, moderada y alta erosión, respectivamente), con ancho de erosión de: 10, 17.4 y 37 mm. Para su análisis utilizaron el software Star CMM+, con un tiempo de simulación de 0.8 s, la velocidad del viento utilizada fue de 89.6326 m/s con una turbulencia de 0.01 %. El mallado usado fue del tipo hexagonal para mejorar la convergencia y fiabilidad del cálculo. La simulación fue realizada con granos de arena de 0.3 mm, cuyo parámetro de forma se fijó como un cuadrado. Sus resultados muestran que la acumulación de contaminación en el ambiente disminuye el coeficiente de sustentación y arrastre hasta en 27 % y 159 %, respectivamente. Además, en el borde de ataque el coeficiente de sustentación disminuyó y el de arrastre incrementó en 53 % y 314 %, respectivamente. La reducción en el rendimiento aerodinámico incrementa con el grado de daño en el borde de ataque del álabe, especialmente en secciones expuestas a valores de ángulos de ataque altos (más de 10°).

Jinhu Chen *et al.* [16] estudiaron el desgaste erosivo en compuestos de matriz polimérica reforzados con nanotubos de carbono (CNT-por sus siglas en inglés). Para crear el compuesto, se fabricaron películas delgadas de CNT con un espesor de 30-50 μm y con éstas se fabricó un arreglo unidireccional y un arreglo bidireccional a 0° y 90° utilizando resina epóxica Araldita LY 556 y endurecedor XB 3473. El compuesto se fabricó con el método de bolsa al vacío y fue curado durante 2 h a 120 °C + 2 h a 140 °C + 2 h a 180 °C. Los autores realizaron pruebas erosivas con una máquina por aceleración centrífuga utilizando arena de olivino, con tamaño de grano de 238 μm a una velocidad de 40 m/s estudiando el impacto a 4 ángulos diferentes (20 °, 30 °, 45 ° y 90 °). Así,

concluyeron que el compuesto con arreglo unidireccional tiene un comportamiento frágil y que el máximo desgaste erosivo ocurrió a un ángulo de impacto de 90° . También, determinaron que los CNT conservan una buena adhesión con la matriz epóxica cuando se tiene un bajo ángulo de impacto. Por el contrario, a un valor alto de ángulo de impacto se observó la formación de microfisuras.

A. Santoshkumar Malipatil [17] realizó un estudio experimental y numérico en el que analizó la erosión de un compuesto de matriz polimérica (PMC por sus siglas en inglés) de fibra de carbono en viniléster, específicamente Ecmalon 9911. En su estudio analizó el efecto de 3 velocidades y 3 ángulos de impacto diferentes ($50, 75$ y 100 m/s y $45^\circ, 60^\circ$ y 75°) así como también de 3 diferentes tamaños de partícula erosiva y 3 diferentes distancias desde la punta de la boquilla hasta la probeta de erosión ($200, 300$ y 400 μm y $120, 180$ y 240 mm). Utilizó arena de sílice seca a temperatura ambiente bajo la norma ASTM G76 y una máquina de impacto por chorro de aire. El autor identificó que el tamaño de la partícula erosiva no tiene un papel significativo, pero si el ángulo de impacto siendo el ángulo a 60° aquel en donde se presentó mayor desgaste. El autor concluyó que el proceso de erosión depende solamente de la velocidad y ángulo de impacto y que este proceso conlleva a la ocurrencia de microfisuras, exposición de las fibras y remoción de resina.

Uttam Kumar Debnath *et al.* [18], caracterizaron compuestos reforzados con fibra de carbono en un arreglo multidireccional fabricados manualmente y analizaron su desgaste erosivo. En su estudio usaron granos de sílice seco tipo cuarzo con forma irregular de diferentes tamaños ($200-300, 400-500$ y $500-600$ μm) y con diferentes durezas ($40, 45$ y 47 MPa). En su trabajo resaltan la importancia del efecto del ángulo de impacto, el tamaño de la partícula y la distancia de la boquilla a la probeta durante un estudio de desgaste erosivo. Se concluyó que para valores pequeños de ángulos de impacto la erosión se mantiene baja, pero se obtiene un nivel máximo de desgaste a 60° . Luego, al sobrepasar este ángulo de impacto el desgaste en su compuesto disminuyó.

Parvesh Antil *et al.* [19] realizaron un análisis del desgaste erosivo de compuestos de matriz epóxica reforzados con fibra. Los refuerzos de fibra usados fueron vidrio tipo E, tipo S y carburo de silicio (SiC). Los autores basaron su análisis en la metodología de Taguchi utilizando ángulos de impacto entre 30° y 90° durante 240 segundos a temperatura ambiente con partículas tamizadas en tres tamaños distintos. Concluyeron que el tamaño de la fibra de refuerzo es un factor dominante que afecta la resistencia a la erosión en la superficie del compuesto. También, determinaron que el

ángulo de ataque y de la fibra de refuerzo son parámetros importantes para modificar la resistencia a la erosión de compuestos.

Z.H. Ren *et al.* [20] realizaron una investigación sobre el desgaste erosivo de compuestos de fase continua de espuma de SiC embebida en una matriz epóxica. La resina usada fue E-51. Para la fabricación de los compuestos utilizaron el método de moldeo por compresión al vacío y un proceso de curado a 100 °C, a presión constante de 10 MPa, durante 4 h. Las pruebas de erosión las llevaron a cabo en una máquina de disco rotatorio, con una mezcla de agua y arena de cuarzo comercial con tamaño de grano tamizado de 70 μm a 150 μm , a una velocidad de 10 m/s y con un contenido de arena de 10 kg/m^3 . En su estudio concluyeron que el coeficiente de erosión tiene un valor relativamente grande antes del punto de transición, pero este disminuye al pasar este punto. Así mismo, determinaron que el desgaste erosivo aumenta conforme a la velocidad de flujo y el contenido de arena lo hacen.

H. H. Ya *et al* [21] estudiaron el proceso de desgaste erosivo seco y húmedo de un fluido bifásico. Su investigación se llevó a cabo sobre placas de acero dulce de 50 mm x 40 mm. Las pruebas de erosión se llevaron a cabo con partículas finas de 60 μm en una mezcla de arena-agua durante 5 h, a diferentes ángulos de impacto (-30 °, 30 ° y 90 °) y una velocidad constante de 0.124 m/s. Los autores concluyeron que la erosión por partículas finas cambió significativamente la rugosidad, observando una degradación de 800 % a un ángulo de ataque de 90 ° y que el valor de la dureza disminuye inversamente proporcional al desgaste erosivo.

Este trabajo de tesis se centra en modificar los parámetros de fabricación de un material compuesto de matriz polimérica ampliamente utilizado desde la fabricación de artículos deportivos hasta componentes estructurales con geometría compleja. Lo anterior, sabiendo que en diferentes estudios han identificado cambios en las características mecánicas al modificar por ejemplo la superficie de las fibras o la relación fibra/resina, entre otros. No obstante, son pocos los estudios en donde se ha modificado la temperatura del proceso de post curado de materiales compuestos fabricados mediante infusión al vacío, específicamente de los compuestos de resina epoxica y fibra de vidrio en una proporción de 50-50% con un arreglo bidireccional. El interés científico por analizar el efecto de modificar particularmente la temperatura del proceso de post curado de estos materiales radica en la hipótesis de lograr modificar su cristalinidad o el grado de polimerización del material, lo que en consecuencia puede mejorar el comportamiento o la respuesta mecánica del

material sin necesidad de recurrir a técnicas que impliquen un costo extra como adicionar partículas o utilizar otro tipo de fibras.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Materiales compuestos

En [22] se define un material compuesto como la combinación de dos o más materiales químicamente diferentes. Los materiales constituyentes mantienen sus identidades separadas, aun así, su combinación produce propiedades y características diferentes de cuando se encuentran separados. Uno de los componentes forma una fase continua llamada matriz, el otro componente es un refuerzo en forma de fibras o partículas (Fig. 1), que por lo general es agregado a la matriz para mejorar o alterar sus propiedades. El refuerzo forma una fase discontinua que es dispersada uniformemente en la matriz. Mallick explica que el material de la matriz en un composito puede ser un polímero, un metal o un cerámico. Dependiendo de la matriz usada, los materiales compuestos son clasificados como: compuestos de matriz polimérica (PMCs del inglés Polymer Matrix Composites), compuestos de matriz metálica (MMCs del inglés Metal Matrix Composites), o compuestos de matriz cerámica (CMCs del inglés Ceramic Matrix Composites).

También se explica que las fibras son el componente principal que soporta las cargas en un composito. La efectividad de las fibras de refuerzo depende del tipo, longitud, fracción de volumen y orientación de las fibras en la matriz. Una selección adecuada de estas fibras es de suma importancia debido a su influencia en una o más de las siguientes características del composito:

- Densidad
- Esfuerzo y módulo a la fluencia
- Esfuerzo de compresión y módulo de compresión
- Resistencia a la fractura y rendimiento en la fatiga
- Respuesta a cargas de impacto
- Propiedades eléctricas y térmicas
- Costo

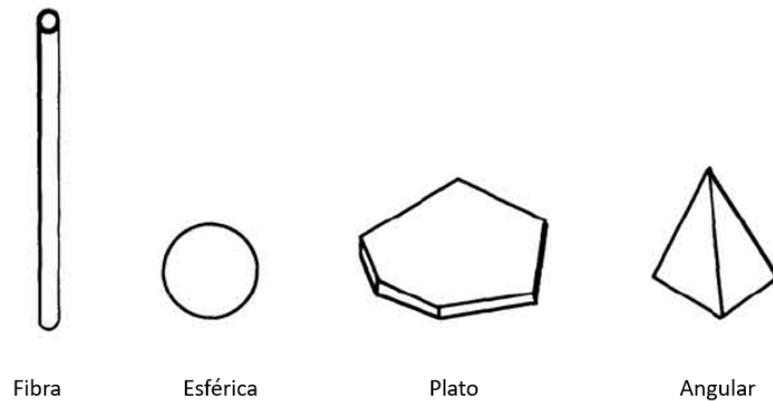


Fig. 1. Forma de fibra y formas de partículas [22].

De acuerdo con [23], los materiales compuestos se pueden clasificar en tres categorías:

1. Con partículas (por ejemplo: el concreto, que es una mezcla de cemento y grava)
2. Con fibras (por ejemplo: la fibra de vidrio)
3. Laminares (por ejemplo: la madera contra chapada o Plywood)

Si las partículas de refuerzo están distribuidas uniformemente, los compuestos particulados tendrán propiedades isotrópicas, los compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos, los laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópico.

3.2. Materiales compuestos reforzados

3.2.1. Reforzamiento con fibras

Así mismo, en [23] se menciona que la mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso al incorporar fibras resistentes y rígidas, pero se obtienen comportamientos frágiles si se mezclan fibras resistentes en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada.

Las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen un material adecuado para aplicaciones en la industria automotriz y en la industria aeroespacial.

3.2.2. Características de los compuestos reforzados con fibras

Al diseñar un compuesto reforzado con fibras se deben tomar en consideración muchos factores como la longitud, el diámetro, la orientación, la cantidad y propiedades de las fibras, las propiedades de la matriz y la unión entre fibras y matriz.

- Longitud y diámetro de las fibras: las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo se caracterizan sus dimensiones mediante la relación forma l/d donde l es la longitud de las fibras y d su diámetro. La relación del compuesto mejora cuando la relación de forma es grande. A menudo las fibras se fracturan debido a defectos de superficie. Fabricar las fibras con un diámetro lo más pequeño posible otorga menos área superficial logrando menos defectos que pueden propagarse durante el proceso de fabricación o durante la utilización del material resultante. Por lo general se prefieren fibras largas. Para cualquier diámetro dado de fibra d se puede determinar la longitud crítica de la fibra l_c como lo muestra la ecuación 1

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i} \quad \text{Ec.1}$$

Donde σ_f es la resistencia de la fibra y τ_i está relacionado con la resistencia de la unión entre la fibra y la matriz o al esfuerzo al que la matriz se empieza a deformar. Si la longitud l de la fibra es menos que l_c , se observa poco efecto reforzante; si es mayor que aproximadamente $15 l_c$, la fibra se comporta casi como si fuera continua. La resistencia del material compuesto se puede estimar a partir de la ecuación 2

$$\sigma_c = f_f \sigma_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + f_m \sigma_m \quad \text{Ec.2}$$

Donde σ_m es el esfuerzo de la matriz al romperse las fibras.

- Cantidad de fibras: una fracción mayor de volumen de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del material compuesto, sin embargo, la fracción máxima de volumen de fibras es aproximadamente 80%, más allá de esta cantidad, las fibras ya no quedan totalmente rodeadas por la matriz.
- Orientación de las fibras: las fibras de refuerzo pueden introducirse en la matriz con diferentes orientaciones. Los arreglos unidireccionales con fibras largas e incluso continuas producen propiedades anisotrópicas con resistencia y rigidez particularmente buenas cuando se aplican cargas paralelas a las fibras. Estas fibras se denominan como capas de 0° indicando que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado. Sin embargo, si la carga es perpendicular a las fibras, la orientación unidireccional origina propiedades pobres. En la matriz se pueden introducir fibras largas y continuas en varias

direcciones, mediante arreglos ortogonales (capas de 0° /90°) se obtienen buenas resistencias en dos direcciones perpendiculares. Disposiciones más complejas (como capas de 0°/±45° /90°) proporcionan refuerzo en varias direcciones. Las fibras también se pueden organizar en tejidos tridimensionales.

- Propiedades de las fibras: en la mayoría de los compuestos reforzados con fibras, estas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Por lo que la resistencia específica y el módulo específico de la fibra son características importantes y se pueden calcular con la ecuación 3 y 4 respectivamente:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad \text{Ec.3}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \quad \text{Ec.4}$$

Donde σ_y es el esfuerzo de cedencia, ρ la densidad y E el módulo de elasticidad. En la Tabla 1 y en la Figura 2 se muestran las propiedades de fibras típicas.

Tabla 1. Propiedades de materiales de refuerzo y fibras seleccionadas [23].

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (ksi)	Módulo de elasticidad (x10 ⁶ psi)	Temperatura de fusión (°C)	Módulo específico (x10 ⁷ plg)	Resistencia específica (x10 ⁶ plg)
Polímeros						
Kevlar	1.44	650	18.0	500	34.7	10.1
Nylon	1.14	120	0.4	249	1.0	2.9
Polietileno	0.97	480	25.0	147	7.1	13.7
Metales						
Be	1.83	185	44.0	1277	77.5	2.8
Boro	2.36	500	55.0	2030	64.7	4.7
W	19.40	580	59.0	3410	8.5	0.8
Vidrio						
Vidrio E	2.55	500	10.5	<1725	11.4	5.6
Vidrio S	2.50	650	12.6	<1725	14.0	7.2
Carbono						
HS (alta resistencia)	1.75	820	40.0	3700	63.5	13.0
HM (alto módulo)	1.90	270	77.0	3700	112.0	3.9
Cerámicos						

Al₂O₃	3.95	300	55.0	2015	28.8	2.1
B₄C	2.36	330	70.0	2450	82.4	3.9
SiC	3.00	570	70.0	2700	47.3	5.3
ZrO₂	4.84	300	50.0	2677	28.6	1.7
Whiskers						
Al₂O₃	3.96	3000	62.0	1982	43.4	21.0
Cr	7.20	1290	35.0	1890	13.4	4.9
Grafito	1.66	3000	102.0	3700	170.0	50.2
SiC	3.18	3000	70.0	2700	60.8	26.2
Si₃N₄	3.18	2000	55.0		47.8	17.5

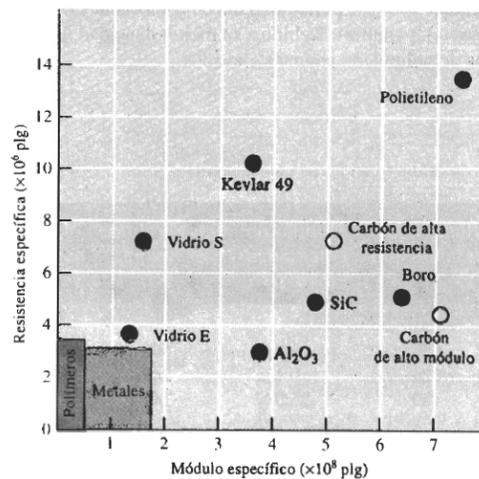


Fig. 2. Resistencia y módulo específicos en las fibras, en comparación con algunos metales y polímeros [23].

- Propiedades de las matrices: la matriz de un material compuesto contiene las fibras manteniéndolas en su posición, transfiere la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso, pero también evitan la propagación de grietas en las fibras a todo lo largo del compuesto. Por lo general, la matriz es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto. Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayoría de los polímeros, tanto termoplásticos como termoestables están disponibles en grados correspondientes a reforzamiento con fibras de vidrio.
- Unión y falla: particularmente en los compuestos de matriz polimérica y metálica, debe obtenerse una buena unión entre los constituyentes. Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz si la carga debe transferirse correctamente de la matriz a las fibras. Si la unión es pobre, las fibras pueden salir de la matriz durante la carga, reduciendo la resistencia y la resistencia a la fractura del compuesto. En algunos casos, para mejorar la

unión, se pueden utilizar recubrimientos especiales. Otra propiedad que debe considerarse al introducir fibras en una matriz es la similitud de los coeficientes de expansión térmica de ambos materiales, si la fibra se expande y contrae a una razón muy diferente a la de la matriz, las fibras se pueden romper o la unión se puede destruir causando falla prematura. En muchos compuestos, las capas o chapas individuales de tejido se unen. La unión entre estas capas también debe ser buena o puede ocurrir otro problema: la “delaminación”, esto es que las capas pueden separarse bajo carga y causar falla.

3.2.3. Materiales de la matriz

De acuerdo a lo mencionado en [24] las funciones y requerimientos de la matriz son los siguientes:

- Mantener las fibras en su lugar
- Ayudar a distribuir las cargas
- Proteger los filamentos o fibras colocados en el sistema
- Controlar las propiedades eléctricas y químicas del composito
- Lidiar con el esfuerzo cortante interlaminar

Así mismo, las necesidades o propiedades deseadas de la matriz, que dependen del propósito de la estructura son:

- Minimizar la absorción de la humedad
- Contar con un bajo parámetro de contracción
- Tener un bajo coeficiente de expansión térmica
- Debe fluir para penetrar completamente entre el conjunto de las fibras y eliminar los vacíos durante el proceso de curado
- Debe tener una resistencia razonable, la elongación debe ser mayor a la de las fibras
- Debe ser elástico para transmitir las cargas a las fibras
- Ser resistente a temperaturas elevadas (dependiendo de la aplicación)
- Tener una baja resistencia a la temperatura (dependiendo de la aplicación)
- Contar con una buena resistencia química (dependiendo de la aplicación)
- Debe tener una buena estabilidad dimensional (mantener su forma)

Existen diferentes elecciones de matriz, cada tipo afecta en la técnica de procesamiento, propiedades físicas y mecánicas, pero también en la resistencia al ambiente del compuesto final. Las matrices termoplásticas más comunes son:

- Poliéster y vinilos
- Epoxi
- Maleimidas (BMI del inglés Bismaleimide)
- Poliamida
- Ester de cianato y triazina fenólica

Cada sistema de resinas tiene sus contras, los cuales deben ser tomados en cuenta para los planes de diseño y manufactura. Las matrices de poliéster han sido usadas por un largo tiempo, y son usadas en un amplio rango de estructuras. Las matrices de epoxi las más utilizadas en materiales compuestos avanzados, estas resinas son más costosas que los poliésteres y no tienen las mismas capacidades de alta temperatura que tienen las Maleimidas o poliamidas, pero los epoxis son más utilizados por las ventajas que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de selección para sistemas de resina epóxica [24].

Ventajas	Desventajas
Adhesión de fibras y de resina	Resinas tóxicas cuando no están curadas
Sin formación de subproductos durante el curado	Absorción de humedad
Baja contracción durante el curado	Punto de distorsión de calor reducido por absorción de humedad
Alta o baja fuerza o flexibilidad	Cambio de dimensiones y propiedades físicas debido a la absorción de humedad
Resistencia a solventes y químicos	Uso limitado alrededor de 200°C máximo (en seco)
Resistencia a la fluencia y a la fatiga	Dificultad para combinar resistencia a la tenacidad y a la temperatura
Resinas sólidas y líquidas en estado no curado	Alto coeficiente de expansión térmica
Amplio rango de opciones de curado	Alto grado de liberación de humo en un incendio
Radio de curado ajustable	Puede ser sensible a la degradación por luz ultravioleta
Buenas propiedades eléctricas	Curado lento

3.2.4. Materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio

En [24] se describe la composición del vidrio, así como las propiedades de las fibras de vidrio explicando que este es definido generalmente, como un material amorfo, siendo líquido o sólido.

Además, explican que existen diferentes composiciones de fibra de vidrio dependiendo de las propiedades que se deseen como resultados de las fibras (Tabla 3).

- A-Vidrio: un vidrio con elevado álcali es convertido en fibras para su uso en donde se necesita una buena resistencia química
- E-Vidrio: un vidrio con bajos álcali, basado en boro silicato de aluminio. Este tipo posee excelentes propiedades como aislante eléctrico y es la fibra de más alta calidad utilizada en la mayor parte de producción textil de fibra de vidrio.
- C-Vidrio: un material basado en carbonato de boro silicato que produce una fibra con excelente resistencia química
- S-2 Vidrio: este vidrio está compuesto de magnesio y silicato de aluminio, ofrece una alta resistencia física. Las fibras producidas de este tipo de vidrio tienen aproximadamente el 40% de mejora en la resistencia a la tracción que las fibras compuestas con E-Vidrio.
- D-Vidrio: estas fibras son obtenidas de una composición con bajos dieléctricos, tiene propiedades de pérdidas dieléctricas (constante dieléctrica de 3.8 a 1 mcs-1) superior a la del E-Vidrio (6.0 a 1 mcs-1).
- R-Vidrio Una composición especial de vidrio que produce fibras con resistencia álcali, generalmente es usada para reforzar concreto.
- Bajo K: una fibra experimental creada para mejorar propiedades de pérdida dieléctrica en aplicaciones de electricidad (similar a las propiedades del D-Vidrio).
- Fibra hueca: un vidrio especial cuyas fibras tienen forma de tubo, es decir, son huecas; este material tiene aplicaciones específicas en partes reforzadas de aeronaves en las que el peso es muy importante.
- Te vidrio: un S-Vidrio japonés, fabricado para aplicaciones de alta resistencia estructural.

Tabla 3. Composición de las fibras de vidrio (peso, %) [24].

Componentes	Grado de vidrio			
	A (alto álcali)	C (Químico)	E (eléctrico)	S (alta resistencia)
Oxido de silicón	72.0	64.6	54.3	64.2
Oxido de aluminio	0.6	4.1	15.2	24.8
Oxido de hierro	-	-	-	0.21
Oxido de calcio	10.0	13.2	17.2	0.01
Oxido de magnesio	2.5	3.3	4.7	10.27
Oxido de sodio	14.2	7.7	0.6	0.27
Oxido de potasio	-	1.7	-	-
Oxido de boro	-	4.7	8.0	0.01
Oxido de bario	-	0.9	-	0.2
Varios	0.7	-	-	-

Así mismo, se explica que la composición de la fundición original juega un rol determinante en las propiedades de las fibras de vidrio, indicando que la continua y creciente utilización de la fibra de vidrio puede deberse a las diversas aplicaciones relacionadas con sus propiedades únicas que esta posee (Tabla 4).

- Alta resistencia a la tracción: La fibra de vidrio cuenta con una excepcional resistencia a la tracción comparada con otras fibras textiles, la proporción de su resistencia-peso excede a la del alambre de acero en algunas aplicaciones.
- Resistencia al calor y al fuego: Debido a que las fibras de vidrio son un material inorgánico no se quema, es decir, no propicia la combustión.
- Resistencia química: las fibras de vidrio tienen una excelente resistencia a la mayoría de los químicos y son impermeables ante los hongos, bacterias e insectos.
- Resistencia a la humedad: esta propiedad se debe a que las fibras de vidrio no absorben el agua, ni se hinchan, comprimen o descomponen. La fibra de vidrio no se pudre fácilmente y continúa manteniendo su resistencia mecánica en ambientes húmedos.
- Propiedades térmicas: debido a su bajo coeficiente de expansión lineal térmica y a su alto coeficiente de conductividad térmica, la fibra de vidrio muestra un excelente desempeño en ambientes térmicos.

- Propiedades eléctricas: Al carecer de conductividad eléctrica, la fibra de vidrio tiene una aplicación ideal como aislante eléctrico.

Tabla 4. Propiedades de las fibras de vidrio [24].

	Grado de fibra			
	A	C	E	S
Propiedades físicas				
Gravedad específica	2.50	2.49	2.54	2.48
Dureza de Mohs	-	6.5	6.5	6.5
Propiedades mecánicas				
Resistencia a la tracción, psix10³ (MPa)				
A 72°F (22°C)	440 (3033)	440 (3033)	500 (3448)	665 (4585)
A 700°F (371°C)	-	-	380 (2620)	545 (3758)
A 1000°F (538°C)	-	-	250 (1724)	350 (2413)
Módulo de elasticidad				
A 72°F (22°C), psix10⁶ (GPa)	-	10.0 (69.0)	10.5 (72.4)	12.4 (85.5)
Elongación, %	-	4.8	4.8	5.7
Recuperación elástica, %	-	100	100	100
Propiedades térmicas				
Coefficiente de expansión térmica lineal, °F⁻¹1x10⁻⁶ (°C⁻¹)	4.8 (8.6)	4.0 (7.2)	2.8 (5-0)	3.1 (5.6)
Coefficiente de conductividad térmica, Btu.in.h⁻¹.ft⁻²°F⁻¹ (Wm⁻¹K⁻¹)	-	-	72(10.4)	-
Calor específico a 72°F (°C)	-	0.212	0.197	0.176
Temperatura de reblandecimiento, °F (°C)	1340(727)	1380 (749)	1545 (841)	-
Propiedades eléctricas				

Resistencia dieléctrica, V/mil	-	-	498	-
Constante dieléctrica a 72°F (22°C)				
A 60Hz	-	-	5.9-6.4	5.0-5.4
A 10⁶ Hz	6.9	7.0	6.3	5.1
Factor de disipación (energía)				
A 72°F (22°C)				
A 60 Hz	-	-	0.005	0.003
A 10⁶ Hz	-	-	0.002	0.003
Resistividad volumétrica a 72°F (22°C)	-	-	10 ¹⁵	10 ¹⁶
Y 500V DC, ohm-cm				
Resistividad superficial a 72°F (22°C)	-	-	10 ¹³	10 ¹⁴
Y 500V DC, ohm-cm				
Propiedades ópticas				
Índice de refracción	-	-	1.547	1.523
Propiedades acústicas				
Velocidad de sonido, ft/s (m/s)	-	-	17500 (5330)	19200 (5850)

En numerosas aplicaciones se han escogido refuerzos de vidrio porque este permite a los compuestos conservar al máximo las propiedades cuando se utilizan en ambientes con alta humedad. Las fibras de E-Vidrio son las elegidas en su mayoría debido a su excelente resistencia al agua (las fibras de E-vidrio muestran únicamente una pérdida de peso del 1-7% cuando son expuestas a agua hirviendo durante 60 minutos). Esta resistencia al agua ayuda a mantener las características físicas y eléctricas del composito durante tiempos prolongados de exposición a atmósferas acuosas.

3.3. Manufactura de materiales compuestos

Peters [24] menciona que los objetivos de los procesos de manufactura son:

- Lograr consistencia en el producto controlando:
 - El espesor de las fibras
 - El volumen de las fibras

- La dirección de las fibras
- Minimizar la formación de vacíos
- Reducir esfuerzos residuales internos
- Procesar con el menor costo posible

Los procedimientos para lograr estos objetivos comprenden procesos iterativos para seleccionar los tres componentes principales:

- Material compuesto y su configuración
- Herramientales
- Proceso

Cuando el material ha sido seleccionado, el primer paso para lograr una estructura aceptable es la selección de los herramientales (o herramientas), para todas las técnicas de curado, las herramientas deben ser:

- Suficientemente resistentes y rígidos para resistir la presión ejercida
- Dimensionalmente estables para soportar ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento constantes
- Suficientemente ligeros para responder rápidamente a los cambios en los ciclos de temperatura de curado y para ser movidos en el espacio designado
- A prueba de fugas para asegurar que el vacío y los ciclos de presión son consistentes.

La Figura 3 muestra los componentes básicos de un herramientales para llevar a cabo la técnica de vacío por bolsa y la Tabla 5 muestra las funciones de cada sistema

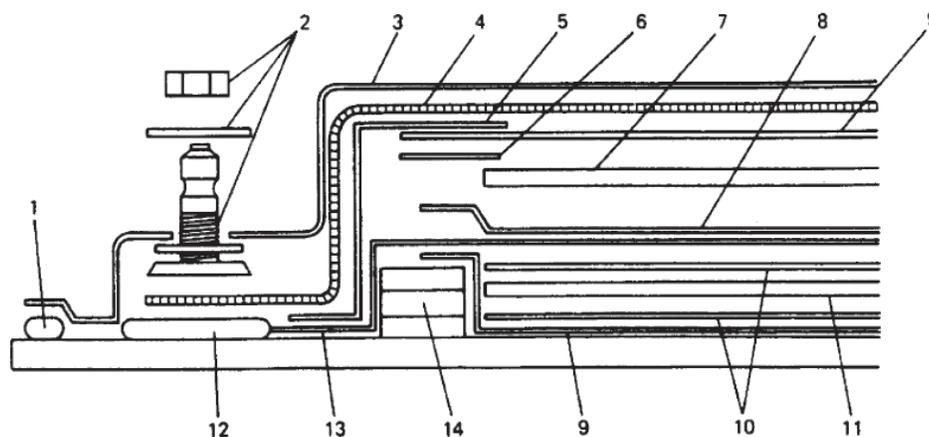


Fig. 3. Componentes para el proceso de bolsa de vacío [24].

Tabla 5. Funciones de los componentes para el proceso de la bolsa de vacío [24].

Componente	Funciones
1 Sellador de la bolsa	Une temporalmente la bolsa de vacío al herramental
2 Equipo y adaptador de vacío	Expulsa aire, provee la conexión adecuada a la bomba de vacío
3 Película de embolsado	Encierra la pieza, permite el vacío y la presión
4 Estera de ventilación de tejido abierto	Permite que el aire o el vacío se transfiera a toda la pieza
5 Cinta de poliéster (ancha)	Mantiene otros componentes de la bolsa en su lugar
6 Cinta de poliéster (delgada)	Mantiene a los componentes en su lugar
7 Hoja de camiseta	Imparte el contorno y acabado superficial deseado al compuesto
8 Película de liberación perforada	Permite el flujo de resina o aire sin adhesión
9 Película de liberación no perforada	Previene la adhesión de resina laminada a la superficie del herramental
10 Capa	Imparte una superficie adherida al curado laminado
11 Lamina	
12 Múltiple de admisión de vidrio del tipo 1581	Permite la transferencia de aire o vacío
13 Purgadora de vidrio del tipo 1581	Absorbe el exceso de resina
14 Contención de borde de silicona	Forza al exceso de resina para que fluya verticalmente incrementando la presión del fluido

3.4. Fundamentos de tribología

La palabra tribología se deriva del griego “tribos”, que significa frotamiento. La tribología se define como la ciencia y tecnología de las superficies que interactúan entre sí con movimiento relativo. La tribología comprende el estudio de fricción, desgaste y lubricación. Siempre que dos superficies se encuentren en contacto entre sí, ocurre una interacción superficial, lo cual significa que existirá un cambio estructural en las superficies [25].

3.5. Desgaste erosivo

La erosión es la forma de daño experimentado por un cuerpo sólido cuando es impactado por partículas sólidas o partículas líquidas. Existen, básicamente, dos tipos de erosión: erosión por partículas sólidas y erosión líquida. Durante la erosión se forman residuos como resultado de impactos constantes, el desgaste erosivo se debe a deformación plástica y/o rotura por fragilidad dependiendo del material que se erosiona y de las condiciones de operación. La tasa de desgaste se relaciona directamente al ángulo de impacto para materiales dúctiles. En materiales dúctiles, la mayor tasa de desgaste se presenta a un ángulo de impacto de 20 ° [25].

3.5.1. Erosión por partículas sólidas

La erosión por partículas sólidas resulta del corte por partículas duras contenidas en un fluido o gas y se caracteriza por la presencia de impactos aleatorios. El volumen del material desgastado está relacionado directamente a la masa de las partículas y a la velocidad con la que estas impactan en la superficie del material erosionado [26].

3.5.2. Propiedades de la partícula

3.5.2.1. Dureza

La dureza de las partículas tiene una fuerte influencia en la tasa de desgaste. Las partículas con menor dureza que el cuerpo sólido impactado causaran menos desgaste que partículas con mayor dureza [27].

3.5.2.2. Forma

La tasa de desgaste depende, en gran medida, de la forma de las partículas que impactan un cuerpo sólido, partículas de bordes angulados o puntiagudos provocan mayor desgaste que partículas con bordes redondeados. En la figura 4 se muestran dos formas de partículas de cuarzo. Diferencias en la forma de partícula pueden dar variaciones en los resultados de tasa de desgaste en un factor de hasta 10 o más [27].

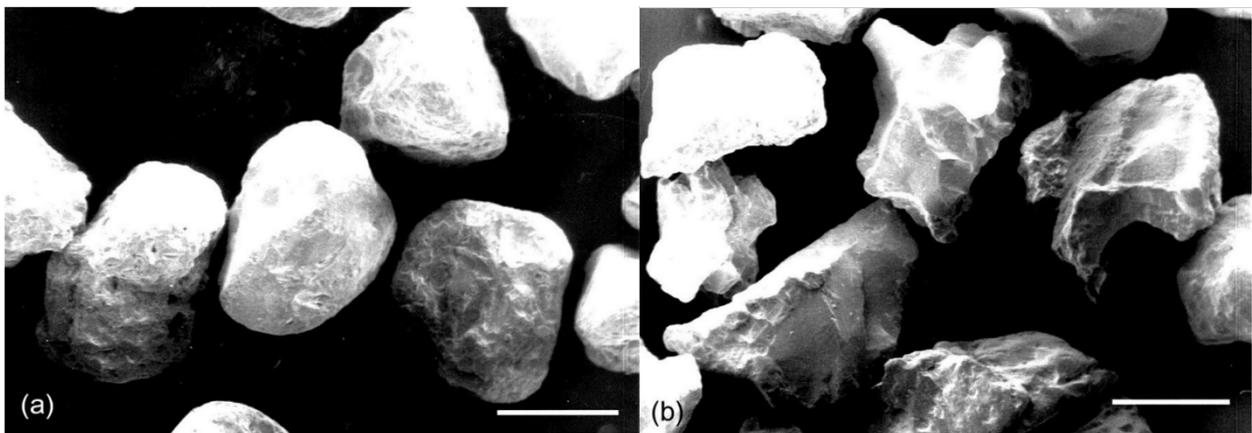


Fig. 4. Imagen de MEB de partículas de sílice: a) Partículas redondeadas; b) Partículas con bordes angulados o puntiagudos [27].

3.5.2.3. Tamaño

Para materiales dúctiles, la erosión relativa es independiente del tamaño de partícula. Tamaños de partícula menores resultan ser menos efectivos. El tamaño de partículas varía ampliamente, las partículas con mayor influencia en desgaste por partículas sólidas tienen un tamaño de entre 5 y 500 μm [28].

3.5.2.4. Ángulo de impacto

Es sabido que el ángulo de impacto es uno de los parámetros más importantes en el comportamiento erosivo de materiales. En la literatura, los materiales son clasificados como dúctiles o frágiles de acuerdo a la relación entre la tasa de erosión y el ángulo de impacto que presenten. El comportamiento dúctil se caracteriza por la tasa de erosión máxima a bajos ángulos de impacto, comúnmente $15^\circ < \alpha < 30^\circ$. Por otro lado, si la tasa de erosión máxima se encuentra a un ángulo normal de impacto (E máx. a $\alpha = 90^\circ$), el comportamiento del material se define como frágil. Los materiales compuestos reforzados han mostrado un comportamiento semi-dúctil mostrando la tasa máxima de erosión a ángulos de impacto intermedios, comúnmente $45^\circ < \alpha < 60^\circ$ [29].

4. MATERIAL Y MÉTODOS

Como se ha mencionado tanto en literatura especializada como en distintos estudios sobre materiales compuestos es importante conocer morfológicamente la materia prima a partir de la cual se manufacturan [24], [30]. Para ello, se realizó inicialmente un análisis morfológico por microscopía óptica y electrónica de barrido del material de refuerzo. Posteriormente, se fabricaron placas de material compuesto por la técnica de infusión al vacío (Vacuum Infusion Process-VIP por sus siglas en inglés) variándose las temperaturas de post-curado del material en: 26, 40 y 60 °C durante 16 horas, con base en la ficha técnica del fabricante Axon [31] de la resina epóxica utilizada como matriz. El propósito de analizar el efecto de diferentes temperaturas de post-curado sobre las características mecánicas de los compuestos es promover un incremento de la rigidez del material considerando que se utilizará en la fabricación de estructuras (álabes o palas) que deben soportar esfuerzos mecánicos provocados por ráfagas de aire. La caracterización microestructural de los especímenes compuestos se llevó a cabo por microscopía óptica en un Olympus Infinity 1 y por microscopía electrónica de barrido en un JEOL JSM-7800F con un sistema de detección de energía electrónica dispersiva (EDS- por sus siglas en inglés). Un espécimen de cada placa se caracterizó por difracción de rayos-X (DR-X) en un Difractómetro Rigaku Smartlab con la finalidad de identificar el efecto del proceso de post-curado a distintas temperaturas sobre la cristalinidad del material. Otro estudio con un propósito similar se llevó a cabo por espectrometría de IR en un FT-IR Perkin Elmer Spectrum GX. Por su parte, la caracterización mecánica se realizó según distintas normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM por sus siglas en inglés) para materiales compuestos. Para los ensayos de tensión se usó la norma ASTM D3039 [32] y una máquina universal de la marca Shimatzu con una capacidad de carga de 50 kN. Los ensayos de impacto se realizaron bajo la norma ASTM D256 [33] en una máquina de impacto Charpy/Izod de la marca Physical Test Solutions con una capacidad de 300 J. Los ensayos de flexión se llevarán a cabo siguiendo la norma ASTM D7264 [34]. Los ensayos de dureza se realizaron siguiendo la norma ASTM E384 [35] con un micro durómetro. Previamente al ensayo de desgaste, se midió la rugosidad promedio (Ra) de los materiales de acuerdo al estándar ISO 4287 [37], posteriormente, se llevaron a cabo los ensayos de desgaste siguiendo la norma ASTM G76 [38] en una máquina para ensayos de desgaste erosivo por partícula sólida, la cual fue desarrollada por alumnos e investigadores de la División de Estudios de Posgrado del TecNM/ITP, finalmente, se obtuvo el

perfil de rugosidad en la huella de desgaste de los materiales ensayados (Pa) siguiendo el estándar ISO 4287 [37].

4.1. Preparación y análisis de especímenes

4.1.1. Análisis morfológico del material de refuerzo

Algunas fibras se cortaron de la tela de fibra de vidrio proporcionada por el centro de investigación CIDESI, ubicado en la ciudad de Querétaro, en su sede aeropuerto. Las fibras cortadas, aproximadamente de 12 mm de longitud, se observaron por microscopía óptica (MO) a distintos aumentos. Para ello, se colocaron sobre cinta de grafito en una superficie metálica lisa. Luego de su observación por MO la muestra se analizó por microscopía electrónica de barrido (MEB). Previamente, sabiendo que la fibra de vidrio es un material no conductor, el espécimen fue recubierto con oro-paladio para su observación por MEB. A su vez, se realizó un análisis químico elemental EDS.

4.1.2. Proceso de fabricación del material compuesto

La Figura 5 muestra de manera general el proceso de manufactura de las placas de material compuesto denominado: infusión al vacío (en algunos artículos se conoce como: proceso de infusión en bolsa al vacío).



Fig. 5. Proceso de manufactura de placas de material compuesto.

El corte y colocación bidireccional de las fibras a partir de la tela proporcionada por el CIDESI, unidad aeropuerto, se realizó basado en las dimensiones de las placas de los compuestos que se fabricaron tanto para su análisis microestructural como la caracterización mecánica. A manera de ejemplo, las dimensiones de una placa para los ensayos de tensión se muestran en la Figura 6.

- NOTAS: -Todas las unidades de las cotas mostradas están en mm
-Por cada placa se fabricaron de 7 a 8 probetas
-Las dimensiones generales de la placa son: 530 x 485 x 2.5 mm
-Los espacios entre borde y tablillas son de 20 mm

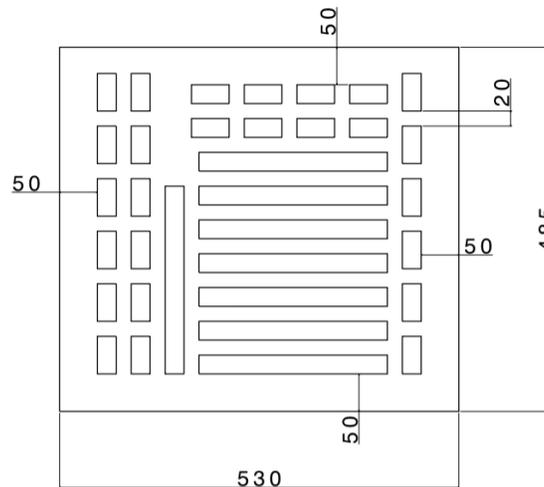


Fig. 6. Dimensiones de una placa de material compuesto, en este caso de aquella para el corte y preparación de especímenes del ensayo de tensión.

El acomodo de las fibras es bidireccional, y previo al proceso de bolsa de vacío el arreglo de la fibra fue ortogonal, es decir a 0° y a 90° . Lo anterior, dado que se ha demostrado en diferentes estudios cierto incremento del valor de la resistencia a la flexión del material con este acomodo [39]. No se omite mencionar que, se espera que modificando la temperatura del proceso de post-curado se logre un efecto favorable sobre el valor de resistencia a la flexión del compuesto, debido a que será utilizado en la fabricación de álabes de un aerogenerador de baja potencia de eje vertical.

4.1.3. Caracterización por microscopía óptica, MEB, DR-X, FT-IR

4.1.3.1. Preparación de muestras para visualización por MO y MEB

Se prepararon especímenes de 1.2x1.2 cm a partir de cortes realizados a tres placas de material compuesto manufacturadas con temperaturas de curado de 26, 40 y 60 °C. Así, tres especímenes fueron observados por MO y MEB tanto en su sección transversal como en su sección longitudinal. Previamente a la observación en cada probeta se realizó un proceso de desbaste manual en todas

sus caras para eliminar las posibles laceraciones ocasionadas en el material debido al previo corte. El desbaste se efectuó con lubricación constante (agua potable) utilizando una serie de lijas para agua, comenzando con lija de grano 320 para posteriormente utilizar lijas de grano 400, 600, 1000, 1200, 2000 y 2500 para finalizar con lija de grano 3000. Debido al tamaño de las piezas y al proceso manual de desbaste no se aplicó demasiada fuerza durante la operación, evitando siempre la creación de “bordes” o caras “irregulares” con el fin de obtener una superficie uniforme para efectuar el análisis. El proceso se llevó a cabo haciendo 5 pasadas en cada cara con las lijas de grano 320 hasta la lija de grano 600, posteriormente se realizaron 15 pasadas con lija de grano 1000 al 3000 en cada cara para la obtención de un acabado uniforme, así mismo, se realizó un proceso de limpieza en un baño ultrasónico con alcohol isopropílico durante 10 segundos y agua destilada para remover el remanente de alcohol. El proceso de preparación de especímenes se ilustra de manera general en la Figura 7.

Etapa de corte y desbaste de especímenes



Equipo utilizado en para la limpieza de especímenes (Baño Ultrasónico)



Microscopio óptico Olympus

Fig. 7. Preparación de especímenes para su caracterización por MO.

Con ayuda del microscopio electrónico de barrido, JSM-7800F, del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías (CNMN) del Instituto Politécnico Nacional se realizó la visualización superficial y lateral con aumentos de 30x, 50x, 80x, 150x, 300x, 500x, y 1000x de los compuestos curados a 26, 40 y 60 °C. Previamente los especímenes fueron preparados con un recubrimiento de oro (20 segundos de deposición con una presión de 2 Torr) para poder ser observados, Figura 8.



Fig. 8. Microscopio Electrónico de Barrido del CNMN-IPN, Modelo JSM-7800F.

Además, muestras de aproximadamente 15x15x12 mm fueron analizadas por DR-X en el Laboratorio de Ingeniería de Superficies y Manufactura Aditiva (LISMA), ubicado en el CIDESI, unidad Querétaro, Figura 9.



Fig. 9. Difractómetro del Laboratorio de Ingeniería de Superficies y Manufactura Aditiva (LISMA).

Por su parte, especímenes de cada placa de aproximadamente 10x12x12 mm se caracterizaron por FT-IR en el CINVESTAV, unidad Querétaro. Específicamente con este estudio se espera

identificar las vibraciones moleculares características de los materiales compuestos e identificar posibles diferencias al variar la temperatura de post-curado a 26, 40 y 60 °C, respectivamente. El equipo utilizado se muestra en la Figura 10.



Fig. 10. Espectrómetro FT-IR de CINVESTAV, unidad Querétaro.

4.1.4. Caracterización mecánica

Para la caracterización mecánica de cada compuesto se prepararon y ensayaron probetas normadas de compuestos manufacturados con temperaturas de curado a 26, 40 y 60 °C. Así, para cada ensayo las dimensiones de las probetas se muestran en la Figura 11. Los requisitos generales de forma, dimensiones y tolerancias se pueden encontrar en [32], [33], [34].

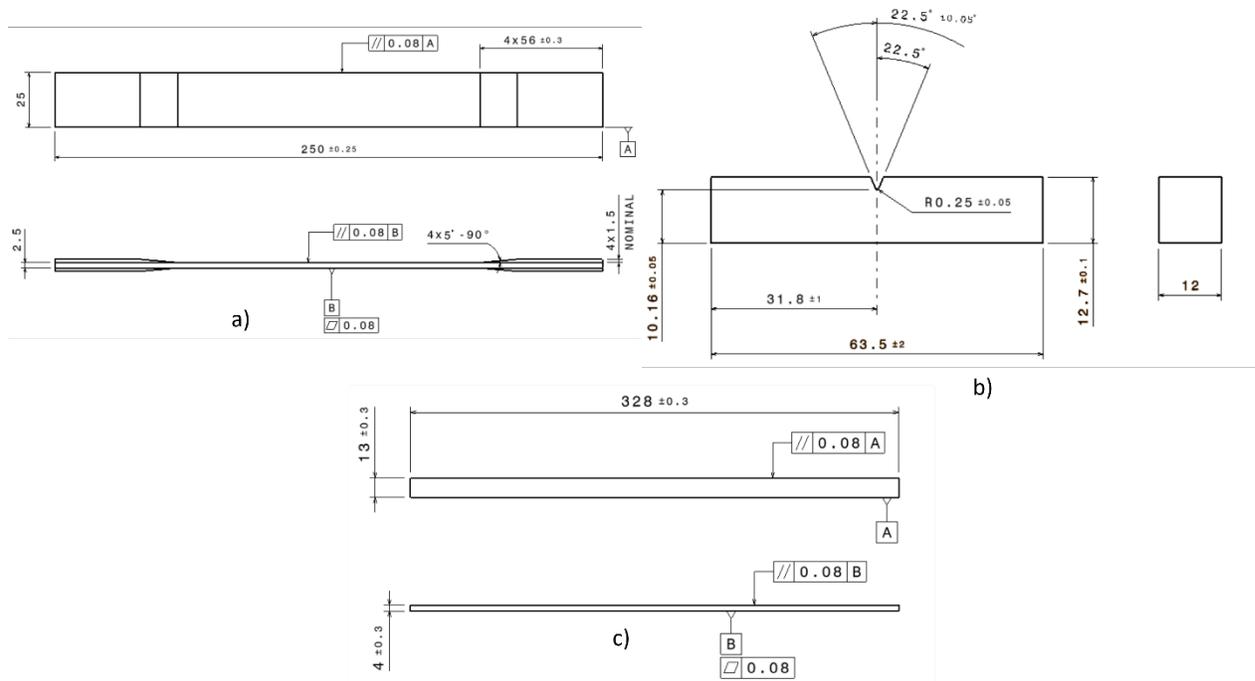


Fig. 11. Dimensiones de probetas para los ensayos mecánicos de: a) tensión, b) impacto y c) flexión.

Los requisitos mínimos para el diseño de probetas para ensayo de tensión mostrados en la imagen anterior son insuficientes para crear una probeta correctamente dimensionada. Por ello, se proveen recomendaciones de otras dimensiones importantes para configuraciones comunes de materiales en la Tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones de probetas para ensayo de tracción.

Orientación de la fibra	Ancho mm [in.]	Longitud total mm [in.]	Espesor mm [in.]	Longitud de mordaza mm [in.]	Espesor de mordaza mm [in.]	Chafilán de la mordaza Ángulo, °
0° unidireccional	15[0.5]	250[10.0]	1.0[0.040]	56[2.25]	1.5[0.062]	7 o 90
90° unidireccional	25[1.0]	175[7.0]	2.0[0.080]	25[1.0]	1.5[0.062]	90
Equilibrado y simétrico	25[1.0]	250[10.0]	2.5[0.100]	Papel lija	_____	_____
Aleatorio-discontinuo	25[1.0]	250[10.0]	2.5[0.100]	Papel lija	_____	_____

Para las probetas de flexión se indica que la relación estándar de espacio de soporte-espesor es de 32:1, el espesor estándar de la probeta es de 4 mm (0.16 in), el ancho estándar es de 13 mm (0.5 in) siendo la longitud de la probeta alrededor del 20% mayor al espacio de soporte.

Finalmente, se realizó un estudio del desgaste erosivo sobre especímenes de 20x20x5 mm, a una velocidad de 8 m/s con partículas de carburo de silicio con un tamaño aprox. de 80 μm . La prueba fue realizada con una boquilla de 10 mm de diámetro a una distancia de 10 mm desde la punta de la boquilla a la probeta con un ángulo de impacto de 90 °. El equipo utilizado para este fin se muestra en la Figura 12. Antes y después del estudio de desgaste, se analizó la superficie del material en un rugosímetro de la marca Mitutoyo modelo SJ-410 ubicado en el Laboratorio de Posgrado del TecNM/ITPachuca, Figura 13. Se midió en cada probeta la rugosidad promedio y el perfil promedio.



Fig. 12. Equipo utilizado para el ensayo de desgaste erosivo por partícula sólida.

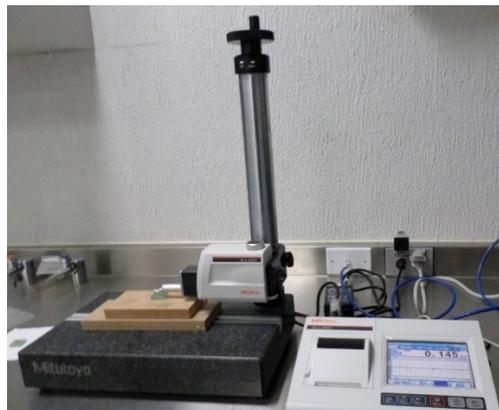


Fig. 13. Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410.

5. RESULTADOS

5.1. Análisis morfológico del material de refuerzo

Algunas fibras de vidrio fueron observadas por microscopía óptica (MO) a distintos aumentos. Para ello, se colocaron sobre cinta de grafito en una superficie metálica lisa como se muestra en la Figura 14. El propósito de este estudio fue identificar la morfología de las fibras (si eran continuas o discontinuas, si presentaban microgrietas, así como su diámetro). Tal análisis es importante debido a que, como se ha mencionado en distintos libros [22], [23], [24], las propiedades del material compuesto dependen en gran parte de las características de material de refuerzo como: su tamaño, forma, dispersión, continuidad, entre otros.

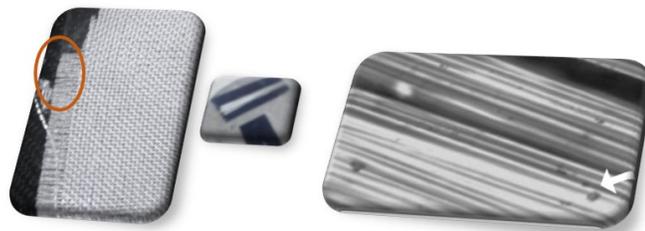


Fig. 14. Imágenes de la fibra de vidrio obtenidas por MO.

De la Figura 14, es claro que debido a que el material de refuerzo tiene la característica de ser capaz de reflejar y refractar luz, y sabiendo que una fuente de luz es el medio de interacción con la superficie de un material para su observación por MO no es de extrañarse que resulte difícil enfocar las fibras para lograr identificar su diámetro con esta técnica. No obstante, se puede observar una textura lisa y continua. Así mismo, se identificaron algunas partículas, como la señalada con la flecha blanca de la Figura 14 que pueden ser parte del mismo material, fibra fracturada por la manipulación al momento de colocarla sobre cinta de grafito. Para estar seguros de ello, se hace necesario un estudio por MEB con un análisis EDS. Previamente, el espécimen fue recubierto con oro-paladio para su observación por esta técnica, como lo muestra la Figura 15.

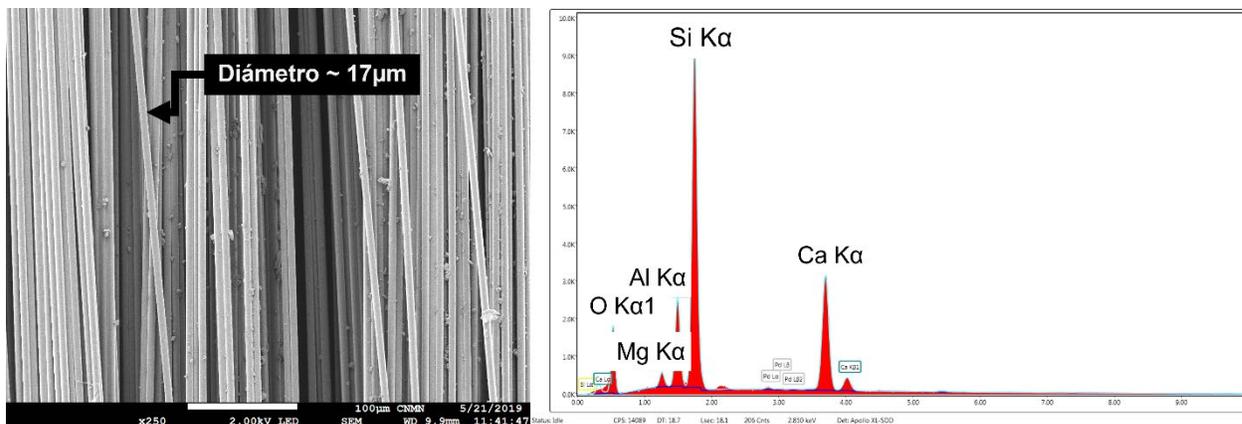


Fig. 15. Micrografía y microanálisis de la fibra de vidrio obtenida por MEB.

La Figura 15 muestra de manera general el equipo utilizado para depositar una capa delgada, micrométrica, de Au-Pd sobre las fibras observadas por MEB. En la micrografía de la sección central se observa claramente que el tamaño aprox. de la fibra de vidrio es de 17 µm. Así mismo, se aprecian fibras continuas y la ocurrencia, con mayor detalle, de partículas pequeñas del mismo material adheridas sobre los filamentos. Por su parte, el microanálisis de la derecha, en la misma Figura 15, confirma la ocurrencia de O, Mg, Al, Si y Ca. Estos elementos son característicos de la fibra de vidrio tipo E [40].

5.2. Caracterización por microscopía óptica del material compuesto

En la Figura 16 se muestran las capturas del análisis realizado con el sistema óptico “Olympus Infinity 1” de la superficie principal y lateral con aumentos de 100x de muestras de los materiales previamente fabricados. Mediante esta técnica hemos podido comprobar el arreglo bidireccional de las fibras, así como la presencia de una burbuja en el material curado a 26 °C. Sin embargo, en algunas zonas de las muestras curadas a 40 y 60 °C se aprecia que el arreglo bidireccional no es del todo ortogonal, esto puede deberse a movimientos en el arreglo durante la impregnación de la resina epóxica y/o aplicación del vacío durante la etapa de fabricación. Es importante remarcar que la comprobación del arreglo de las fibras posterior a la etapa de fabricación puede suponer un caso de estudio independiente al tema tratado en la presente tesis.

En todos los especímenes a diferentes temperaturas de curado (26, 40 y 60 °C) se observa cualitativamente buena adherencia de la resina hacia la fibra, es decir no se observa la ocurrencia de huecos o micro grietas entre la fibra de vidrio y la resina.

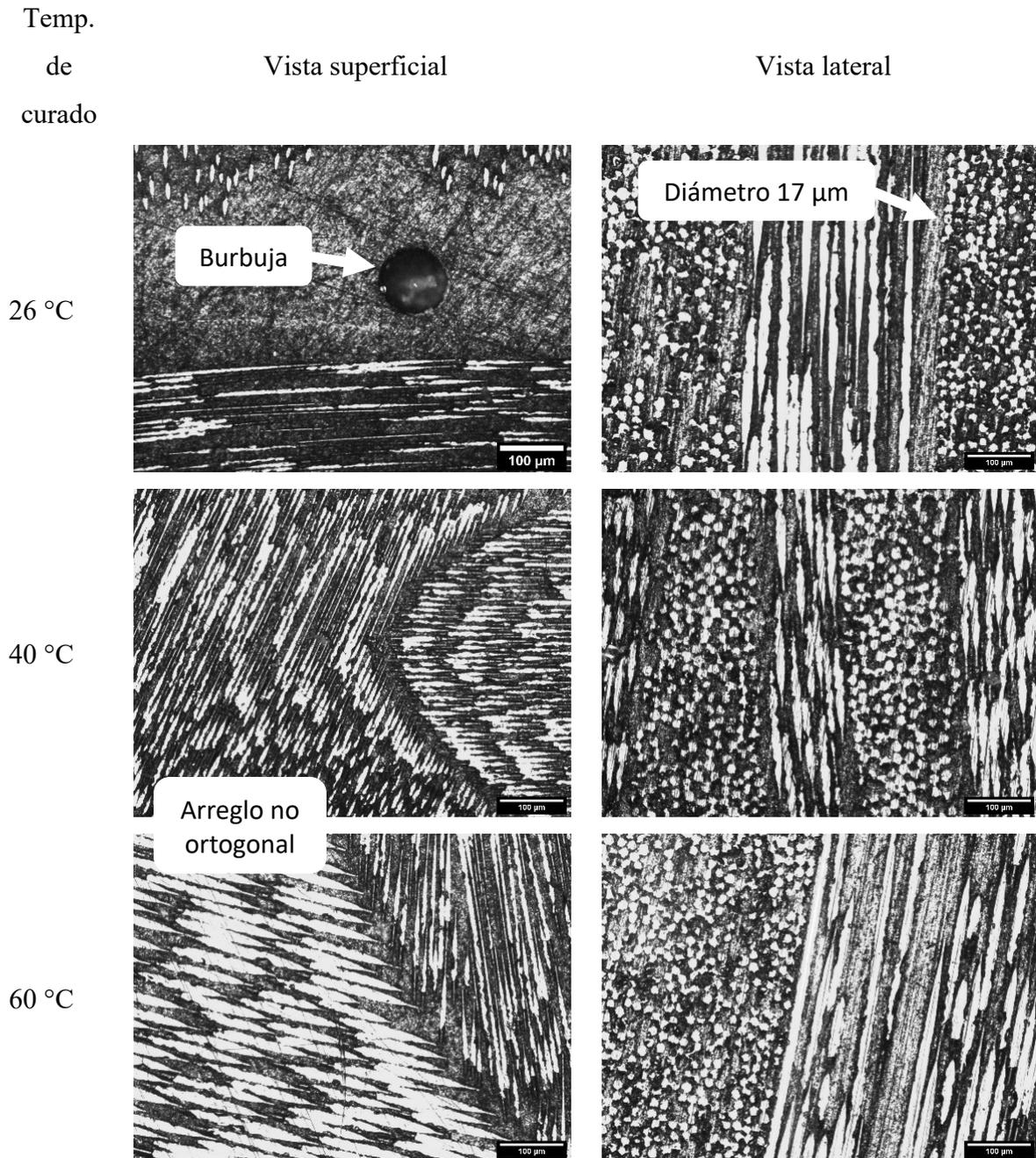


Fig. 16. Imágenes de compuestos obtenidas por MO secciones transversal y superficial: Material curado a 26, 40 y 60 °C.

5.3. Caracterización por MEB del material compuesto

Las imágenes mostradas en la Figura 17 confirman las observaciones obtenidas por MO. Se logró captar la misma burbuja mostrada anteriormente en el material curado a 26 °C, misma que se señala en la Figura 17 con una flecha blanca. Así mismo, se puede ver el arreglo bidireccional para los

tres materiales, así como el diámetro homogéneo de las fibras con las que se fabricaron los compuestos, de aproximadamente 17 μm .

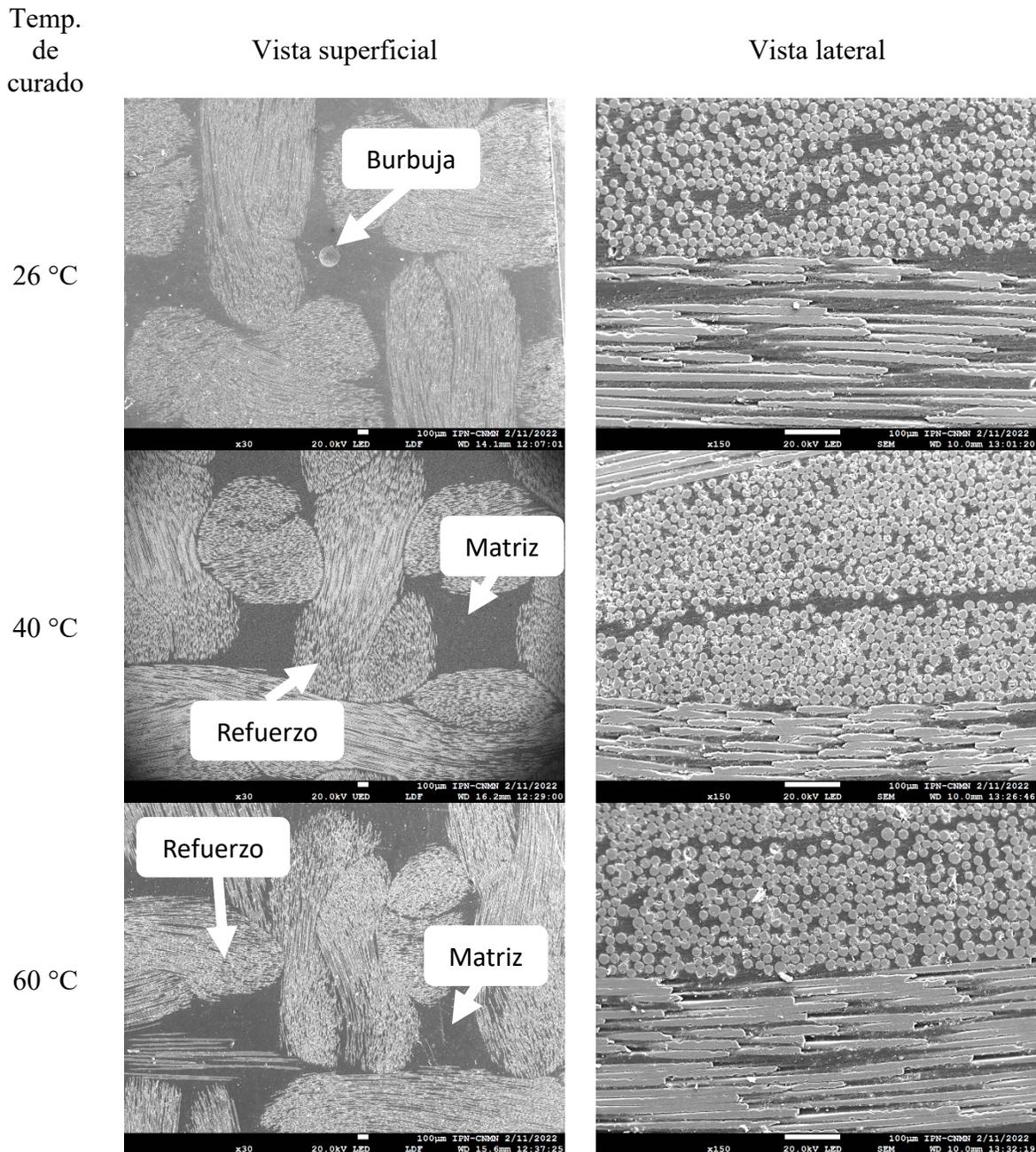


Fig. 17. Imágenes de compuestos obtenidas por MEB secciones transversal y superficial: Material curado a 26, 40 y 60 °C.

5.4. Caracterización por DR-X y por FT-IR del material compuesto

En la Figura 18 se muestran los difractogramas obtenidos de cada material compuesto fabricados a temperaturas de post curado a 26, 40 y 60 °C. La muestra que ha presentado mayor grado de

crystalinity es la correspondiente al material post curado a 60 °C. Debido a lo mencionado anteriormente, se espera que el material compuesto post curado a 60 °C demuestre un comportamiento distinto en algunas pruebas mecánicas.

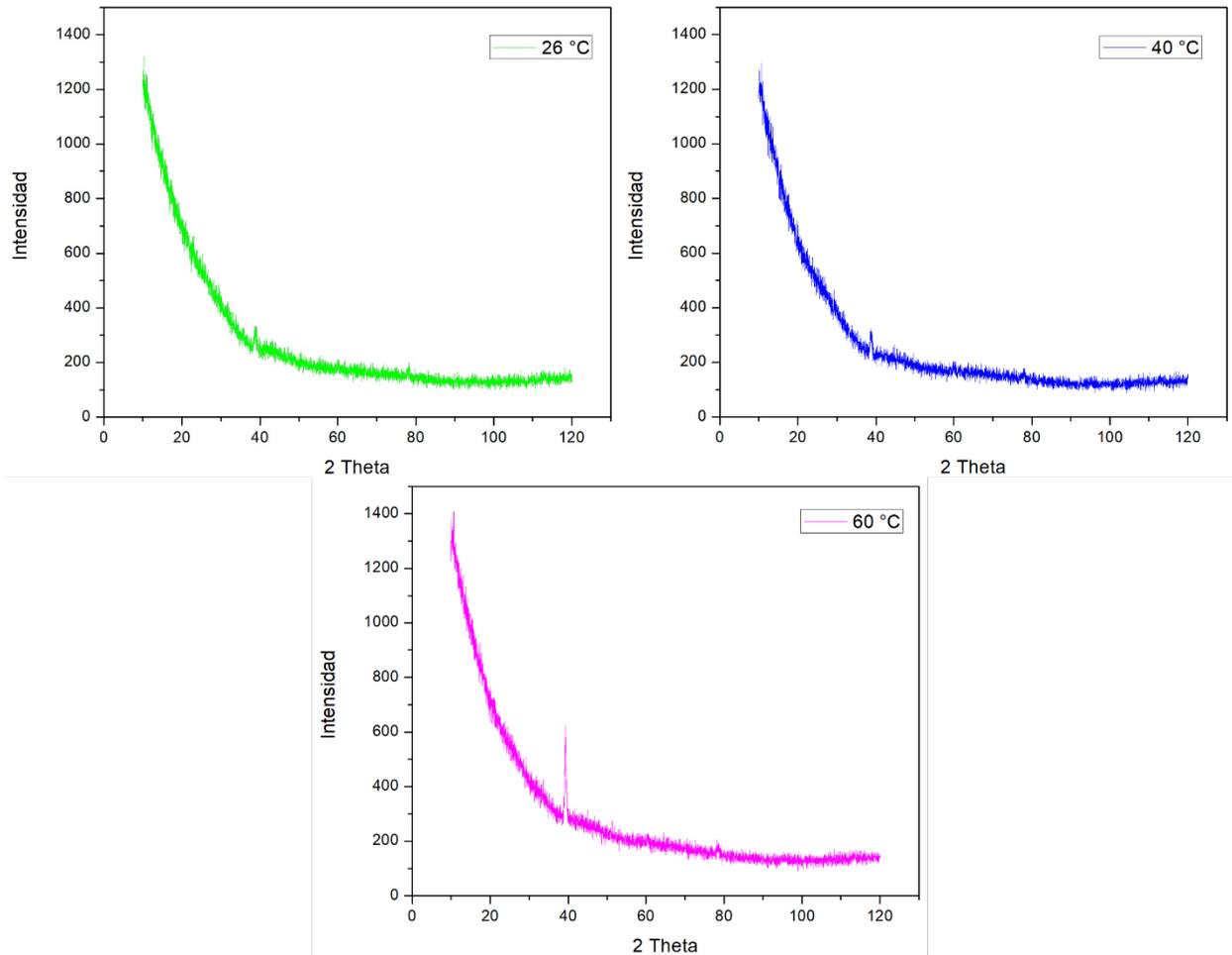


Fig. 18. Difractogramas de materiales post curados a 26, 40 y 60 °C.

En la Figura 19 se pueden observar las gráficas correspondientes a los espectros infrarrojos de la resina Epolam 2015 con endurecedor y de los materiales compuestos post curados a 26, 40 y 60 °C. Se pueden observar las bandas características de una molécula DGEBA obtenida de [41] y de acuerdo a lo mencionado en [42] propios de la resina epoxica.

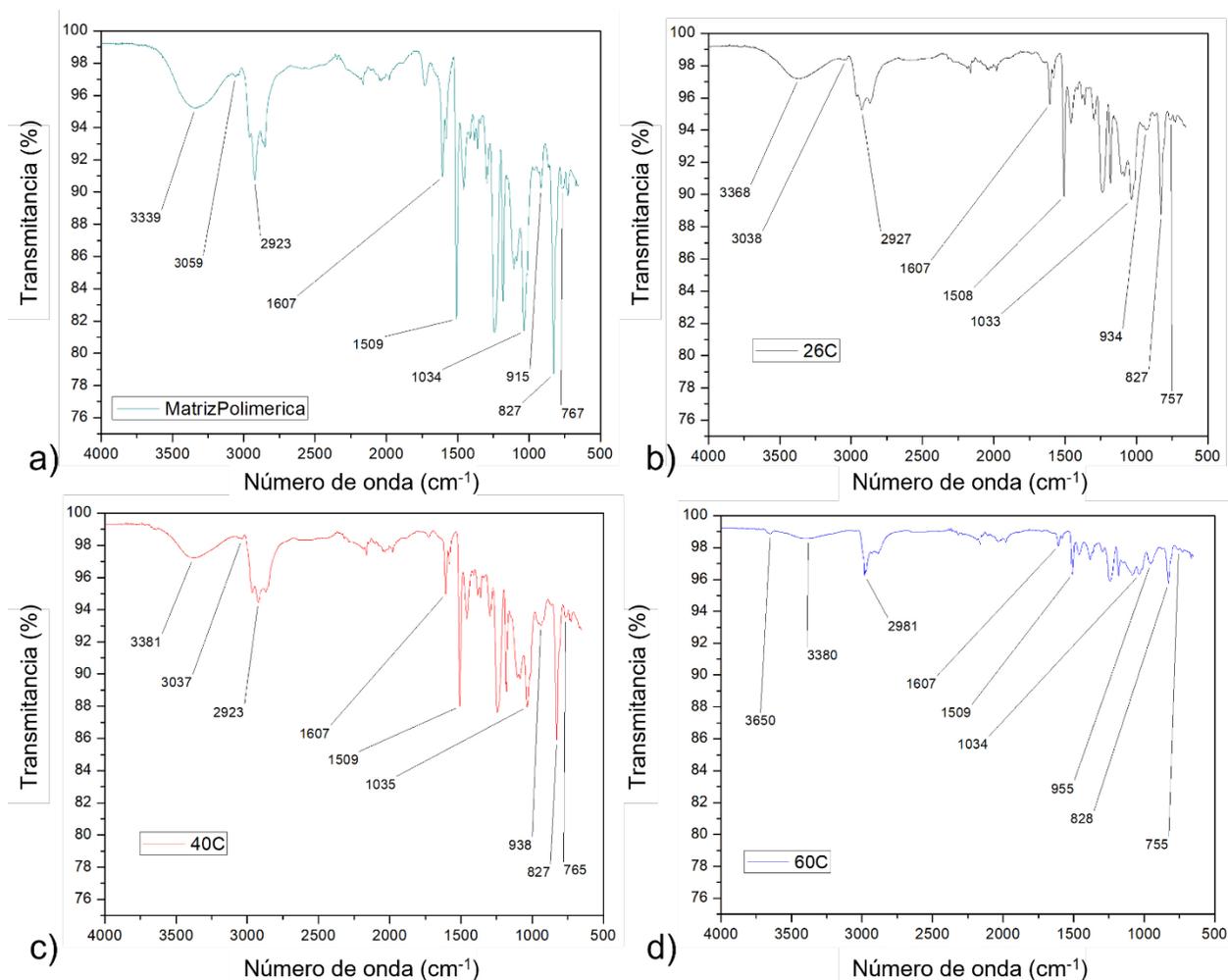


Fig. 19. Espectros infrarrojos de a) Resina Epolam 2015 con endurecedor; compuestos post curados a: b) 26 °C, c) 40 °C y d) 60 °C.

En la Figura 20 se muestran, sobrepuestas, las curvas correspondientes a cada material (resina epoxica Epolam 2015, materiales post curados a 26, 40 y 60 °C) que se han obtenido mediante espectroscopia infrarroja. Se han colocado líneas verticales para mostrar el posicionamiento de cada banda característica de la molécula DGEBA.

Se han identificado las bandas a alrededor de 1280-1230 y 915 cm^{-1} correspondientes al anillo epóxico [43].

Se puede observar la banda característica al enlace O-H en la región de 3600-3200 cm^{-1} , se observa que conforme aumenta la temperatura de post curado esta banda comienza a desaparecer.

De igual manera, la banda presente alrededor de 1750 cm^{-1} que se observa en el espectro correspondiente a la resina epoxica Epolam 2015 comienza a desaparecer después del post curado.

Se ha identificado que la cristalinidad de un material polímero puede ser identificada en las bandas de su espectro infrarrojo. Inclusive, se puede apreciar un cambio en la cristalinidad cuando las bandas son finas. En los materiales amorfos las bandas son anchas [44]

Evidentemente la banda en 2981 cm^{-1} se ve mucho más fina en la muestra a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a las muestras a $26, 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de resina Epolam 2015. El hecho de la ausencia de algunas bandas de la muestra a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ puede deberse a la ocurrencia de alguna reacción que pudiera estar incrementando la cantidad de enlaces cruzados en el material. Aparentemente, este es el caso y se está incrementando la formación de enlaces cruzados en el material generando una estructura más rígida. Esto se corrobora con los resultados que se obtuvieron en el estudio de DR-X. En [45] se observan claramente los picos de la fibra de vidrio, en la gráfica correspondiente al material post curado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 18) se puede ver un pico intenso y fino indicativo de cristalinidad, se puede observar el mismo pico, menos intenso a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, es más difuso y ancho a $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lo anterior, sugiere que el material post curado a $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ es amorfo a diferencia del material compuesto post curado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

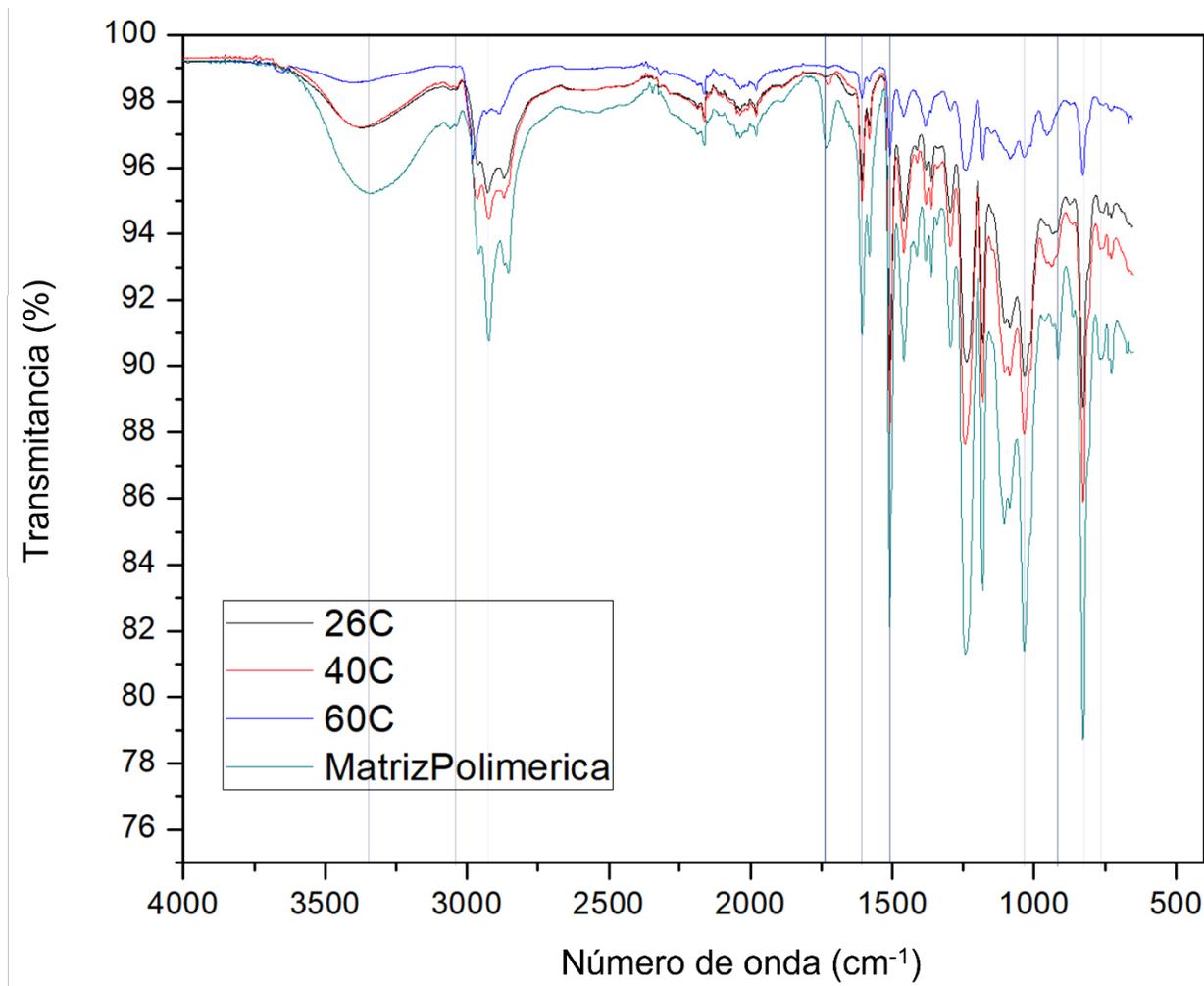


Fig. 20. Espectros de IR sobrepuestos de Resina Epolam 2015 y materiales post curados a 26, 40 y 60 °C obtenidos en un FT-IR Perkin Elmer.

En la Tabla 7 se muestra la asignación de las bandas correspondientes a cada material mostrado en la Figura 20. Se observan bastantes similitudes ya que solo se han encontrado pequeños desplazamientos en el número de onda para ciertas bandas.

Tabla 7. Asignación de bandas de espectros Infrarrojos de: Resina Epoxica Epolam 2015 y materiales post curados a 26, 40 y 60 °C.

Material	Banda	Asignación
Resina epoxica Epolam 2015	3339	Enlace O-H
	3059	Enlace de C-H del anillo oxirano
	2923	Enlace C-H de CH ₂ y CH aromático y alifático
	1607	Enlace C=C de anillos aromáticos
	1509	Enlace C-C aromático

	1034	Enlace C-O-C de éteres
	915	Enlace C-O del grupo oxirano
	827	Enlace C-O-C del grupo oxirano
	767	Balanceo de CH ₂
Material post curado a 26 °C	3368	Enlace O-H
	3038	Enlace de C-H del anillo oxirano
	2927	Enlace C-H de CH ₂ y CH aromático y alifático
	1607	Enlace C=C de anillos aromáticos
	1508	Enlace C-C aromático
	1033	Enlace C-O-C de éteres
	934	Enlace C-O del grupo oxirano
	827	Enlace C-O-C del grupo oxirano
	757	Balanceo de CH ₂
Material post curado a 40 °C	3381	Enlace O-H
	3037	Enlace de C-H del anillo oxirano
	2923	Enlace C-H de CH ₂ y CH aromático y alifático
	1607	Enlace C=C de anillos aromáticos
	1509	Enlace C-C aromático
	1035	Enlace C-O-C de éteres
	938	Enlace C-O del grupo oxirano
	827	Enlace C-O-C del grupo oxirano
	765	Balanceo de CH ₂
Material post curado a 60 °C	3650	Enlace O-H
	3380	Enlace de C-H del anillo oxirano
	2981?	Enlace C-H de CH ₂ y CH aromático y alifático
	1607	Enlace C=C de anillos aromáticos
	1509	Enlace C-C aromático
	1034	Enlace C-O-C de éteres
	955	Enlace C-O del grupo oxirano
	828	Enlace C-O-C del grupo oxirano
	755	Balanceo de CH ₂

5.5. Caracterización mecánica del material compuesto

5.5.1. Ensayos de Tensión

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos del ensayo de tensión realizado bajo la norma ASTM D3039.

Tabla 8. Resultados del ensayo de tensión obtenidos según la norma ASTM D3039.

Temp.	26 °C			40 °C			60 °C		
Prueba	Max tensión (MPa)	Max deformación (%)	Módulo elástico (GPa)	Max tensión (MPa)	Max deformación (%)	Módulo elástico (GPa)	Max tensión (MPa)	Max deformación (%)	Módulo elástico (GPa)
1	177.349	3.42234	11.36	230.007	2.43599	9.74	146.421	1.93439	8.172
2	292.597	4.77806	12.026	234.503	2.37024	11.48	185.955	2.44172	8.60923
3	328.463	5.18499	11.2073	208.985	2.10853	12.77	163.726	1.76692	8.5732
4	267.821	5.40469	11.4372	216.723	2.12093	14.23	144.203	1.35693	11.1591
5	313.571	5.70514	9.97702	206.072	2.11039	14.79	185.466	2.0116	9.4951
Promedio	275.9602	4.899044	11.2015	219.258	2.229216	12.602	165.1542	1.902312	9.201726

Como se puede observar, el material curado a 26 °C es el que presenta mayor resistencia a la tensión mientras que el material curado a 40 °C es el que presenta un mayor módulo elástico. En contraste, en [46] el módulo elástico obtenido es de 2.4 GPa, el resultado de resistencia máxima a la tensión obtenido fue de 59.4 MPa para el material comercial y 61.1 MPa para el material fabricado in situ con oligómeros cíclicos. En su estudio, los autores fabricaron materiales compuestos híbridos WGF-PBT (del inglés Woven Glass Fiber Poly Butylene Terephthalate) con oligómeros cíclicos, modificando dos variables: el desplazamiento y la presión en su proceso de manufactura. Al respecto, la resistencia máxima a la tensión obtenida en ese trabajo fue de 302 y 356 MPa, respectivamente.

En [47] la resistencia máxima a la tensión obtenida fue de 280.25 MPa mientras que en [48] registraron una resistencia máxima a la tensión de 220 MPa. En éstos últimos trabajos el tipo de matriz polimérica utilizada fue distinto.

En la Figura 21 se observa un modo de falla del tipo LIT que significa que ocurrió falla lateral en la sección al interior de la tablilla superior. Este tipo de falla se aprecia claramente en el detalle izquierdo y derecho superior de la misma Figura 21. A su vez, no se observa fuerte desprendimiento de las fibras de vidrio de la matriz, por lo que cualitativamente parece haber una buena adherencia entre el material de refuerzo y la resina utilizada en este estudio, Epolam 2015+Endurecedor 2015. Continuando con la descripción del modo de falla identificado, basados en la norma, podemos concluir que las probetas de material curado a 40 y 60 °C presentan ruptura del tipo DGT lo que

significa que el tipo de falla corresponde a delaminación en el borde superior. Cabe mencionar que, el modo de falla LIT concuerda con lo registrado en [49].

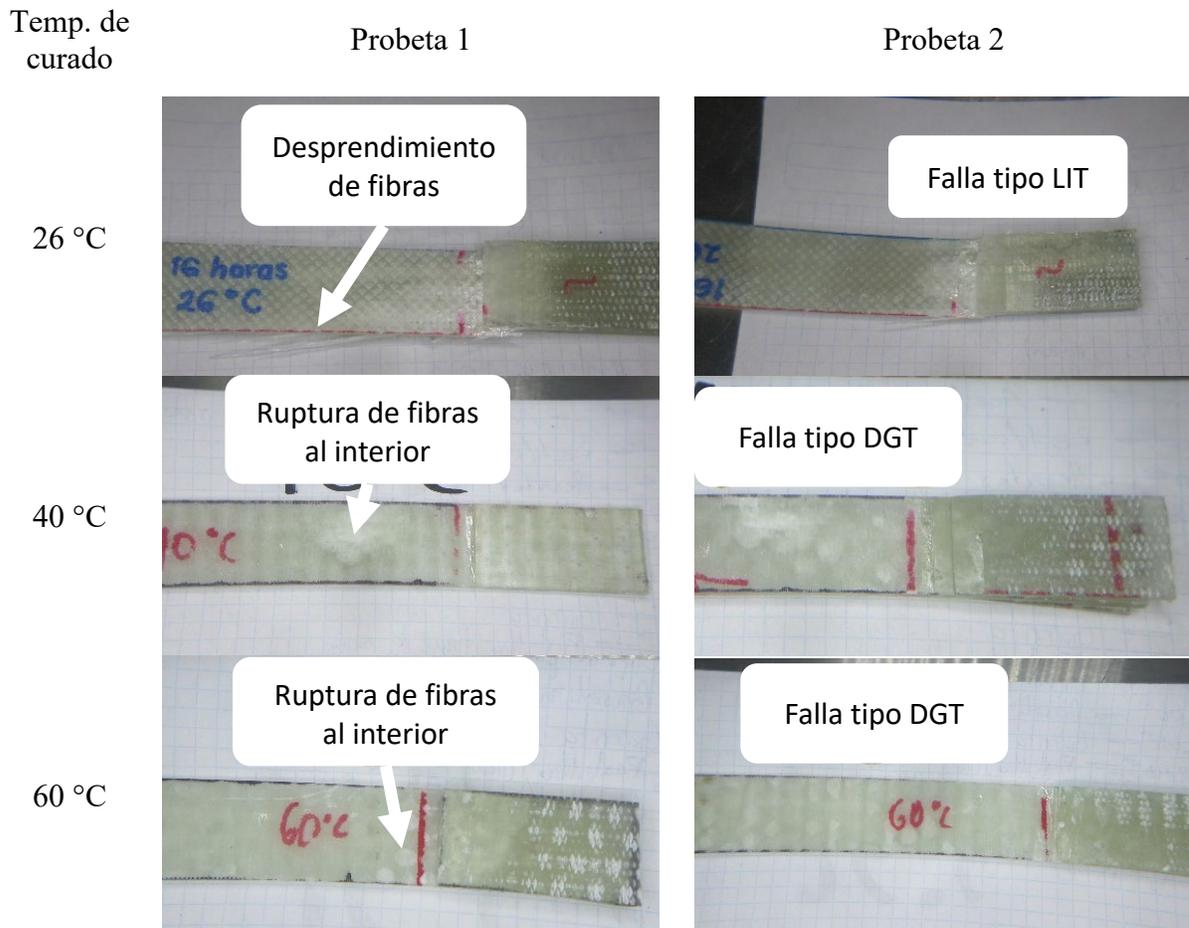


Fig. 21. Probetas ensayadas en máquina universal Shimatzu fabricadas a una temperatura de post-curado de 26, 40 y 60 °C.

5.5.2. Ensayos de Impacto

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de impacto Izod bajo la norma ASTM D256. En la Figura 22 se muestran las probetas después de realizar el ensayo de impacto Izod, la visualización se realizó con ayuda de una lupa de 5x, el tipo de falla identificado, según la norma utilizada, corresponde a “Ruptura completa” (C = Complete break) y “Ruptura de bisagra” (H = Hinge break). Se puede observar delaminación y exposición de las fibras en los tres materiales, también se observan espacios “vacíos” o huecos en la resina debidos al desprendimiento de las fibras de la matriz epóxica.

Tabla 9. Resultados del ensayo de impacto obtenidos según la norma ASTM D256.

Prueba de impacto Izod			
Probeta No.	Energía absorbida (J)	Energía absorbida (J)	Energía absorbida (J)
	26°C	40°C	60°C
1	20.9	17.3	26.8
2	20.9	18.1	17.7
3	21.5	19	23.7
4	21.5	19.4	18.6
5	20.9	17.8	23.1
Promedio de energía absorbida	21.14	18.32	21.98

En [8] la resistencia al impacto obtenida fue de 10.34 Joules (J) para una mezcla de 50% resina-50% fibra, de un material compuesto basado en fibra de vidrio tipo-E reforzando una matriz polimérica. Es importante destacar que este resultado corresponde a una prueba de impacto Charpy mientras que los resultados de este estudio corresponden a una prueba de impacto Izod siguiendo la norma ASTM D256. En [47] los autores identificaron una resistencia al impacto de 11.4 J en materiales compuestos similares a los mostrados en este estudio.

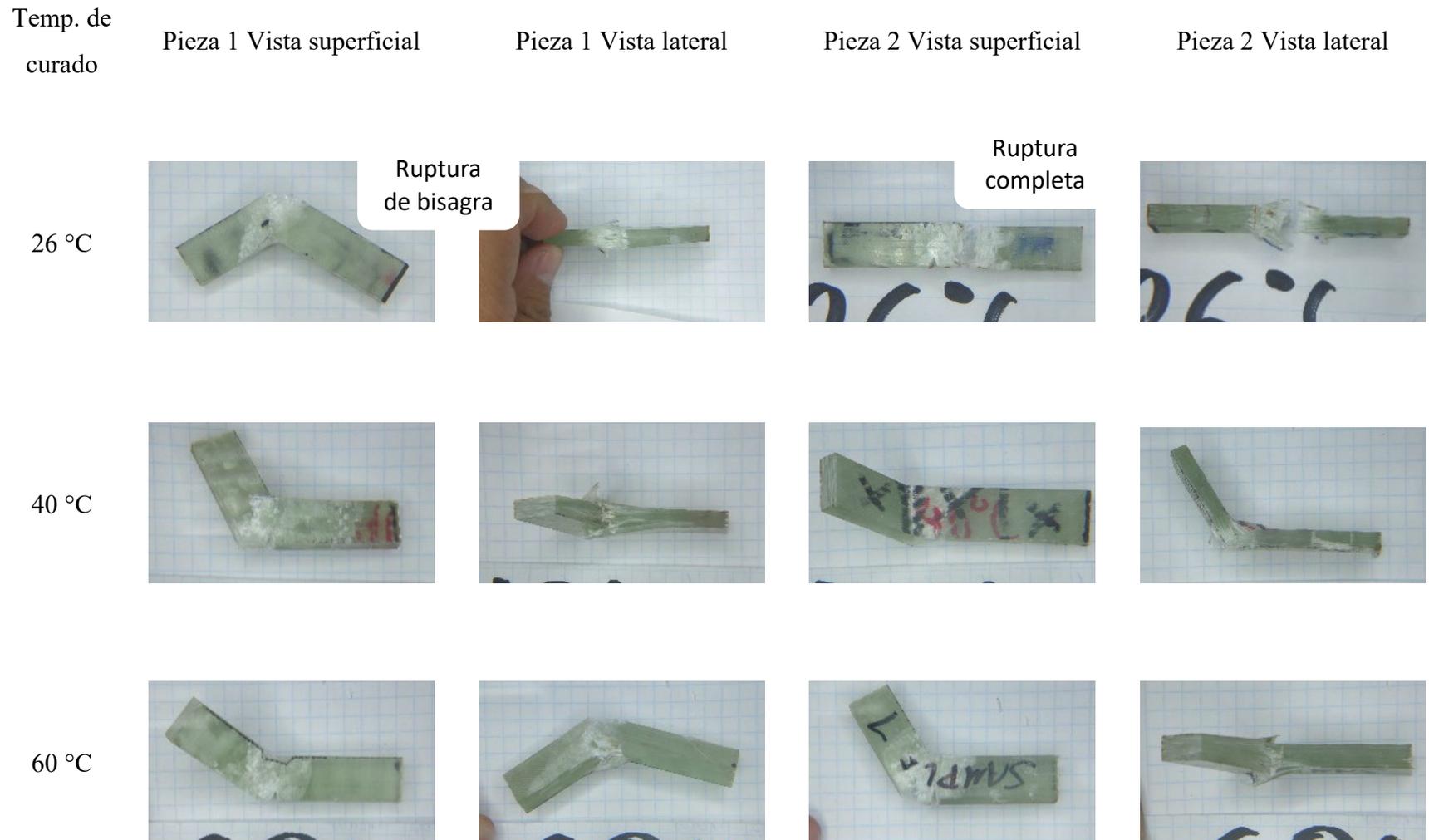


Fig. 22. Probetas ensayadas en máquina de impacto IZOD fabricadas a una temperatura de post-curado de 26, 40 y 60 °C.

En la Figura 23 podemos observar las microfotografías de las probetas de impacto, las cuales demuestran que en los tres materiales se puede observar desprendimiento total de fibras, se aprecian partes en las que la resina acompaña a las fibras en el desprendimiento. También se pueden ver fisuras que representan la típica ruptura frágil en la matriz rodeando el material de refuerzo, excepto en las secciones transversales en las cuales se rompe la fibra. De igual manera, se pueden apreciar planos de clivaje en las fibras típicos de la ruptura frágil.

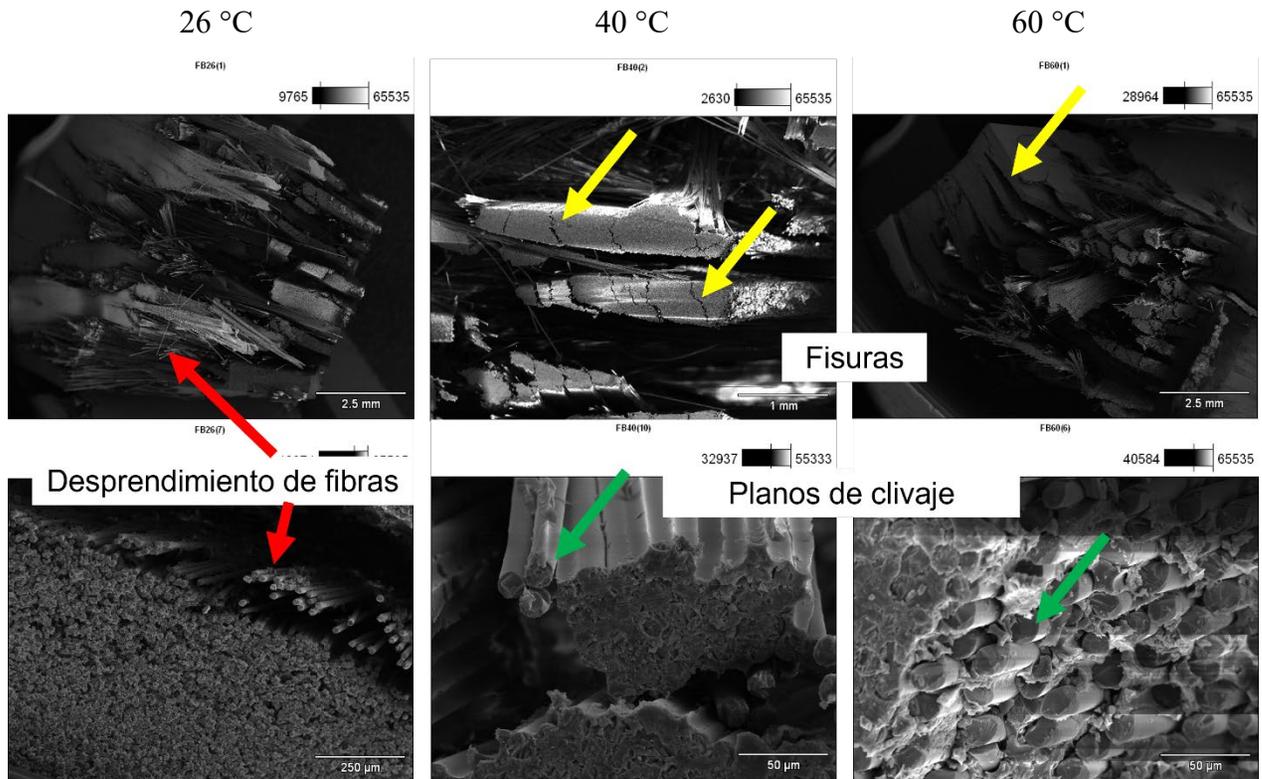


Fig. 23. Micrografías de probetas ensayadas en máquina de impacto IZOD.

5.5.3. Ensayos de Dureza

En la Tabla 10 se muestra el valor promedio obtenido de micro dureza Vickers. Según estos resultados, el material más duro es aquel con un proceso de post-curado de 26 °C.

Tabla 10. Valores de micro dureza Vickers.

Micro dureza Vickers		
26°	40°	60°
27.68	24.89	25.37

En [48] obtuvieron valores de micro dureza Vickers en compuestos de poliéster reforzados con fibra de vidrio tipo-E de 18.84.

5.5.4. Estudio de desgaste erosivo

En la Figura 24 se muestran los resultados del estudio del desgaste erosivo sobre especímenes de 20x20x5 mm siguiendo la norma ASTM G76. Se observa que las probetas curadas a 60 °C perdieron menos masa durante el ensayo en comparación con las probetas curadas a otras temperaturas. Las probetas de material curado a 40 °C mostraron una mayor pérdida de material.

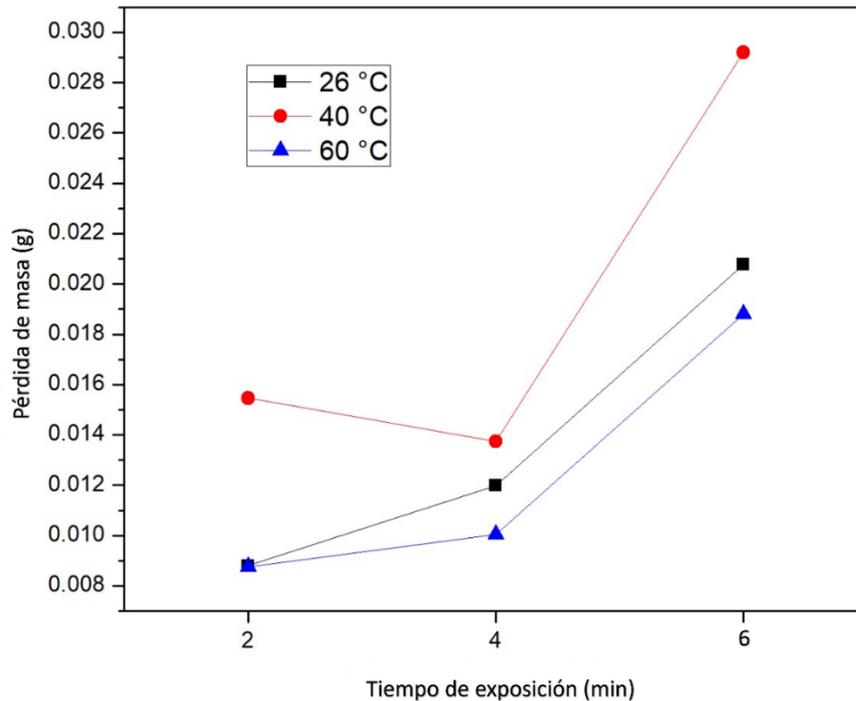


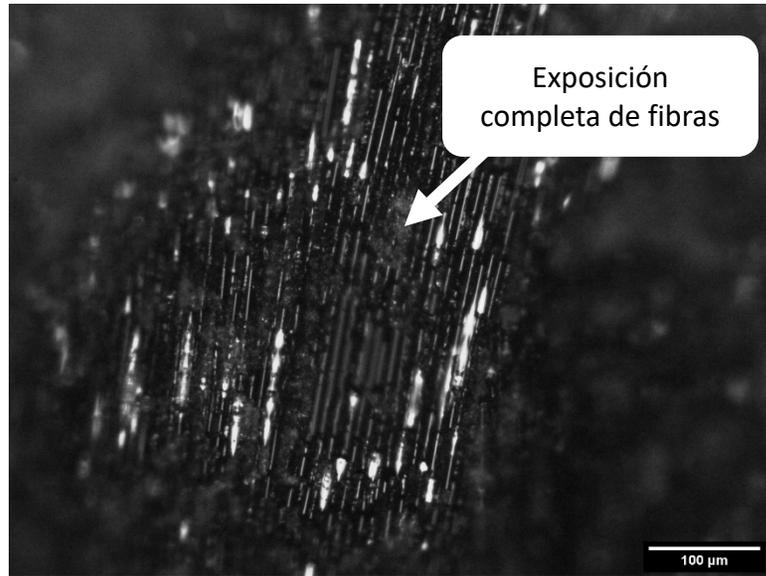
Fig. 24. Resultados de ensayos de desgaste erosivo por partículas sólidas.

En la Figura 25 se muestran las imágenes tomadas por MO de las probetas de desgaste. Es evidente un severo desgaste. Aunque no con suficiente claridad, es posible distinguir el desprendimiento de resina lo que deja expuesto al material de refuerzo ocasionando la ruptura de fibras de vidrio tanto en su arreglo longitudinal como en su arreglo transversal.

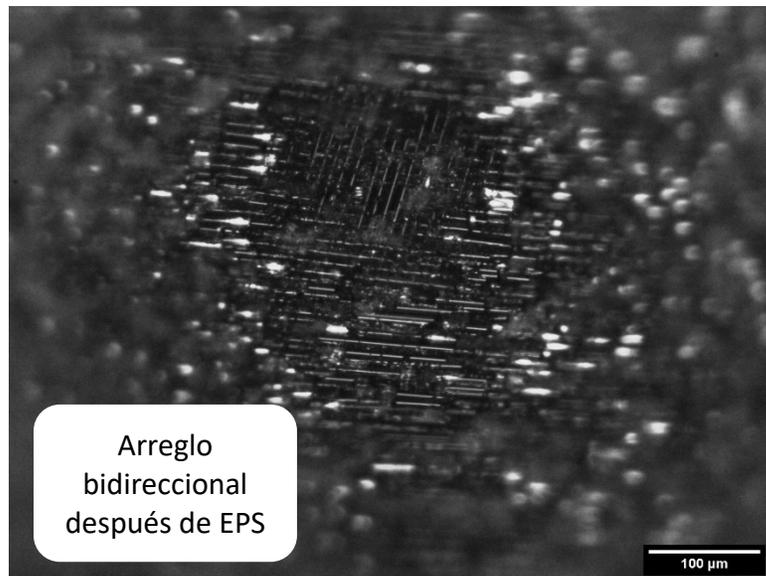
Temp. de curado

Probeta 1

26 °C



40 °C



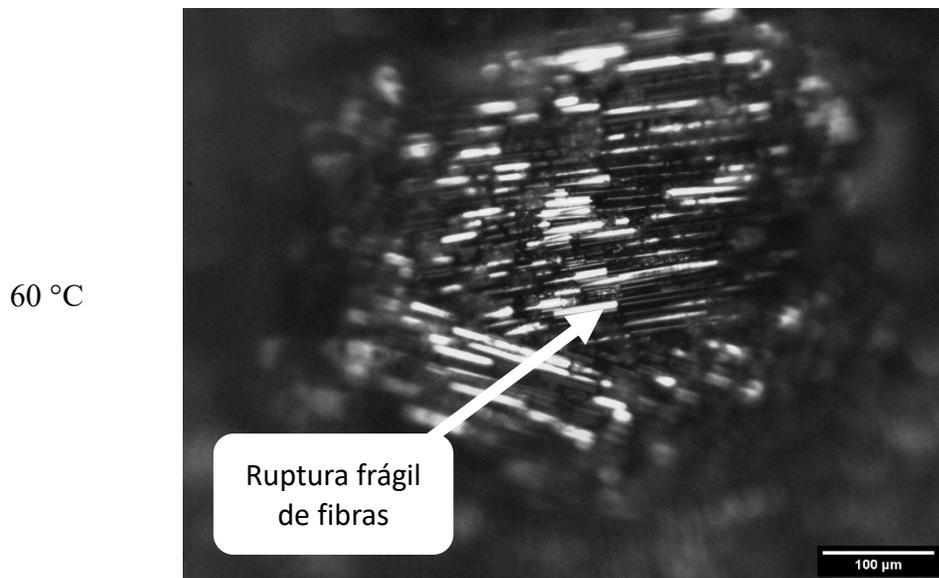


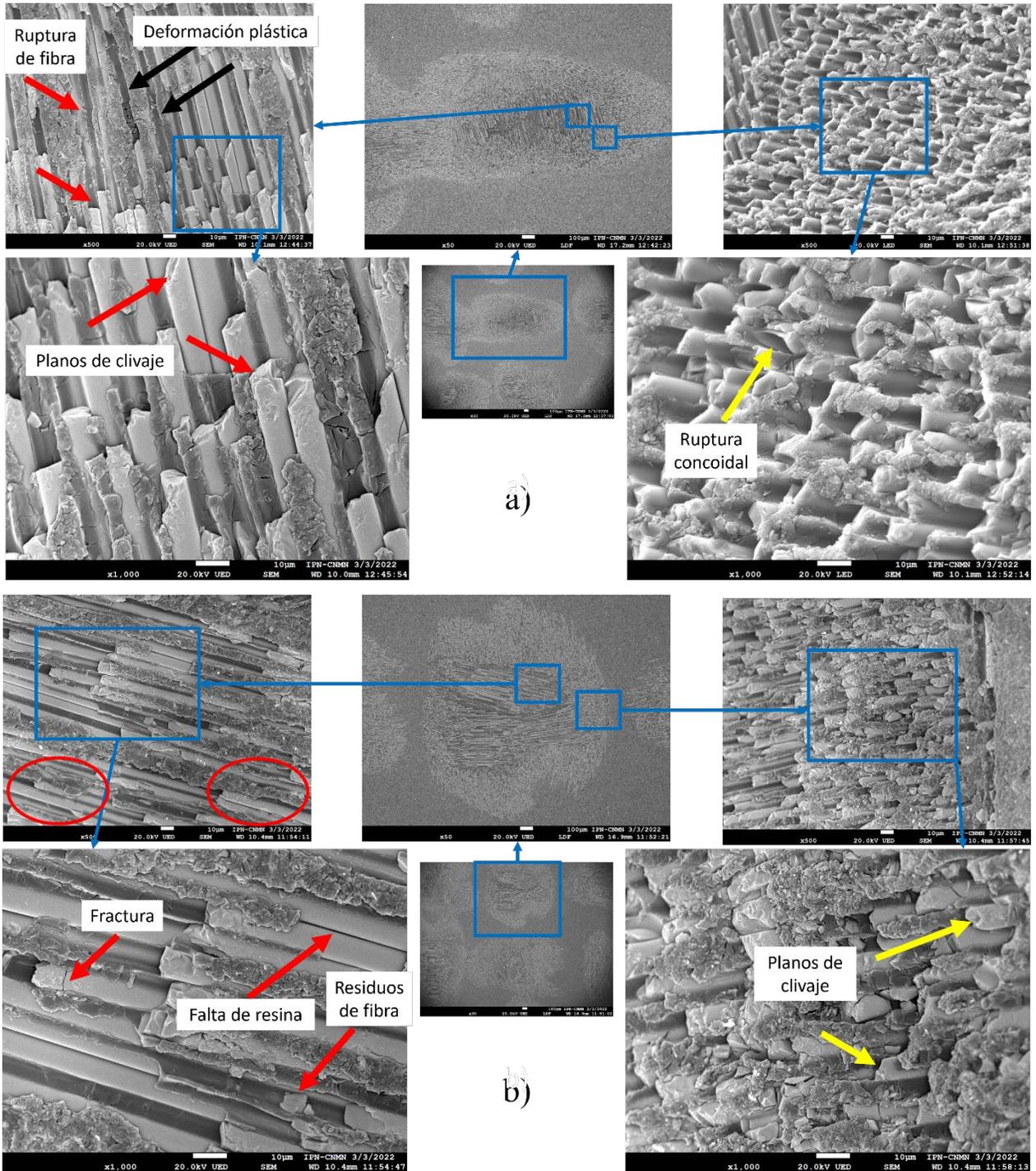
Fig. 25. MO de probetas de desgaste de material curado a 26, 40 y 60 °C.

En la Figura 26 se muestran las imágenes tomadas con MEB de las mismas probetas desgastadas. En el material curado a 26 °C (Figura 24 “a”) se observan huellas de desgaste con una forma irregular, es decir, no se logra apreciar un patrón (esférico, ovalado, etc.) lo que hace pensar que ocurre deformación plástica por lo menos en la matriz. Podemos apreciar que la resina es cualitativamente uniforme y sin inconsistencias, también podemos observar, cualitativamente, la buena adherencia de la matriz con el refuerzo. A 500x (imagen superior izquierda) es evidente el rompimiento de fibras que ha ocurrido. Se observa ruptura del tipo frágil en las fibras que muestran planos de clivaje, no se aprecian remanentes del material de refuerzo lo que demuestra que las fibras como tal se han pulverizado durante la prueba de EPS, también se aprecian fisuras o fracturas del tipo frágil en la resina (flechas rojas), de igual manera, se logra apreciar deformación plástica ocurrida en la resina (flecha negra). A 1000x (imagen inferior izquierda) podemos apreciar grietas en la matriz principalmente en sentido transversal con respecto a la fibra. Observamos mayormente que la resina aun cubre casi en su totalidad a la fibra lo cual indica que la matriz muestra una buena adherencia con el material de refuerzo.

En el material curado a 40 °C (Figura 24 “b”) se observan huellas de desgaste con una forma irregular pero más “circular” que lo observado en las microfotografías de material curado a 26 °C. Cualitativamente podemos apreciar que la resina es uniforme y sin inconsistencias. A 500x (imagen superior izquierda) podemos observar que algunas fibras no se encuentran envueltas completamente en resina (círculos rojos). Se observan fisuras en algunas fibras, así como la falta total de remanentes de fibras (flechas rojas) lo cual indica que el material de refuerzo se ha

pulverizado por completo. Se aprecia, cualitativamente, menos resina alrededor de las fibras (hablando muy generalmente) que en las micrografías de material curado a 26 °C. Se nota cualitativamente la buena adherencia de la resina con las fibras. No obstante, en este caso aparentemente la matriz está absorbiendo la energía del impacto de partículas sólidas y se fractura primero dejando las puntas de las fibras expuestas. A 1000x (imagen inferior derecha e izquierda) se observa ruptura frágil en las fibras y en la matriz, en algunos casos se aprecia un ángulo en la superficie de ruptura de las fibras (flechas amarillas), además, se aprecia fractura frágil en el material de refuerzo que muestra planos de clivaje.

En el material curado a 60 °C (Figura 24 “c”) se aprecian similitudes con el material curado a 26 °C, a 30x (imagen central inferior) se observan huellas de desgaste con una forma irregular, es decir, no se logra apreciar un patrón (esférico, ovalado, etc.) en las huellas de desgaste lo que hace pensar que ocurre deformación plástica por lo menos en la matriz. A 500x (imagen superior derecha y superior izquierda) es posible observar cualitativamente la buena adherencia del material de refuerzo con la matriz. A 1000x (imagen inferior derecha) se aprecia fractura frágil en el material de refuerzo que muestra principalmente planos de clivaje. Así mismo no se aprecian remanentes del material de refuerzo lo que demuestra que las fibras como tal se han pulverizado durante la prueba de EPS, no ha existido un desprendimiento como tal de las fibras ya que estas aún están dentro de la matriz, esto también es un indicativo, cualitativamente, de la buena adherencia del material de refuerzo con la matriz.



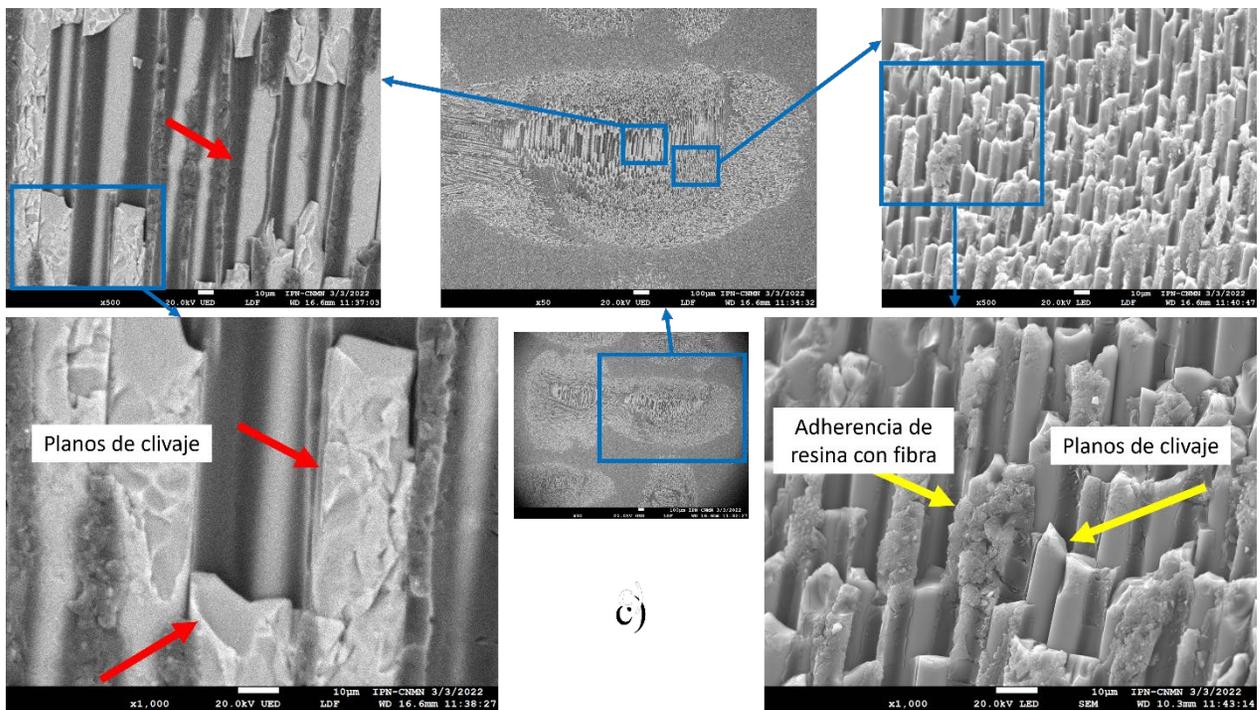


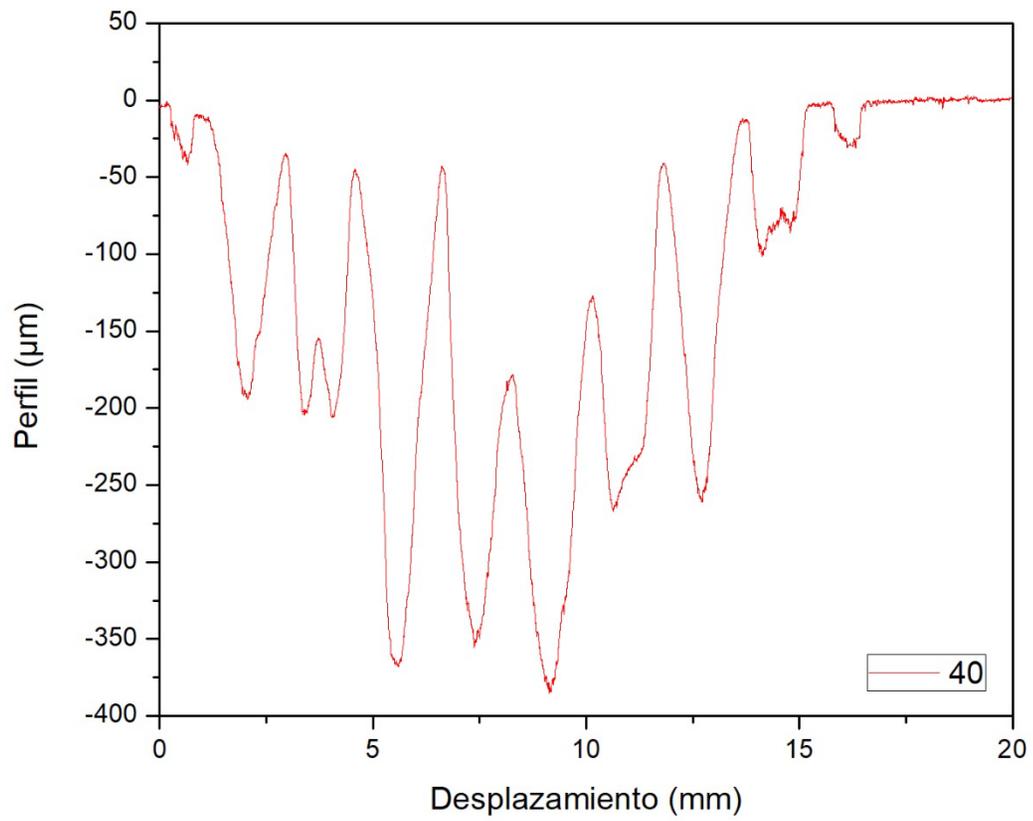
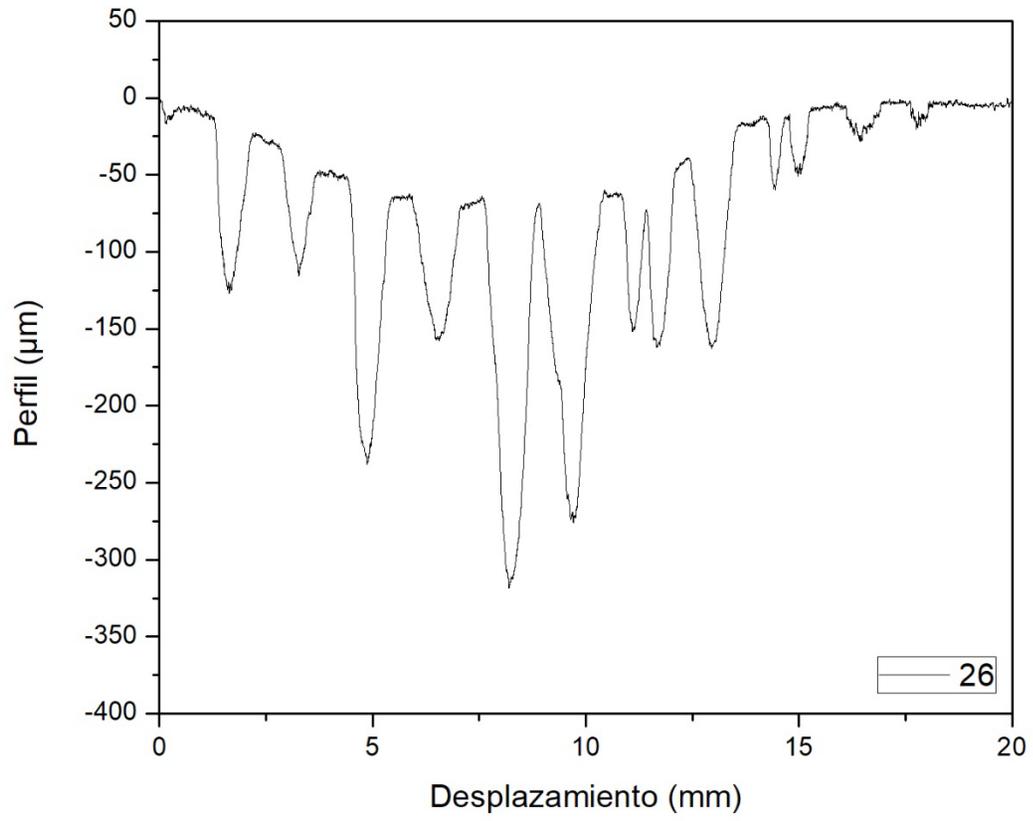
Fig. 26. MEB de probetas de desgaste de material curado: a) 26, b) 40 y c) 60 °C.

Los resultados del estudio de rugosidad se muestran en la Tabla 11. Se observa menor rugosidad en el material que se ha curado a 40 °C, mientras que el material curado a 60 °C tiene ligeramente una mayor rugosidad.

Tabla 11. Rugosidad promedio de cada espécimen antes del estudio de desgaste erosivo.

Temperatura de curado	26 °C	40 °C	60 °C
Ra	0.17553125	0.14255	0.180625

Finalmente, en la Figura 27 se muestran las gráficas correspondientes a la perfilometría de cada espécimen utilizado para las pruebas de desgaste.



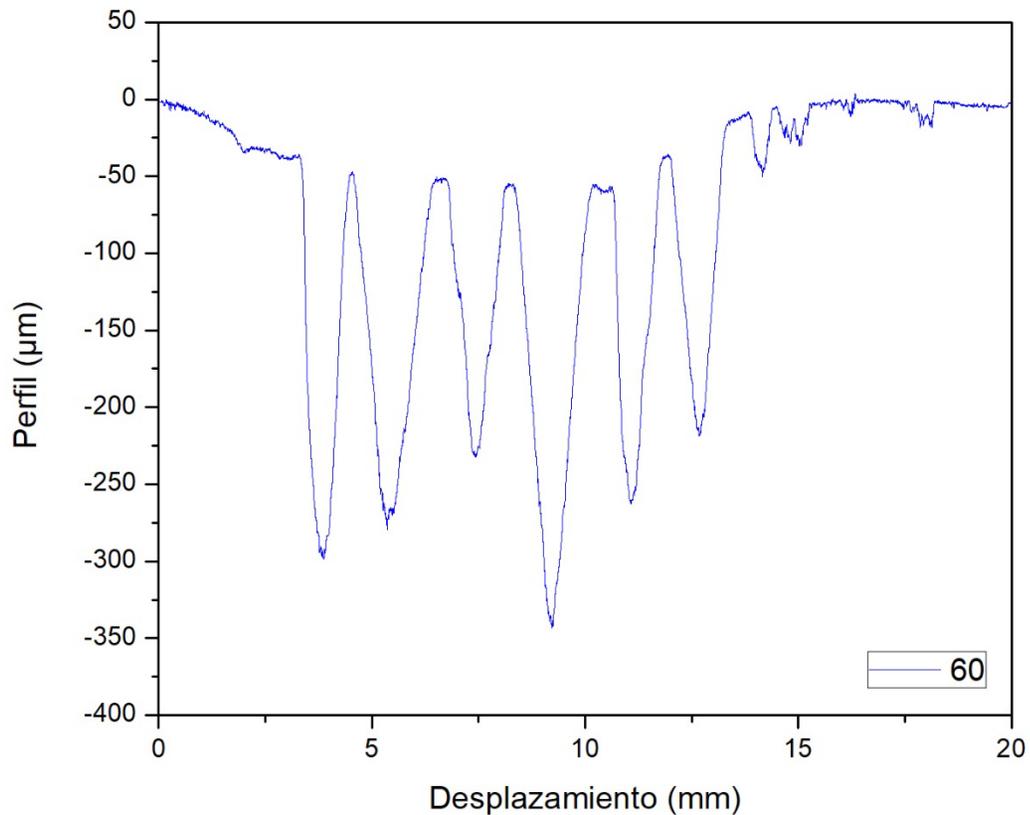


Fig. 27. Gráficas de perfil de cada espécimen después del estudio de desgaste erosivo, material curado a: 26, 40 y 60 °C.

Se puede apreciar que el material post curado a 40 °C presenta una mayor profundidad de desgaste cerca de 400 µm lo cual corresponde con los resultados de las pruebas de desgaste ya que este material es el que ha demostrado una menor resistencia al desgaste. De igual manera podemos correlacionar estos resultados con los obtenidos en las pruebas de impacto ya que el material post curado a 40 °C es el que ha demostrado una menor resistencia.

5.5.5. Estudio de Flexión

La tabla 12 muestra los resultados del ensayo de flexión:

Tabla 12. Valores promedio de resistencia a la flexión.

Resultados promedio flexión			
Temp (°C)	26	40	60
Carga Max (N)	550.28	551.25	581
Alargamiento Max (mm)	27.4932	20.6542	23.6318
σ_{max} (MPa)	203.18	203.53	214.52

Como se puede observar, el material curado a 60 °C demuestra una mayor resistencia a la flexión mientras que el material curado a 26 °C es el que demostró un menor desempeño durante la prueba con resultados similares al material curado a 40 °C. Estos resultados se atribuyen a las variaciones en la cohesión entre los materiales provocadas por el post curado.

En [46] la resistencia a la flexión encontrada es de 104.2 MPa (IS-PBT), mientras que en [48] la resistencia a la flexión es de 210 MPa aproximadamente y en [47] la resistencia a la flexión obtenida fue de 42.99 kgf/cm² lo cual equivale a 4.2 MPa aprox.

En la Fig. 28 se pueden observar las probetas del ensayo de flexión, en los tres materiales se identificó ruptura frágil y desprendimiento de fibras. En el material curado a 40 °C se observa una mayor delaminación (flechas blancas), la ruptura interna de las fibras se aprecia constante lo cual indica que la matriz cumple con su trabajo de “distribuir” las cargas a las fibras uniformemente. En el material curado a 60 °C la ruptura interna de las fibras ocurre en diferentes secciones.

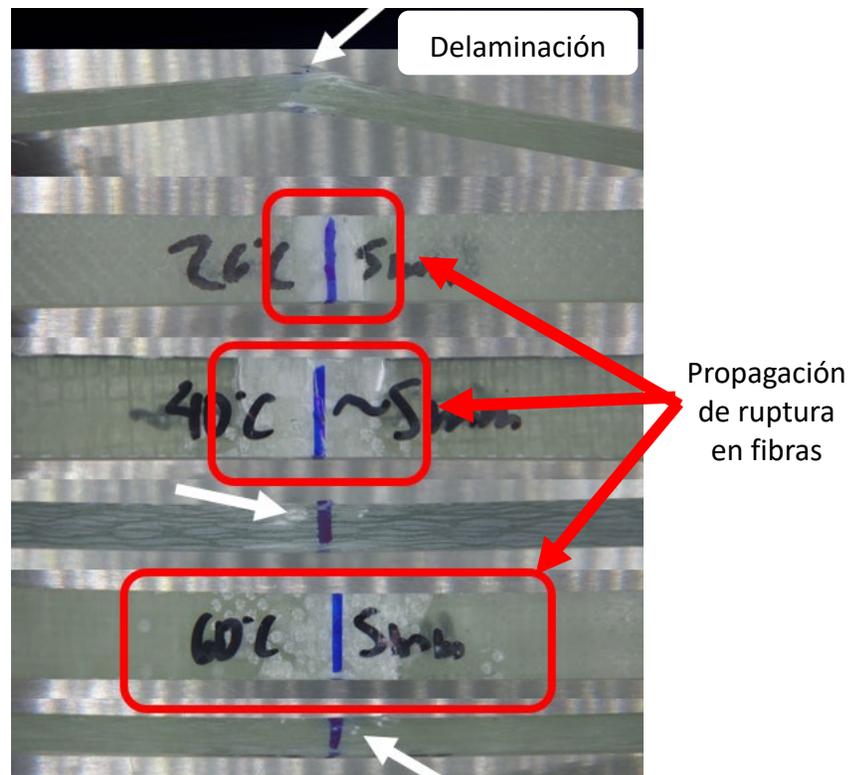


Fig. 28. Probetas de ensayo de flexión.

6. CONCLUSIONES

Los resultados mostrados anteriormente nos permiten realizar las siguientes conclusiones:

1.- Se llevó a cabo la fabricación por infusión al vacío de placas de material compuesto de matriz polimérica, Epolam 2015, reforzadas con fibra de vidrio, tipo E, con un arreglo bidireccional a

diferentes temperaturas del proceso de post-curado (26, 40 y 60 °C).

2.- Los resultados de la caracterización por MO de un espécimen de cada placa permitieron observar cualitativamente una buena adherencia entre el material de refuerzo y la matriz polimérica, así como la ocurrencia de un arreglo bidireccional con desviaciones angulares entre 0° y 90°.

3.- Las micrografías obtenidas por MEB de un espécimen de cada placa permitieron confirmar la ocurrencia de un arreglo bidireccional con desviaciones angulares entre 0° y 90°.

4.- En el análisis de FT-IR se han identificado las bandas características de una molécula DGEBA correspondientes a la resina epoxica.

5.- Fueron determinadas bajo norma (de la ASTM) la micro dureza, resistencia a la tensión, resistencia al impacto y resistencia a la flexión de especímenes obtenidos a partir de las placas fabricadas a tres diferentes temperaturas del proceso de post-curado (26, 40 y 60 °C). El valor promedio más alto de micro dureza Vickers y de resistencia tensil se obtuvo para el material compuesto con un proceso de post-curado a 26 °C. No obstante, el valor promedio más alto de energía de impacto absorbida y de resistencia a la flexión se obtuvieron en el material compuesto con un proceso de post-curado a 60 °C.

6.- La resistencia al desgaste erosivo de especímenes obtenidos a partir de las placas fabricadas a tres diferentes temperaturas del proceso de post-curado (26, 40 y 60 °C) fue mayor para el material compuesto con un proceso de post-curado a 60 °C seguido por el post-curado a 26 °C y luego por el material post-curado a 40 °C.

7.- El comportamiento mecánico identificado hasta ahora podría ser atribuido al mecanismo de adherencia entre la matriz polimérica y el material de refuerzo. También, se resalta que mediante la caracterización por MO y MEB se identificó la ocurrencia de un arreglo bidireccional en cada material compuesto fabricado a diferentes temperaturas del proceso de post-curado (26, 40 y 60 °C) con desviaciones angulares entre 0° y 90°, lo que evidentemente puede afectar los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos de cada material compuesto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. A. Nava, H. M. Siqueiros, B. González, Y. Vega y M. I. Mendoza, “Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica”, *Revista Materia*, v. 23, (2018)
- [2] Lascano, D.; Valcácer, J.; Balart, R.; Quiles-Carrillo, L. y Boronat, T. “Fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento medioambiental con resina epoxi de origen renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío”, *Ingenius. N. 23*, pp. 62-73 (2020)
- [3] R. J. Arruti, “La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi”. *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 23, pp. 22-29, (2016)
- [4] M.J. Martínez, J.D. Castro-Bermúdez and I.D. Ortega-Anillo, “Design turbine blade Aeolian of vertical axis using laminated tin palm material using the finite element method”, *Respuestas*, vol. 23, pp. 43-52, (2018)
- [5] R.F. Gonzalez, R. Paez, M. Vazquez y P.J. Astola. “Fabricación de piezas de geometría compleja mediante infusión empleando tecnología de impresión 3D para la generación de utillaje”. *Materiales compuestos Vol 4*, (2019)
- [6] J. T. Galindo Gómez, “Manufactura y caracterización mecánica de estructuras tipo sándwich fabricadas por infusión al vacío para componentes aeronáuticos”. Centro de ingeniería y desarrollo industrial. Querétaro, Qro. (2019)
- [7] F. Segovia, A. Vicente, M^a D. Salvador y V. Amigó, “Características mecánicas de compuestos epoxy reforzados 0-90° sometidos a impactos de baja energía”. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía, pp. 321-329, (2002)
- [8] Wilson Webo, Leonard Masu and Maina Maringa. “The impact toughness and hardness of treated and untreated sisal fibre-epoxy resin composites”. *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*. (2018)
- [9] P. S. Veers, T. D. Ashwill, H. J. Sutherland, D. L. Laird and Donald W. Lobitz. “Trends in the design, manufacture and evaluation of wind turbine blades”. *Wind Energ.* (2003)
- [10] E. E. Vera *et al.*, “Microanalysis of carbon and glass fiber obtained by resin transfer molding process to manufacture blades for wind turbines”. *Microsc. Microanal.* 24 (Suppl 1), Microscopy Society of America (2018)

- [11] T. Lijin and M. Ramachandra, “Advanced materials for wind turbine blade- A Review”. *Materials Today: Proceedings* 5, p2635–2640, Elsevier Ltd, (2018)
- [12] A. Le Duigou, P. Davies and C. Baley. “Interfacial bonding of Flax fibre/Poly(L-lactide) bio-composites”. *Composites Science and Technology* 70, p231–239, Elsevier Ltd, (2010)
- [13] U.S. Tewari, A.P. Harsha, A.M. Häger, K. Friedrich. “Solid particle erosion of carbon fibre– and glass fibre–epoxy composites”. *Composites Science and Technology* 63, p549–547, Elsevier Ltd, (2003)
- [14] N. Yang and H. Nayeb-Hashemi. “The effect of solid particle erosion on the mechanical properties and fatigue life of fiber-reinforced composites”. *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 41, No. 5, DOI: 10.1177/0021998306065288, (2007)
- [15] H. Woobeom, K. Jonghwa, K. Bumsuk. “Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines”. *Renewable Energy*, DOI: 10.1016/j.renene.2017.09.002, (2017)
- [16] Jinhu Chen et al. “Aligned carbon nanotube reinforced high performance polymer composites with low erosive wear”. *Composites: Part A* 67, 86–95, (2014)
- [17] A. S. Malipatil, *Experimental and LS-DYNA of Sand Particle Erosion on Polymer Composites*, IFAC Proceedings Volumes, Volume 47, Issue 1, Pages 1080-1083, (2014)
- [18] U. Kumar Debnath, M. Asaduzzaman Chowdhury, Md. Arefin Kowser, and Md. Shahin Mia. “Study of erosion characterization of carbon fiber reinforced composite material”. *AIP Conference Proceedings* 1851, 020098, DOI: 10.1063/1.4984727, (2017)
- [19] Parvesh Antil et al. “Erosion analysis of fiber reinforced epoxy composites”. *Mater. Res. Express* in press <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab34b4>, (2019)
- [20] Z.H. Ren et al. “Erosive behaviors of SiC foam/epoxy co-continuous phase composites”. *Wear* 336-337, 21–28, (2015)
- [21] H. H. Ya et al. “A preliminary experimental investigation of wet fine erosion in two phase flow”. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 328 012023, (2018)
- [22] P.K. Mallick, *Composites engineering handbook* (1997)
- [23] D. R. Askeland. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Tercera edición. International Thomson Publishing (1998)
- [24] S.T. Peters, *Handbook of composites* by S.T. Peters. Second edition. Springer Science + Business Media Dordrecht (1998)

- [25] P. L. Menezes et al. *Tribology for scientist and engineers*. Springer. DOI 10.1007/978-1-4614-1945-7, (2013)
- [26] M. Varenberg, “Towards a unified classification of wear”, *Friction* 1(4): 333–340, DOI 10.1007/s40544-013-0027-x, (2013)
- [27] I. Hutchings & P. Shipway, *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, Second edition, Butterworth-Heinemann by Elsevier (2017)
- [28] A.W. Ruff and S.M. Wiederhorn, *Erosion by solid particle impact*, National measurement laboratory, Center of materials Science, National Bureau of Standards, (1979)
- [29] A.P. Harsha, A. A. Thakre, “Investigation on solid particle erosion behavior of polyetherimide and its composites”, *Wear* 262, 807–818, (2007)
- [30] Mahmood Husein Dattoo, *Mechanics of Fibrous Composites*, Elsevier applied science, ISBN: 1-85166-600-1, (1997)
- [31] <https://www.sherfab.com/assets/images/TDS%20-%20Epolam%202015%20System%20-%20US%20REV%2002.pdf>
- [32] Norma ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- [33] Norma ASTM D256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
- [34] Norma ASTM D7264 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- [35] Norma ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness
- [36] Norma ASTM E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials
- [37] Norma ISO 4287 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters
- [38] Norma ASTM G76 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets
- [39] N. Kumar y A. Singh, Study the effect of fiber orientation on mechanical properties of bidirectional basalt fiber reinforced epoxy composites, *Materials Today: Proceedings*, (2020)

- [40] S. A. Morales Ortuño, “Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones”, Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D.F., (2008)
- [41] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Scan=cob2233&Type=IR>
- [42] Theophile Theophanides. Introduction to Infrared Spectroscopy, Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology, Prof. Theophanides Theophile (Ed.), ISBN: 978-953-51-0537-4, InTech Open (2012)
- [43] E. Pretsch, P. Buhlmann, M. Badertscher. Structure Determination of Organic Compounds. ISBN 978-3-540-93809-5. DOI 10.1007/978-3-540-93810-1 (2009)
- [44] A. S. López Rodríguez. “Síntesis de copolímeros en bloque Nylon 6 / Poliuretano en estrella mediante moldeo por inyección reactiva (RIM)”. Tesis de grado: Doctor en Polímeros. Centro de investigación en química aplicada. Saltillo, Coahuila (2001)
- [45] A. G. Camargo Muciño. “Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base Kevlar”. Tesis de grado. Instituto Tecnológico de Pachuca (2020)
- [46] Z. A. Mohd Ishak, Y.W. Leong, M. Steeg, J. Karger-Kocsis. “Mechanical properties of woven glass fabric reinforced in situ polymerized poly (butylene terephthalate) composites”. Composites Science and Technology 67, p 390–398, Elsevier Ltd, (2007)
- [47] M. R. Sanjay, B. Yogesha. “Studies on Mechanical Properties of Jute/E-Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites”. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 4, p 15-25, Scientific Research Publishing, (2016)
- [48] Padmaraj N H, Chethan K N, Suyash Utkarsh, Siddharth Banerjee, Utkarsh. “Influence of marine environment on mechanical properties of glass fiber reinforced composites”. International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 377, (2018)
- [49] Balu Maloth, N. V. Srinivasulu, R. Rajendra. “Fabrication and Characterization of E-glass Fabric Composites Using Amine-Terminated Butadiene Acrylonitrile”. Advances in Lightweight Materials and Structures, Springer Proceedings in Materials 8, (2020)

ANEXOS

Derivados de la Tesis





*Otorga el presente
Reconocimiento
por su valiosa participación a:*

Jorge A. Castillo Hernández, Erika O. Avila-Dávila, Edgar E. Vera Cárdenas, Saul Ledesma Ledesma, Yuri S. Hernández Demesa, Diego G. Espinosa Arbeláez y Alejandro Cruz Ramírez

Por el trabajo:

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS POR INFUSIÓN AL VACÍO PARA SU APLICACIÓN EN LA MANUFACTURA DE ÁLABES DE UN AEROGERADOR DE EJE VERTICAL



María Eugenia Sánchez
Representante del Comité Organizador



Rafael Espinosa Luna
Director General del CIO



Alejandra Jáidar
Físico mexicana



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

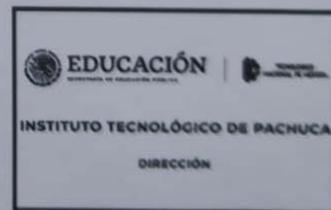
A

JORGE AARÓN CASTILLO HERNÁNDEZ

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN EN LA SESIÓN DE PÓSTERS DEL
2º SEMINARIO DE POSGRADO "EL ROL DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN LA SOLUCIÓN DE
LOS PROBLEMAS NACIONALES" REALIZADO LOS DÍAS 19 Y 20 DE MAYO DEL PRESENTE.

PACHUCA DE SOTO, HGO., A 20 DE MAYO 2022.

ING. FRANCISCO RAFAEL SALDAÑA IBARRA
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA



El presente documento es una copia digitalizada de un documento original. No tiene validez legal. Para más información, consulte el sitio web del Instituto Tecnológico de Pachuca.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO.

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA**

OTORGA EL PRESENTE

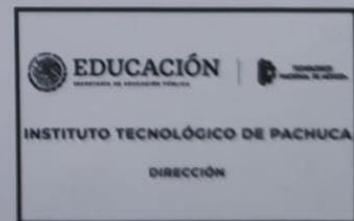
RECONOCIMIENTO

A

JORGE AARÓN CASTILLO HERNÁNDEZ

POR HABER OBTENIDO LA **MAYOR PRODUCTIVIDAD ACADÉMICA** DE CUARTO SEMESTRE DEL PROGRAMA DE MAestrÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA EN EL PERIODO AGOSTO-DICIEMBRE 2021.

PACHUCA DE SOTO, HGO., 19 DE MAYO DE 2022.



ING. FRANCISCO RAFAEL SALDAÑA IBARRA
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA



México Abril, 2021

Gaceta de la Propiedad Industrial

SOLICITUDES DE PATENTE, DE REGISTROS DE MODELO DE UTILIDAD Y DE DISEÑOS INDUSTRIALES

Solicitudes de Patente

adulto. De manera particular, la presente invención está dirigida a la detección electrónica de manera inalámbrica, más específico a la detección electrónica inalámbrica por frecuencia de aleteo en un rango específico, de uno o más mosquitos hembra del género aedes aegypti dentro de un espacio con precisión temporal y espacial, sin afectación por el ruido ambiental de otros organismos vivos o fuentes externas de ruido persistente, u ocasional, pudiéndose emplear para su detección con fines de alertamiento, o para estudios entomológicos.

porcentaje de oxigenación del cuerpo durante la sesión de vibración, alrededor de 4 %. Esta plataforma mejora la escasa o mala circulación de la sangre en los músculos lo que previene los molestos calambres y aumenta la oxigenación de todos los órganos del cuerpo. El aumento de la circulación de la sangre en el cuerpo puede prevenir hipertensión y menores concentraciones de glucosa y triglicéridos, así como pérdida de grasa corporal. La plataforma puede ser utilizada por cualquier persona, aunque se recomienda evitarla para aquellas recién operadas, con problemas cardiovasculares y durante el embarazo. Puede ser usada por deportistas para distensión de músculos, personas con escaso ejercicio físico, que sufren calambres, en hospitales para personas que están inmóviles, que pretenden disminuir de peso, hipertensos, prediabéticos y por personas que involucren alguna afección por escasa circulación de la sangre.

[21] Número de solicitud: MX/a/2019/012332
[22] Fecha de presentación: 15/10/2019
[71] Solicitante(s): CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA SC. [MX]
[72] Inventor(es): Armando CONTRERAS ARIAS [MX]; Carlos HERNANDEZ BENITEZ [MX]; Francisco Javier RODRIGUEZ VALADEZ [MX]
[74] Agente: RODRIGO LANUZA ACOSTA [MX]; GUANAJUATO, 37160, MX
[51] Clasificación CIP: **H01M 8/18** (2006.01) **C02F 3/00** (2006.01) **C02F 3/12** (2006.01)
[52] Clasificación CPC: **H01M 8/18** (2017.08) **C02F 3/005** (2013.01) **C02F 3/12** (2013.01)
[54] Título: CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA
[57] Resumen: Se proporciona una celda de combustible microbiano para el tratamiento de agua, el cual está conformado principalmente por: un conducto inferior de entrada de agua a tratar que recibe el agua por gravedad; una zona de soporte de celda; una zona anódica que comprende un arreglo de una pluralidad de celdas abiertas en la parte inferior y superior; dicha zona de anódica comprende adicionalmente una pluralidad de ánodos formados por una columna de carbón activado granular en tubos verticales insertados en la pluralidad de celdas; una zona de transición aguas arriba de dicha zona de anódica y en comunicación de fluido con la misma; una zona catódica aguas arriba de dicha zona de transición y en comunicación de fluido con la misma, la cual conformada por una alojamiento que comprende una pluralidad de celdas con cátodos; en donde dicha zona catódica está expuesta al aire con el fin de utilizar el oxígeno presente en el aire, y en donde los cátodos de carbón están formados por carbón activado contenido en rejillas, en donde el carbón activado está colocado de manera que sobresalga por arriba del nivel del agua; vertederos de agua por donde sale el agua tratada, la cual es distribuida mediante conductos de descarga de agua tratada que permiten descargarla a un tanque del almacenamiento o al drenaje; y un consorcio microbiano que crece sobre la superficie de la pluralidad de ánodos y que cuenta con exoelectrogenos los cuales pueden convertir la materia orgánica en electrones que son transferidos al ánodo y dan lugar a una corriente eléctrica, en donde dicha corriente eléctrica fluye a través de un circuito externo, a través de electrodos que conectan la pluralidad de ánodos con la pluralidad de cátodos, en donde llegan a estos últimos y finalmente son transferidos al oxígeno que actúa como aceptor de electrones generando un voltaje y una corriente eléctrica.

[21] Número de solicitud: MX/a/2019/012355
[22] Fecha de presentación: 16/10/2019
[71] Solicitante(s): Chih-chuan CHEN [TW]
[72] Inventor(es): Chih-chuan CHEN [TW]
[74] Agente: GABRIELA FERNANDEZ LARRALDE [MX]; Ciudad de México, 05348, MX
[51] Clasificación CIP: **G09F 3/00** (2006.01)
[52] Clasificación CPC: **G09F 3/03** (2013.01)
[54] Título: SELLO ELECTRÓNICO DE TIPO MULTIFRECUENCIA
[57] Resumen: La presente invención comprende un tapón-perno fijado a una tarjeta de circuitos y una antena de detección en un perno y un asiento de bloqueo ajustado con una antena principal. La tarjeta de circuitos se ajusta con un chip, un circuito principal y un circuito secundario. Cuando el asiento de bloqueo y el perno se acoplan y bloquean; el chip, el circuito y la antena principales se conectan eléctricamente para emitir una primera señal para proporcionar el receptor de identificación al monitor, y controlar el circuito secundario que se conectará eléctricamente con el chip y la antena de detección para emitir una segunda señal. La segunda señal se puede utilizar para que el software del teléfono móvil haga el control de calidad de la primera señal. La primera y la segunda señal se pueden interrumpir simultáneamente cuando el tapón-perno se rompe. Esto le permitirá al cliente final hacer la prueba real y el control de calidad utilizando el teléfono móvil.

[21] Número de solicitud: MX/a/2019/012351
[22] Fecha de presentación: 07/10/2019
[71] Solicitante(s): SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA - TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO [MX]
[72] Inventor(es): KARLA IRAZEMA LOPEZ ZEPEDA [MX]; Ciudad de México, 03330, MX
[74] Agente: KARLA IRAZEMA LOPEZ ZEPEDA [MX]; Ciudad de México, 03330, MX
[51] Clasificación CIP: **F03D 3/00** (2006.01)
[52] Clasificación CPC: **F03D 3/005** (2013.01)
[54] Título: AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL CON DISPOSITIVO GIRATORIO AXIAL.
[57] Resumen: El presente invento es un aerogenerador de eje vertical con un dispositivo giratorio axial (11), tiene aplicación específica en zonas urbanas y conurbadas, está diseñado para trabajar con vientos bajos, su uso está dirigido a una altura mínima de 10 m, se aconseja usar en los tejados. Esta invención está construida por una góndola (29, conectores

[21] Número de solicitud: MX/a/2019/012399
[22] Fecha de presentación: 17/10/2019
[71] Solicitante(s): INSTITUTO MEXICANO DEL SEGURO SOCIAL [MX]
[72] Inventor(es): Carlos Javier QUINTAL NOVELO [MX]; Juan Bautista CHALE DZUL [MX]; Rosa Esther MOO PUC [MX]
[74] Agente: ANA CAROLINA SEPÚLVEDA VILDÓSOLA [MX]; Ciudad de México, 06720, MX
[51] Clasificación CIP: **A61K 38/03** (2006.01) **A61K 9/00** (2006.01) **A61P 1/18** (2006.01) **A61P 29/00** (2006.01) **A61P 35/00** (2006.01)
[52] Clasificación CPC: **A61K 38/03** (2013.01) **A61K 9/00** (2016.05) **A61P 1/18** (2018.01) **A61P 29/00** (2018.01) **A61P 35/00** (2018.01) **A61K 2238/15** (2013.01) **A61K 2238/33** (2013.01)
[54] Título: EXTRACTOS DE SARGASSUM FLUITANS, METODOS DE OBTENCION Y USOS DE LOS MISMOS COMO AGENTES HEPATOPROTECTORES.
[57] Resumen: La presente invención se refiere a un extracto etanólico y un extracto fucoldiano de Sargassum fluitans, una alga que se encuentra en el mar del caribe los cuales poseen propiedades hepatoprotectoras. Asimismo, la invención se refiere a los diferentes metabolitos encontrados en esta alga. Los compuestos activos o metabolitos se identificaron mediante HPLC. Adicionalmente, la invención demuestra que los extractos tienen propiedades hepatoprotectoras ya que fueron ensayados in vivo, en modelos animales donde se les indujo fibrosis hepática. Se demostró que los extractos son útiles para proteger a las células hepáticas de agentes tóxicos que inducen daño hepático tal como el CCl₄. Asimismo, se demostró la

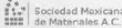
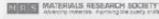


The Organizing Committee
Acknowledges the Participation of

Jorge Aarón Castillo Hernández

in the
**XXX International Materials Research Congress
& International Conference on Advanced Materials**
held in Cancun, Mexico
from August 14th to 19th, 2022

Patricia Zambrano R.
Patricia del C. Zambrano Robledo
SMMater President

 Sociedad Mexicana de Materiales A.C.  MATERIALS RESEARCH SOCIETY
Advancing materials. Improving the world. 



THIS CERTIFICATE IS AWARDED TO

Jorge Aarón Castillo Hernández

for obtaining the **FIRST PLACE** in the poster session on Monday, August 15th 2022

with the abstract entitled:

**EFFECT OF THE POST-CURING TEMPERATURE IN THE WEAR RESISTANCE OF COMPOSITES
OBTAINED BY VACUUM INFUSION PROCESS**

During the XXX International Materials Research Congress

Patricia del C. Zambrano Robledo
SMMater President

 Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

 MATERIALS RESEARCH SOCIETY®
Advancing Materials. Improving the Quality of Life.



Digital Discovery

This is to certify that

Jorge Aarón Castillo Hernández

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Pachuca

.....
has been awarded a *Digital Discovery* Poster Prize.

International Materials Research Congress 2022
Cancun, Mexico
14-19 August, 2022



Alán Aspuru-Guzik

Editorial Board Chair
Digital Discovery



Anna Rulka

Executive Editor
Digital Discovery