



“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

## **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA**

# **ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESGASTE EROSIVO EN MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE CARBONO Y FIBRA DE VIDRIO**

**BAJO LA OPCIÓN I:  
TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

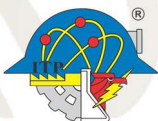
**PRESENTA:  
JESÚS CORNELIO MENDOZA MENDOZA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. EDGAR ERNESTO VERA CÁRDENAS**

**SINODALES:  
DRA. ERIKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA  
DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA**

74 páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo Junio de 2019





“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

Pachuca, Hidalgo, **20/Mayo/2019**  
OFICIO No. DEPI-091-19

**C. ING. JESÚS CORNELIO MENDOZA MENDOZA  
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:

“Estudio experimental del desgaste erosivo en materiales compuestos  
de fibra de carbono y fibra de vidrio”

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.

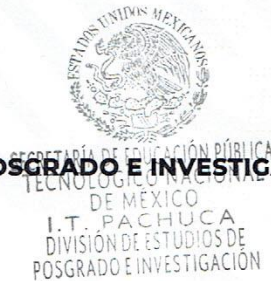
Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*

**MTRA. KARLA MARTÍNEZ TAPIA  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo  
KMT/lmpp





“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica  
A C T A

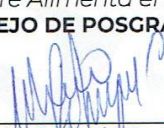
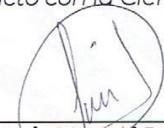

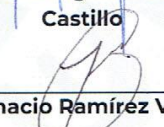
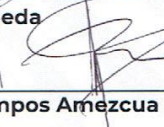

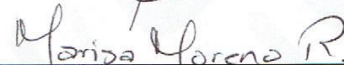
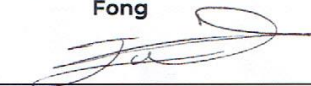
Siendo las 13:00 horas del 15 de Febrero de 2019, reunidos en el aula U6, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: Estudio experimental del desgaste erosivo en materiales compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio, con el siguiente contenido:

Resumen/Abstract  
Nomenclatura  
Contenido  
Índice de cuadros, gráficas y figuras.  
1. Introducción  
2. Antecedentes  
3. Marco Teórico  
4. Materiales y métodos  
5. Resultados y discusión  
Conclusiones  
Bibliografía  
Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Jesús Cornelio Mendoza Mendoza obtenga el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas, profesor de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

**ATENTAMENTE**

*El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*  
**EL CONSEJO DE POSGRADO**

|   |  |  |
|---|--|--|
| <br>_____<br>Dr. Mario Emigdio Rodríguez<br>Castillo | <br>_____<br>Dr. Luis Manuel Palacios<br>Pineda | <br>_____<br>Dra. Erika Osiris Ávila Dávila     |
| <br>_____<br>Dr. Ignacio Ramírez Vargas              | <br>_____<br>Dr. Rafael Campos Amezcua         | <br>_____<br>Dr. Hugo Francisco Abundis<br>Fong |
| <br>_____<br>Dra. Marisa Moreno Ríos                 |  | <br>_____<br>Dr. Edgar Ernesto Vera<br>Cárdenas |



## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el periodo de estudios de maestría en el cual desarrolle la presente tesis de investigación.

A mi director de tesis Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas por la dedicación y su valioso apoyo en la asesoría para el desarrollo de esta investigación.

Al Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA) por el apoyo para la fabricación de los materiales de estudio.

Al Dr. Roger Lewis por la estancia académica en La Universidad de Sheffield dentro del grupo de investigación de tribología en el departamento de ingeniería mecánica.

A mis sinodales Dra. Erika Osiris Ávila Dávila y Dr. Luis Manuel Palacios Pineda por formar parte de la comisión revisora por los importantes consejos para la mejora de esta tesis.

Al M.C. Saúl Ledesma Ledesma por el asesoramiento para la fabricación de los materiales de estudio.

Al Dr. Armando Irvin Martínez Pérez por su apoyo en el uso de equipo de experimentación del laboratorio de ingeniería mecánica en La Universidad Politécnica de Pachuca.

A todos los Doctores del consejo de posgrado por haber colaborado en mi formación profesional.

A mi madre por su apoyo incondicional y sus sabios consejos tanto en los momentos difíciles de mi vida estudiantil como personal.

A mis compañeros de maestría por la fraternidad que establecimos en este tiempo.

## Resumen

En este trabajo de investigación, se analizó el fenómeno del desgaste erosivo que se presenta en materiales compuestos de fibra carbono y fibra de vidrio. Estos materiales comúnmente se utilizan para la fabricación de palas de aerogeneradores instalados principalmente en zonas marítimas, donde el impacto agresivo y continuo de la arena sobre la superficie de las palas, provocan el desgaste de las mismas y a su vez pérdidas en la eficiencia del aerogenerador. Se realizaron pruebas experimentales de desgaste por erosión con partículas sólidas y líquidas. También se realizaron pruebas en ambos materiales recubiertos con una resina de poliéster (Gelcoat), para comparar la resistencia a la erosión al desgaste con materiales no recubiertos. Las pruebas experimentales de erosión de partículas sólidas se llevaron a cabo en una plataforma diseñada de acuerdo a parámetros establecidos en la norma ASTM G76. Se realizaron pruebas a temperatura ambiente y temperatura de 50 °C, en probetas con una forma rectangular con dimensiones de 25 x 18 mm y un espesor de 4 mm. La partícula erosiva utilizada fue arena de mar obtenida de la costa de Oaxaca. Se utilizaron ángulos de impacto de 75°, 85° y 90° con una velocidad de partícula de 12 m/s. La duración de cada prueba fue de 6 minutos y con una balanza analítica de precisión (precisión de  $\pm 0.0001$  g) se pesaron las muestras cada 2 minutos para medir la cantidad de masa perdida. Para las pruebas de erosión de partículas líquidas se utilizó un ángulo de impacto de 75° y un tiempo de exposición de 10, 20 y 30 min. Para identificar los mecanismos de desgaste se utilizó microscopía óptica y electrónica de barrido. Los resultados mostraron que la fibra de carbono presentó 3 veces más resistencia al desgaste erosivo que la fibra de vidrio. La rugosidad inicial de la superficie de los materiales influye fuertemente en la tasa de erosión. Se concluye que el uso de fibra de carbono como material protector del borde de ataque en palas de aerogeneradores, puede ayudar a disminuir este fenómeno erosivo, aumentando la vida útil de las palas. Los mecanismos de desgaste identificados en este estudio fueron picaduras, acción de corte, deformación plástica, formación de cráteres y formación de grietas en las superficies erosionadas del material.

## **Abstract**

In this research work, the phenomenon of erosive wear that occurs in carbon fiber and glass fiber composite materials was analyzed. These materials are used to manufacture wind turbine blades that are mainly used in maritime areas, where the continuous and aggressive impact of particles of sand, cause the wear of the blades on the leading edge; and it causes losses in efficiency of the wind turbine in addition to reducing the life of the blades. Experimental tests of wear by erosion of solid and liquid particles were carried out. Tests were also carried out on both materials with a coating of polyester resin (Gelcoat), to compare the erosion wear resistance with uncoated materials. The experimental tests of erosion wear by solid particles were performed according to the ASTM G76 standard. Tests were carried out at room temperature and temperature of 50 ° C. The specimens had a rectangular shape with dimensions of 25 x 18 mm and a thickness of 4 mm. The erosive particle used was sea sand obtained from the coast of Oaxaca state. Impact angles of 75°, 85° and 90° were used with a particle velocity of 12 m/s. The duration of each test was 6 minutes and with a precision analytical balance (accuracy of  $\pm 0.0001$  g), every 2 minutes the specimens were removed to measure the amount of mass lost. For erosion tests, using liquid particles, an impact angle of 75° and an exposure time of 10, 20 and 30 min were used. To identify the wear mechanisms, an optical and a scanning electron microscopy were employed. The results showed that carbon fiber presented 3 times more wear resistance than fiberglass. It was concluded that, the initial roughness on the surface, influences strongly in the rate of erosion. It was concluded that the use of carbon fiber as a protective material for the leading edge in wind turbine blades, can help to reduce this erosive phenomenon, increasing the useful life of the blades. The wear mechanisms found in this study were, cutting action, plastic deformation, formation of craters and formation of cracks in the eroded surfaces of the material.

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| 1. Introducción.....  | 1  |
| 1.1 Planteamiento del problema y justificación.....             | 1  |
| 1.2 Objetivos.....  | 2  |
| 2. Antecedentes.....  | 4  |
| 2.1 Estudios previos.....                                       | 4  |
| 3. Marco teórico.....   | 10 |
| 3.1 Fundamentos de tribología.....                              | 10 |
| 3.2 Tipos de desgaste.....                                      | 10 |
| 3.3 Desgaste erosivo.....                                       | 11 |
| 3.4 Erosión por partículas líquidas.....                        | 12 |
| 3.5 Erosión por partículas sólidas.....                         | 12 |
| 3.6 Propiedades de la partícula.....                            | 13 |
| 3.6.1 Forma.....  | 13 |
| 3.6.2 Tamaño.....   | 14 |
| 3.6.3 Dureza.....   | 15 |
| 3.7 Mecanismo de desgaste erosivo por deformación plástica..... | 16 |
| 3.8 Ángulo de impacto.....                                      | 17 |
| 3.9 Materiales compuestos.....                                  | 18 |
| 3.9.1 Fibras.....   | 19 |
| 3.9.2 Fibra de vidrio.....                                      | 19 |
| 3.9.3 Fibra de carbono.....                                     | 20 |
| 3.9.4 La matriz.....  | 21 |
| 3.9.5 Manufactura de materiales compuestos.....                 | 21 |
| 4. Fabricación y caracterización de materiales compuestos.....  | 23 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1   | Fabricación de probetas para el estudio de erosión de partículas sólidas a temperatura ambiente y temperatura de 50 °C..... | 23 |
| 4.2   | Caracterización de probetas para pruebas de erosión a temperatura ambiente.....   | 26 |
| 4.2.1 | Medición de rugosidad.....  | 26 |
| 4.2.2 | Medición de dureza.....   | 27 |
| 4.2.3 | Microscopia.....  | 28 |
| 4.3   | Pruebas de erosión de partículas sólidas a temperatura ambiente.....  | 28 |
| 4.4   | Caracterización de la partícula erosiva.....  | 30 |
| 4.4.1 | Distribución de tamaño de partícula erosiva.....  | 30 |
| 4.5   | Caracterización de probetas para pruebas de erosión a temperatura de 50°C.....  | 32 |
| 4.5.1 | Medición de rugosidad.....  | 32 |
| 4.5.2 | Medición de dureza.....   | 33 |
| 4.5.3 | Microscopia.....  | 33 |
| 4.6   | Pruebas de erosión de partículas sólidas con temperatura a 50°C.....  | 34 |
| 4.7   | Fabricación de probetas para el estudio de erosión de partículas líquidas.....  | 35 |
| 4.8   | Caracterización de probetas para pruebas de erosión líquida.....  | 37 |
| 4.8.1 | Medición de rugosidad.....  | 37 |
| 4.8.2 | Medición de dureza.....   | 38 |
| 4.8.3 | Microscopia.....  | 39 |
| 4.9   | Pruebas de desgaste por erosión de partículas líquidas.....   | 40 |
| 5.    | Resultados y discusión.....   | 41 |
| 5.1   | Desgaste por erosión de partículas sólidas a temperatura ambiente.....  | 41 |
| 5.1.1 | Huellas de desgaste.....  | 41 |
| 5.1.2 | Microscopia electrónica de barrido.....   | 42 |
| 5.1.3 | Tasas de desgaste.....  | 43 |
| 5.1.4 | Perfilometría.....  | 45 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.2   | Desgaste por erosión de partículas sólidas a temperatura de 50 °C.....       | 46 |
| 5.2.1 | Huellas de desgaste .....  | 46 |
| 5.2.2 | Microscopia electrónica de barrido .....                                     | 48 |
| 5.2.3 | Tasas de desgaste .....  | 51 |
| 5.2.4 | Perfilometría.....   | 53 |
| 5.3   | Desgaste por erosión de partículas líquidas .....                            | 54 |
| 5.3.1 | Huellas de desgaste .....  | 54 |
| 5.3.2 | Microscopia Óptica .....   | 55 |
| 5.3.3 | Tasa de desgaste .....   | 59 |
| 5.3.4 | Perfilometría.....   | 59 |
| 5.4   | Costo-beneficio del uso de fibra de carbono en palas de aerogeneradores..... | 60 |
| 6.    | Conclusiones.....  | 63 |
| 7.    | Bibliografía.....  | 64 |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Propiedades de algunas fibras comerciales [29].....   | 19 |
| Tabla 2. Rugosidad en probetas para erosión de partículas sólidas.....   | 27 |
| Tabla 3. Mediciones de dureza Barcol en probetas para erosión de partículas sólidas.....                             | 28 |
| Tabla 4. Rugosidad en probetas para pruebas de erosión de partículas solidas con temperatura. ....                   | 32 |
| Tabla 5. Valores de Dureza Barcol en probetas para erosión de partículas sólidas con temperatura. ....               | 33 |
| Tabla 6. Rugosidad en probetas para pruebas de erosión de partículas líquidas.....                                   | 38 |
| Tabla 7. Mediciones de dureza Vickers.....   | 39 |
| Tabla 8. Dureza de los materiales en escala Barcol. ....   | 39 |
| Tabla 9. Masa perdida total en probetas sometidas a erosión de partículas sólidas. ....                              | 45 |
| Tabla 10. Masa perdida en probetas sometidas a pruebas de erosión de partículas sólidas a temperatura de 50 °C. .... | 53 |
| Tabla 11. Lista de materiales.....   | 61 |
| Tabla 12. Estimación del costo de pala de aerogenerador y protección para el borde de ataque..                       | 62 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Ejemplo de erosión en palas de aerogeneradores [3].   | 4  |
| Figura 2. Perfil aerodinámico S809 con erosión modelo A, B y C [4].   | 5  |
| Figura 3. Morfología de las partículas erosivas: a) angulares y b) esféricas [6].   | 7  |
| Figura 4. Tribosistema [22].  | 10 |
| Figura 5. Fuerzas de contacto partícula-superficie [24].  | 11 |
| Figura 6. Partículas duras llevadas por un líquido que golpean la superficie y producen erosión [25].   | 12 |
| Figura 7. Partículas erosivas a) Esferas de vidrio, b) Carburo de Tungsteno, c) Alúmina, d) Diamantes [26].   | 13 |
| Figura 8. Desgaste en función del tamaño de la partícula. Degaste de Cobre por partículas SiC bajo los sistemas de erosión (masa perdida/masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido / (carga x distancia)) [26]. | 14 |
| Figura 9. Desgaste para la relación de dureza partícula ( $H_a$ ) – superficie ( $H_s$ ) [27].  | 15 |
| Figura 10. Proceso de penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana. Deformación plástica de la superficie, contacto inicial a un tiempo $t=0$ , partícula en reposo a un tiempo $t=T$ [28].                                 | 16 |
| Figura 11. Erosión con respecto al ángulo de impacto. Comportamiento dúctil y comportamiento frágil [28].   | 18 |
| Figura 12. Tipos de materiales compuestos según el refuerzo a) Compuesto de partículas; b) Compuesto fibroso, c) Compuesto laminado [29].   | 18 |
| Figura 13. Diversas presentaciones de fibra de vidrio.  | 20 |
| Figura 14. Diversas presentaciones de fibra de carbono.   | 21 |
| Figura 15. Proceso de infusión de resina [30].  | 22 |
| Figura 16. Proceso de inyección de resina por RTM [30].   | 22 |
| Figura 17. Fibras utilizadas a) Fibra de vidrio y b) fibra de carbono.  | 23 |
| Figura 18. Colocación de fibras: a) Molde de aluminio, b) Fibra de vidrio y c) Fibra de carbono.  | 24 |
| Figura 19. Preparación de resina.   | 24 |
| Figura 20. Equipo para el Moldeo por transferencia de resina (RTM).   | 25 |
| Figura 21. a) Laminado de fibra de vidrio y b) Laminado de fibra de carbono.  | 25 |
| Figura 22. a) Cortador de disco de diamante y b) Recubrimiento Gelcoat.   | 26 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23. a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-400, b) Rugosidad en fibra de carbono y c) Rugosidad en gelcoat.....  | 26 |
| Figura 24. Ensayo de dureza en fibra de carbono.....  | 27 |
| Figura 25. Microscopia electrónica de barrido: a) fibra de carbono y b) fibra de vidrio. ....   | 28 |
| Figura 26. Esquema de plataforma de EPS: 1. Cámara erosionadora, 2. Muestra, 3. Posicionador de ángulo de impacto, 4. Boquilla mezcladora de partículas erosivas con aire, 5. Vacuómetro, 6. Inyector de aire, 7. Manómetro, 8. Conducto alimentador de aire, 9. Flujo de partículas erosivas, 10. Ducto alimentador de partículas erosivas, 11. Partículas erosivas, 12. Plato giratorio. .... | 29 |
| Figura 27. Microscopia de morfología de la partícula erosiva (arena de mar).....  | 30 |
| Figura 28. Tamizadora Ro-Tap Testing Sieve Shaker. ....   | 31 |
| Figura 29. Partículas erosivas de arena de mar. ....  | 31 |
| Figura 30. Distribución del tamaño de las partículas erosivas. ....   | 31 |
| Figura 31. Determinación de rugosidad con Alicona Infinite Focus SL. ....   | 32 |
| Figura 32. Microscopia: a) Fibra de carbono, b) Fibra de vidrio. ....   | 33 |
| Figura 33. Plataforma de erosión por partículas sólidas.....  | 34 |
| Figura 34. a) Fibra de vidrio y b) Fibra de carbono. ....   | 35 |
| Figura 35. Preparación de Resina. ....  | 36 |
| Figura 36. Proceso de fabricación de laminados compuestos por infusión.....   | 36 |
| Figura 37. Probetas fabricadas por el método de infusión de resina: a) fibra de vidrio, b) fibra de vidrio con gelcoat, c) fibra de carbono y d) fibra de carbono con gelcoat. ....   | 37 |
| Figura 38. Mediciones de rugosidad con Alicona Infinite Focus SL. ....  | 37 |
| Figura 39. Durómetro Vickers.....   | 38 |
| Figura 40. Microscopia: a) Fibra de carbono y b) Fibra de vidrio. ....  | 39 |
| Figura 41. Plataforma para pruebas de erosión líquida. ....   | 40 |
| Figura 42. Huellas de desgaste. ....  | 41 |
| Figura 43. Microscopia electrónica de barrido.....  | 42 |
| Figura 44. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 75°. ....  | 44 |
| Figura 45. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 85°. ....  | 44 |
| Figura 46. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 90°. ....  | 45 |
| Figura 47. Perfilometría de probetas sometidas a pruebas con ángulo de impacto de a) 75°, b) 85° y c) 90°.....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 48. Huellas de desgaste. ....   | 47 |
| Figura 49. Superficie desgastada: a) fibra de vidrio, b) fibra de carbono. ....  | 48 |
| Figura 50. Recubridor EMSCOPE SC500. ....  | 48 |
| Figura 51. SEM HITACHI TM3030Plus. ....  | 48 |
| Figura 52. Microscopia electrónica de barrido en fibra de vidrio. ....   | 49 |
| Figura 53. Microscopia electrónica de barrido en fibra de carbono. ....  | 50 |
| Figura 54. Microscopia electrónica de barrido en probetas con gelcoat. ....  | 50 |
| Figura 55. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 75°. ....   | 51 |
| Figura 56. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 85°. ....   | 52 |
| Figura 57. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 90°. ....   | 52 |
| Figura 58. Perfilometría sometidas a pruebas con ángulo de impacto de a) 75°, b) 85° y c) 90°. ....  | 54 |
| Figura 59. Huellas de desgaste. ....   | 55 |
| Figura 60. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de vidrio con tiempo de exposición de 10 min. ....   | 56 |
| Figura 61. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de vidrio con tiempo de exposición de 20 min. ....   | 56 |
| Figura 62. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de vidrio con tiempo de exposición de 30 min. ....   | 56 |
| Figura 63. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de carbono con tiempo de exposición de 10 min. ....  | 57 |
| Figura 64. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de carbono con tiempo de exposición de 20 min. ....  | 57 |
| Figura 65. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de carbono con tiempo de exposición de 30 min. ....  | 57 |
| Figura 66. Microscopia óptica: a) fibra de carbono, b) fibra de vidrio, c) fibra de carbono con gelcoat y d) fibra de vidrio con gelcoat. .... | 58 |
| Figura 67. Volumen perdido, pruebas de erosión líquida con ángulo de impacto a 75°. ....   | 59 |
| Figura 68. Perfilometría de probetas sometidas a erosión líquida con tiempo de exposición de: a)10 min, b) 20 min y c) 30 min. ....            | 60 |
| Figura 69. Pala de aerogenerador de fibra de vidrio, con protección de fibra de carbono en el borde de ataque. ....                            | 62 |

## 1. Introducción

El presente trabajo de investigación se realiza en conjunto con el Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA). Este Centro de Investigación diseña y fabrica palas de aerogeneradores con fibra de vidrio y utiliza un recubrimiento (Gelcoat) que protege la superficie de las palas contra los rayos UV. Frecuentemente instalan aerogeneradores en zonas marítimas donde el impacto agresivo y continuo de la arena sobre la superficie de las palas, provocan el desgaste de las mismas disminuyendo la vida útil y generan pérdidas en la eficiencia del aerogenerador. Debido a que no hay información técnica disponible del desempeño del uso de la fibra de vidrio, fibra de carbono y el recubrimiento gelcoat para la fabricación de palas de aerogeneradores como materiales resistentes al desgaste por erosión, se realiza este estudio con la finalidad de comprender el efecto del desgaste erosivo que se presenta en estos materiales. Se realizaron pruebas con partículas sólidas y líquidas en probetas de fibra de vidrio, fibra de carbono, y en ambos materiales recubiertos con gelcoat. Las pruebas experimentales de erosión de partículas sólidas se llevaron a cabo en una plataforma de erosión diseñada con parámetros establecidos en la norma ASTM G76. Se utilizó arena de mar como partícula erosiva. Se realizaron pruebas con ángulos de impacto de 75°, 85° y 90°. Las pruebas de erosión líquida se realizaron en una plataforma de erosión por chorro de agua, con un ángulo de impacto de 75° con tiempos de exposición de erosión de 10, 20 y 30 min. Las probetas fueron caracterizadas antes y después de las pruebas. Para identificar los mecanismos de desgaste se utilizó microscopía electrónica de barrido.

### 1.1 Planteamiento del problema y justificación

La energía eólica es una fuente de energía renovable que no produce contaminación atmosférica significativa. En los últimos años la energía eólica ha mostrado un crecimiento muy importante, se espera que esta incremente un 350.2% a lo largo del período comprendido entre 2016 y 2030, para ubicarse en 47,365.6 GWh al final de este período [1]. Una variable crítica para la optimización económica de la producción de energía eólica es la evolución del diseño de las palas eólicas de acuerdo a sus propiedades estructurales y aerodinámicas, ya que es fundamental para la extracción eficiente de la energía del viento. Hasta hace relativamente poco tiempo era suficiente diseñar palas eólicas con un perfil aerodinámico deseable y una estructura liviana. Sin embargo, con la expansión de la infraestructura eólica, un número cada vez mayor de aerogeneradores se instalan en zonas climáticas distintas, como ambientes helados, regiones húmedas y ambientes con vientos agresivos cargados de arena. Cada uno de estos ambientes puede crear importantes problemas operativos para

un parque eólico, principalmente en las palas de los aerogeneradores [2]. En lo que se refiere al ambiente con vientos agresivos de arena, el impacto constante y repetitivo de dichas partículas, provoca un fenómeno de erosión ocasionando modificaciones en la rugosidad de la superficie y en casos severos conduce a un adelgazamiento de material, bordes irregulares y deterioro del mismo. Al aumentar la rugosidad en el borde de ataque, el viento no fluye adecuadamente por el perfil aerodinámico, debido a que el viento choca con las irregularidades de la superficie creando pequeños vórtices que perjudican la eficiencia en la generación de energía eléctrica. Las palas de aerogeneradores se fabrican principalmente de fibra de vidrio, pero estudios recientes han demostrado que este material presenta poca resistencia al desgaste erosivo, por ello se propone el uso de fibra de carbono en el borde de ataque de palas de aerogeneradores, se espera disminuya este fenómeno que provoca el impacto de partículas sólidas y líquidas, a su vez evitar pérdidas en la eficiencia de la generación de energía eléctrica y gastos en mantenimientos no programados. Por lo tanto, el problema a resolver es el daño ocasionado por el efecto de la erosión en el borde de ataque de la pala del aerogenerador. De lo anterior se propone el uso de materiales resistentes al desgaste erosivo para la fabricación de palas. Es importante realizar trabajos experimentales que proporcionen información acerca del comportamiento de los diferentes materiales y recubrimientos a fin de evaluar la resistencia a este fenómeno.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo General

Realizar un estudio del desgaste por erosión en materiales compuestos (fibra de carbono y fibra de vidrio) para la fabricación de palas de aerogeneradores, a través de la caracterización tribológica de los materiales y superficies empleados en su diseño y construcción, por medio de técnicas experimentales.

### Objetivos Específicos

1. Desarrollar la metodología experimental de pruebas de desgaste por erosión de acuerdo a la norma ASTM G76.
2. Identificar los diferentes tipos de materiales empleados para la construcción de palas de aerogeneradores.
3. Caracterizar los materiales mediante microscopia, perfilometría y dureza antes y después de las pruebas.

4. Adquirir los conocimientos necesarios para el uso de la plataforma de erosión de partículas sólidas y la plataforma de chorro de agua para pruebas de erosión líquida.
5. Identificar los tipos de mecanismos de desgaste en los materiales de las pruebas realizadas con erosión de partículas sólidas y líquidas.
6. Determinar las tasas de desgaste por erosión, ya sea por masa perdida o volumen perdido.



## 2. Antecedentes

### 2.1 Estudios previos

A continuación, se dan a conocer una serie de investigaciones anteriormente realizadas que guardan relación con el tema a tratar. Se realizaron consultas en artículos científicos que tenían interrelación con el efecto de erosión de la lluvia, viento con partículas de arena, granizo y problemas de ingeniería que se presentan en la superficie del borde de ataque de las palas que influyen en la eficiencia del aerogenerador.

Dalili et al. (2009) en su revisión de “problemas de ingeniería de superficie críticos para el rendimiento de la turbina eólica” establece que el viento transporta grandes cantidades de arena y gotas de agua que puede erosionar el borde de ataque de una pala de aerogenerador y aumentar la rugosidad de la superficie como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Ejemplo de erosión en palas de aerogeneradores [3].

Estos efectos deterioran el rendimiento aerodinámico y afectan la eficiencia del aerogenerador de la misma manera que la contaminación por insectos. El efecto de la erosión depende de la fuerza con que las partículas impactan sobre el perfil aerodinámico. Las formas geométricas y las velocidades relativas tanto del perfil aerodinámico como de la partícula impactante determinan la fuerza de impacto de las partículas. La velocidad del viento y la velocidad de rotación de la pala determinan la velocidad de impacto. La velocidad de rotación es máxima en la punta de la pala del perfil aerodinámico que es la más alejada del eje de rotación. El efecto de la rugosidad en el rendimiento aerodinámico de una pala depende propiamente del diseño geométrico, de modo que una pala puede adaptarse para inducir una pérdida de energía mínima. Sin embargo, la rugosidad de la superficie cambia durante la operación debido a la contaminación (insectos) o la erosión, y

típicamente siempre conducirá a pérdidas de energía imprevistas. Es por ello que proponen soluciones para mejorar la resistencia a la erosión de un perfil aerodinámico, como aplicar un recubrimiento en el borde de ataque del perfil aerodinámico en forma de cinta. Sin embargo, estas cintas deben reemplazarse con frecuencia; ya que no absorben adecuadamente la energía de impacto de la materia en partículas. Estas cintas son adecuadas para turbinas pequeñas, aunque aumentan la resistencia aerodinámica sobre la superficie de la pala [2].

Gharali y Johnson (2012) en su estudio “Modelado numérico de un perfil aerodinámico S809 bajo pérdida dinámica, erosión y altas frecuencias reducidas”, simularon numéricamente una corriente de frenado oscilante sobre un perfil S809 estacionario utilizando ANSYS Fluent 12.1. Para comparar, la transición laminar-turbulenta en diferentes modelos. Los coeficientes aerodinámicos resultantes que presentan fenómenos de pérdida dinámica se comparan con los coeficientes aerodinámicos de los datos experimentales y semi-empíricos existentes para una superficie de sustentación S809 oscilante. La simulación se extendió para varios números de Reynolds, 104, 105 y 106, para un amplio rango de la frecuencia reducida, de 0.026 a 18. La erosión del borde de ataque, que es un problema común para las palas de turbinas eólicas en servicio, se simula en función del rango de erosión que se encuentra en las condiciones de funcionamiento de la turbina. Se modelaron tres casos de erosión para examinar los efectos de la longitud y el espesor de las erosiones, mostrados en la figura 2.

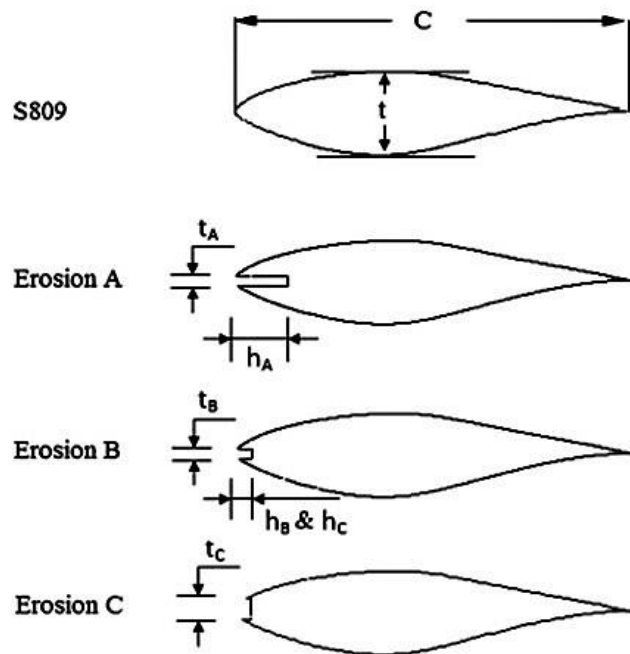


Figura 2. Perfil aerodinámico S809 con erosión modelo A, B y C [4].

Concluyen que la longitud de la erosión tiene un efecto menor sobre los coeficientes aerodinámicos, pero el espesor de la erosión afecta notablemente los resultados. La erosión del borde de ataque cambia la forma estándar del perfil aerodinámico y cuando ocurre una erosión significativa, las características de los fenómenos de pérdida dinámica ya no se pueden predecir. Bajo una erosión severa, el rendimiento de la pala de la turbina eólica se ve afectado significativamente [4].

Sareen, Sapre y Michael (2013) investigaron el “efecto de la erosión en el borde de ataque de la pala en el rendimiento del aerogenerador”, realizaron pruebas que se llevaron a cabo en el túnel de viento subsónico de baja turbulencia. Obtuvieron resultados que revelaron que la erosión del borde de ataque puede ser significativamente perjudicial para el rendimiento del perfil aerodinámico. La erosión también causó una reducción sustancial en el coeficiente de sustentación, especialmente en los ángulos de ataque más altos que experimentan los aerogeneradores durante su operación. De forma similar a la erosión de borde de ataque, los errores simulados en el borde de ataque también dieron como resultado una degradación significativa en el rendimiento del perfil aerodinámico. Mediante el software PROPID, estimaron un aumento del 80% en el arrastre, que fue causado por un grado relativamente pequeño de erosión en el borde de ataque, esto puede representar una pérdida del 5% en la producción anual de energía. Para un aumento en el arrastre de 400-500% junto con la pérdida de sustentación, como se observó en muchos de los casos de erosión de moderados a fuertes, esta pérdida en la producción anual de energía podría ser tan alta como del 25%. Estos resultados evidencian el efecto perjudicial de la erosión del borde de ataque y la necesidad de estrategias de mitigación de la erosión. Los métodos que podrían reducir o eliminar la erosión del borde de ataque ayudarían a prevenir las pérdidas sufridas debido a la degradación en el rendimiento de las palas del aerogenerador después de unos pocos años de funcionamiento [5].

Vite et al. (2013) en su trabajo titulado “erosión de partículas sólidas en acero inoxidable AISI 420 usando partículas angulares y redondas de carburo de silicio”, menciona que el desgaste por erosión en una superficie sólida se genera debido al impacto de partículas sólidas duras. Este tipo de desgaste es común en procesos industriales y de fabricación. Debido a esto, muchos investigadores estudian este fenómeno con el objetivo de reducir el daño generado por este mecanismo de desgaste. La tasa de erosión causada por partículas sólidas que impactan en la superficie de un material con un flujo continuo depende de las características de flujo y del mecanismo de remoción de material. En su trabajo mostraron dos tipos de comportamientos por

erosión de partículas sólidas: dúctil, donde el material se elimina debido a la acción de corte y remoción de material; fractura frágil, se caracteriza por la formación de fracturas y pequeñas grietas en la superficie del material. Con respecto al daño por erosión causado por diferentes formas de partículas, específicamente, partículas angulares y redondas como se muestra en la figura 3, en los resultados obtenidos de las pruebas en acero inoxidable AISI 420 mostraron que el daño por erosión es muy pronunciado en la superficie del material cuando las partículas erosivas son angulares.

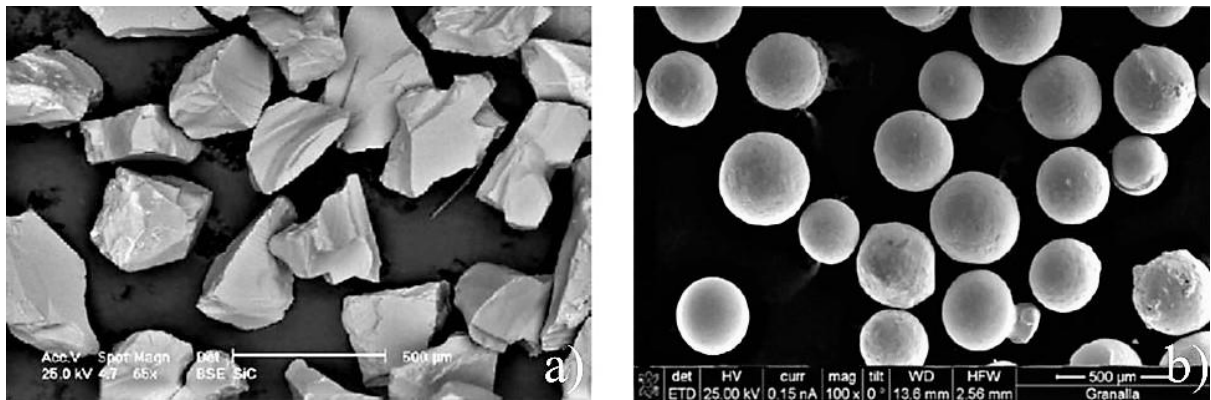


Figura 3. Morfología de las partículas erosivas: a) angulares y b) esféricas [6].

El comportamiento de la erosión dependía marcadamente de su propio aspecto. Las tasas de erosión logradas usando carburo de silicio fueron aproximadamente dos veces mayores que las obtenidas cuando se usaron partículas esféricas para probar en todos los ángulos incidentes. Los mecanismos de desgaste identificados en este estudio fueron picaduras y acción de remoción de material, formación de escamas y ondulaciones de desgaste como partículas esféricas impactadas o deslizadas sobre la superficie de la muestra [6].

Castorrini (2016) en su estudio “Análisis computacional de la erosión de la lluvia en alabes de aerogeneradores”, demuestran que el daño causado por la erosión de la lluvia en los alabes puede ser significativo si las palas no están protegidas. Este daño no influiría típicamente en la integridad estructural de los alabes, pero podría degradar el rendimiento aerodinámico y por lo tanto la producción de energía. La potencia máxima de un aerogenerador con palas profundamente erosionadas podría reducirse hasta un 20% de la potencia nominal [7].

Schramm et al. (2017) en su trabajo: “Influencia de las palas erosionadas en el rendimiento de la turbina eólica utilizando simulaciones numéricas”, simuló una turbina NREL de 5 MW con palas limpias y erosionadas, que se comparan con palas recubiertas equipadas con protección de borde

de ataque. Para incluir el efecto de la erosión y la rugosidad, se generan curvas polares utilizando geometrías del perfil aerodinámico y rugosidad superficial mediante la dinámica de fluidos computacional. Los cálculos de carga se llevaron a cabo utilizando la teoría del momento de los elementos de las palas. El análisis en este trabajo muestra que, en comparación con las palas del rotor limpias, el peor comportamiento aerodinámico de las palas fuertemente erosionadas puede conducir a pérdidas de potencia del 9%. Por el contrario, las palas revestidas solo tienen un pequeño impacto en la potencia de la turbina de menos del 1%. Las palas de la turbina eólica se erosionan debido a la lluvia y al granizo, o están contaminadas con insectos. Con el fin de evitar una fuerte erosión, proponen instalar una protección en el borde de ataque de las palas del rotor, que se puede aplicar a las palas después de la instalación inicial, pero cambia la forma de las secciones iniciales de la superficie aerodinámica [8].

La erosión en el borde de ataque es un problema emergente en la confiabilidad de las palas de los aerogeneradores, que causa una disminución del rendimiento y costos de mantenimiento adicionales. El tema de la erosión en materiales compuestos ha recibido una atención sustancial en las últimas décadas, el interés en esta área es proporcional a la creciente utilización de materiales compuestos en la industria aeroespacial, en la que pueden ser sometidos a múltiples impactos de partículas sólidas o líquidas, donde la durabilidad es una consideración primordial [9, 10].

Es importante estudiar el comportamiento del desgaste erosivo de los compuestos polímeros reforzados con fibra, y conocer los principales factores que influyen en el comportamiento del desgaste erosivo como son: el tipo de fibra o relleno, orientación de la fibra, composición de la resina [11]. El compuesto epoxi reforzado con fibra de vidrio bidireccional muestra una mejor resistencia al desgaste que los compuestos reforzados unidireccionales. El comportamiento de erosión de los compuestos epoxi está controlado por el tipo de fibra, composición [12], la forma de las partículas y el ángulo de ataque [13]. Los efectos del tamaño de partícula de arena en las características de rendimiento de una turbina eólica de eje vertical, revelan que las partículas menores de 100  $\mu\text{m}$  se adhieren a la superficie en el momento del impacto, para partículas más grandes, la probabilidad de adherencia depende del tamaño de partícula, velocidad de impacto y temperatura, además de las condiciones ambientales operativas impredecibles y potencialmente volátiles, todos estos aspectos presentan grandes desafíos para el desarrollo de la tecnología eólica, especialmente para controlar los problemas de erosión en el borde de ataque de las palas de los aerogeneradores [14]. La pérdida y degradación de materiales debido a la erosión sigue siendo una preocupación importante en las aplicaciones de ingeniería para materiales compuestos, por eso se

han desarrollado estudios de modelos basado en elementos finitos para predecir el comportamiento de erosión de los compuestos unidireccionales de fibra de carbono-epoxi sometidos a impactos de partículas sólidas [15]. Las fibras de carbono se recomiendan como una solución prometedora para la fabricación de palas de aerogeneradores ya que presentan mayor rigidez y mejores propiedades mecánicas [16]. En la industria eólica se revelan desafíos complejos de ingeniería, uno de ellos es la erosión en el borde de ataque de las palas de los aerogeneradores [17]. Las palas de los aerogeneradores se fabrican para obtener un rendimiento óptimo, es decir, están diseñadas para desarrollar una elevación óptima para sostener su movimiento de rotación, basándose en el equilibrio entre la integridad estructural y el peso, por lo tanto, los materiales compuestos de polímero se utilizan principalmente para fabricar las palas de aerogeneradores [18]. La erosión debida a la lluvia en las palas de los aerogeneradores se debe a los repetidos impactos de las gotas de líquido a alta velocidad, que causan daños en forma de picaduras o delaminación y pueden llevar a una reducción significativa del rendimiento si no se tratan. Debido a un aumento en la velocidad de la punta de las palas de las turbinas eólicas modernas, la erosión por lluvia se está convirtiendo en un problema cada vez más importante [19]. Los diámetros de los rotores de turbinas eólicas marinas siguen aumentando, las velocidades de la punta de la pala son de hasta 110 m/s, lo que da lugar a condiciones de impacto de lluvia más severas [20]. Para reducir las costosas reparaciones de mantenimiento y evitar períodos fuera de servicio, se requieren materiales y recubrimientos que absorban energía para proteger la superficie de las palas de la erosión causada por la lluvia [21].

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Fundamentos de tribología

La palabra tribología, se deriva del griego “tribos” cuyo significado es rozamiento o fricción y logos, estudio o tratado. Por ello, desde el punto de vista etimológico, se define como el estudio o tratado de los fenómenos de la frotación o fricción. Sin embargo, un grupo de Científicos del Ministerio Británico de Ciencia y Educación, encabezado por el Prof. Peter Jost, en 1966, la definió como: “La ciencia y tecnología que estudia los sólidos que se encuentran en contacto y movimiento relativo, así como los fenómenos que de ello se derivan”. En consecuencia, la fricción, el desgaste, y la lubricación son áreas importantes en dicha ciencia [22]. Para el estudio de la tribología, esta se ve apoyada por otras ciencias, como ciencia de los materiales, física, ingeniería mecánica y química. Es necesario, estudiar tanto las características como las condiciones en que se lleva a cabo las interacciones de las superficies de los pares mecánicos, a este entorno, se le conoce como tribosistema, cuyos elementos se presentan en la figura 4.

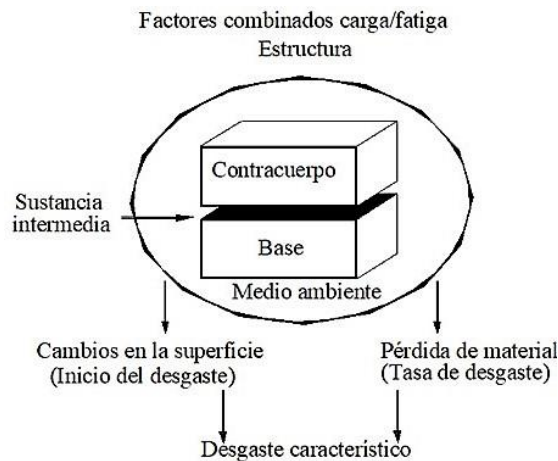


Figura 4. Tribosistema [22].

#### 3.2 Tipos de desgaste

En un sistema tribológico, al desgaste se le considera como todo material removido o indeseablemente desplazado por efecto de las superficies interactuantes, dentro del medio ambiente en el que trabajan. También se le define como el daño de la superficie o la remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo, ya sea por deslizamiento, rodamiento o impacto. Primeramente, el material en la superficie de contacto, es desplazado por lo que las propiedades del sólido, cerca de la misma, se alteran, pero muy poco o nada de material se pierde. Posteriormente, el material puede ser removido de la superficie, es decir, se transfiere a

la otra superficie, o bien, puede perderse como un residuo de desgaste conocido como debris. Existen diferentes tipos de mecanismos de desgaste, los cuales habitualmente actúan en forma combinada sobre los sistemas tribológicos, denominados tribosistemas. Estos son: Desgaste por adhesión, Desgaste por erosión, Desgaste por fatiga, Desgaste por corrosión y Desgaste de abrasión [23]. Para el estudio de este proyecto de investigación se analizará únicamente el desgaste por erosión, que se presenta principalmente en el borde de ataque de aerogeneradores.

### 3.3 Desgaste erosivo

La palabra erosión se deriva del latín “rodene”, que significa roer o desgastar gradualmente. La erosión es un fenómeno no deseado en sistemas ingenieriles, como la transportación de sólidos en sistemas neumáticos, turbinas, hélices, componentes de automóviles, sistemas blindados, procesos de formado, etc. El desgaste efectuado por el mecanismo de erosión genera la pérdida de material en la superficie, debido a estar expuesta a repetidos impactos de partículas sólidas o líquidas. En algunos casos es útil, como para la limpieza de equipos, en los que, por medio de disparar arena a presión, se obtienen superficies libres de óxido, o el usar máquinas de corte bajo este mecanismo, pero también es un serio problema en muchos sistemas ingenieriles. En la erosión por impacto de partículas sólidas se consideran aspectos como: la forma, tamaño, velocidad y dureza de la partícula, así como la dureza y rugosidad de la superficie, la distancia boquilla-muestra y el ángulo de impacto. En el desgaste erosivo, diversas fuerzas pueden actuar en la partícula que está en contacto con la superficie, como se muestra en la figura 5. Las partículas vecinas pueden ejercer fuerzas de contacto y el flujo del fluido puede causar arrastre. En algunas condiciones la fuerza de gravedad puede tomar importancia, pero la fuerza dominante es la fuerza que las frena durante el impacto de la misma, esta es la fuerza de contacto ejercida por la superficie [24].



Figura 5. Fuerzas de contacto partícula-superficie [24].



### 3.4 Erosión por partículas líquidas

La erosión por impacto líquido produce una pérdida progresiva de material de una superficie debido a la exposición continua al impacto de gotas o de chorros. La superficie es erosionada por pequeños cuerpos líquidos (gotas) discretos, como se muestra en la figura 6, que viajan a grandes velocidades de tal forma que un solo impacto puede ocasionar ya sea una deformación plástica o una fractura. En caso de que éste sea continuo, se produce un desgaste erosivo con algunas picaduras. En materiales dúctiles, la interacción, puede generar una depresión central con una deformación plástica circular alrededor de la misma, donde el flujo del líquido desprende el material por una acción de desgarre. En cambio, si los materiales son frágiles, se forman grietas de tendencia circular en su entorno, ocasionadas por los esfuerzos de tracción de las ondas que se propagan hacia el exterior de la superficie. Normalmente este tipo de desgaste, viene acompañado de corrosión, debido a que el material se erosiona por un líquido. Se presenta, particularmente, en el fuselaje de aviones y aeronaves, rotores de helicópteros, pipas, ductos de crudo, entre otros [25].

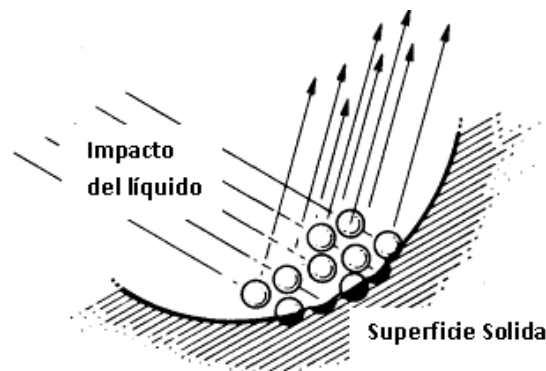


Figura 6. Partículas duras llevadas por un líquido que golpean la superficie y producen erosión [25].

### 3.5 Erosión por partículas sólidas

Se denomina erosión por partículas sólidas (EPS) al mecanismo en el que la pérdida de material se produce por el ataque reiterado de partículas generalmente suspendidas en un gas o en un líquido y proyectadas contra un sólido a velocidad suficiente (superior a 1 m/s). El efecto de la EPS en servicio provoca un cambio en la rugosidad superficial, en un rango que va desde fino pulido hasta una superficie basta, dependiendo de la medida y de la velocidad de la partícula, la desaparición de estriados propios de operaciones anteriores o la formación de un ondulado característico. Conviene precisar la diferencia entre los mecanismos de erosión y abrasión, ya que a veces se les confunde; la erosión por partículas sólidas se produce debido a partículas que golpean y rebotan

sobre una superficie, mientras que el mecanismo de abrasión ocurre cuando una partícula se desliza a lo largo de una superficie bajo el efecto de una fuerza externa aplicada sobre ella. En la erosión, la fuerza ejercida sobre las partículas se debe a la desaceleración producida al impactar, y dependerá de las velocidades instantáneas del fluido que suspende a las partículas. En abrasión en cambio la fuerza externa es prácticamente constante. Las variables que afectan la erosión pura son básicamente de tres tipos: las que se refieren al flujo, las de las partículas y las del material. Las primeras tienen que ver con la velocidad ( $v$ ), el ángulo de ataque ( $\alpha$ ) y la concentración de partículas en el flujo. El ángulo de ataque es el que forman en dirección de la partícula con la superficie con las que impacta. Hay que considerar las variables propias de las partículas: forma, tamaño, dureza, tipo de fractura. Dentro de las variables inherentes al material podemos citar su dureza, el comportamiento al endurecimiento por trabajo, su microestructura, etc. La velocidad de erosión se expresa habitualmente como masa o volumen perdido por unidad de masa del material que erosiona; en general la podemos expresar como se indica en la ecuación 3.1, donde  $E$  es la velocidad de erosión,  $k$  es una constante y  $n$  es el exponente de la velocidad, que es una función del material y de las condiciones de erosión [25] .

$$E = k \cdot v^n \quad (3.1)$$

### 3.6 Propiedades de la partícula

#### 3.6.1 Forma

La intensidad del desgaste depende altamente de la forma de partícula, donde aquellas que sean angulares causan mayor desgaste que las que muestran forma redonda. Algunas formas en las que pueden ser presentadas las partículas erosivas son como se muestra en la figura 7.

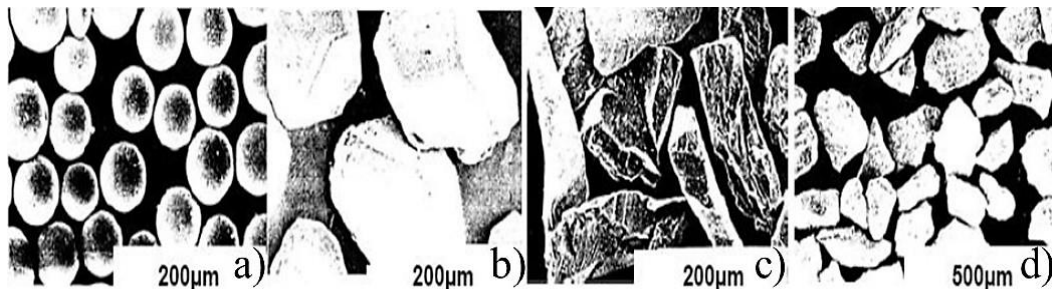


Figura 7. Partículas erosivas a) Esferas de vidrio, b) Carburo de Tungsteno, c) Alúmina, d) Diamantes [26].

Las partículas angulares causan mayor pérdida por erosión superior al que se obtiene si estas son esféricas. Un método sencillo de obtener información de la forma de la partícula es el factor de

redondez  $F$ , este puede ser definido como el área real de proyección  $A$  y el área de un círculo con el mismo perímetro  $P$  de la proyección y se expresa como en la ecuación 3.2.

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.2)$$

Si  $F = 1$ , la proyección es un círculo; a medida que se aleja de este valor tenderá a ser una partícula angular.

### 3.6.2 Tamaño

Se han encontrado diferentes patrones de comportamiento en el desgaste por partículas sólidas tanto en abrasión como en erosión de materiales dúctiles, donde está involucrado el tamaño de las partículas. Lain Finnie [26] demostró que la cantidad de desgaste es menor cuando el tamaño de las partículas es menor a  $100 \mu\text{m}$ . La figura 8 muestra los resultados obtenidos, donde partículas de  $10 \mu\text{m}$  causan alrededor de una cuarta parte del desgaste que causan las partículas de  $100 \mu\text{m}$ . Para materiales frágiles el desgaste involucra fractura frágil y existe una fuerte dependencia con el tamaño de partícula; llegándose a presentar incluso comportamientos dúctiles en el material. Cualquiera que sea el mecanismo dominante, las partículas pequeñas causan afortunadamente menor desgaste.

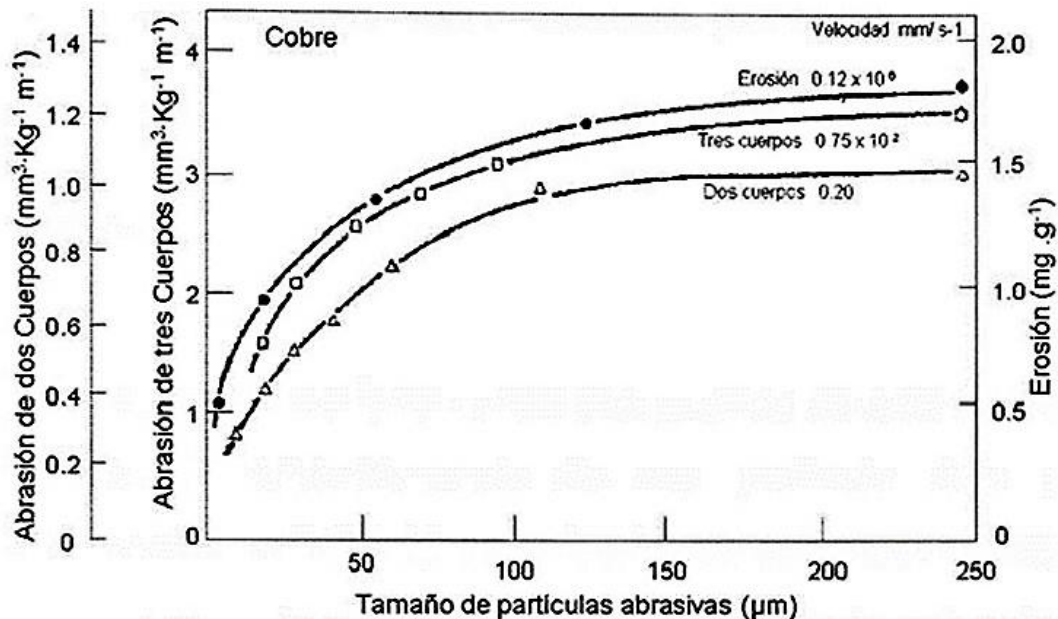


Figura 8. Desgaste en función del tamaño de la partícula. Degaste de Cobre por partículas SiC bajo los sistemas de erosión (masa perdida/masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido / (carga x distancia)) [26].

### 3.6.3 Dureza

La dureza es una de las propiedades esenciales de la partícula en relación a la cantidad de desgaste obtenido. Partículas con mayor dureza que la superficie a impactar causaran un mayor desgaste que aquellas partículas con menor dureza en la superficie. El comportamiento mostrado en la figura 9 indica las magnitudes de desgaste de metales y cerámicos. Para el sistema de abrasión de dos cuerpos, empiezan a ser mucho mayores cuando la relación de la dureza de la partícula ( $H_a$ ) y la dureza de la superficie a impactar ( $H_s$ ) es mayor a 1. El comportamiento se puede explicar con el estudio de la mecánica de contacto entre una partícula y una superficie plana. Si la superficie del material fluye plásticamente una vez que su punto de cedencia es excedido, ocurrirá un significativo flujo plástico en la superficie cuando la presión de contacto alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial. La deformación ocurrirá si la carga normal de la partícula es incrementada y solo si la partícula puede sostener la presión de contacto sin deformarse. Si la partícula falla por flujo plástico o fractura frágil antes de que la presión sobre la superficie alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial, ocurrirá una insignificante deformación plástica en la superficie [27].

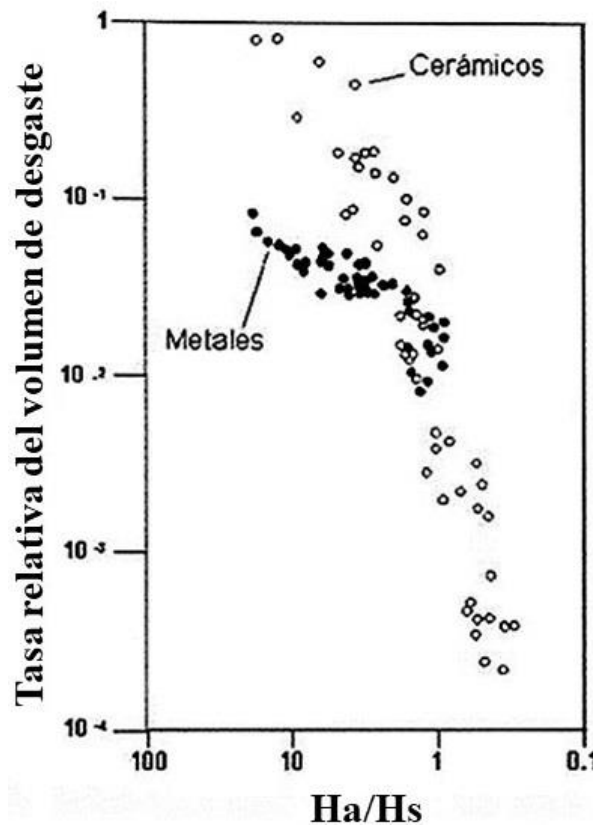


Figura 9. Desgaste para la relación de dureza partícula ( $H_a$ ) – superficie ( $H_s$ ) [27].

### 3.7 Mecanismo de desgaste erosivo por deformación plástica

Para entrar en detalle de los fenómenos que ocurren en este tipo de erosión, se puede examinar el comportamiento de una partícula dura golpeando la superficie a un ángulo de 90°. La única fuerza que se considera es la fuerza de contacto ejercida por la superficie, como fue mostrada con anterioridad en el análisis de fuerzas que interactúan en el contacto de una partícula y una superficie. Se supone que el flujo de material es totalmente plástico con una constante de indentación  $H$  (dureza). La figura 10 representa el momento en que una partícula de masa ( $m$ ), viajando a una velocidad ( $U$ ), toca la superficie en un tiempo  $t=0$ . A un tiempo determinado  $t$ , la partícula ha penetrado la superficie sólida una distancia  $x$  y formando un área de contacto  $A(x)$ , la cual está determinada por la forma de la partícula. Al llegar la partícula a su punto de reposo a un tiempo  $t=T$  ha penetrado una distancia  $d$ . La fuerza dominante que desacelera a la partícula será provocada por la presión del flujo plástico actuando sobre el área  $A(x)$  y la ecuación de equilibrio queda expresada como la ecuación 3.3:

$$m \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) = -HA(x) \quad (3.3)$$

El trabajo realizado por la fuerza retardante, ejercida por la resistencia a ser penetrada la superficie, será igual a la energía cinética inicial de la partícula. Esto puede ser expresado por la ecuación 3.4:

$$\int_0^d HA(x)dx = \frac{1}{2}mU^2 \quad (3.4)$$

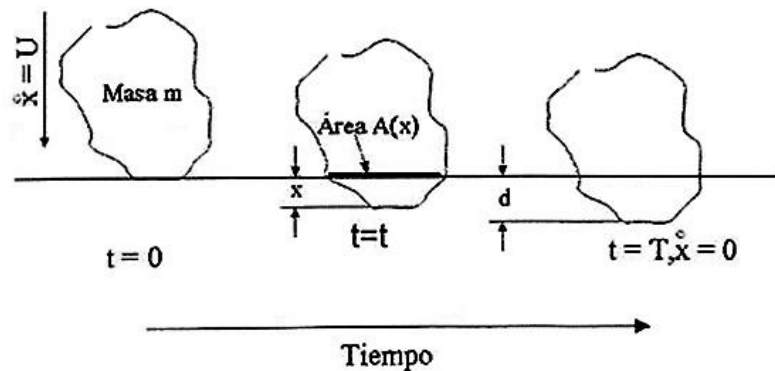


Figura 10. Proceso de penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana. Deformación plástica de la superficie, contacto inicial a un tiempo  $t=0$ , partícula en reposo a un tiempo  $t=T$  [28].

El volumen final ( $V$ ) de la indentación será expresado por la ecuación 3.5:

$$V = \int_0^d A(x)dx \quad (3.5)$$

Y considerando la dureza como constante, el volumen ( $V$ ) del material desplazado será expresado por la ecuación 3.6:

$$V = \frac{mU^2}{2H} \quad (3.6)$$

El material desplazado de la indentación puede experimentar diversos destinos: puede ser acomodado por deformación elástica del material, lejos de la marca, puede crear un borde alrededor de la huella, o bien puede ser removido de la indentación como desgaste por viruta, dando lugar a la ecuación 3.7:

$$\text{masa del material removido} = k\rho \frac{mU^2}{2H} \quad (3.7)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material erosionado y el factor  $k$  representa la fracción de material que es removida como material de desgaste. La suma de la ecuación anterior sobre muchos impactos sugiere que la masa total de material removido de la superficie deberá ser proporcional al total de la masa de partículas erosivas que golpean en él, dando así el valor real de la erosión que expresa con la ecuación 3.8:

$$E = \frac{\text{masa del material removido}}{\text{masa de partículas erosivas golpeando la superficie}} \quad (3.8)$$

Donde la  $E$  es adimensional y la ecuación quedara como se muestra en la ecuación 3.9:

$$E = k\rho \frac{U^2}{H} \quad (3.9)$$

Esta ecuación predice que la erosión es inversamente proporcional a la dureza de la superficie, y el factor  $k$  es una medida de la eficiencia de los procesos de desprendimiento de material. El valor de  $k$  tomaría el valor de la unidad si fuera el caso de que todo el material desplazado por la erosión fuera removido, los valores de  $k$  para los metales se encuentra dentro del intervalo de  $5 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-1}$ , los cuales son muy similares a los valores observados en el mecanismo de abrasión de dos cuerpos [28].

### 3.8 Ángulo de impacto

Factores como la geometría de la deformación causada por el impacto de partículas duras depende de la velocidad, la forma y orientación de las partículas, así como del ángulo de impacto. En la erosión de los materiales dúctiles el ángulo de impacto es un factor que influye fuertemente en los resultados obtenidos. En la figura 11 se observa como el desgaste para materiales dúctiles muestra un máximo cuando los ángulos de impacto se encuentran entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$ , y posteriormente para

ángulos de impacto de  $90^\circ$  el desgaste se encuentra en valores de una tercera parte del máximo [28].

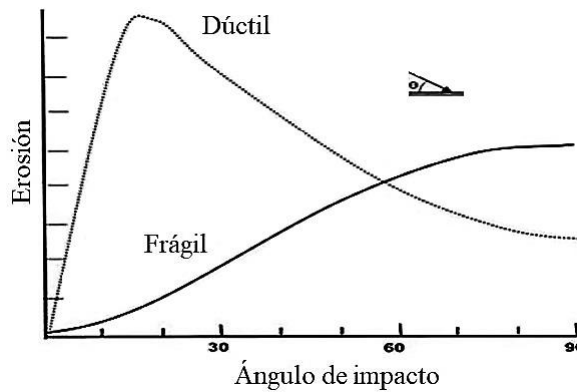


Figura 11. Erosión con respecto al ángulo de impacto. Comportamiento dúctil y comportamiento frágil [28].

### 3.9 Materiales compuestos

El uso de los materiales compuestos en la industria eólica lleva ya algunas décadas, la mayor parte usando fibras de vidrio con resinas epoxi. El proceso más frecuente en la manufactura de palas es la infusión, este consiste que mediante una bomba de vacío se extraiga el aire al mismo tiempo que se succiona la resina al interior de las fibras. Los materiales compuestos están constituidos por dos componentes; las fibras que sirven como refuerzo y la resina que sirve como matriz. La fibra aporta la resistencia y son los principales elementos de carga; mientras que la matriz mantiene las fibras en su posición y las protege del medio ambiente. Esta combinación permite a los materiales compuestos obtener una combinación de propiedades que no podrían ser alcanzadas por cualquiera de los constituyentes actuando solos. En resumen, las propiedades del material compuesto dependen de la naturaleza de las fibras utilizadas como elementos de refuerzo, su disposición y orientación en la matriz, y de la efectividad de la interface Fibra/Matriz. En la figura 12 se observa algunos tipos de materiales compuestos.

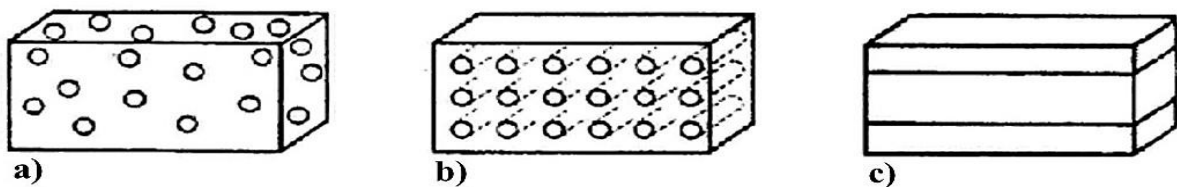


Figura 12. Tipos de materiales compuestos según el refuerzo a) Compuesto de partículas; b) Compuesto fibroso, c) Compuesto laminado [29].

### 3.9.1 Fibras

La fibra es uno de los dos elementos de un material compuesto. La intención es que la cantidad de fibra sea mayor a la de resina; los principales factores que determinan esta relación (cantidad de fibra y resina) son: Proceso de fabricación (infusión, RTM, Autoclave, etc.), el tipo de material (Fibra seca, fibra pre-impregnada, etc.) así como el control que se tenga sobre estos. La selección adecuada del tipo de fibra, fracción volumétrica y orientación de las fibras son algunos factores que influyen en las propiedades finales del material compuesto, como son: densidad, resistencia a la tensión, resistencia a la compresión y resistencia a la fatiga [29]. Existe una amplia variedad de fibras comerciales disponibles y sus propiedades se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de algunas fibras comerciales [30].

| Material                         | $E_T$<br>GPa | $\sigma_T$<br>GPa | $\rho$<br>g/cm <sup>3</sup> | $E_T/\rho$<br>(10 <sup>9</sup> ·N·m)/kg | $\sigma_T/\rho$<br>(10 <sup>9</sup> ·N·m)/kg |
|----------------------------------|--------------|-------------------|-----------------------------|---|--|
| <b>Fibras</b>                    |              |                   |                             |   |  |
| E-glass                          | 72           | 3.5               | 2.54                        | 29                                      | 1.38   |
| S-glass                          | 86           | 4.6               | 2.48                        | 35                                      | 1.85   |
| Carbono de alto módulo           | 390          | 2.1               | 1.90                        | 205                                     | 1.10   |
| Carbono de alta resistencia      | 240          | 2.9               | 1.77                        | 136                                     | 1.64   |
| Kevlar-49                        | 130          | 2.8               | 1.45                        | 87                                      | 1.87   |
| Kevlar-29                        | 60           | 2.8               | 1.44                        | 42                                      | 1.80   |
| Boro                             | 385          | 2.8               | 2.63                        | 146                                     | 1.1  |
| Spectra-1000                     | 117          | 2.6               | 0.97                        | 120                                     | 2.8  |
| <b>Materiales convencionales</b> |              |                   |                             |   |  |
| Acero                            | 210          | 0.34-2.1          | 7.8                         | 27                                      | 0.043-0.27                                   |
| Aleaciones de aluminio           | 70           | 0.14-0.62         | 2.7                         | 26                                      | 0.052-0.23                                   |
| Vidrio                           | 70           | 0.7-2.1           | 2.5                         | 28                                      | 0.28-0.84                                    |
| Tungsteno                        | 350          | 1.1-4.1           | 19.3                        | 18                                      | 0.057-0.21                                   |
| Berilio                          | 300          | 0.7               | 1.4                         | 164                                     | 0.38   |

$E_T$ : módulo de tracción;  $\sigma_T$ : tensión de tracción;  $\rho$ : densidad;

$E_T/\rho$ : módulo específico;  $\sigma_T/\rho$ : tensión específica

### 3.9.2 Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio como se muestran en la figura 13, son las más utilizadas en la industria eólica, y automotriz principalmente por el costo en comparación con las fibras de carbono. Las fibras de vidrio en general proveen una resistencia a tracción alta, son duras, resistentes al ataque químico, pero a las ves son muy flexibles. Las fibras de vidrio se elaboran a partir de la sílice (del 50% al 70% de su composición), al que se le añade otros componentes en función de las propiedades



deseadas, distinguiéndose los siguientes tipos: VIDRIO-E para aplicaciones generales, VIDRIO-S usado cuando se requiera una mayor resistencia y rigidez, VIDRIO-C ofrece estabilidad química, VIDRIO-M para muy alta rigidez y VIDRIO-D para aplicaciones donde se exija muy baja constante dieléctrica, etc. [29].



Figura 13. Diversas presentaciones de fibra de vidrio.

### 3.9.3 Fibra de carbono

La fibra de carbono como se muestra en la figura 14, es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. También en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas tanto en las fibras de alto módulo como en las de alta resistencia. Su densidad es baja ( $1.6 \text{ kg/dm}^3$ ), lo cual implica que sus propiedades mecánicas específicas o por unidad de peso sean excepcionalmente elevadas. La principal característica de las fibras de carbono es su alta resistencia específica, características adicionales incluyen un coeficiente de expansión térmico bajo, alta resistencia a la fatiga y alta conductividad térmica y eléctrica. Las desventajas son su baja deformación a la falla, baja resistencia al impacto y su alta conductividad eléctrica. Las

aplicaciones aeronáuticas donde la reducción de peso es más importante que el costo del material es un área en donde el uso de fibra de carbono sigue creciendo [29].

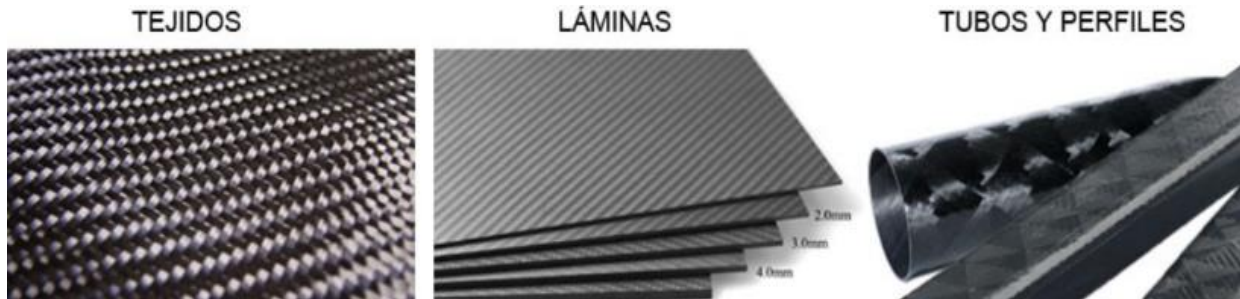


Figura 14. Diversas presentaciones de fibra de carbono.

### 3.9.4 La matriz

La función de la matriz en un material compuesto es mantener las fibras en su lugar y distribuir los esfuerzos entre las fibras, proveer una barrera en contra del medio ambiente como son agentes químicos y la humedad; y proteger las fibras de la degradación mecánica como la abrasión. No obstante, la matriz juega un papel secundario en capacidad de carga de una estructura de material compuesto. La selección de la matriz tiene mayor influencia en las propiedades de compresión y corte interlaminar. La matriz provee soporte lateral para evitar el pandeo de las fibras en condiciones de compresión. La resistencia de corte interlaminar es un parámetro muy importante en el diseño de estructuras que se encuentran sujetas a cargas de flexión. La resina epóxica es la más utilizada para aplicaciones estructurales, mientras que el poliéster proporciona menor resistencia, pero también es utilizada debido a su menor costo. En cuanto a las fibras de carbono y aramida estas solo son usadas con resina epóxica [31].

### 3.9.5 Manufactura de materiales compuestos

Existen diferentes procesos de manufactura de materiales compuestos, para la fabricación de palas de aerogeneradores principalmente se usa el proceso de infusión de resina y el proceso de moldeo de transferencia de resina (RTM). La infusión de resina es un proceso mediante el cual se coloca las fibras orientadas sobre una placa o molde de metal, se sella con cinta de butilo y bolsa de vacío alrededor de toda la periferia, al final se le hace vacío, el cual ayudara a que la resina sea succionada y fluya sobre el laminado de fibra seca, como se muestra en la figura 15, además ayuda a eliminar partículas volátiles y el aire atrapado. El proceso de laminado por infusión se considera un proceso de molde cerrado. El proceso permite lograr resultados consistentes y proporciona una

unión óptima entre el núcleo y el laminado. También permite lograr reducciones de peso sin comprometer la integridad estructural [29].

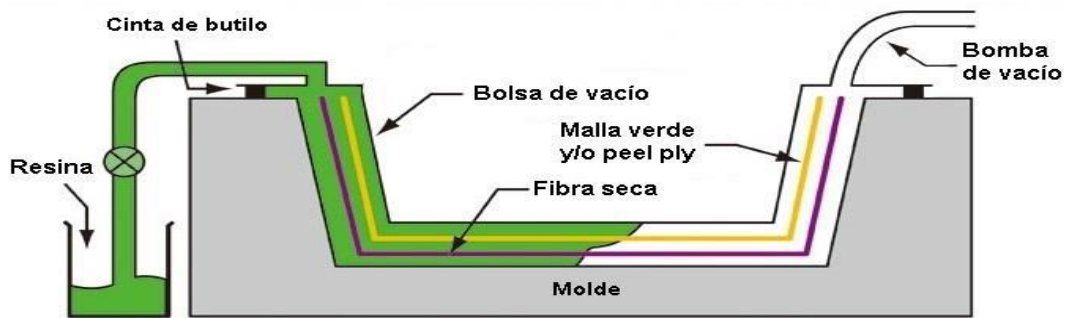


Figura 15. Proceso de infusión de resina [30].

La manufactura por moldeo de transferencia de resina (RTM) es un proceso de inyección de resina bajo presión en la cavidad de un molde. La resina se inyecta a presión por un lado y por el otro se complementa con vacío que extrae aire del molde y los tejidos. Ya con la resina dentro del molde y las fibras impregnadas, la pieza se cura en el molde bajo calor y presión. Este proceso es muy versátil pues permite fabricar componentes de geometría compleja en un solo paso con buena resistencia mecánica. En la figura 16 se presenta un esquema del proceso de RTM. El proceso RTM ofrece algunas ventajas como son: altas propiedades mecánicas, tiempos de proceso cortos, capacidad para obtener piezas complejas en moldes cerrados, entre otras [29].

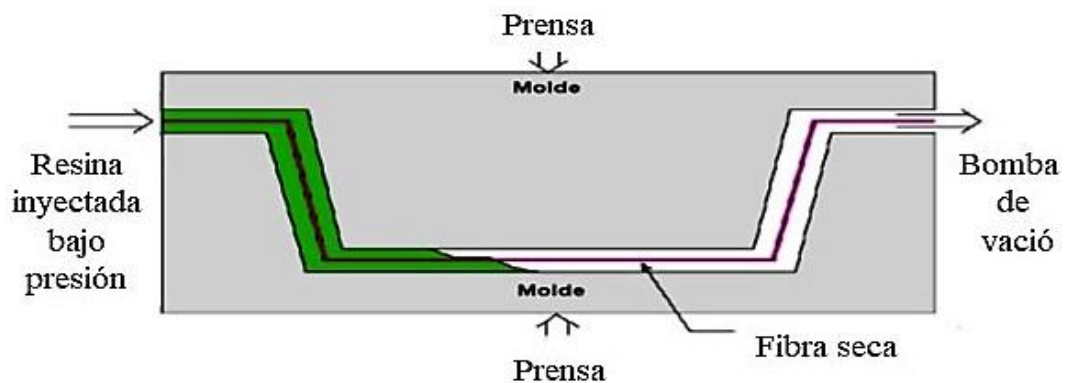


Figura 16. Proceso de inyección de resina por RTM [30].

## 4. Fabricación y caracterización de materiales compuestos

### 4.1 Fabricación de probetas para el estudio de erosión de partículas sólidas a temperatura ambiente y temperatura de 50 °C.

Los materiales de prueba se fabricaron en el Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA) en el Estado de Querétaro. Se fabricaron 2 laminados compuestos, uno de fibra de vidrio y otro de fibra de carbono mediante el proceso de fabricación de Moldeo por Transferencia de Resina (RTM). El proceso de manufactura RTM es comúnmente usado en la fabricación de palas de aerogeneradores [16]. Esta técnica, también conocida como moldeo por transferencia líquida, consiste en la inyección de una resina termoestable en un molde cerrado, en cuyo interior se ha dispuesto previamente un material de refuerzo [32]. La resina puede ser inyectada por uno o más puertos, dependiendo del tamaño de la pieza. Los múltiples puntos de inyección permiten una inyección uniforme de resina para la obtención de piezas de gran tamaño y además una reducción del tiempo de ciclo del proceso [31]. En la figura 17a) se observa la fibra de vidrio utilizada, es de tipo petatillo con tejido bidireccional 0/90°, las fibras de vidrio son las más utilizadas en la industria eólica y automotriz, principalmente por su bajo costo en comparación con las fibras de carbono. Las fibras de vidrio en general proveen una resistencia a tracción alta, son duras, resistentes al ataque químico, pero a la vez son muy flexibles. En la figura 17b) se observa la fibra de carbono utilizada con tejido bidireccional 0/90°, la principal característica de las fibras de carbono es su alta resistencia específica, características adicionales incluyen un coeficiente de expansión térmico bajo, alta resistencia a la fatiga y alta conductividad térmica y eléctrica. Las aplicaciones aeronáuticas donde la reducción de peso es más importante que el costo del material es un área en donde el uso de fibra de carbono sigue creciendo.

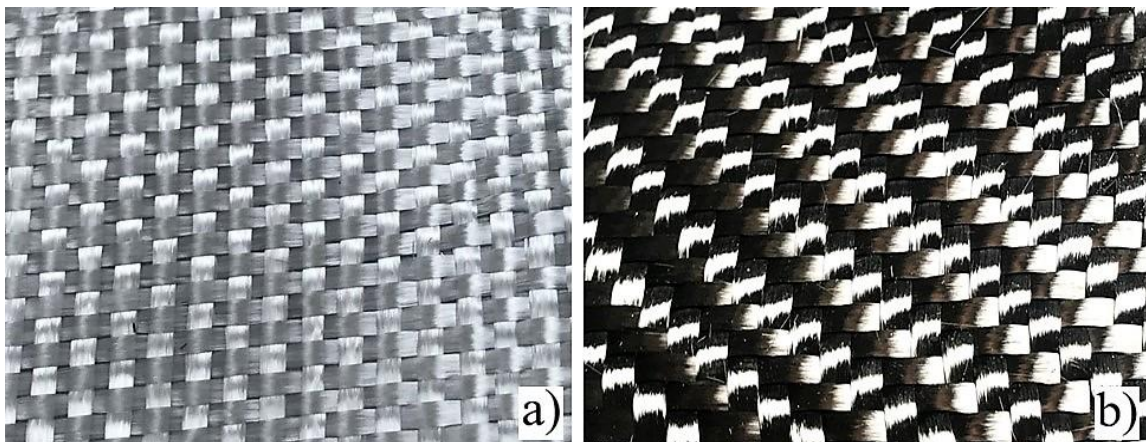


Figura 17. Fibras utilizadas a) Fibra de vidrio y b) fibra de carbono.

El molde para la fabricación de los laminados es de aluminio con una superficie plana, antes de colocar las fibras el molde es limpiado con acetona y posteriormente se le aplica un agente desmoldante, esto con el fin de ayudar a la facilidad de separación de las placas después del curado de los laminados compuestos. Se colocan 6 capas de fibra de vidrio y 6 capas de fibra de carbono, para obtener un espesor de 4 mm, como se muestra en la figura 18.

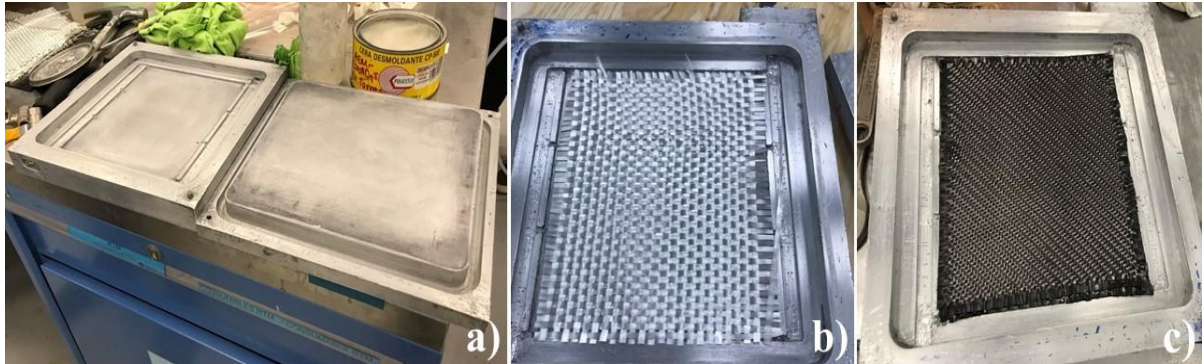


Figura 18. Colocación de fibras: a) Molde de aluminio, b) Fibra de vidrio y c) Fibra de carbono.

El molde es sellado y colocado en una prensa hidráulica de platos calientes a la cual se le aplica una temperatura de 50 °C y carga de 1.5 toneladas para comprimir las fibras y no se muevan durante la inyección de resina. El proceso de preparación de resina se muestra en la figura 19, para ambos laminados compuestos se usó una resina epóxica Epolam 2015 con endurecedor Epolam 2015, esta resina es muy utilizada en proceso RTM, para cada laminado se usaron 292 g de resina y 93.5 g de endurecedor con una viscosidad de 550 mPa.s a 25 °C. La resina y el endurecedor son mezclados durante un par de minutos para posteriormente verter la resina en el pistón neumático y poder comenzar el proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM).



Figura 19. Preparación de resina.

La inyección se realizó a 17 cc/min a 50°C; una vez lleno el molde de resina se aplicó una presión positiva de inyección de 70 psi durante 120 min, el tiempo total de curado fue de 4.5 horas a 60°C en la prensa de platos calientes. El proceso RTM se hace de la misma manera para obtener el laminado de fibra de vidrio. Este proceso ofrece algunas ventajas como son: altas propiedades mecánicas, tiempos de proceso cortos, capacidad para obtener piezas complejas en moldes cerrados, entre otras. Los equipos utilizados para la manufactura de los laminados por el proceso RTM son los que se muestran en la figura 20: Pistón neumático Radius 2100 CC, molde cerrado, prensa de platos calientes PHI, trampa de resina Airtech y la bomba de vacío Refco.

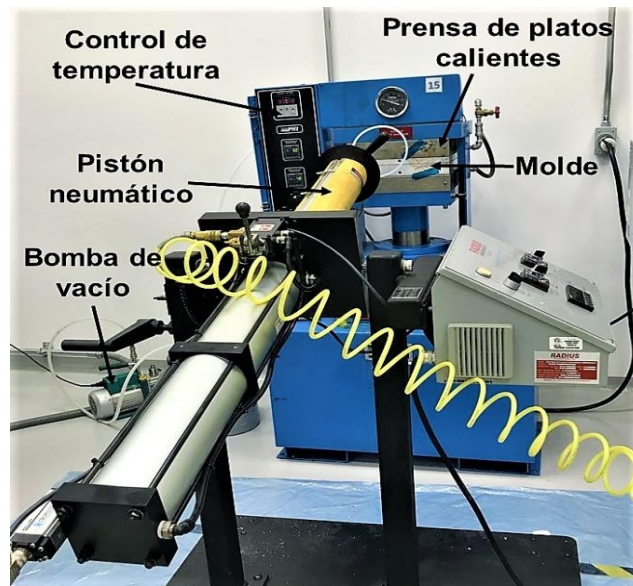


Figura 20. Equipo para el Moldeo por transferencia de resina (RTM).

Finalizado el tiempo de curado, se puede desmoldar y sacar el laminado de fibra, los resultados para los laminados compuestos se muestran en la figura 21.



Figura 21. a) Laminado de fibra de vidrio y b) Laminado de fibra de carbono.

Con una cortadora de disco de punta de diamante, que se muestra en la figura 22a) se cortaron 18 probetas de fibra de vidrio y 18 probetas de fibra de carbono con una forma rectangular de 25 mm x 18 mm y 4 mm de espesor, posteriormente se realizan las pruebas de erosión por impacto de partículas de arena de mar. Se aplica un recubrimiento a 9 probetas de fibra de vidrio y 9 de fibra de carbono, el recubrimiento es una resina de poliéster (gelcoat), esta fue aplicada con brocha curada a temperatura ambiente posterior a la manufactura de los laminados. El gelcoat es un protector contra la intemperie en materiales compuestos y protege la superficie de los materiales contra los rayos UV, en la figura 22b) podemos ver el recubrimiento utilizado.



Figura 22. a) Cortador de disco de diamante y b) Recubrimiento Gelcoat.

## 4.2 Caracterización de probetas para pruebas de erosión a temperatura ambiente

### 4.2.1 Medición de rugosidad

En la Universidad Politécnica de Pachuca se realizaron las mediciones de rugosidad superficial de los materiales, esta se determinó con un rugosímetro Mitutoyo SJ-400 que se muestra en la figura 23. Para calcular el valor promedio de la rugosidad se midieron 10 puntos diferentes, el parámetro empleado para la medida de la rugosidad fue la rugosidad media Ra. Los valores de rugosidad promedio se muestran en la tabla 2.

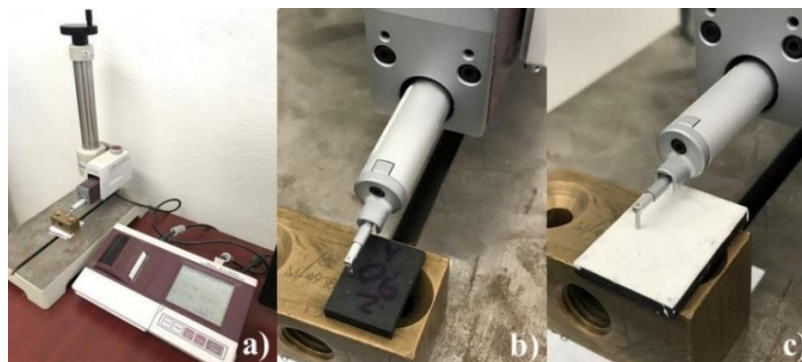


Figura 23. a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-400, b) Rugosidad en fibra de carbono y c) Rugosidad en gelcoat.

Tabla 2. Rugosidad en probetas para erosión de partículas sólidas.

|                 | <b>Fibra de vidrio</b> | <b>Fibra de vidrio con gelcoat</b> | <b>Fibra de carbono</b> | <b>Fibra de carbono con gelcoat</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Medición        | Ra [ $\mu\text{m}$ ]   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | Ra [ $\mu\text{m}$ ]                |
| 1               | 5.25                   | 3.27                               | 6.47                    | 3.12                                |
| 2               | 5.73                   | 3.09                               | 6.21                    | 3.69                                |
| 3               | 5.11                   | 3.19                               | 6.53                    | 3.17                                |
| 4               | 4.73                   | 3.89                               | 5.77                    | 3.43                                |
| 5               | 6.13                   | 3.37                               | 5.88                    | 3.11                                |
| 6               | 5.87                   | 4.31                               | 6.22                    | 2.92                                |
| 7               | 6.16                   | 3.44                               | 6.14                    | 3.61                                |
| 8               | 5.34                   | 4.13                               | 6.76                    | 3.13                                |
| 9               | 5.23                   | 2.67                               | 6.45                    | 3.05                                |
| 10              | 5.39                   | 3.57                               | 6.16                    | 2.84                                |
| <b>Promedio</b> | <b>5.47</b>            | <b>3.49</b>                        | <b>6.26</b>             | <b>3.21</b>                         |

#### 4.2.2 Medición de dureza

La dureza superficial de los materiales se determinó con el método de prueba estándar de la norma ASTM D2583-95 [33], la figura 24 muestra la prueba de dureza en fibra de carbono utilizando un durómetro Barcol GYZJ 934-1. El método Barcol es una forma de evaluar la dureza de un material a través de la medida de la resistencia a la penetración de una punta de acero esférica. La lectura de la dureza se indica inmediatamente en la superficie graduada del equipo que va de 0 a 100 Barcol. Las mediciones de dureza se realizaron en el centro de investigación CIATEQ en Cd. Sahagún, las muestras en las que se determinó la dureza son de forma rectangular con dimensiones de 25 mm x 18 mm y 4 mm de espesor, para obtener el valor promedio de la dureza se midieron 5 puntos diferentes, las mediciones realizadas muestran que la fibra de carbono presenta una mayor dureza, estos valores se muestran en la tabla 3.



Figura 24. Ensayo de dureza en fibra de carbono.



Tabla 3. Mediciones de dureza Barcol en probetas para erosión de partículas sólidas.

|                 | <b>Fibra de vidrio</b> | <b>Fibra de vidrio con gelcoat</b> | <b>Fibra de carbono</b> | <b>Fibra de carbono con gelcoat</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
|                 | 45                     | 40                                 | 52                      | 53                                  |
|                 | 55                     | 35                                 | 55                      | 58                                  |
|                 | 49                     | 49                                 | 56                      | 58                                  |
|                 | 51                     | 42                                 | 51                      | 53                                  |
|                 | 54                     | 38                                 | 58                      | 49                                  |
| <b>Promedio</b> | <b>50.8</b>            | <b>40.8</b>                        | <b>54.4</b>             | <b>54.2</b>                         |

### 4.2.3 Microscopia

La microscopía electrónica de barrido nos permite revelar la microestructura característica del material compuesto: porosidad, orientación de fibras, grietas, distribución de la resina entre las capas de fibra etc. Con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6010LA se observó las características de las probetas de fibra de carbono y fibra de vidrio antes de ser sometidas a pruebas de erosión, en la figura 25 se observan los tejidos de ambos materiales y estos son bidireccionales a 0/90°, se pueden observar los diferentes tejidos que tiene cada material.

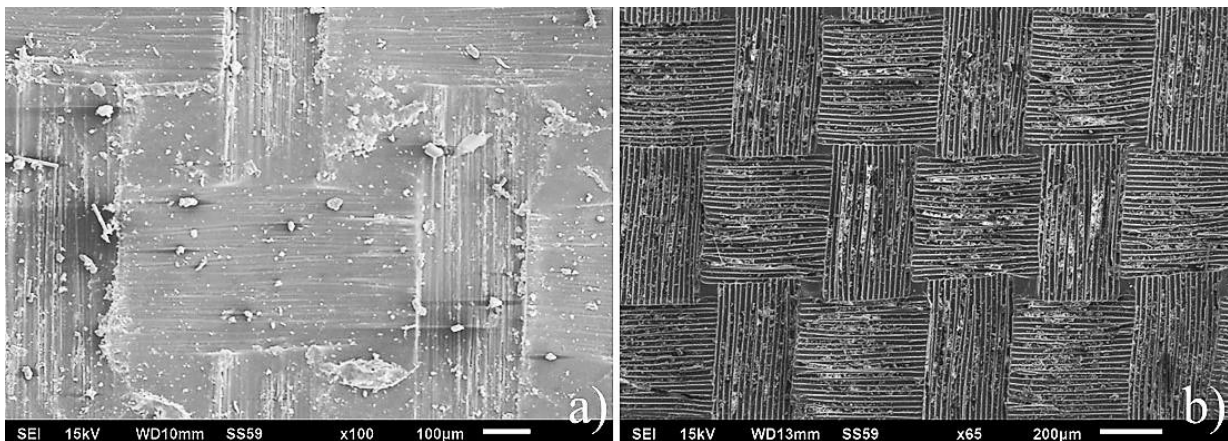


Figura 25. Microscopia electrónica de barrido: a) fibra de carbono y b) fibra de vidrio.

### 4.3 Pruebas de erosión de partículas sólidas a temperatura ambiente

La erosión de partículas sólidas depende de varios factores, como los parámetros de funcionamiento que son: ángulo de impacto, velocidad de impacto, presión, flujo másico; propiedades de las partículas erosionadoras: forma, dureza, tamaño, tipo; propiedades del material de estudio: dureza, rugosidad y las condiciones ambientales: temperatura, humedad etc. [28]. Las pruebas de erosión se realizaron en el laboratorio de la ESIME del Instituto Politécnico Nacional,

en la figura 26 se muestra un esquema de la plataforma de erosión desarrollada con algunos parámetros establecidos en la norma ASTM G76 [34].

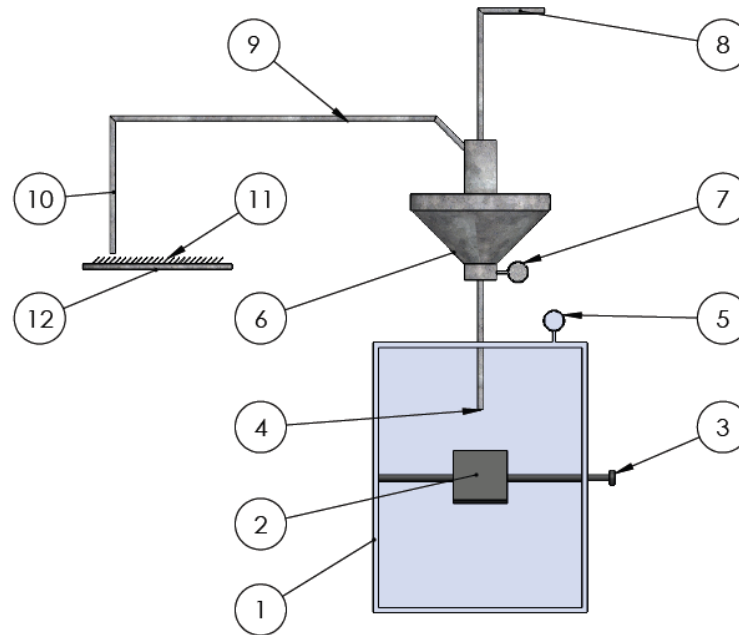


Figura 26. Esquema de plataforma de EPS: 1. Cámara erosionadora, 2. Muestra, 3. Posicionador de ángulo de impacto, 4. Boquilla mezcladora de partículas erosivas con aire, 5. Vacuómetro, 6. Inyector de aire, 7. Manómetro, 8. Conducto alimentador de aire, 9. Flujo de partículas erosivas, 10. Ducto alimentador de partículas erosivas, 11. Partículas erosivas, 12. Plato giratorio.

En esta máquina tribológica las partículas erosivas se proyectan sobre la superficie de la muestra a través de una boquilla, que son accionadas por la presión de aire generada por un compresor. Se realizaron 9 pruebas de cada material, las muestras se ubicaron a 10 mm de la salida de la boquilla. La boquilla tiene las siguientes dimensiones: 4.7 mm de diámetro interno, 6.3 mm de diámetro externo y una longitud de 260 mm. Se utilizó una velocidad de partícula de 12 m/s. La velocidad del flujo de la partícula se determinó con un anemómetro digital. La partícula erosiva utilizada fue arena de mar, las probetas se erosionaron durante un tiempo total de 6 minutos, antes de cada prueba y cada 2 minutos se pesaron las muestras mediante una balanza analítica de precisión (precisión de  $\pm 0,0001$  g) para determinar la cantidad de masa perdida. La cámara erosionadora cuenta con un sistema para la variación del ángulo de impacto, se utilizaron ángulos de  $75^\circ$ ,  $85^\circ$  y  $90^\circ$ , de esta manera se puede analizar cuál es el ángulo más crítico que puede ser afectado por este fenómeno erosivo. Se establecieron dichos ángulos de impacto para las pruebas experimentales ya que el CENTA fabrica palas de aerogeneradores que se encuentran entre este rango.

#### 4.4 Caracterización de la partícula erosiva

La morfología de las partículas erosivas influye fuertemente en la tasa de erosión, las partículas con diferentes picos tienden a causar mayor desgaste que las partículas redondas. Para observar la morfología de las partículas erosivas utilizadas en las pruebas de erosión, se utilizó un microscopio óptico Will Strübin Wetzlar que se muestra en la figura 27a) del laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. En la figura 27b) podemos observar la morfología de las partículas erosivas de arena de mar, dichas partículas son de la costa de Oaxaca, estas tienen una forma angular con diversos picos. Esta partícula erosiva fue utilizada para las pruebas de erosión de partículas sólidas con temperatura ambiente y temperatura de 50 °C.



Figura 27. Microscopia de morfología de la partícula erosiva (arena de mar).

##### 4.4.1 Distribución de tamaño de partícula erosiva

La distribución del tamaño de partícula de arena de mar fue obtenida usando el equipo Ro-Tap Testing Sieve Shaker, del laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Este consta de un sistema vibratorio que hace que las partículas de arena pasen a través de una serie de tamices como se muestra en la figura 28, para este caso se usaron 16 tamices comenzando desde un tamaño de partículas de 1000 µm hasta un tamiz de 62 µm. La arena acumulada en cada tamiz fue pesada con una balanza analítica de precisión y seleccionada por tamaño como se muestra en la figura 29. Para obtener la distribución del tamaño de partícula, los datos obtenidos son graficados y se muestran en la figura 30, por medio de este análisis se determinó que el tamaño de partícula promedio es de 300 µm.



Figura 28. Tamizadora Ro-Tap Testing Sieve Shaker.



Figura 29. Partículas erosivas de arena de mar.

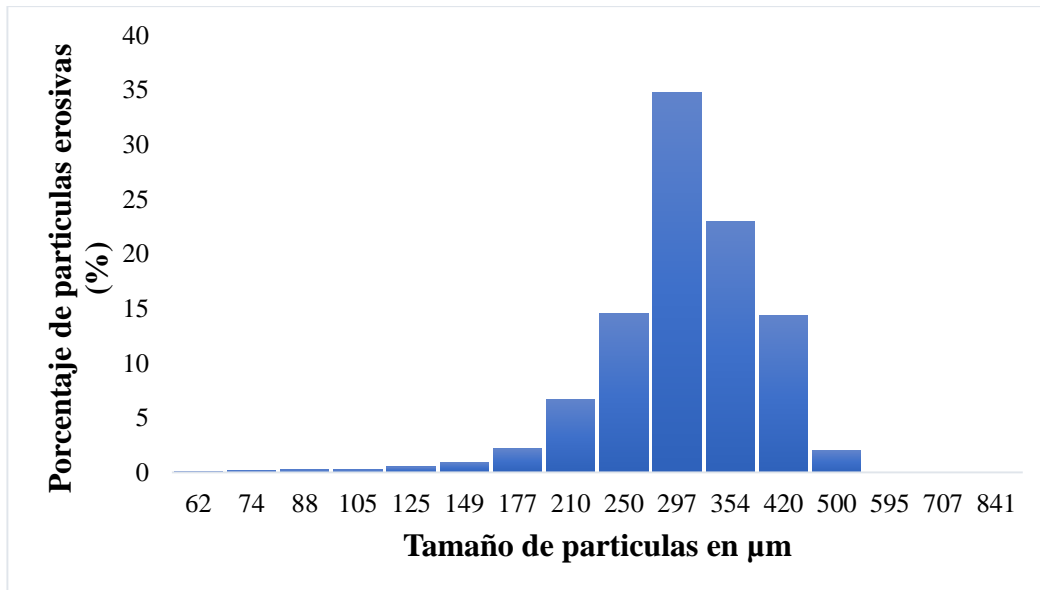


Figura 30. Distribución del tamaño de las partículas erosivas.

## 4.5 Caracterización de probetas para pruebas de erosión a temperatura de 50°C

### 4.5.1 Medición de rugosidad

La rugosidad de una superficie es un parámetro muy importante en la erosión por partículas sólidas y líquidas [35, 36]. Para determinar la rugosidad se utilizó un sistema de medición óptico 3D Alicona Infinite Focus SL del Laboratorio de Tribología de La Universidad de Sheffield que se muestra en la figura 31, para obtener un valor promedio se midieron 10 puntos diferentes para cada material de la rugosidad media Ra. Los valores obtenidos y la rugosidad promedio de los materiales compuestos son los que se muestran en la tabla 4.

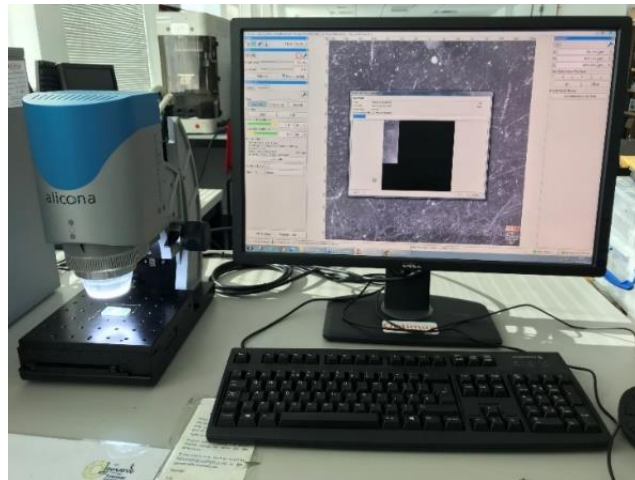


Figura 31. Determinación de rugosidad con Alicona Infinite Focus SL.

Tabla 4. Rugosidad en probetas para pruebas de erosión de partículas sólidas con temperatura.

|                 | <b>Fibra de vidrio</b> | <b>Fibra de vidrio con gelcoat</b> | <b>Fibra de carbono</b> | <b>Fibra de carbono con gelcoat</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Medición        | Ra [ $\mu\text{m}$ ]   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | Ra [ $\mu\text{m}$ ]                |
| 1               | 0.09                   | 1.14                               | 0.21                    | 0.3                                 |
| 2               | 0.11                   | 1.73                               | 0.13                    | 2.12                                |
| 3               | 0.37                   | 1.55                               | 0.12                    | 0.44                                |
| 4               | 0.24                   | 1.33                               | 0.14                    | 2.25                                |
| 5               | 0.21                   | 0.61                               | 0.09                    | 1.01                                |
| 6               | 0.24                   | 3.06                               | 0.1                     | 2.88                                |
| 7               | 0.86                   | 2.4                                | 0.29                    | 1.51                                |
| 8               | 0.13                   | 1.44                               | 0.25                    | 2.34                                |
| 9               | 0.31                   | 2.23                               | 0.19                    | 2.44                                |
| 10              | 0.41                   | 1.02                               | 0.29                    | 2.2                                 |
| <b>Promedio</b> | <b>0.297</b>           | <b>1.651</b>                       | <b>0.181</b>            | <b>1.749</b>                        |

### 4.5.2 Medición de dureza

Como en el caso anterior las mediciones de dureza superficial de las probetas se determinaron con un durómetro Barcol del centro de investigación CIATEQ. Para obtener un valor promedio de la dureza se realizaron 5 mediciones en diferentes puntos para cada material, los valores obtenidos de las mediciones son los que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de Dureza Barcol en probetas para erosión de partículas sólidas con temperatura.

|                 | Fibra de vidrio | Fibra de vidrio con gelcoat | Fibra de carbono | Fibra de carbono con gelcoat |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|
|                 | 53              | 39                          | 57               | 38                           |
|                 | 57              | 42                          | 63               | 52                           |
|                 | 58              | 47                          | 59               | 44                           |
|                 | 59              | 40                          | 61               | 38                           |
|                 | 54              | 41                          | 56               | 50                           |
| <b>Promedio</b> | <b>56.2</b>     | <b>41.8</b>                 | <b>59.2</b>      | <b>44.4</b>                  |

### 4.5.3 Microscopia

Mediante el microscopio Alicona, se observaron las superficies de las probetas antes de ser sometidas a pruebas de erosión de partículas sólidas con temperatura, en la figura 32 se observa la superficie de las probetas de fibra de carbono y fibra de vidrio respectivamente, se observan los tejidos bidireccionales de los materiales compuestos sin ningún daño.

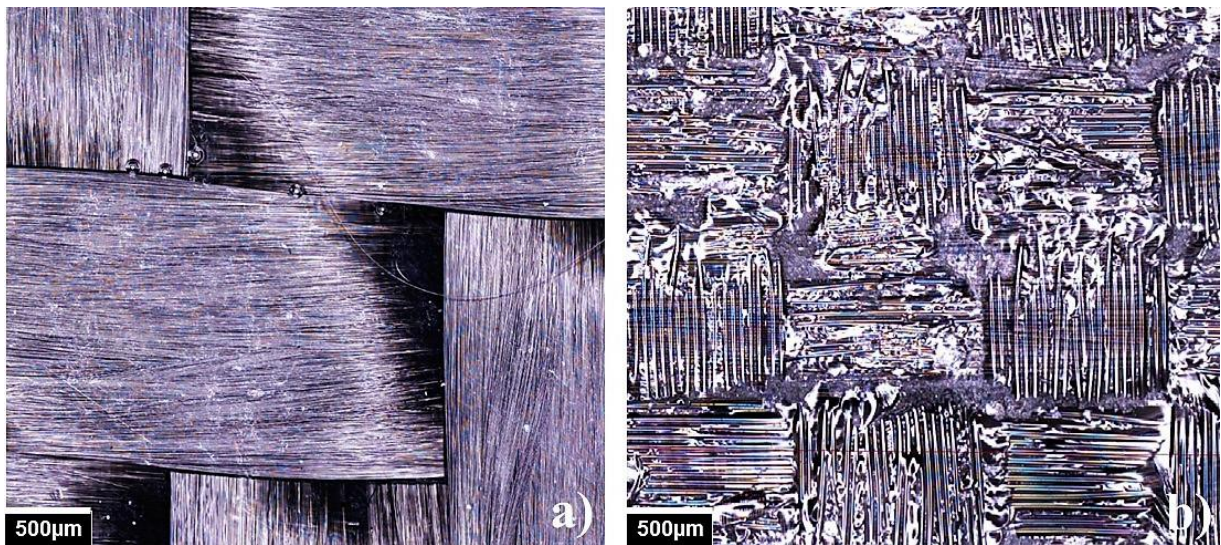


Figura 32. Microscopia: a) Fibra de carbono, b) Fibra de vidrio.

#### 4.6 Pruebas de erosión de partículas sólidas con temperatura a 50°C

Las pruebas con temperatura de erosión de partículas sólidas usando arena de mar, se realizaron en el laboratorio de la ESIME del Instituto Politécnico Nacional. La plataforma de erosión de partículas sólidas utilizada para dichas pruebas es la que se muestra en la figura 33.

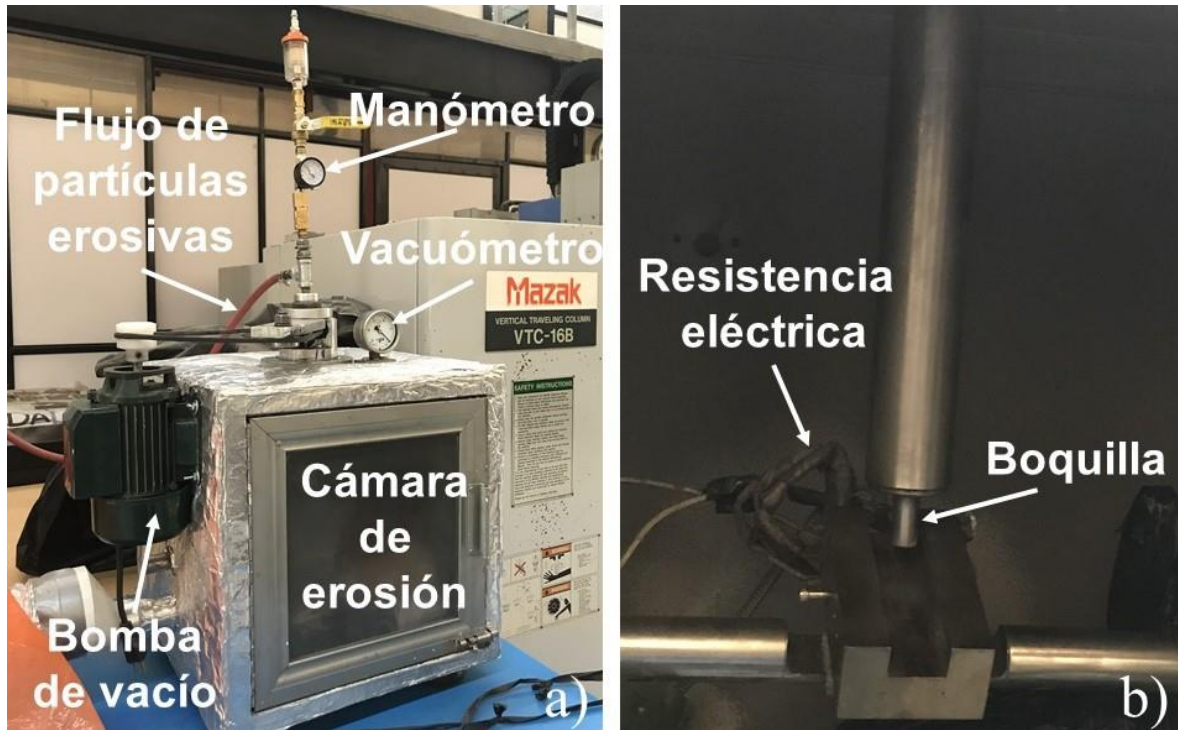


Figura 33. Plataforma de erosión por partículas sólidas.

Para dichas pruebas se usó una velocidad de las partículas de 12 m/s y las muestras se ubicaron a 10 mm del extremo de la boquilla. El porta muestras fue calentado para que las muestras obtuvieran una temperatura de 50 °C por medio de una resistencia eléctrica, la temperatura se regula por medio de un termopar, este sistema apaga y prende la resistencia para mantener la temperatura deseada. La boquilla tiene las siguientes dimensiones: 4.7 mm de diámetro interno, 6.3 mm de diámetro externo y una longitud de 260 mm. Las probetas se erosionaron durante un tiempo total de 6 minutos, pesando las probetas cada 2 minutos mediante una balanza analítica de precisión (precisión de  $\pm 0,0001$  g) para determinar la cantidad de masa perdida. Como en las pruebas realizadas descritas en el capítulo 4.3 se realizaron pruebas con ángulos de impacto a 75°, 85° y 90°, con el fin de determinar cómo influye la erosión con diferentes ángulos de impacto y a su vez comparar la resistencia a la erosión entre estos materiales.

#### 4.7 Fabricación de probetas para el estudio de erosión de partículas líquidas

Las probetas se fabricaron en el Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA) en el Estado de Querétaro, utilizando el método de infusión de resina. La infusión de resina es un proceso mediante el cual el vacío succiona resina hacia un laminado de fibra seca en un molde de un solo lado. Se coloca una membrana de película rígida o flexible sobre la parte superior y se sella alrededor de la periferia del molde, a este método se le considera un “proceso a molde cerrado”. Para la elaboración de dichas probetas, se utilizan las fibras mostradas en la figura 34, fibra de carbono y fibra de vidrio respectivamente.

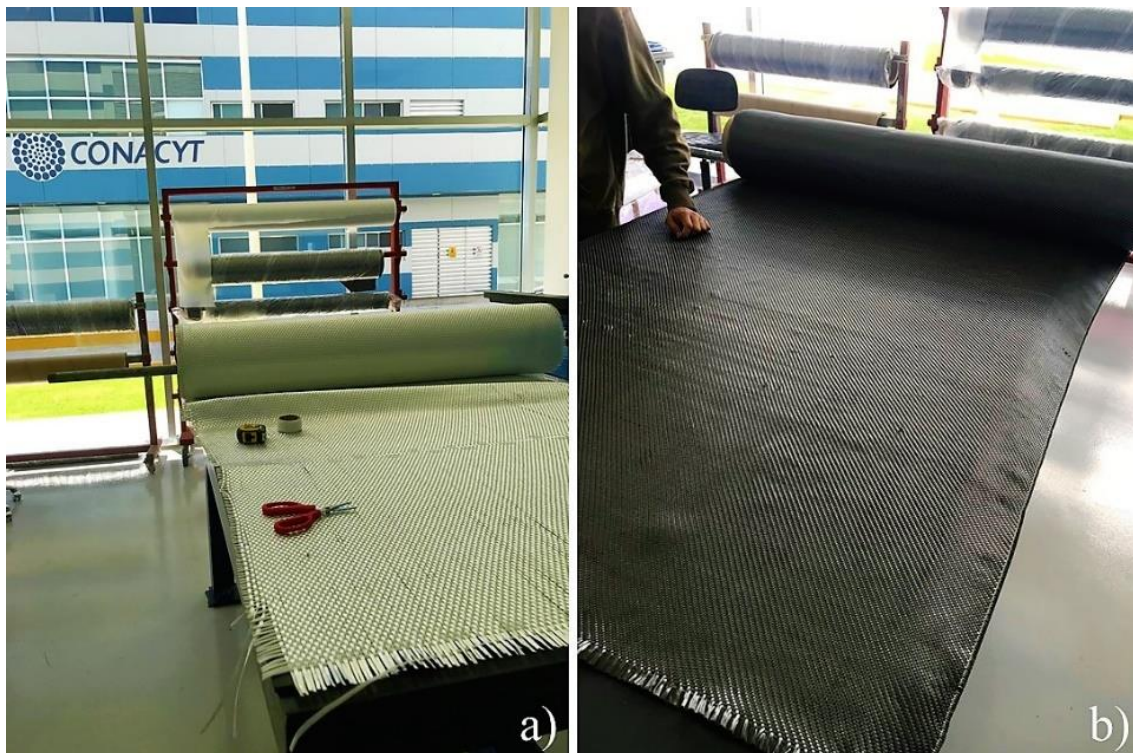


Figura 34. a) Fibra de vidrio y b) Fibra de carbono.

Para el laminado de fibra de carbono se cortan 8 capas con el fin de obtener un espesor de 4 mm, estas capas son de una sección rectangular de 200 mm x 300 mm. Para el laminado de fibra de vidrio se utilizan 9 capas para obtener el espesor de 4 mm con una sección rectangular de 200 mm x 300 mm. La resina utilizada es Epolam 2015 y endurecedor Epolam 2015, para cada laminado se utilizan 304.6 gramos de resina y 90.9 gramos de endurecedor, como se muestra en la figura 35. La resina es pesada con una balanza analítica de precisión, posteriormente la resina se mezcla con el endurecedor un par de minutos.



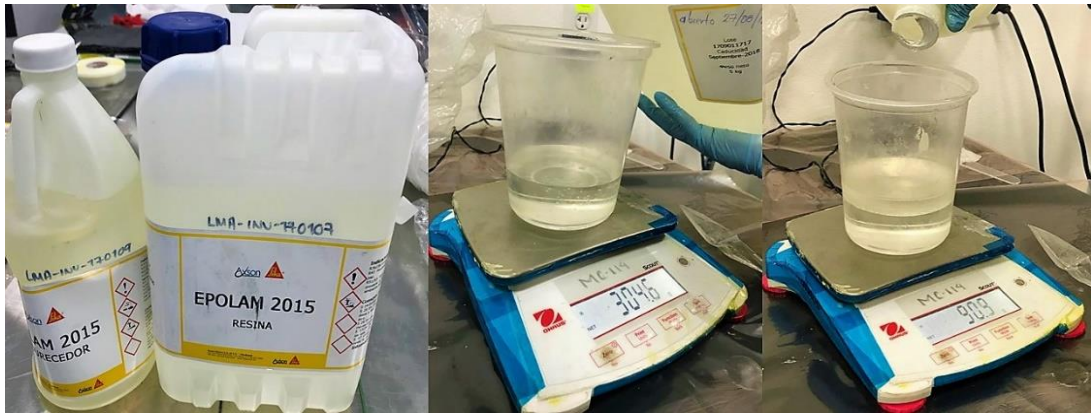


Figura 35. Preparación de Resina.

Las fibras son colocadas en una placa metálica previamente pulida, con el fin de obtener un acabado liso y brillante. Se coloca una tela de liberación que ayudará a desmoldar el laminado, después se coloca una malla de infusión verde que permitira a la resina a fluir por las fibras. Las fibras son selladas con una bolsa de vacío rosa, por último, se coloca la válvula de entrada para la inyección de resina y la conexión de succión para la bomba de vacío como se muestra en la figura 36, este proceso de infusión es similar al descrito por Jinhua Chen y N. Mohan [37, 38]. La resina tarda en curar aproximadamente 8 horas a temperatura ambiente, después de este tiempo se procede a desmoldar los laminados compuestos.



Figura 36. Proceso de fabricación de laminados compuestos por infusión.

Las probetas obtenidas son las que se muestran en la figura 37. En total se realizaron 2 laminados de fibra de carbono y 2 laminados de fibra de vidrio. Un laminado de fibra de carbono y un laminado de fibra de vidrio fueron recubiertos con gelcoat, esta resina epoxica es para proteger al

material con los rayos UV y también se espera que el recubrimiento gelcoat proteja el material contra el fenómeno de erosión.

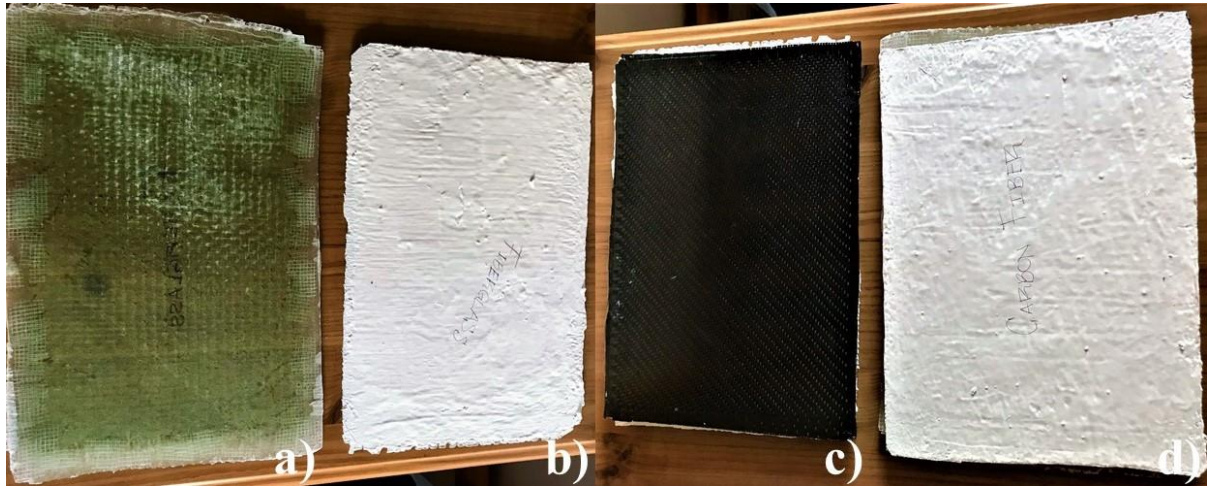


Figura 37. Probetas fabricadas por el método de infusión de resina: a) fibra de vidrio, b) fibra de vidrio con gelcoat, c) fibra de carbono y d) fibra de carbono con gelcoat.

## 4.8 Caracterización de probetas para pruebas de erosión líquida

### 4.8.1 Medición de rugosidad

La medición de rugosidad de la superficie de los materiales se determinó con un sistema de medición óptico Alicona que se muestra en la figura 38, del laboratorio de Tribología de la Universidad de Sheffield U.K. Se realizaron 10 mediciones aleatoriamente para cada material se obtuvieron los valores promedio de la rugosidad media Ra y se muestran en la tabla 6.

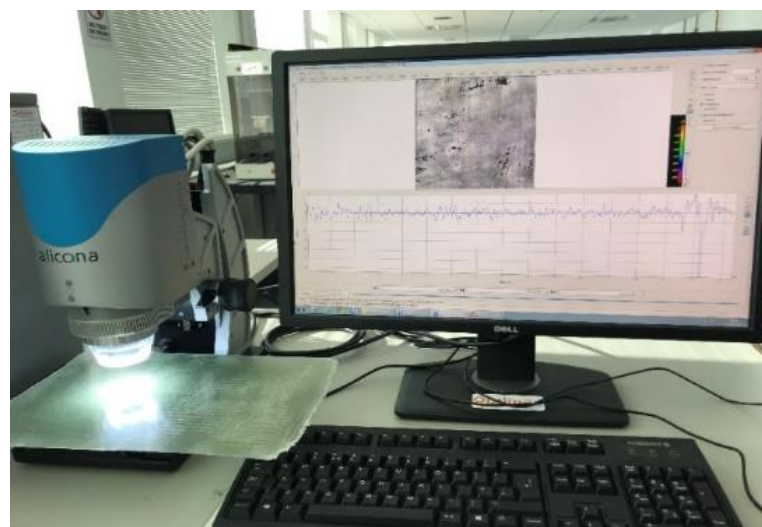


Figura 38. Mediciones de rugosidad con Alicona Infinite Focus SL.

Tabla 6. Rugosidad en probetas para pruebas de erosión de partículas líquidas.

|                 | <b>Fibra de vidrio</b> | <b>Fibra de vidrio<br/>con gelcoat</b> | <b>Fibra de carbono</b> | <b>Fibra de carbono<br/>con gelcoat</b> |
|-----------------|------------------------|--|-------------------------|---|
| Medición        | Ra [ $\mu\text{m}$ ]   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]                   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | Ra [ $\mu\text{m}$ ]                    |
| 1               | 5.99                   | 4.07                                   | 1.73                    | 1.39                                    |
| 2               | 1.49                   | 3.04                                   | 1.34                    | 4.93                                    |
| 3               | 4.46                   | 4.39                                   | 4.48                    | 5.55                                    |
| 4               | 7.42                   | 2.13                                   | 2.71                    | 0.92                                    |
| 5               | 5.49                   | 2.26                                   | 1.21                    | 2.61                                    |
| 6               | 3.43                   | 1.78                                   | 1.59                    | 8.53                                    |
| 7               | 5.73                   | 2.15                                   | 1.21                    | 1.83                                    |
| 8               | 4.67                   | 1.93                                   | 2.82                    | 1.22                                    |
| 9               | 3.82                   | 3.67                                   | 2.52                    | 6.24                                    |
| 10              | 2.34                   | 1.89                                   | 1.13                    | 2.84                                    |
| <b>Promedio</b> | <b>4.484</b>           | <b>2.731</b>                           | <b>2.074</b>            | <b>3.61</b>                             |

#### 4.8.2 Medición de dureza

Para este caso la dureza de las probetas se determinó con un durómetro Vickers del departamento de mecánica de la Universidad de Sheffield U.K., utilizando como indentador una punta pequeña de diamante en forma de pirámide, aplicando una carga de 2.5 kg. El durómetro Vickers Limited utilizado es que se muestra en la figura 39. La dureza se obtiene al dividir la carga aplicada entre el área de la huella que deja en la superficie del material. Los valores obtenidos de dureza de las probetas son los que se muestran en la tabla 7. De acuerdo a la norma ASTM D2583-95 donde se establecen los parámetros para el método de prueba estándar para dureza de indentación de plásticos rígidos [33]. Los valores de la tabla 7 fueron convertidos a valores de dureza Barcol y se muestran en la tabla 8.



Figura 39. Durómetro Vickers.

Tabla 7. Mediciones de dureza Vickers

|                 | <b>Fibra de vidrio</b> | <b>Fibra de vidrio con gelcoat</b> | <b>Fibra de carbono</b> | <b>Fibra de carbono con gelcoat</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
|                 | 33.2                   | 29.4                               | 32.3                    | 26.8                                |
|                 | 34.9                   | 25.6                               | 33.1                    | 29.5                                |
|                 | 36.5                   | 26.5                               | 39.7                    | 27.4                                |
|                 | 31.5                   | 30.9                               | 38.3                    | 31.4                                |
|                 | 32.9                   | 28.1                               | 34.8                    | 26.1                                |
| <b>Promedio</b> | <b>33.8</b>            | <b>28.1</b>                        | <b>35.64</b>            | <b>28.24</b>                        |

Tabla 8. Dureza de los materiales en escala Barcol.

|                 | <b>Fibra de vidrio</b> | <b>Fibra de vidrio con gelcoat</b> | <b>Fibra de carbono</b> | <b>Fibra de carbono con gelcoat</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| <b>Promedio</b> | 49                     | 44                                 | 50                      | 44                                  |

### 4.8.3 Microscopia

Con el microscopio Alicona se observaron las superficies de las probetas de fibra de carbono y fibra de vidrio antes de ser sometidas a pruebas de erosión por impacto de partículas líquidas. En la figura 40 se pueden observar la superficie de fibra de carbono y fibra de vidrio, es notable que los filamentos de fibra de vidrio son más grandes que los de fibra de carbono.

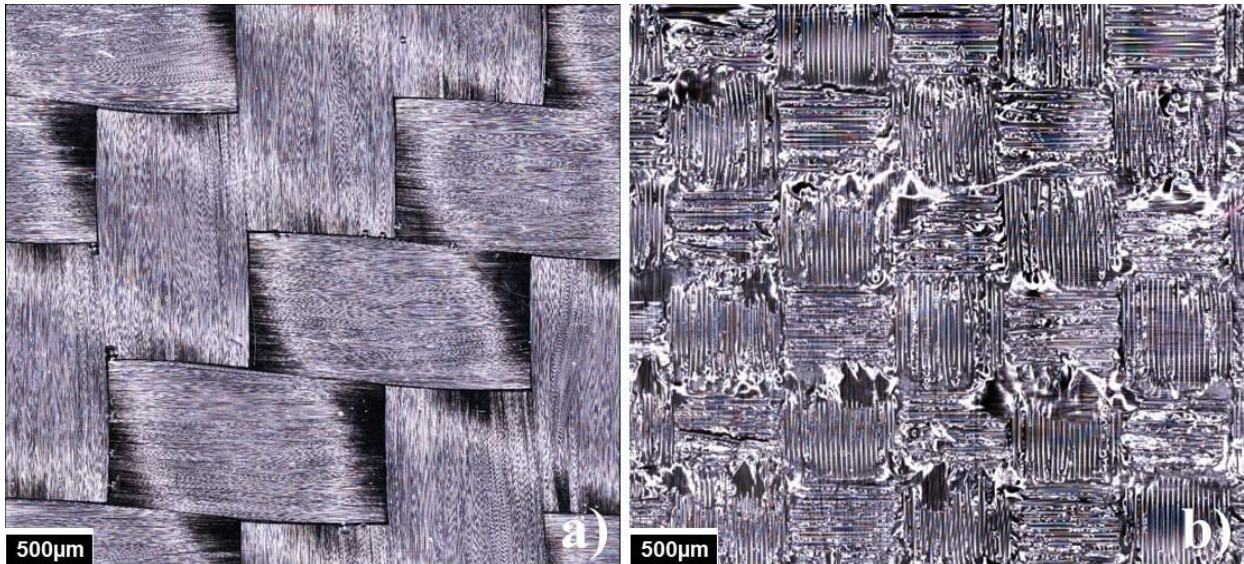


Figura 40. Microscopia: a) Fibra de carbono y b) Fibra de vidrio.

#### 4.9 Pruebas de desgaste por erosión de partículas líquidas

En los últimos años se han desarrollado muchas instalaciones e instrumentos de pruebas experimentales para investigar la erosión. Actualmente para estudiar la erosión debida a la lluvia, se emplean principalmente dos tipos de instalaciones experimentales: las instalaciones de pruebas de erosión por chorro de agua [18, 39] y las instalaciones de pruebas de brazos giratorios [40, 41], aunque existen otras. Las pruebas de erosión por impacto de partículas líquidas en materiales compuestos se realizaron en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sheffield U.K. En estas pruebas las partículas líquidas se proyectan con una presión de 150 bar sobre la superficie de la probeta a través de una boquilla, que son accionadas por una Hidro-bomba Industrial de 25 HP. En las pruebas realizadas, las probetas se ubican a 65 mm del extremo de la boquilla. La boquilla tiene una punta de salida de sección plana de carburo de tungsteno con un estabilizador de flujo de 110 mm de longitud. Se realizaron 3 pruebas en cada material, la primera prueba con tiempo de exposición de 10 min, la segunda a 20 min y la tercera a 30 min. La boquilla de esta plataforma solamente se puede ajustar para ángulos de impacto entre  $45^\circ$  y  $75^\circ$  es por ello que para estas pruebas únicamente se realizaron con un ángulo de impacto de  $75^\circ$  para todas las pruebas, con el fin de comparar cuál de los materiales compuestos tiene mayor resistencia al desgaste erosivo. La plataforma de erosión por chorro de agua es la que se muestra en la figura 41, esta fue desarrollada con algunos parámetros establecidos en la norma ASTM G73 [39].

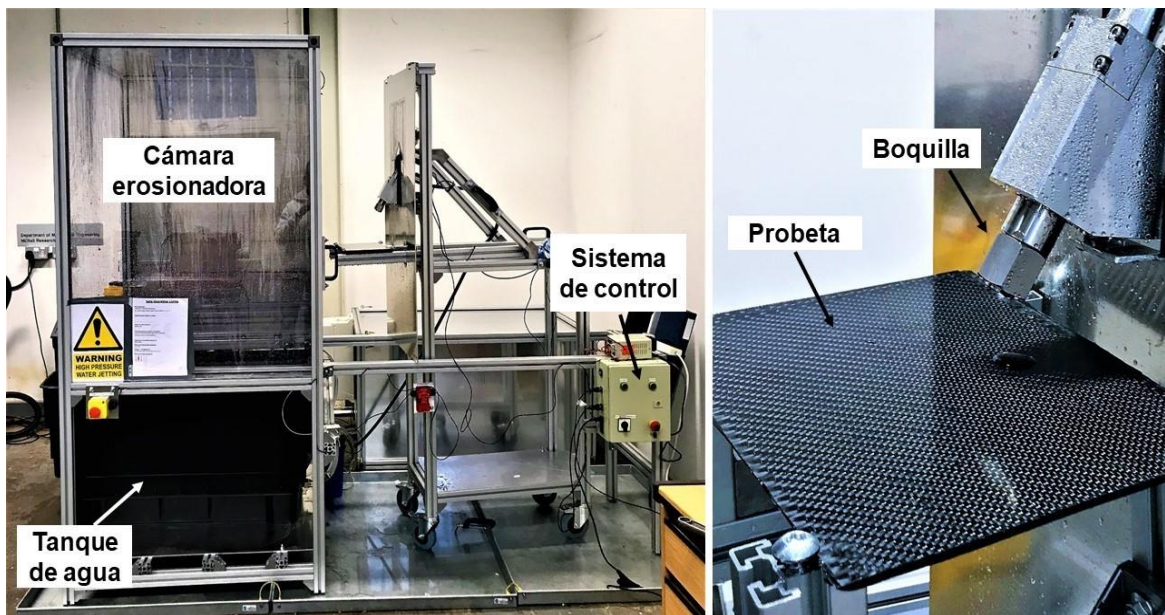


Figura 41. Plataforma para pruebas de erosión líquida.

## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Desgaste por erosión de partículas sólidas a temperatura ambiente

#### 5.1.1 Huellas de desgaste

En la figura 42 se muestran las huellas de desgaste de las probetas sometidas a pruebas de erosión con arena de mar, usando tres diferentes ángulos de impacto a  $75^\circ$ ,  $85^\circ$  y  $90^\circ$ . Los materiales de fibra de vidrio presentan huellas muy irregulares mientras que los materiales de fibra de carbono presentan huellas de desgaste casi circulares. Se observa que la formación de cráteres más abundante se presentó en fibra de vidrio. El proceso de erosión en las palas de aerogeneradores generalmente comienza con la formación de pequeñas grietas cerca del borde de ataque de la pala, que con el impacto constante de las partículas erosivas crean cráteres en la superficie provocando así la degradación superficial del material y en consecuencia afecta el rendimiento del aerogenerador [5].

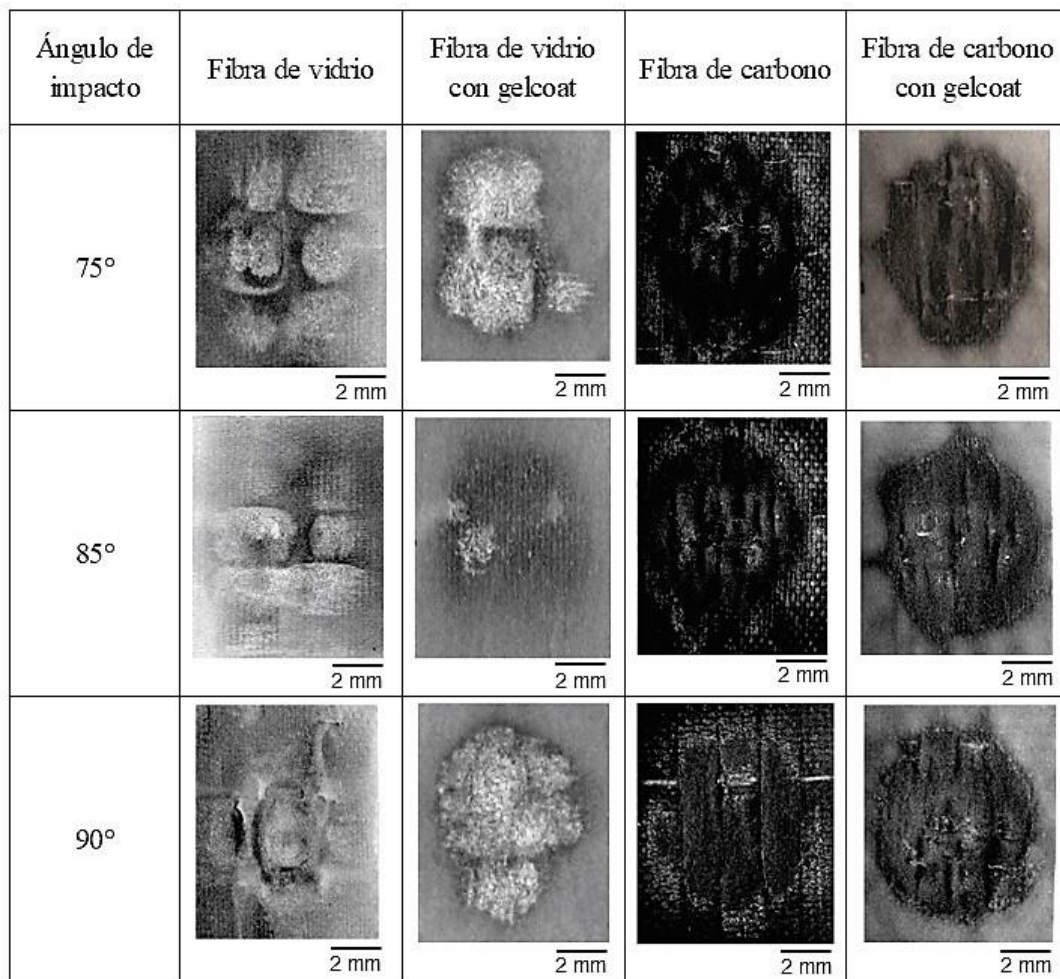


Figura 42. Huellas de desgaste.

### 5.1.2 Microscopia electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es ampliamente utilizada en el estudio de superficies de fractura de materiales, suministrando información estructural, de los mecanismos, naturaleza de la fractura, procesos de deformación plástica, falta de adhesión con la matriz, etc. Esta información es útil para conocer la morfología y posible interacción de los componentes, así como los diferentes procesos producidos en el material hasta alcanzar la fractura, por efecto de la degradación. Para poder observar la superficie desgastada de las probetas de material compuesto, estas fueron recubiertas con una pequeña capa de oro para hacerlas conductoras y poder observar los mecanismos de desgaste con ayuda del microscopio electrónico de barrido. La figura 43 muestra en detalle los diferentes mecanismos de desgaste producidos por la erosión de las partículas de arena en la superficie de los materiales compuestos.

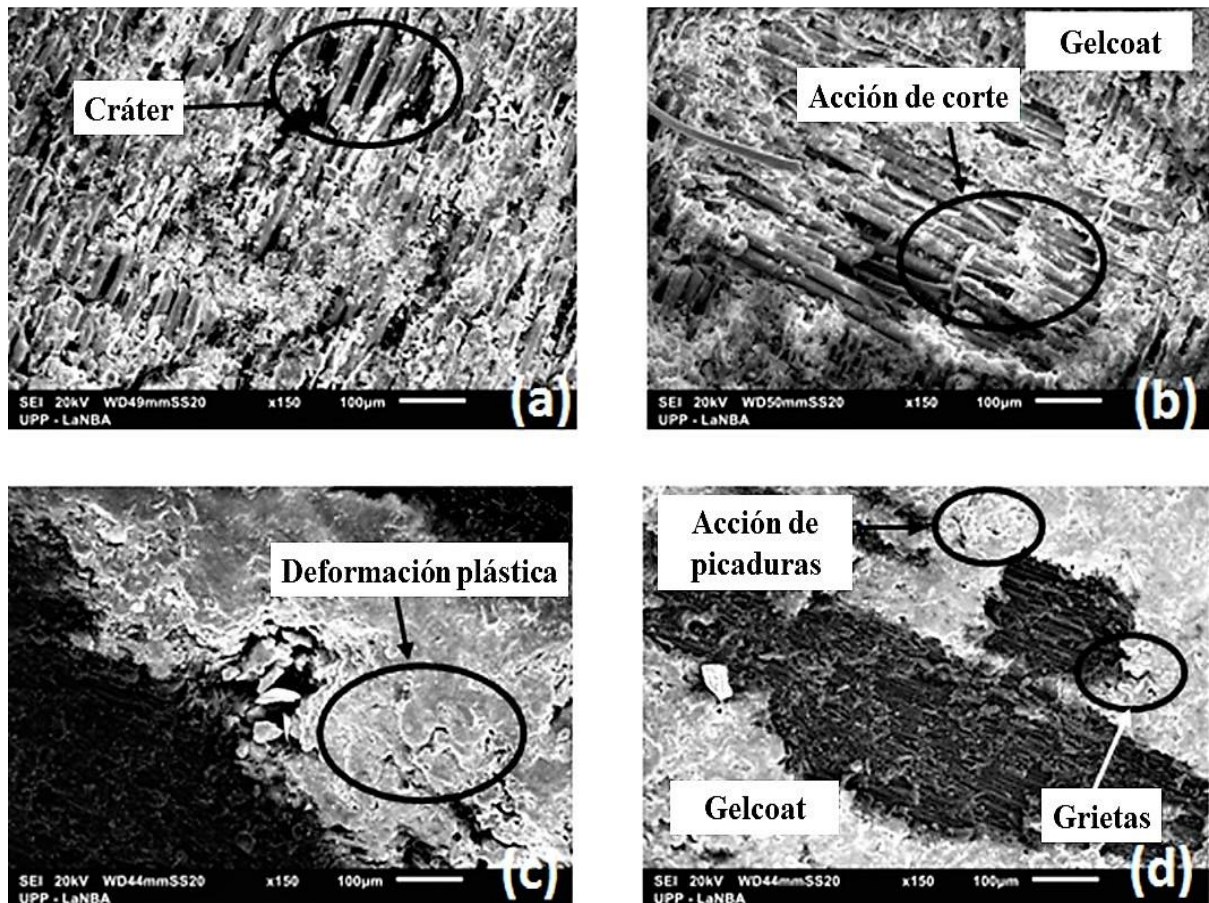


Figura 43. Microscopia electrónica de barrido.

La Figura 43a) muestra áreas de cráteres profundos y deformación de los tejidos en el compuesto de fibra de vidrio sin recubrimiento. El cuál mostró mayor desgaste, tanto en el número de cráteres

como en la profundidad de ellos. La Figura 43b) muestra el daño presentado en la superficie de una muestra de fibra de vidrio con gelcoat. Se puede observar la acción de corte de algunas fibras, causada por el impacto directo de las partículas sólidas, primero contra el recubrimiento (gelcoat) y luego contra las fibras del material compuesto. Además, muestra el bajo rendimiento del recubrimiento, exponiendo el material compuesto y su daño respectivo por acción de corte. La Figura 43c) se refiere al material compuesto de fibra de carbono, que tiene un menor grado de daño en comparación con otras superficies. Es evidente la presencia de deformación plástica en áreas donde hubo deslizamiento progresivo de partículas en la superficie, así como el desprendimiento de pequeños elementos (escombros), que se incrustaron en la matriz de fibra de carbono. La Figura 43d) muestra la imagen de la superficie desgastada de fibra de carbono con gelcoat. Es evidente el desprendimiento en algunas áreas de este recubrimiento, exponiendo la fibra de carbono. El desprendimiento se debió al impacto de las partículas sólidas que causaron, en primer lugar, la formación de pequeñas grietas, que producen una acción de picadura, y debido al impacto continuo y constante de las partículas de arena, esta acción de picadura induce la formación de grietas más grandes. Pero todavía sin dejar un daño considerable en la fibra de carbono.

### **5.1.3 Tasas de desgaste**

La tasa de erosión se definió como la masa perdida de la superficie de las probetas erosionadas. En la figura 44, 45 y 46 se muestra gráficamente el comportamiento de los efectos de la masa perdida, con ángulos de impacto a  $75^\circ$ ,  $85^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente, el material con mayor masa perdida es fibra de vidrio con gelcoat, esto se debe a que el recubrimiento gelcoat no protege el material contra el fenómeno de desgaste erosivo, como se mencionó anteriormente únicamente es para proteger las palas contra los rayos UV y no para impacto de partículas sólidas. Para los tres casos la fibra de carbono se mantuvo con menor masa perdida, esto se debe a que su dureza es mayor a la fibra de vidrio y al tipo de tejido empleado, además que posee propiedades mecánicas similares a las del acero. En la tabla 9 se muestra un promedio de masa perdida de las 9 probetas de cada material sometidas a pruebas de erosión. Muestra que el material con masa perdida más baja fue fibra de carbono a  $85^\circ$ , mientras que el material con la masa perdida más alta fue fibra de vidrio a  $90^\circ$ , en base a resultados mostrados en esta tabla es evidente que la fibra de carbono presenta 3 veces mayor resistencia al desgaste erosivo. Para los tres ángulos de impacto, las fibras recubiertas tuvieron una mayor masa perdida en comparación con las fibras no recubiertas.



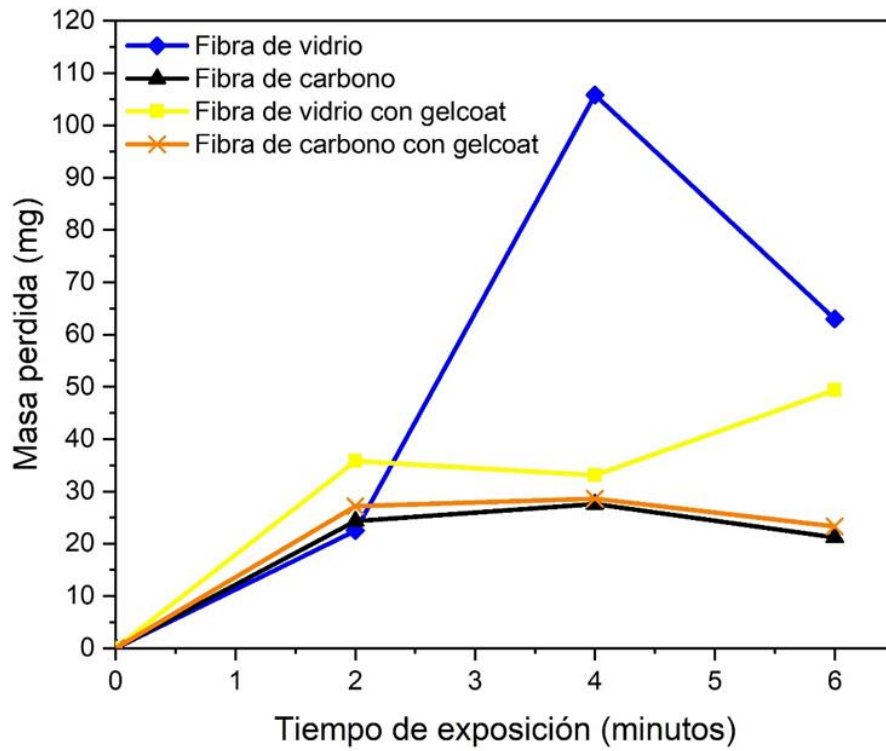


Figura 44. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 75°.

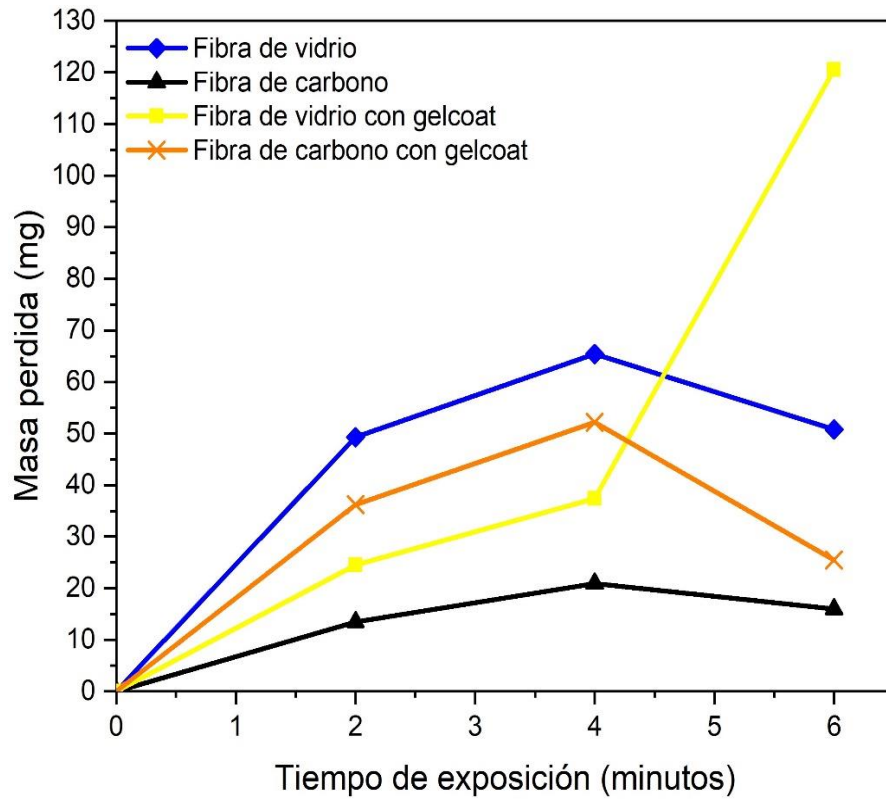


Figura 45. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 85°.

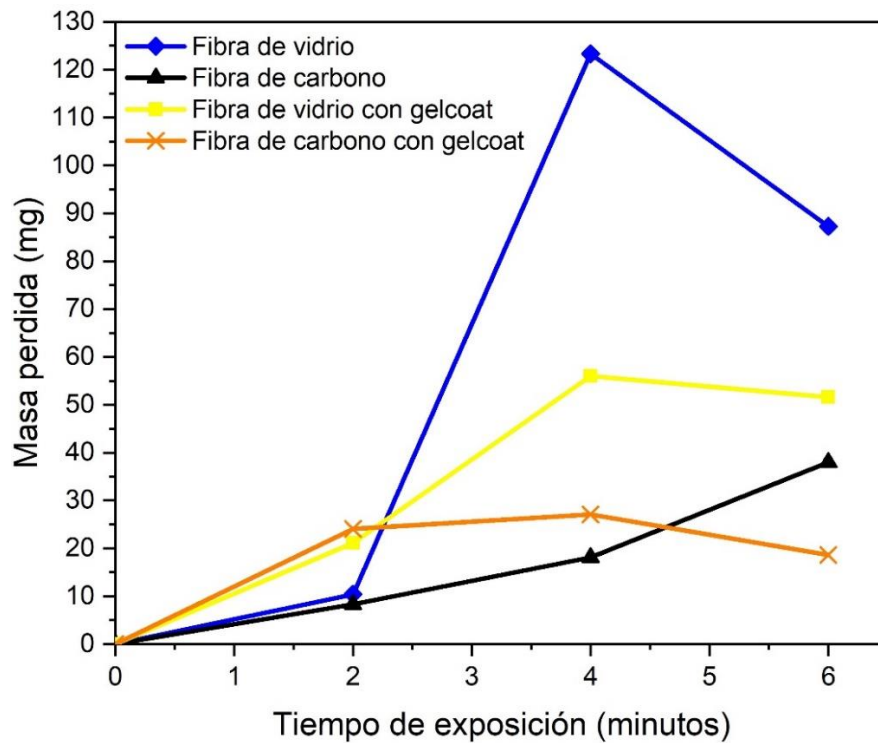


Figura 46. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 90°.

Tabla 9. Masa perdida total en probetas sometidas a erosión de partículas sólidas.

| Material                     | Masa pérdida total (mg) |                         |                         |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                              | Ángulo de impacto a 75° | Ángulo de impacto a 85° | Ángulo de impacto a 90° |
| Fibra de vidrio              | 63.76                   | 55.16                   | 73.66                   |
| Fibra de vidrio con gelcoat  | 39.43                   | 60.8                    | 42.9                    |
| Fibra de carbono             | 24.36                   | 16.8                    | 21.46                   |
| Fibra de carbono con gelcoat | 26.35                   | 37.96                   | 23.26                   |

#### 5.1.4 Perfilometría

Perfilometría es la técnica que se utiliza para obtener un perfil de la superficie de un material. Se obtuvieron los perfiles de rugosidad utilizando un perfilómetro Mitutoyo SJ-400 en las superficies de las probetas erosionadas, específicamente en las zonas de desgaste. El equipo está conectado a una computadora que por medio de un software se visualizan los perfiles de rugosidad, midiendo a su vez la profundidad de la huella de desgaste y longitud. En la figura 47a) se observa la perfilometría de fibra de vidrio, fibra de vidrio con gelcoat, fibra de carbono y fibra de carbono con gelcoat respectivamente, que fueron sometidos a pruebas de erosión con ángulo de impacto a 75°, se observa que la fibra de vidrio tiene una mayor profundidad de desgaste cerca de los 350

$\mu\text{m}$ , mientras que la fibra de carbono presenta menor profundidad cerca de  $200 \mu\text{m}$ . En la figura 47b) se puede observar que en la fibra de vidrio se generaron dos diferentes profundidades una de  $600 \mu\text{m}$  y de  $300 \mu\text{m}$ , se cree que estas profundidades dependen de la rugosidad, al ser mayor que la fibra de carbono las partículas de arena se incrustan fácilmente y remueven el material de la superficie, además al aumentar el ángulo de ataque, aumenta la tasa de erosión. En la Figura 47c) se puede ver la perfilometría de los materiales con ángulo de impacto a  $90^\circ$ , en esta prueba las partículas erosivas son impactadas perpendicularmente a la probeta, por lo que las profundidades de desgaste por erosión son mayores que en los dos casos anteriores.

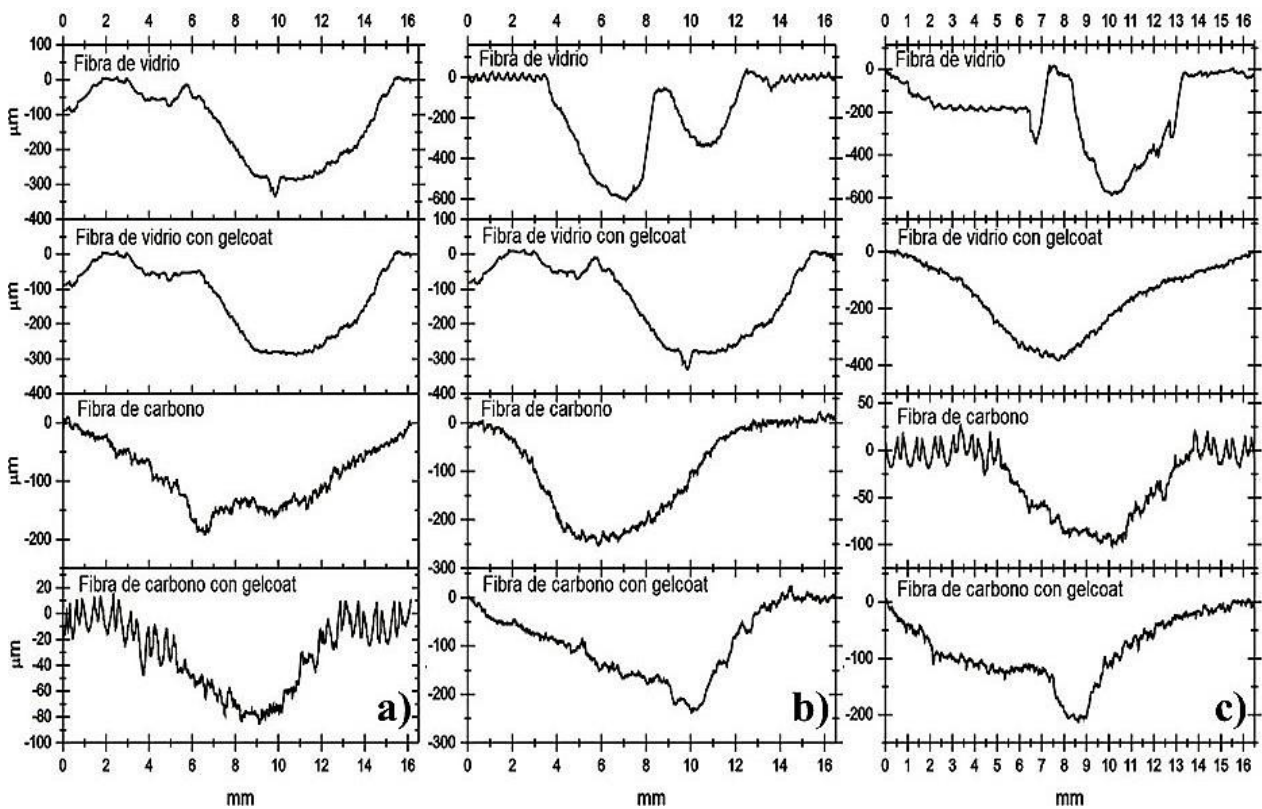


Figura 47. Perfilometría de probetas sometidas a pruebas con ángulo de impacto de a)  $75^\circ$ , b)  $85^\circ$  y c)  $90^\circ$ .

## 5.2 Desgaste por erosión de partículas sólidas a temperatura de $50^\circ\text{C}$

### 5.2.1 Huellas de desgaste

En la figura 48 podemos observar las huellas de desgaste generadas en las probetas de materiales compuestos que fueron sometidos a pruebas de erosión seca con temperatura, se muestran las huellas de desgaste en tres diferentes ángulos de impacto  $75^\circ$ ,  $85^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente. Las superficies de las probetas de fibra de vidrio presentan severas ralladuras y una huella de

desgaste circular altamente marcada, mientras que en las probetas de fibra de carbono se presenta menor desgaste en la superficie ya que la huella de desgaste no alcanza a formarse en su totalidad. Para estas pruebas de erosión con temperatura las probetas recubiertas con gelcoat no muestran daños significativos en la superficie del material, pero si presentan una huella de desgaste circular muy notable y presentan acumulación de material desprendido que se adhirió a la superficie del material.

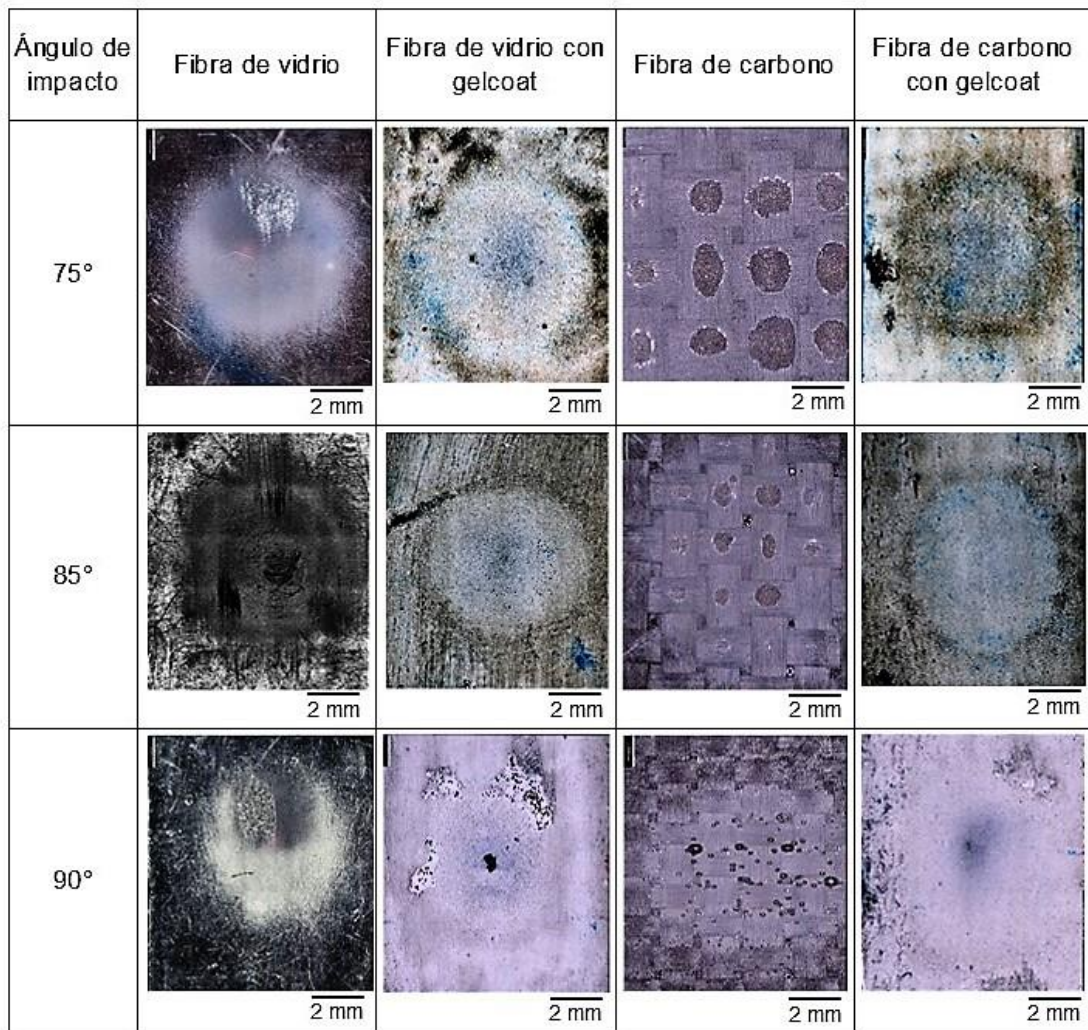


Figura 48. Huellas de desgaste.

En la figura 49a) se muestra detalladamente una zona de desgaste de la superficie de fibra de vidrio, se puede observar las irregularidades y ralladuras que ocasiona la erosión de partículas sólidas de arena, esto se debe a que las partículas impactaron con un ángulo de 75°. En la figura 49b) se muestra una zona de desgaste en fibra de carbono, para este caso las partículas sólidas se impactaron con un ángulo de 90° lo que provoca picaduras y un aumento en la rugosidad de la superficie del material.

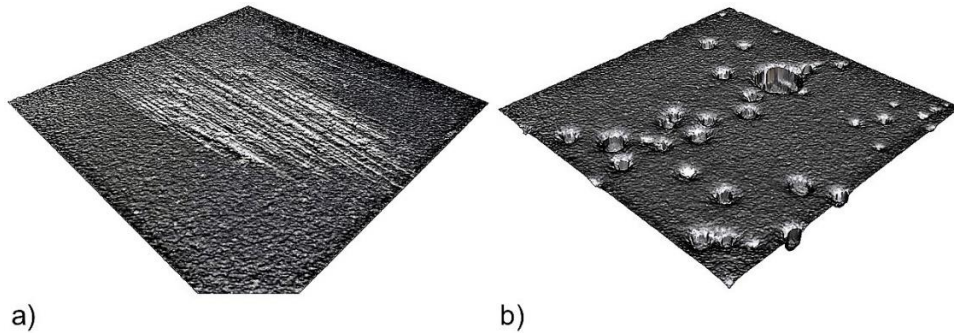


Figura 49. Superficie desgastada: a) fibra de vidrio, b) fibra de carbono.

### 5.2.2 Microscopia electrónica de barrido

Las probetas fueron recubiertas con un material conductor (oro) para poder observar la superficie de las huellas de desgaste en el Microscopio Electrónico de Barrido. Las probetas se introdujeron en una cámara de vacío, el aire fue expulsado de la cámara para poder hacer una aspersión de oro en la superficie de las probetas, por último, el recubrimiento es secado con rayos UV como se muestra en la figura 50, el equipo utilizado es un recubridor EMSCOPE SC 500 del Laboratorio de Tribología de La Universidad de Sheffield. Para observar la superficie de las probetas desgastadas se utilizó un microscopio electrónico de barrido HITACHI TM3030Plus que se muestra en la figura 51.

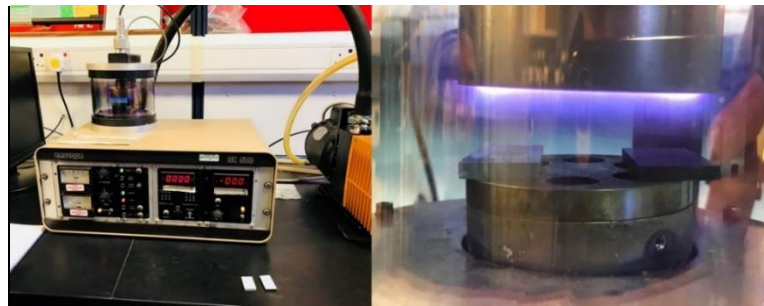


Figura 50. Recubridor EMSCOPE SC500.



Figura 51. SEM HITACHI TM3030Plus.

En la figura 52 se muestran las microfotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido de la superficie desgastada de fibra de vidrio, se pueden observar las fibras cortadas por efecto del impacto de las partículas de arena que a su vez provocan ralladuras e incremento en la rugosidad de la superficie del material, además presenta muchas zonas con deformación plástica y acción de corte de material.

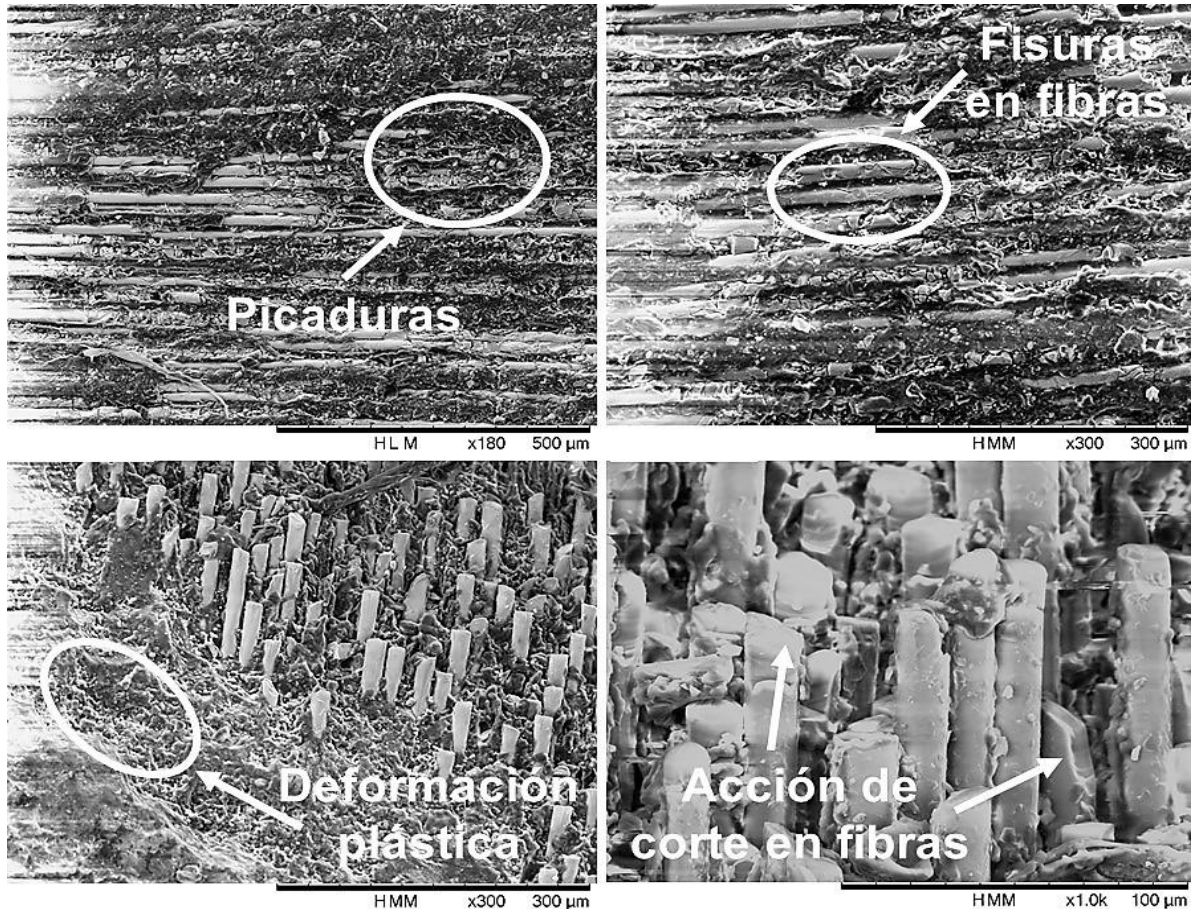


Figura 52. Microscopia electrónica de barrido en fibra de vidrio.

En la figura 53 se muestran microfotografías obtenidas por SEM de las huellas de desgaste en fibra de carbono, se observan mecanismos de desgaste como acción de corte de material, además presenta zonas donde existen pequeñas fisuras que, con el impacto repetitivo de las partículas sólidas de arena, estas fisuras se convierten en grietas que provocan la separación de la resina de las fibras. En la figura 54 se muestran microfotografías obtenidas por SEM del recubrimiento gelcoat, se observan pequeñas grietas, además de material removido que se adhirió a la superficie del recubrimiento (debris). También se observan mecanismos de desgaste como formación de cráteres y picaduras.

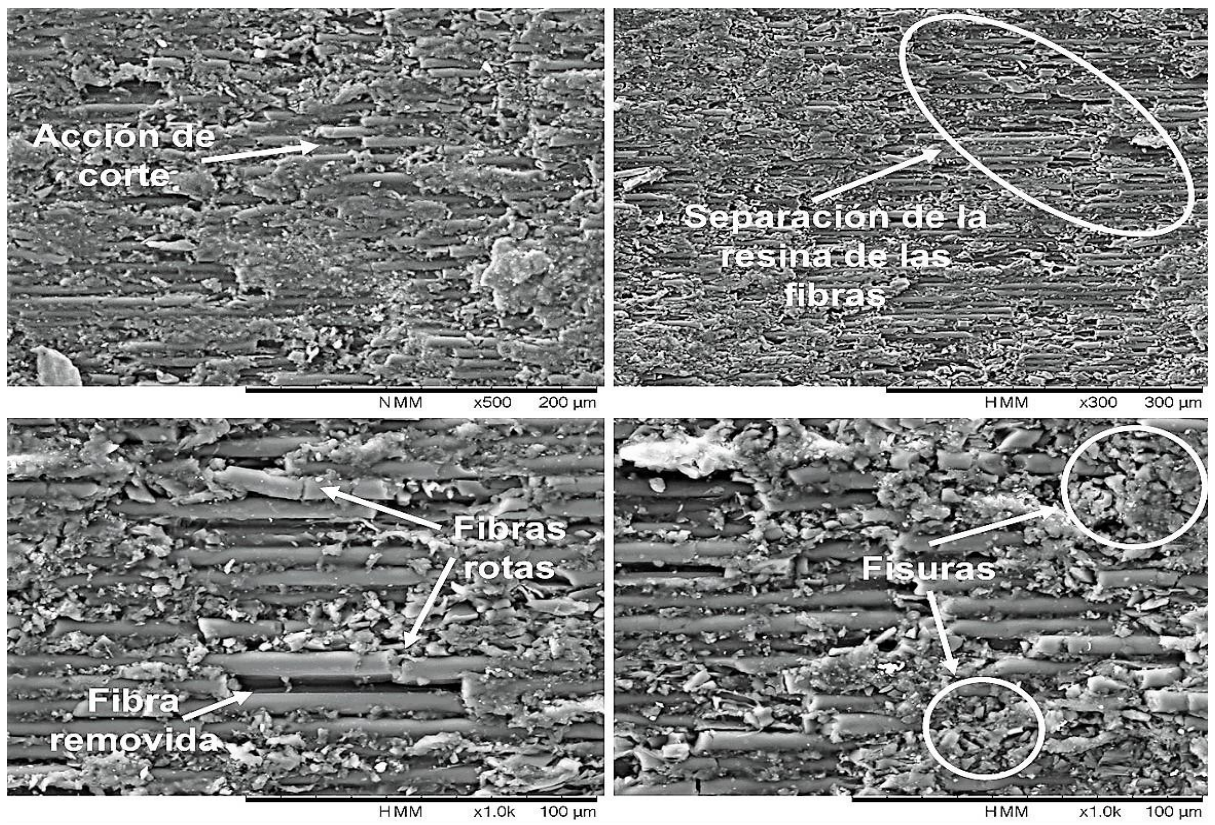


Figura 53. Microscopia electrónica de barrido en fibra de carbono.

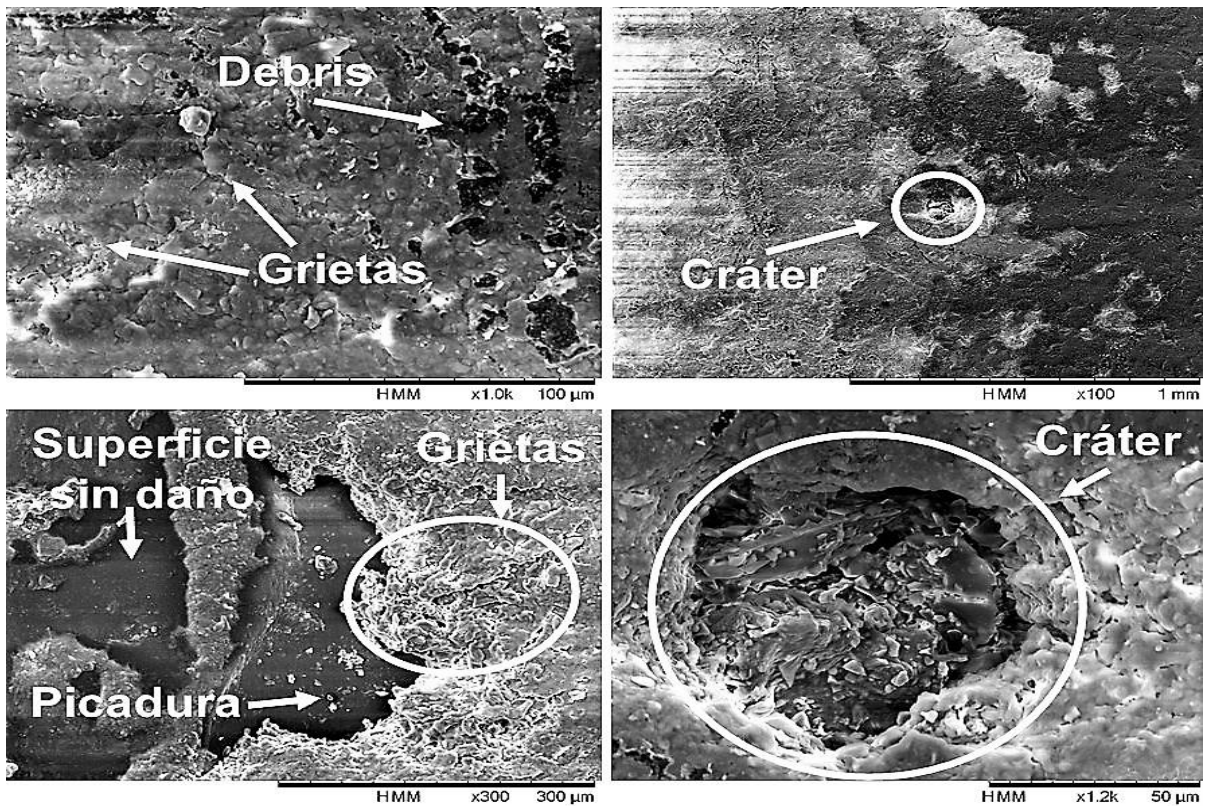


Figura 54. Microscopia electrónica de barrido en probetas con gelcoat.

### 5.2.3 Tasas de desgaste

Como se mencionó antes las tasas de desgaste erosivo son graficadas en función del tiempo de exposición y masa perdida, las muestras erosionadas fueron pesadas con una balanza analítica de precisión cada dos minutos durante un tiempo total de 6 minutos. En la figura 55 se muestra el comportamiento de la tasa de desgaste de los materiales compuestos donde las pruebas de impacto erosivo se realizaron a  $75^\circ$ , se observa que la fibra de vidrio y fibra de carbono tienen una tendencia similar con un crecimiento ascendente pero la fibra de carbono tiene menor masa perdida. En la figura 56 se muestra el comportamiento de la tasa de desgaste con un ángulo de impacto a  $85^\circ$ , las fibras recubiertas con gelcoat presentan mayor desgaste, esto se debe a que el gelcoat tiene una menor dureza y las partículas angulares de arena remueven el material rápidamente. El daño por erosión suele ser máximo en el impacto normal es decir en un ángulo de  $90^\circ$  [42, 43]. En la figura 57 se muestra el comportamiento de la masa perdida con un ángulo de impacto de  $90^\circ$ , donde las partículas erosivas se impactan perpendicularmente a la superficie del material. Las tasas de desgaste erosivo son fuertemente afectadas por la rugosidad de la superficie de los materiales y el ángulo de ataque de las partículas erosivas [44], por lo que al aumentar el ángulo a  $90^\circ$  la tasa de erosión es máxima en los materiales y esto refleja el típico comportamiento de erosión frágil y da como resultado una superficie más áspera.

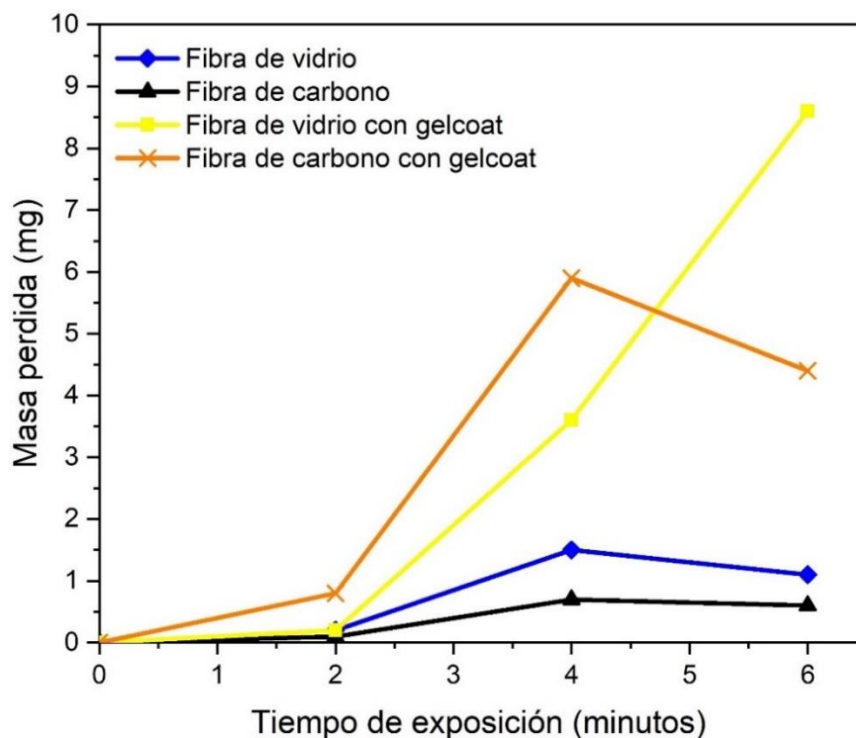


Figura 55. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a  $75^\circ$ .



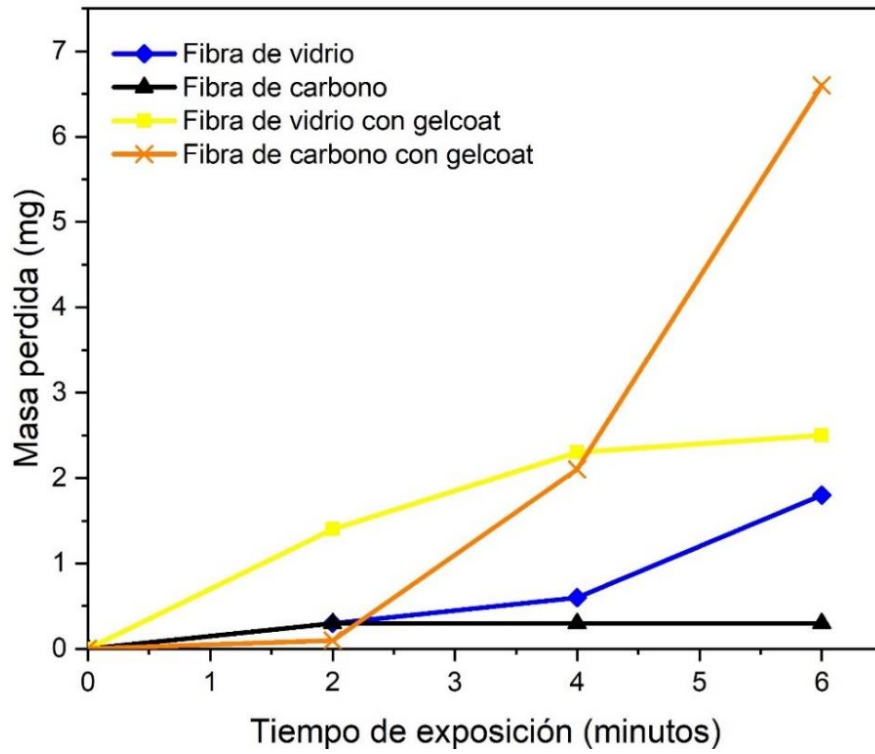


Figura 56. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 85°.

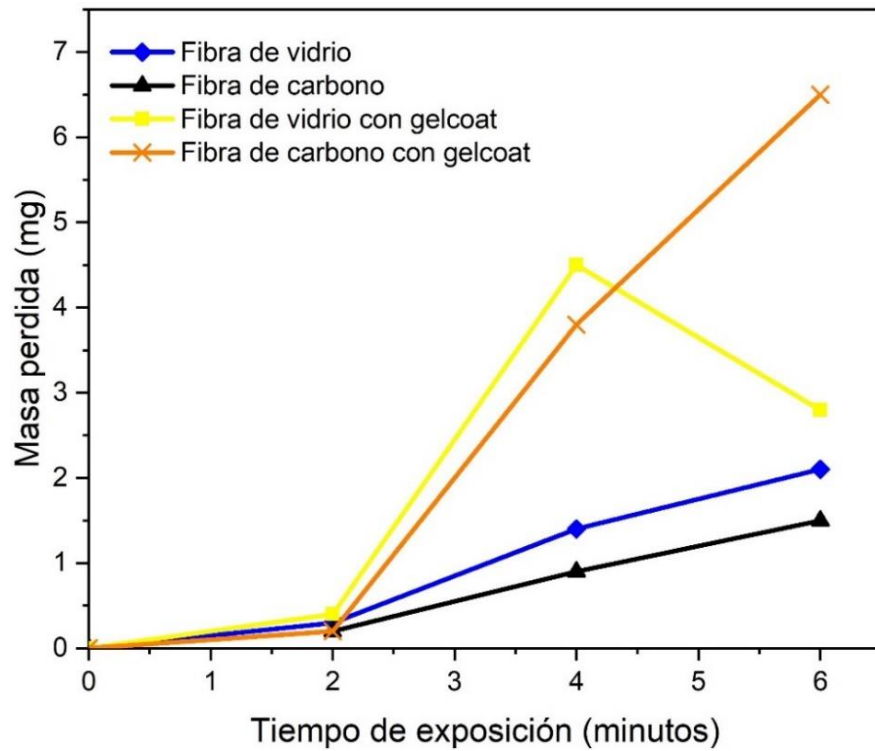


Figura 57. Masa perdida vs tiempo, ángulo de impacto a 90°.

Se realiza un promedio de masa perdida total de las probetas sometidas a erosión con temperatura, los valores promedio son los que se muestran en la tabla 10, para estas pruebas el material con menor masa perdida es fibra de carbono con ángulo de ataque a 85° y el material con mayor masa perdida es fibra de vidrio con gelcoat en pruebas con ángulo de impacto a 90°. Otros estudios han demostrado que la fibra de carbono tiene altas propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y es estable a temperaturas altas [45]. El promedio total de masa perdida muestra que la fibra de vidrio presenta tres veces más desgaste erosivo que la fibra de carbono.

Tabla 10. Masa perdida en probetas sometidas a pruebas de erosión de partículas sólidas a temperatura de 50 °C.

| Material                     | Masa perdida total (mg) |                         |                         |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                              | Ángulo de impacto a 75° | Ángulo de impacto a 85° | Ángulo de impacto a 90° |
| Fibra de vidrio              | 1.27                    | 0.90                    | 0.93                    |
| Fibra de vidrio con gelcoat  | 2.57                    | 2.07                    | 4.13                    |
| Fibra de carbono             | 0.87                    | 0.30                    | 0.47                    |
| Fibra de carbono con gelcoat | 3.50                    | 2.93                    | 3.70                    |

#### 5.2.4 Perfilometría

La perfilometría de las probetas sometidas a erosión con temperatura de 50 °C se determinó con un sistema de medición óptico Alicona y se muestra en la figura 58. En la figura 58a) se muestra la perfilometría para las pruebas con ángulo de impacto a 75°, se observa que la fibra de carbono presenta profundidades de desgaste de 30 μm, mientras que los otros materiales presentan profundidades de desgaste superiores a 100 μm. La perfilometría con ángulo de impacto a 85° se muestra en la figura 58b) y la perfilometría para un ángulo de impacto a 90° se muestra en la figura 58c) a medida que aumenta el ángulo de impacto, la profundidad de las huellas de desgaste de igual manera aumenta debido al impacto directo de las partículas erosivas y también se debe por las modificaciones en la rugosidad que sufre cada una de las superficies de los materiales probados. La fibra de carbono para los tres ángulos de impacto presenta menores profundidades de desgaste en comparación con los otros materiales. Comparando los perfiles de rugosidad de las pruebas a temperatura ambiente y temperatura de 50 °C, se esperaba mayor desgaste en las pruebas con temperatura, pero como se muestra en la figura 47 los materiales tienen profundidades mayores en las pruebas a temperatura ambiente, esto se debe fuertemente a la rugosidad inicial de los materiales, entre mayor sea la rugosidad superficial del material mayor será la profundidad de desgaste.

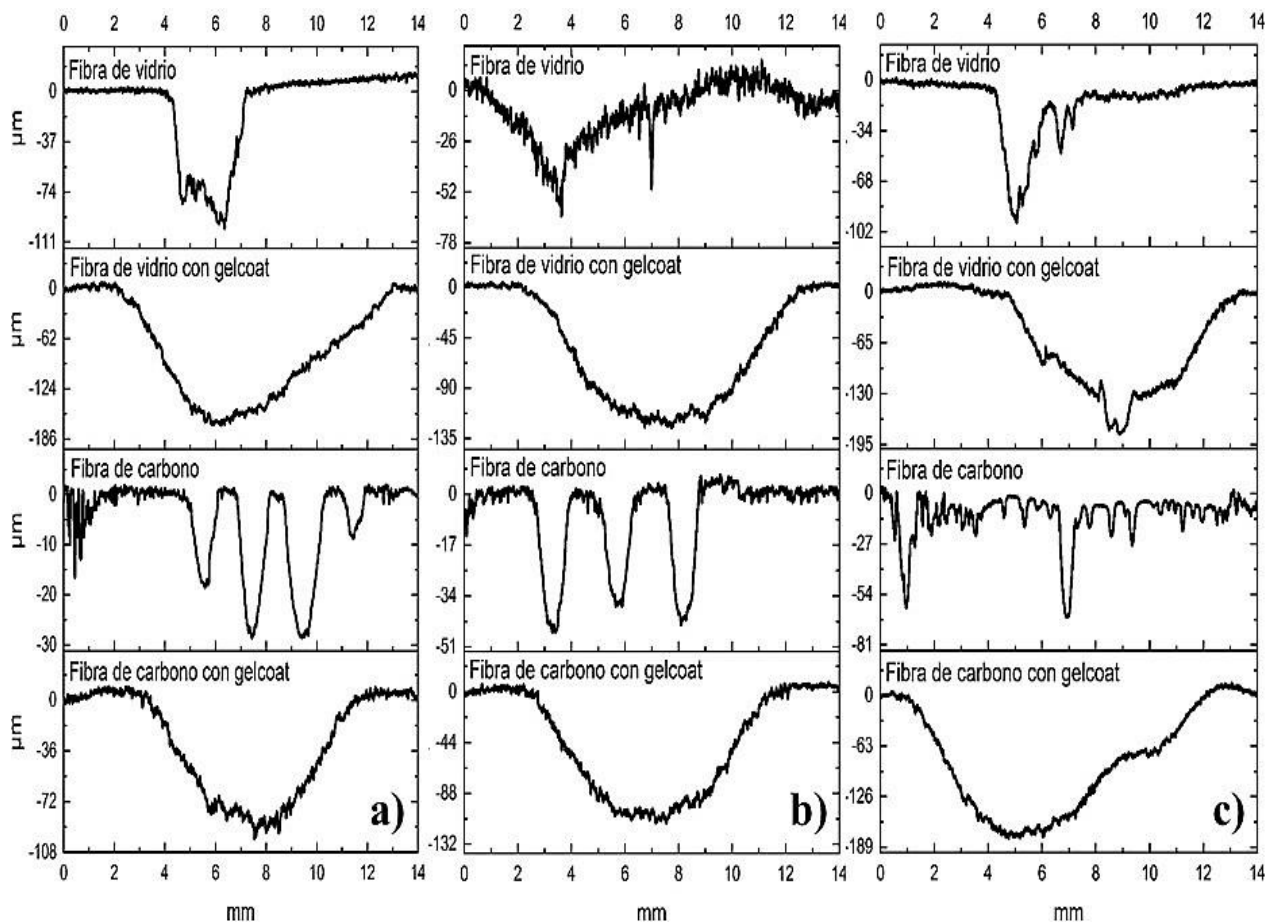


Figura 58. Perfilometría sometidas a pruebas con ángulo de impacto de a) 75°, b) 85° y c) 90°.

### 5.3 Desgaste por erosión de partículas líquidas

#### 5.3.1 Huellas de desgaste

En la figura 59 se muestran las huellas de desgaste formadas por las pruebas de erosión líquida en los materiales, con tiempos de exposición de 10, 20 y 30 min, usando un ángulo de impacto de 75°. Se establecieron estos tiempos de prueba para examinar periódicamente las posibles fallas en el recubrimiento como agrietamiento, fracturas, picaduras y pérdida de adherencia del recubrimiento. La erosión fue muy rápida en los materiales recubiertos con gelcoat, esto pudo haber sido por que el recubrimiento utilizado tiene menor dureza dado que es una resina de poliéster, generalmente los compuestos de poliéster muestran una menor resistencia al desgaste [46]. La forma de la huella de desgaste se puede explicar ya que la boquilla tiene una punta de salida de sección rectangular. También se observa que la erosión no afectó toda el área expuesta de los materiales, si no que comenzó en ciertos puntos y luego se extendió a las zonas más vulnerables del material.

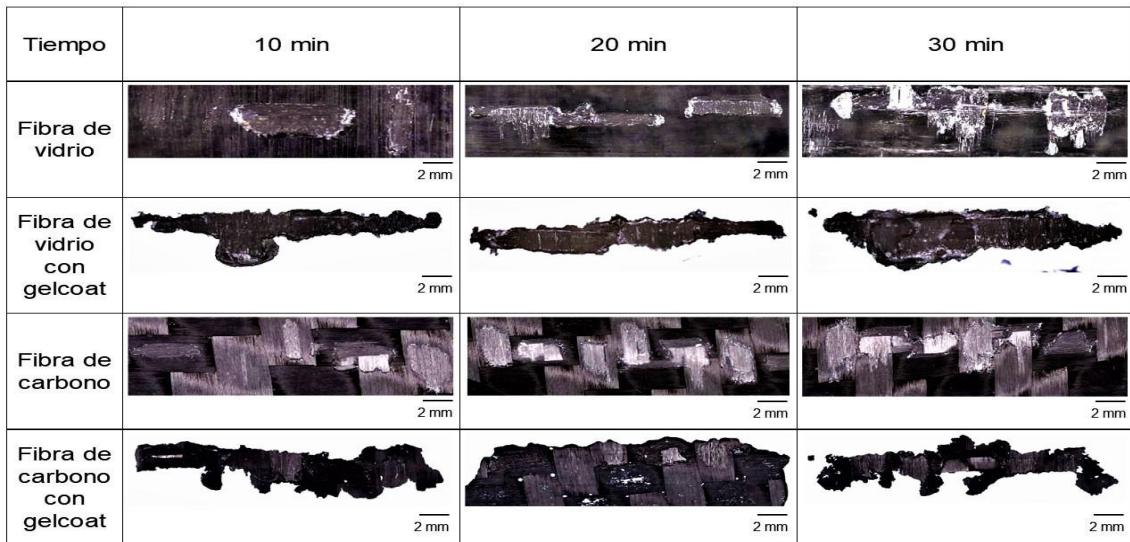


Figura 59. Huellas de desgaste.

### 5.3.2 Microscopia Óptica

Con el sistema de medición óptico Alicona se observaron las zonas de desgaste en los materiales. En figura 60b) se muestra la superficie de fibra de vidrio con un tiempo de exposición de erosión de 10 min, es muy notable las severas irregularidades que se van formando. Para un tiempo de exposición de 20 min el impacto continuo de las partículas líquidas va creando profundidades cada vez mayores en el material como se muestra en la figura 61b). En la figura 62b) se muestra una vista 3D de una zona de desgaste en fibra de vidrio con tiempo de exposición de 30 min, en este caso la profundidad de desgaste sigue aumentando conforme aumenta el tiempo de exposición al impacto de partículas líquidas. En la figura 63a) se muestra la microscopia de la zona de desgaste en fibra de carbono y en la figura 63b) una vista 3D, se puede observar que las partículas líquidas erosionan ligeramente la superficie comenzando con el desprendimiento de la resina, dejando al descubierto las fibras de carbono. En la figura 64 se muestra la microscopia de la zona de desgaste en fibra de carbono con tiempo de exposición de 20 min, se pueden observar pequeñas zonas donde la rugosidad empieza a cambiar, además las partículas líquidas van cortando las fibras hasta encontrarse con los siguientes tejidos del material. En la figura 65 se muestra la zona de desgaste con tiempo de exposición de 30 min, se observan las fibras cortadas y la acumulación de material removido alrededor de la huella de desgaste, pero sin crear daños graves en el material. Haciendo una comparación de las microscopias tomadas en fibra de vidrio y fibra de carbono, es muy notable que la fibra de carbono presenta menor desgaste que la fibra de vidrio, esto se debe fuertemente a la rugosidad, dureza, el tejido y tamaño de los filamentos de las fibras.

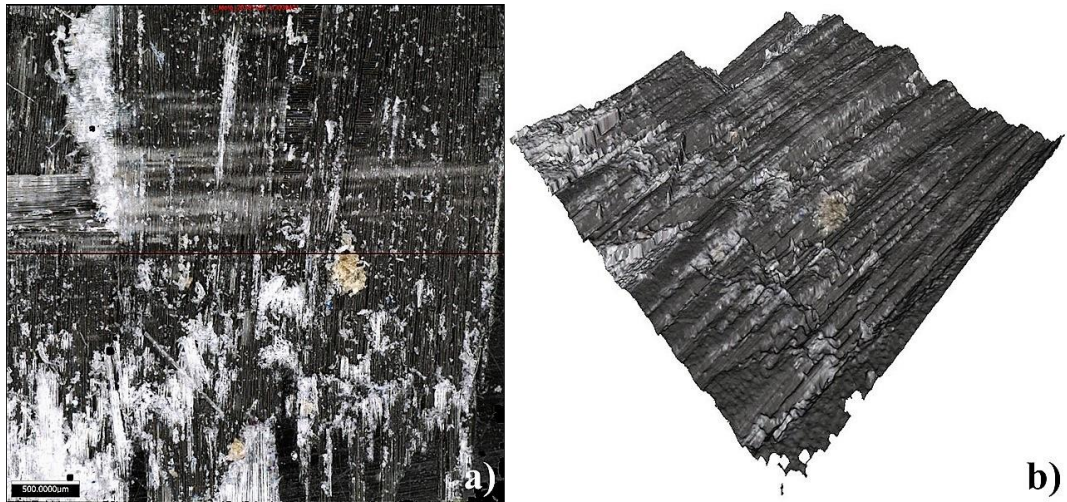


Figura 60. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de vidrio con tiempo de exposición de 10 min.

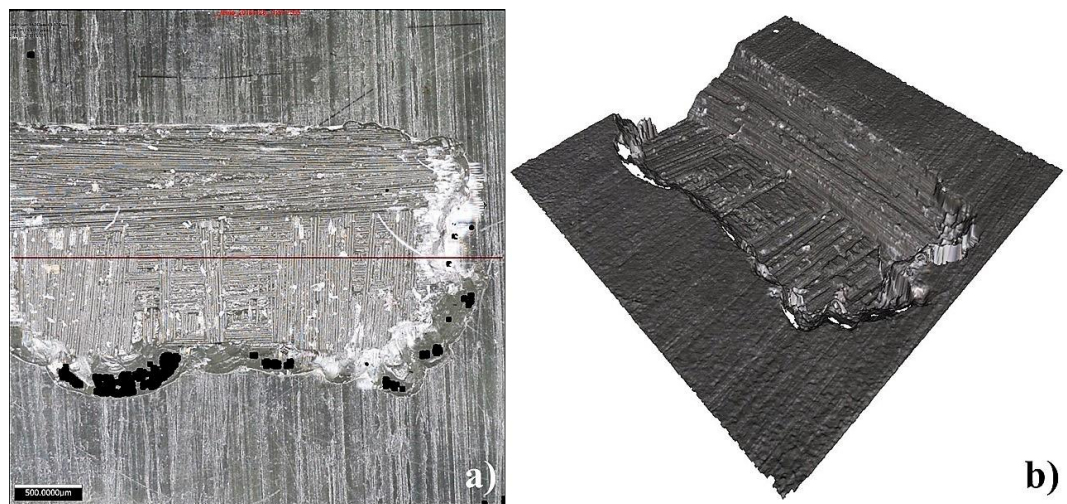


Figura 61. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de vidrio con tiempo de exposición de 20 min.

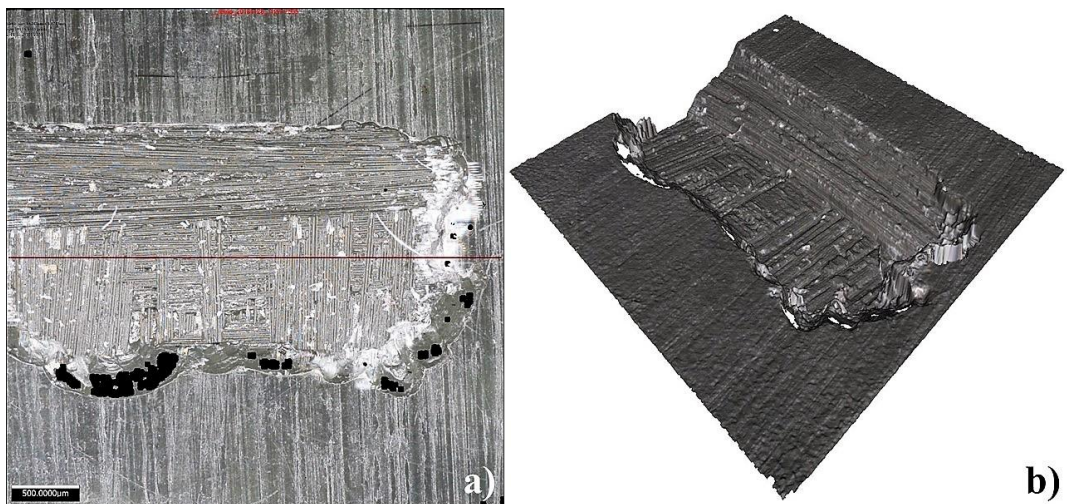


Figura 62. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de vidrio con tiempo de exposición de 30 min.

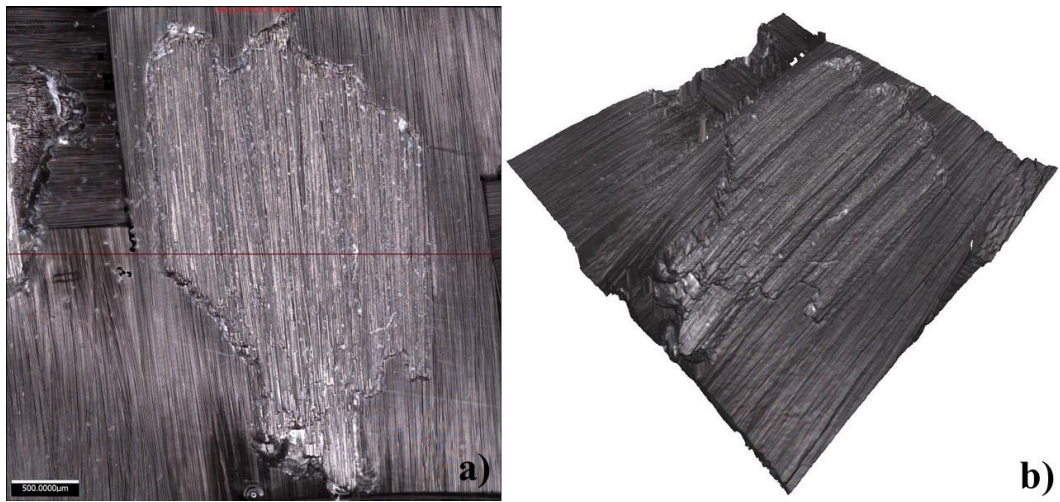


Figura 63. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de carbono con tiempo de exposición de 10 min.

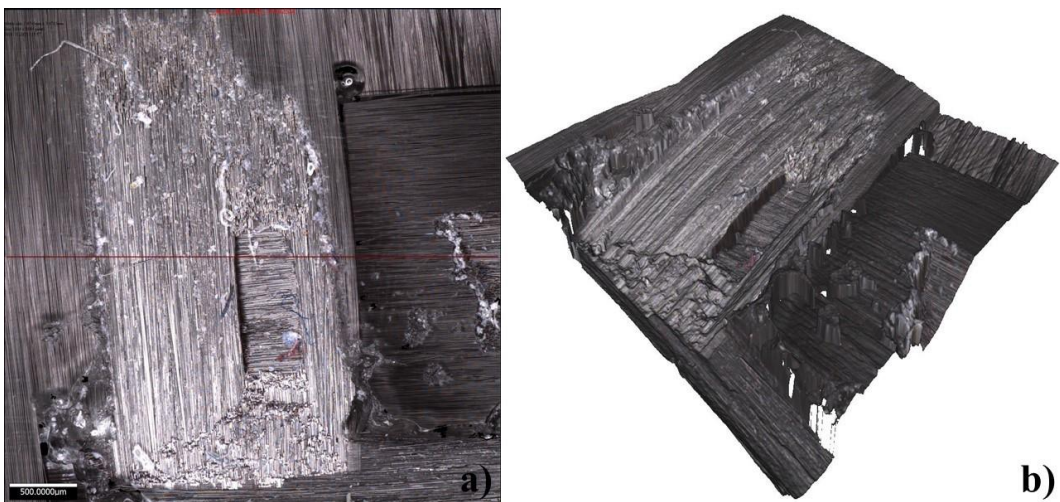


Figura 64. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de carbono con tiempo de exposición de 20 min.

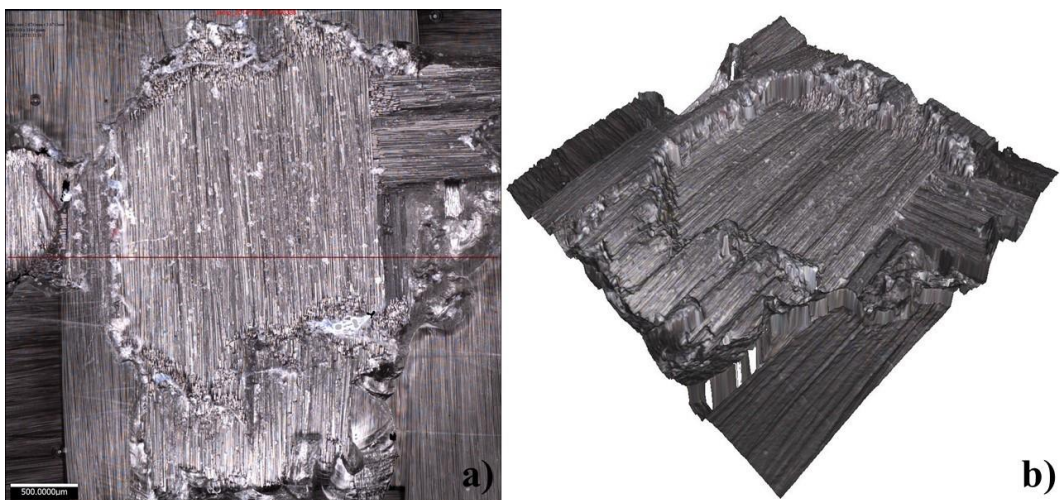


Figura 65. a) Microscopia y b) vista 3D, de fibra de carbono con tiempo de exposición de 30 min.

En la figura 66a) se muestra la microscopía óptica de la zona de desgaste en fibra de carbono, se observa una gran cantidad de fibras cortadas, pero sin crear profundidades significativas en la superficie del material. En la figura 66b) se muestra una zona de desgaste de fibra de vidrio, se puede observar la resina dañada y fibras cortadas por el impacto de las partículas líquidas, además presenta desprendimiento de resina que provoca severas modificaciones en la rugosidad superficial del material y mayores profundidades de desgaste. En la figura 66c) se muestra la superficie desgastada de fibra de carbono con gelcoat, podemos observar que el gelcoat no protege la superficie del material, las partículas líquidas crean pequeñas picaduras que con el ataque continuo provocan grietas y por consiguiente la remoción de la resina para provocar una acción de corte de las fibras. En la figura 66d) se muestra la superficie de fibra de vidrio con gelcoat, se observan zonas de desprendimiento de resina y fibras cortadas, el recubrimiento gelcoat fue erosionado muy rápidamente, lo que provoca el desprendimiento de resina y el arranque de las fibras. Una vez que aparece un defecto, la erosión puede acelerarse debido a los crecientes cambios de rugosidad de la superficie del material.

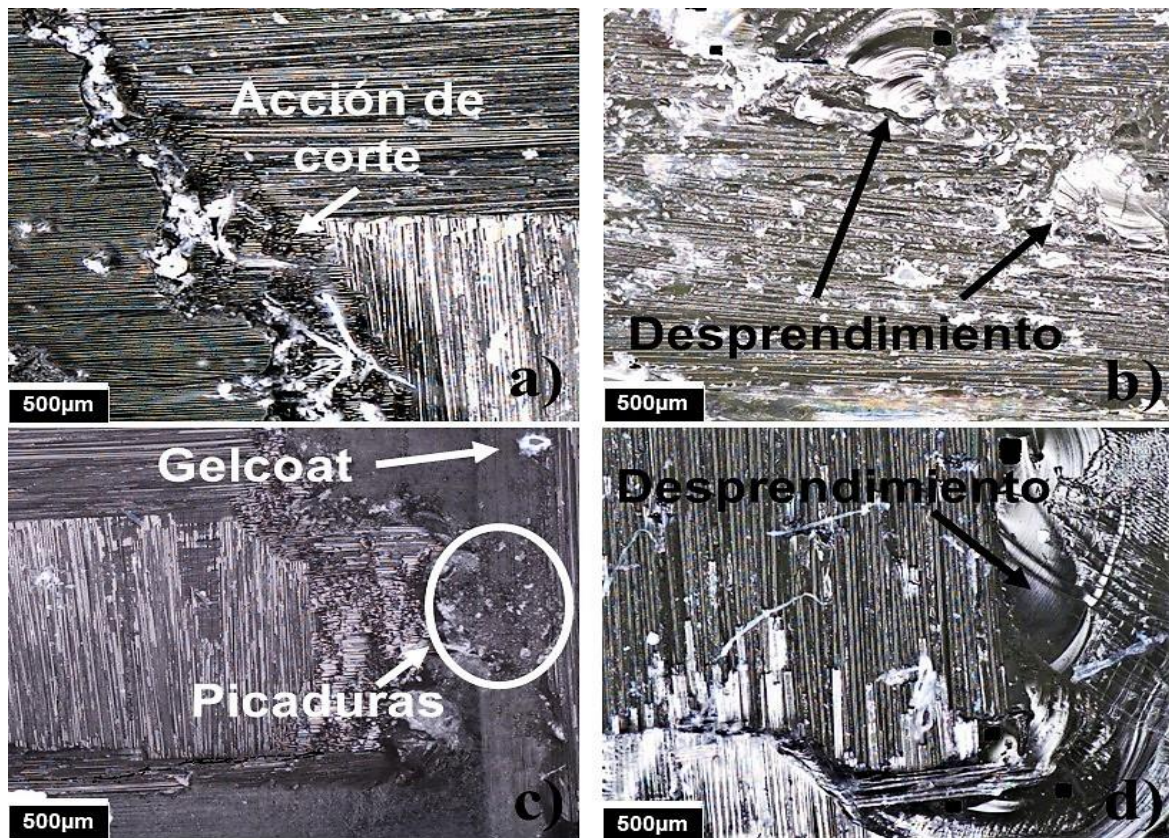


Figura 66. Microscopía óptica: a) fibra de carbono, b) fibra de vidrio, c) fibra de carbono con gelcoat y d) fibra de vidrio con gelcoat.

### 5.3.3 Tasa de desgaste

La norma G73-98 para pruebas por impacto de líquidos determina que la erosión debe reportarse como volumen o masa perdida en comparación con el tiempo de exposición [39]. El volumen perdido se determinó con un sistema de medición óptica 3D Alicona Infinite Focus SL, las huellas de desgaste fueron escaneadas y de esta manera se obtuvo el volumen de desgaste perdido en cada material. En la figura 67 se muestra la variación promedio del volumen perdido por erosión líquida en los materiales compuestos probados para un ángulo de impacto de 75°. Se observa que las fibras de vidrio y fibra de carbono presentan menor pérdida de volumen mientras que las fibras recubiertas tienen un volumen perdido muy alto. El recubrimiento gelcoat tiene menor dureza esto provoca que sea más vulnerable a la penetración de las partículas líquidas es por eso que presentan una mayor tasa de desgaste. El comportamiento mostrado en este gráfico muestra un caso de erosión frágil, ya que la pérdida de volumen aumenta linealmente con el tiempo, esto también se debe a la rugosidad dado que al aumentar la rugosidad también aumenta la tasa de desgaste.

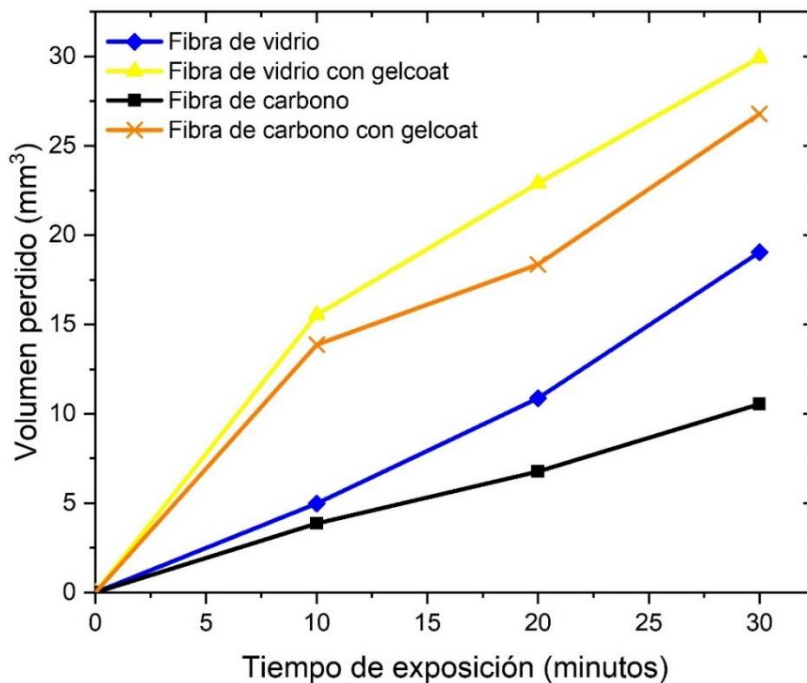


Figura 67. Volumen perdido, pruebas de erosión líquida con ángulo de impacto a 75°.

### 5.3.4 Perfilometría

A continuación, se muestran los perfiles de rugosidad que se obtuvieron en las superficies desgastadas donde se realizaron pruebas de erosión líquida con ángulo de impacto a 75°, las mediciones se determinaron con el sistema de medición óptico Alicona. En la figura 68a) se



muestra la perfilometría de las probetas con un tiempo de exposición de prueba de 10 min, podemos ver como los impactos de las partículas líquidas modifican las rugosidades de la superficie de los materiales. En la figura 68b) se muestra la perfilometria con tiempo de exposición de 20 min, los perfiles de rugosidad van cambiando de forma y de profundidad conforme aumenta el tiempo de exposición. En la figura 68c) los perfiles de rugosidad que se muestran son con un tiempo de exposición de 30 min, para este caso las profundidades son muy altas en materiales recubiertos con gelcoat. Para las tres pruebas, la fibra de vidrio presenta mayor profundidad de desgaste, esto se debe a que tiene una mayor rugosidad que la fibra de carbono, lo que provoca que las partículas penetren rápidamente la superficie del material.

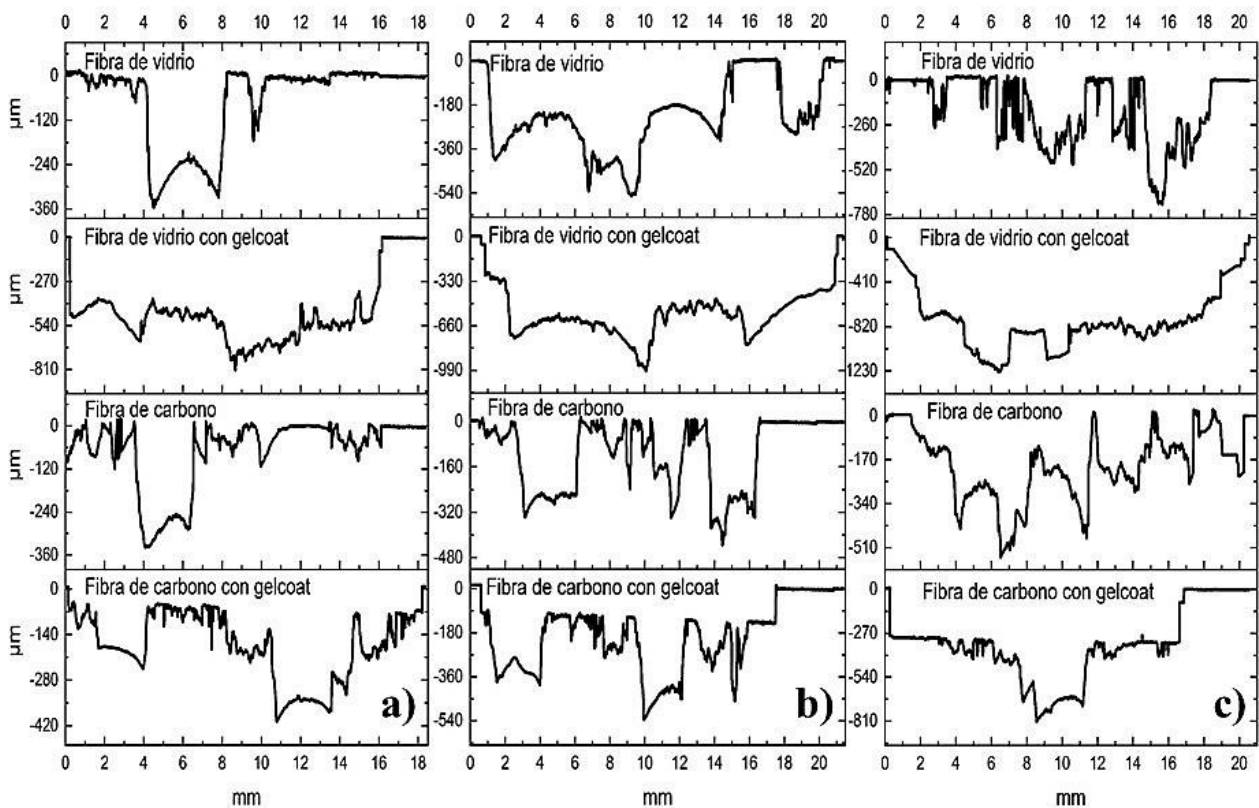


Figura 68. Perfilometría de probetas sometidas a erosión líquida con tiempo de exposición de: a) 10 min, b) 20 min y c) 30 min.

#### 5.4 Costo-beneficio del uso de fibra de carbono en palas de aerogeneradores

En este trabajo de investigación se realizaron pruebas experimentales de desgaste erosivo en materiales de fibra de carbono y fibra de vidrio, se encontró que la fibra de carbono presenta 3 veces más resistencia al desgaste erosivo que la fibra de vidrio, por esta razón se propone fabricar palas de aerogeneradores con una película protectora de fibra de carbono. Investigaciones recientes

mencionan que palas de aerogeneradores fabricadas con fibra de vidrio presentan daños de desgaste erosivo en el borde de ataque, aproximadamente en un año de operación, dichos estudios coinciden con el realizado en este trabajo. Si las palas se fabricaran de fibra de carbono, estas podrían presentar desgaste erosivo después de 3 años de operación, lo que significa menores gastos en el mantenimiento de las palas. Para determinar la viabilidad del uso de fibra de carbono en las palas de aerogeneradores se estimaron los costos de fabricación con ambos materiales. En la tabla 11 se muestran los precios unitarios de los materiales empleados en este estudio de investigación, para poder estimar el costo de fabricación de una pala de aerogenerador de fibra de vidrio y fibra de carbono de 5 m de longitud. La fibra de vidrio y gelcoat se cotizó en Poliformas Plásticas, la fibra de carbono en Quintum y la resina Epolam en AXSON MEXICO.

Tabla 11. Lista de materiales.

| Concepto                            | Unidad | Cantidad | Precio     |
|-------------------------------------|--------|----------|------------|
| Fibra de vidrio petatillo 600 gr/m2 | m      | 1        | \$ 75.00   |
| Fibra de carbono 620 gr/m2 12k      | m      | 1        | \$ 900.00  |
| Resina Epolam 2015                  | kg     | 5        | \$1,325.00 |
| Endurecedor Epolam 2015             | kg     | 1.6      | \$ 425.00  |
| Gel-Coat                            | kg     | 1        | \$ 114.00  |
| Catalizador para Gel-Coat           | pza    | 1        | \$ 10.50   |

Debido a que la fibra de carbono tiene un costo muy elevado en comparación con la fibra de vidrio, se pretende únicamente recubrir el borde de ataque de las palas de aerogeneradores con una protección de fibra de carbono. En la tabla 12 se muestra los costos de los diferentes materiales para la fabricación de palas de aerogeneradores, los costos mostrados únicamente contemplan la cantidad de fibra y la resina a utilizar. Como se puede observar el costo de una pala de fibra carbono es relativamente alto, pero posee mejores propiedades a la resistencia del desgaste erosivo de partículas sólidas y líquidas. Una pala totalmente hecha de fibra de carbono no es rentable, por ello se propone recubrir únicamente el borde de ataque de palas de aerogeneradores, el recubrimiento para el borde de ataque para una pala de 5 metros es de aproximadamente \$7,973, esta opción es más viable que fabricar toda la pala de fibra de carbono. Fabricar una pala de aerogenerador de material base de fibra de vidrio y protección en el borde de ataque con fibra de carbono es mucho más rentable, además proporciona la misma vida útil que fabricar toda la pala de fibra de carbono, ya que como se mencionó anteriormente el fenómeno erosivo únicamente se presenta en el borde de ataque de las palas.

Tabla 12. Estimación del costo de pala de aerogenerador y protección para el borde de ataque.

| Concepto   | Cantidad | Precio       |
|--|----------|--------------|
| Pala de fibra de vidrio  | 1        | \$ 20,890.00 |
| Pala de fibra de carbono   | 1        | \$ 58,954.00 |
| Protección de fibra de carbono para el borde de ataque                           | 1        | \$ 7,973.00  |
| Pala de fibra de vidrio con protección en el borde de ataque de fibra de carbono | 1        | \$ 28,863.00 |

En la figura 69 se muestra la protección de fibra de carbono en el borde de ataque de una pala de aerogenerador, esta protección ayudará a disminuir los mantenimientos no programados en las palas de aerogeneradores, además contribuirá a disminuir pérdidas en la eficiencia de generación de energía eléctrica.

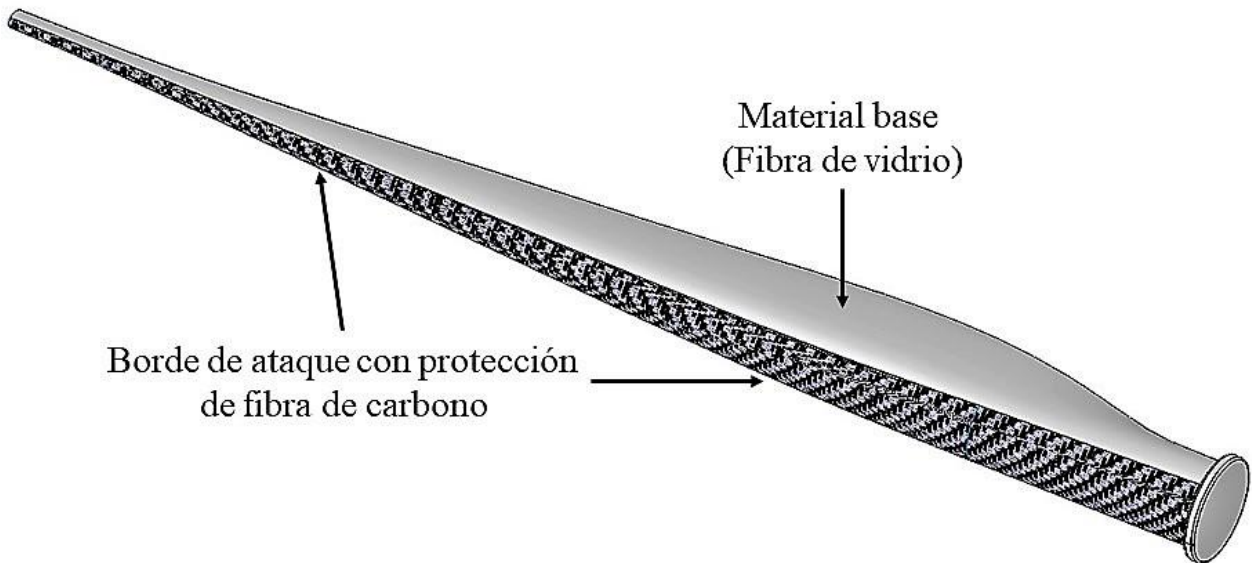


Figura 69. Pala de aerogenerador de fibra de vidrio, con protección de fibra de carbono en el borde de ataque.

## 6. Conclusiones

- Los resultados obtenidos muestran que las partículas erosivas de arena de mar causaron una mayor tasa de erosión en la fibra de vidrio con un ángulo de impacto a 90°.
- La rugosidad de la superficie de los materiales y el ángulo de impacto influyen fuertemente en la tasa de erosión.
- Las tasas de erosión por partículas sólidas obtenidas en fibra de carbono fueron aproximadamente 3 veces más bajas en comparación con fibra de vidrio.
- La tasa de erosión por partículas líquidas obtenida en fibra de carbono fue aproximadamente 2 veces más bajas en comparación con fibra de vidrio.
- El recubrimiento Gelcoat utilizado no ayudó a reducir el fenómeno del desgaste erosivo.
- Para las diferentes pruebas realizadas la fibra de carbono se mantuvo con menor masa perdida, por ello tiene mayor resistencia al desgaste erosivo de partículas sólidas de arena de mar y partículas líquidas, en comparación con la fibra de vidrio.
- Los mecanismos de desgaste identificados en este estudio fueron picaduras, acción de corte, deformación plástica, formación de cráteres y formación de grietas en las superficies erosionadas del material.
- Para las pruebas de erosión líquida los materiales presentan un comportamiento de erosión frágil, ya que el volumen perdido aumenta linealmente con el tiempo.
- El uso de fibra de carbono como material para la fabricación de palas de aerogeneradores en lugar de fibra de vidrio, puede ayudar a disminuir este fenómeno erosivo, aumentando la vida útil de las palas.
- Se cumplió con el objetivo de realizar un estudio del desgaste erosivo en materiales compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio, así como su caracterización conociendo y utilizando equipos como: Rugosímetros, Durometros, Microscopios ópticos y Microscopios Electrónicos de Barrido, trabajando conjuntamente con las instituciones dedicadas al estudio de materiales como el CENTA y el Departamento de Tribología de La Universidad de Sheffield UK.

### Trabajos futuros

- Realizar estudios de desgaste por erosión en materiales compuestos, cambiando la orientación de los tejidos de las fibras y el tipo de resina.
- Realizar pruebas de desgaste erosivo por partículas sólidas y líquidas en otros materiales compuestos como el Kevlar.

## 7. Bibliografía

- [1] SECRETARÍA DE ENERGÍA, «Prospectiva de energías renovables 2016 - 2030,» *SENER*, 2016.
- [2] N. Dalili, E. A. y R. Carriveau, «A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, p. 428–438, 2009.
- [3] H. Slot y et al, «Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models,» *Renewable Energy*, vol. xxx, pp. 1-12, 2015.
- [4] K. Gharali y D. A. Johnson, «Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall, erosion and high reduced frequencies,» *Applied Energy*, vol. 93, pp. 45-52, 2012.
- [5] A. Sareen, C. A. Sapre y S. M. Selig, «Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance,» *Wind Energy*, vol. 17, pp. 1531-1542, 2013.
- [6] M. Vite Torres, J. R. Laguna Camacho, R. Baldenebro Castillo, E. Gallardo Hernández, E. Vera Cárdenas y J. Vite Torres , «Study of solid particle erosion on AISI420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles,» *Wear*, vol. 301, pp. 383-389, 2013.
- [7] A. Castorrini, A. Corsini, F. Rispoli, P. Venturini, K. Takizawa y T. E. Tezduyar, «Computational analysis of wind-turbine blade rain erosion,» *Computers & fluids*, vol. 141, pp. 175-183, 2016.
- [8] M. Schramm, H. Rahimi, B. Stoevesandt y K. Tangager, «The Influence of Eroded Blades on Wind Turbine Performance Using Numerical Simulations,» *Energies*, vol. 10, pp. 114-118, 2017.
- [9] P. Xianqiang y F. Klaus, «Erosive wear properties of unidirectional carbon fiber reinforced PEEK composites,» *Tribology International*, vol. 55, pp. 135-140, 2012.
- [10] P. Amar, S. Alok, C. Navin, B. N.M. y B. Sandhyarani, «Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review,» *Wear*, vol. 268, pp. 249-263, 2010.
- [11] Z. Ling-yun, Z. Hui, P. Xiang-qiang, F. Klaus, E. Christian y Z. Zhong, «Erosive wear of transparent nanocomposite coatings,» *Tribology International*, vol. 61, p. 62 69, 2013.
- [12] A. Harsha y S. Kumar Jha, «Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence,» *Wear*, vol. 265, pp. 1129-1135, 2008.

- [13] N. G. Karsli, T. Yilmaz, A. Aytac y G. Ozkoc, «Investigation of erosive wear behavior and physical properties of SGF and/or calcite reinforced ABS/PA6 composites,» *Composites: Part B*, vol. 44, pp. 385-393, 2013.
- [14] A. Ghada, Z. Karina, M. Rakesh y A. Taimoor, «Effects of Sand Particle Size on the Performance Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine,» *Proceedings of the 6th International and 43rd National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, pp. 15-17, 2016.
- [15] D. Ajaz Ahmed, P. M. Rinu y Y. Chandra Sekher, «A multiple particle impact model for prediction of erosion in carbon-fiber reinforced composites,» *Wear*, vol. 406, pp. 185-193, 2018.
- [16] L. M. Jr., K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan y B. F. Sørensen, «Materials for Wind Turbine Blades: An Overview,» *Materials*, vol. 10, pp. 1-24, 2017.
- [17] M. Grundwürmer, O. Nuyken, M. Meyer, J. Wehr y N. Schupp, «Sol-gel derived erosion protection coatings against damage caused by liquid impact,» *Wear*, vol. 263, pp. 318-329, 2007.
- [18] L. Bartolome y T. Julie, «Prospective challenges in the experimentation of the rain erosion on the leading edge of wind turbine blades,» *Wind Energy*, p. DOI: 10.1002/we.2272, 2018.
- [19] A. O'Carrolla, M. Hardimana, E. Tobinb y T. Younga, «Correlation of the rain erosion performance of polymers to mechanical and surface properties measured using nanoindentation,» *Wear*, vol. 412, pp. 38-48, 2018.
- [20] H. Slot, R. IJzerman, M. I. Feber, K. Nord-Varhaug y E. v. d. Heide, «Rain erosion resistance of injection moulded and compression moulded polybutylene terephthalate PBT,» *Wear*, vol. 414, pp. 234-242, 2018.
- [21] S. Zhang, K. Dam-Johansen, S. Norkjaer, P. L. Bernad Jr. y K. Soren, «Erosion of wind turbine blade coatings – Design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation,» *Progress in Organic Coatings*, vol. 78, p. 103–115, 2015.
- [22] D. Dowson, *History of Tribology*, Longmas Group, 1979, p. 25.
- [23] R. Arnell y et al, *Tribology, Principles and Design Applications*, Macmillan Education LTD, U.K., 1991.
- [24] K. Ludema, *Friction Wear Lubrication: a Textbook in Tribology*, CRC Press, 1996.
- [25] A. Edward, *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, I. M. Hutchings, 1992.

- [26] Z. Martínez Arriero, Análisis del desgaste por erosión por impacto de partículas sólidas en recubrimientos de Carburo de Silicio (SiC) y Carbono Tipo Diamante (DLC) sobre sustratos de acero inoxidable (Tesis de Maestría), Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2015.
- [27] C. A. Valdez Camargo, Estudio experimental del fenomeno de erosión seca empleando particulas abrasivas de silica sobre aceros herramientales (Tesis de Maestría), Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2010.
- [28] A. M. Treviño Acevedo, Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma de Nuevo León, 2004.
- [29] A. Miravete, Materiales Compuestos, Barcelona: Reverté, 2012.
- [30] V. A. Gómez Culebro, Caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de autoclave, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Santiago de Querétaro, Qro., 2017.
- [31] V. H. Guerrero y et al, Nuevos Materiales, Aplicaciones estructurales e industriales, Quito, Ecuador: Imprefepp, 2011.
- [32] Z. Sun, J. Xiao, L. Tao, Y. Wei, S. Wang, H. Zhang y S. Zhu, «Preparation of High-Performance Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Compression Resin Transfer Molding,» *Materials*, vol. 12, pp. 1-13, 2018.
- [33] ASTM D 2583-95, Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor, Annual Book of ASTM Standards, vol. 08.01, Philadelphia, 2001.
- [34] ASTM Standard G76-95, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets<sup>1</sup>, Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02, Philadelphia, 1995, pp. 321-325.
- [35] E. Valaker, S. Armada y S. Wilson, «Droplet Erosion Protection Coatings for Offshore Wind Turbine Blades,» *Energy Procedia*, vol. 80, pp. 263-275, 2015.
- [36] N. Fujisawa, S. Takano, K. Fujisawa y T. Yamagata, «Experiments on liquid droplet impingement erosion on a rough surface,» *Wear*, vol. 398, pp. 158-164, 2018.
- [37] C. Jinhu, T. James A., T. D. B. Michael S.A., R. Sameer S. y K. Krzysztof K.K., «Aligned carbon nanotube reinforced high performance polymer composites with low erosive wear,» *Composites: Part A*, vol. 67, pp. 86-95, 2014.

- [38] N. Mohan, S. Natarajan, S. P. Kumaresh Babu, S. Siddaramaiah y J. Hee Lee, «Studies on Erosive Wear Behavior of UHMWPE-Filled Aramid–Epoxy Hybrid Composites,» *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, pp. 430-435, 2012.
- [39] ASTM G73-98, Standard Practice for Liquid Impingement Erosion Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.
- [40] S. Zhang, K. Dam-Johansen, P. L. Bernad Jr y S. Kiil, «Rain erosion of wind turbine blade coatings using discrete water jets: Effects of water cushioning ,substrate geometry, impact distance, and coating properties,» *Wear*, vol. 328, pp. 140-148, 2015.
- [41] ASTM G73-10, ASTM G73-10(2017), Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [42] S. Rao K, Y. S. Varadarajan y N. Rajendra, «Erosive wear behaviour of carbon fiber-reinforced epoxy composite,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, pp. 2975-2983, 2015.
- [43] L. Guangchao, Z. Na, H. Ming, S. Changyu y J. K. T. Castro, «The remarkably enhanced particle erosion resistance and toughness properties of glass fiber/epoxy composites via thermoplastic polyurethane nonwoven fabric,» *Polymer Testing*, vol. 69, pp. 470-477, 2018.
- [44] S. Nejat y S. Tamer, «Erosive wear behaviour of carbon fibre/polyetherimide composites under low particle speed,» *Materials and Design*, vol. 28, pp. 351-355, 2007.
- [45] A. Khoddamzadeh, R. Liu, M. Liang y Q. Yang, «Novel wear-resistant materials – Carbon fiber reinforced low-carbon Stellite alloy composites,» *Composites: Part A*, vol. 43, pp. 344-352, 2012.
- [46] H. Pihtili, «An experimental investigation of wear of glass fibre–epoxy resin and glass fibre–polyester resin composite materials,» *European Polymer Journal*, vol. 45, pp. 149-154, 2009.