



EFECTO DEL AGUA SALINA EN EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DE VIDRIO, CARBONO Y ARAMIDA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTA:

ING. ABEL ESLAVA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDGAR ERNESTO VERA CÁRDENAS

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. JULIO ALEJANDRO RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

SINODAL:
DR. ARMANDO IRVIN MARTÍNEZ PÉREZ

Pachuca de Soto, Hgo. diciembre de 2023

89 páginas





Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca, Hidalgo, **13/DICIEMBRE/2023**
OFICIO No. DEPI-00234-23

**C. ING. ABEL ESLAVA HERNÁNDEZ
PRESENTE**

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

Efecto del agua salina en el comportamiento
tribológico de materiales compuestos reforzados con
fibras de vidrio, carbono y aramida

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

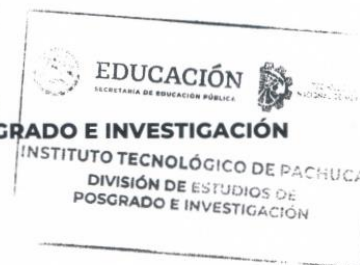
Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

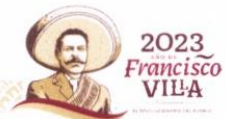
*Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®*


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

C.p. Archivo
ECGO/LMPP



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





Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica ACTA





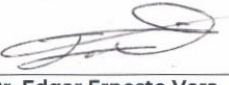
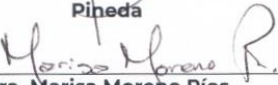

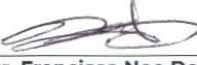

Siendo las 13:00 horas del 17 de febrero de 2023, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Efecto del agua salina en el comportamiento tribológico de materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio, carbono y aramida*, con el siguiente contenido:

- I Introducción
- II Antecedentes
- III Marco teórico
- IV Metodología experimental
- V Resultados y discusión
- VI Conclusiones
- Bibliografía

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Abel Eslava Hernández obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Édgar Ernesto Vera Cárdenas y la co-dirección del Dr. Julio Alejandro Rodríguez González.

ATENTAMENTE

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

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



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



Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Pachuca por permitirme continuar con mi proyecto de vida cursando el posgrado.

A mi director de tesis, Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas, por la flexibilidad, orientación y atención que en todo momento me ha brindado.

A mi codirector de tesis, Dr. Julio Alejandro Rodríguez González, por la atención, capacitación y asesorías brindadas.

A mi sinodal de tesis, Dr. Armando Irvin Martínez Pérez, por la orientación, atención, capacitación y asesoría brindada.

Al TecNM por el financiamiento del proyecto número 18015.23-P de la Convocatoria: Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2023

Al CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología) por la beca otorgada para el desarrollo de los estudios de maestría que dieron el origen de esta investigación.

A CIDESI (Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial) por el apoyo en la realización de pruebas realizadas para la realización de esta investigación.

A todos y cada uno de los docentes del consejo de posgrado en quienes siempre encontré apoyo en algún tema en particular.

A mis compañeros de maestría con quienes disfrute de muchos momentos agradables a pesar de la diferencia de edades.

Al ITESA (Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo), por la flexibilidad otorgada.

A mi esposa e hijos por su apoyo y paciencia incondicional durante todo el tiempo.

A mi madre y hermanos por el apoyo y confianza.

Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos del efecto del agua salina en las propiedades tribológicas de diferentes materiales compuestos laminados reforzados con fibras de ingeniería. El trabajo se dividió en dos fases; en la primera, se utilizaron materiales compuestos laminados de matriz epóxica reforzados con fibras individuales de vidrio, carbono e híbrida (carbono con Kevlar®), adicionando en su superficie dos capas de fibra de Kevlar®, en la segunda, se utilizaron materiales a base de resinas poliméricas reforzadas con fibras de vidrio unidireccional adicionando en su superficie telas de fibra de vidrio marina y de Kevlar®, en diferentes resinas: Epóxica, Viniléster e híbrida (Epóxica con Viniléster). La manufactura de los compuestos laminados se llevó a cabo por el proceso de infusión de resina asistida por vacío, los especímenes obtenidos fueron expuestos a un proceso de envejecimiento acelerado en agua salina durante 1122 h en la primera fase y 1176 h en la segunda fase todas hasta el punto de saturación en ambos casos que simula las condiciones de agua de mar. En la realización de la prueba de desgaste erosivo se consideró 4.5 bar de presión, ángulo de impacto a 90°, velocidad de impacto de 4.8 m/s (primera fase) y 5.8 m/s (segunda fase), como partícula sólida de impacto se utilizó arena de mar de las costas de Oaxaca. Los resultados obtenidos demuestran que los materiales envejecidos absorben mayor energía de impacto con respecto a los materiales no envejecidos, provocando en ellos menor pérdida de masa, menor profundidad en la huella de desgaste, menor dureza y mayor rugosidad debido a la plasticidad de la matriz. De los resultados obtenidos se concluye que los compuestos envejecidos al ser afectados por la absorción de humedad provocan que estos se plastifiquen dando lugar a que absorban mayor energía de impacto y por consiguiente se refleje en una menor pérdida de masa.

Palabras clave: Materiales compuestos, fibra de vidrio, carbono, Kevlar® y envejecimiento.

Abstract

This paper shows the results obtained from the effect of saline water on the tribological properties of different laminated composite materials reinforced with engineering fibers. The work was divided into two phases; in the first, laminated composite materials reinforced with an epoxy matrix reinforced with individual glass, carbon and hybrid fibers (carbon with Kevlar®) were used, adding two layers of Kevlar® fiber to its surface; In the second, materials based on of polymer resins reinforced with unidirectional glass fibers by adding marine fiberglass and Kevlar® fabrics to their surface, in different resins: Epoxy, Vinylester and hybrid (Epoxy with Vinylester). The manufacturing of the laminated composites was carried out by the vacuum-assisted resin infusion process, the specimens obtained were exposed to an accelerated aging process in saline water for 1122 h in the first phase and 1176 h in the second phase. When carrying out the erosive wear test, 4.5 bar pressure, impact angle at 90°, impact speed of 4.8 m/s (first phase) and 5.8 m/s (second phase) were considered as a solid impact particle. Sea sand from the coasts of Oaxaca was used. The results obtained demonstrate that aged materials absorb greater impact energy with respect to non-aged materials, causing less mass loss, less depth in the wear mark, less hardness and greater roughness due to the plasticity of the matrix. From the results obtained it is concluded that aged compounds, when affected by moisture absorption, cause them to plasticize, resulting is them absorbing greater impact energy and consequently reflecting a lower mass loss.

Keywords: composite materials, fiberglass, carbon, Kevlar® and aging.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen.....	IV
Abstract	V
Contenido.....	VI
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas.....	IX
Lista de abreviaturas	X
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Objetivos	3
2. Antecedentes	4
3. Marco teórico.....	11
3.1 Fundamentos de tribología.....	11
3.2 Tipos de desgaste.....	11
3.3 Desgaste erosivo	12
3.4 Medición del desgaste	12
3.5 Erosión por partículas sólidas.....	13
3.6 Propiedades de las partículas.....	13
3.7 Materiales compuestos.....	13
3.8 Fibras (refuerzo).....	15
3.9 Resinas (Matriz).....	16
3.10 Manufactura de materiales compuestos	17
3.11 Proceso de envejecimiento	19
4. Desarrollo experimental.....	20
4.1 Introducción	20
4.2 Fabricación de materiales compuestos.....	21
4.3 Obtención de especímenes.....	23

4.4	Proceso de envejecimiento	28
4.5	Determinación del porcentaje de humedad	29
4.6	Caracterización de probetas	30
4.6.1	Medición de rugosidad superficial	30
4.6.2	Medición de dureza Shore D	31
4.6.3	Ensayo de desgaste erosivo	31
4.6.4	Medición de huella de desgaste (perfilometría)	35
4.6.5	Microscopia óptica y SEM	36
4.6.6	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	38
4.7	Caracterización de la partícula sólida.....	38
5.	Resultados y discusión	39
5.1	Distribución de tamaño de partícula erosiva	40
5.2	FASE 1 Compuestos laminados reforzados con fibra de vidrio, carbono y Kevlar®	41
5.2.1	Análisis de % de absorción de humedad.....	41
5.2.2	Rugosidad	42
5.2.3	Dureza Shore D.....	44
5.2.4	Pérdida de masa	45
5.2.5	Perfilometría (medición de huellas de desgaste).....	47
5.2.6	Análisis por microscopia óptica.....	49
5.2.7	Análisis por microscopia SEM.....	49
5.2.8	Análisis por espectroscopia infrarroja.....	51
5.3	FASE 2 Compuestos laminados reforzados con fibra de vidrio marina y Kevlar®	53
5.3.1	Análisis de % de absorción de humedad.....	53
5.3.2	Rugosidad	55
5.3.3	Dureza Shore D.....	56
5.3.4	Pérdida de masa	57
5.3.5	Perfilometría (medición de huellas de desgaste).....	59
5.3.6	Análisis por microscopia óptica.....	60
5.3.7	Análisis por microscopia SEM.....	62
5.3.8	Análisis por espectroscopia infrarroja.....	65
6.-	Conclusiones	67
7.-	Bibliografía	69
ANEXO 1.	Artículo: XXVIII CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM	75

ANEXO 2. Constancia: XXVIII CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM	76
ANEXO 3. Artículo: XXIX CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM	77
ANEXO 4. Constancia: XXIX CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM	78

Lista de figuras

Figura 1. Desgaste erosivo [23].....	12
Figura 2. Material compuesto. [26].....	14
Figura 3. Clasificación de materiales compuestos. [28].....	15
Figura 4. Fibras de carbono, aramida y vidrio. [30].....	16
Figura 5. Procesos de manufactura. [34].....	18
Figura 6. Clasificación de los materiales compuestos según su tipología [35]	19
Figura 7. Metodología experimental.	21
Figura 8. Tejidos de fibra: a) Fibra de carbono, b) fibra de vidrio y c) fibra de Kevlar® [39].	22
Figura 9. Arreglo de fibras. a) Fibra de vidrio, b) Fibra de carbono y c) fibra híbrida.	22
Figura 10 Tejidos de fibra de vidrio marina y Kevlar® [39].	23
Figura 11. Compuestos laminados reforzados en su superficie. a) Con fibra de vidrio marina, b) Con fibra de Kevlar®.	23
Figura 12. a) Molde metálico, b) Fibra de vidrio y c) Fibra de Kevlar®.	24
Figura 13. a) Tela antiadherente, b) Malla de distribución y c) tubos de alimentación de resina.	24
Figura 14.a) Bolsa de vacío, b) cinta de poliuretano y c) aplicación de vacío.	25
Figura 15. a) Bomba de vacío, b) trampa de resina y c) Curado de laminado.	25
Figura 16. Esquema de infusión al vacío con el arreglo de fibras.....	26
Figura 17. Especímenes de compuestos laminados: a) PRFV-K, b) PRFH-K,.....	27
Figura 18. Dimensiones de espécimen en porta muestras.....	27
Figura 19. Espesor de materiales compuestos: a) PRFC-K, b) PRFH-K y c) PRFV-K.....	28
Figura 20. Equipo de envejecimiento: a) Probetas inmersas en agua salina y b) Cámara salina a 70°C.	29
Figura 21. a) Horno de secado y b) balanza analítica.	29
Figura 22. Rugosímetro.....	30
Figura 23. Durómetro para dureza Shore D.	31
Figura 24. Baño termostático.	31
Figura 25. Esquema de proceso de erosión.	32
Figura 26. a) Vista general, b) Contenedor de arena y c) espécimen en el portamuestras.	33
Figura 27. Plataforma para pruebas de erosión por partículas sólidas. a) Cámara de erosión, b) alimentación de arena, c) compresor, d) recuperación de arena, e) tolva, f) alimentación de arena, g) válvula de aire, h) porta espécimen, i) espécimen, j) tubería de flujo, k) controlador de temperatura, l) tubería de flujo de aire.....	34
Figura 28. a) anemómetro b) distancia de boquilla a la muestra y c) ángulo de impacto.	35
Figura 29. Perfilómetro	36
Figura 30. Perfil de huella de desgaste.....	36
Figura 31. Estereoscopio.....	37
Figura 32. Microscopio Electrónico de barrido.....	37
Figura 33. Espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).....	38

Figura 34. Arena de mar.....	39
Figura 35. Diámetros de partículas erosivas.	40
Figura 36. Distribución del tamaño de partículas erosivas.	41
Figura 37. Gráfica de % de absorción de humedad en función del tiempo.....	42
Figura 38. Gráfica de rugosidad.....	43
Figura 39. Gráfica de dureza Shore D.....	45
Figura 40. Gráfica de pérdida de masa.....	46
Figura 41. Pérdida de masa total.	47
Figura 42. Perfilometría en muestras base y muestras envejecidas.....	48
Figura 43. Huella de desgaste en especímenes con refuerzo de Fibra de Kevlar.....	49
Figura 44. Observación con microscopio electrónico de barrido: a) PRFH-K no envejecido, b) PRFH-K envejecido.	50
Figura 45. Observación MEB en Fibra: a) PRFH-K no envejecido y b) PRFH-K envejecida.	50
Figura 46. Observación MEB en Matriz: a) PRFH-K no envejecido y b) PRFH-K envejecida.	51
Figura 47. Espectrografía infrarroja de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos: a) PRFC-K, b) PRFH-K y c) PRFV-K.	52
Figura 48. Gráfica de % de absorción de humedad.....	54
Figura 49. Gráfica de rugosidad.....	55
Figura 50. Gráfica de dureza Shore D.....	57
Figura 51. Gráfica de pérdida de masa.....	58
Figura 52. Pérdida de masa total.	58
Figura 53. Perfilometría en muestras base y muestras envejecidas.....	59
Figura 54. Huella de desgaste en especímenes con refuerzo de Fibra de Kevlar.....	60
Figura 55. Huella de desgaste en especímenes con refuerzo de Fibra marina de vidrio.	61
Figura 56. Observación con microscopio electrónico de barrido. Especímenes NO envejecidos.	63
Figura 57. Observación con microscopio electrónico de barrido. Especímenes envejecidos.	64
Figura 58. Espectrografía infrarroja de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos: a) EFK, b) EFVM, c) VFK, d) VFVM, d) HFK y e) HFVM.....	65

Lista de tablas

Tabla 1. Nomenclatura de materiales compuestos	26
Tabla 2. Rugosidad en especímenes de FASE 1	43
Tabla 3. Dureza Shore D en especímenes FASE 1.	44
Tabla 4. Masa perdida promedio de especímenes FASE 1.	46
Tabla 5. Resumen de resultados de pruebas realizadas.....	53
Tabla 6. Rugosidad en especímenes de FASE 2	55
Tabla 7. Dureza Shore D en especímenes FASE 2.	56
Tabla 8. Masa perdida promedio de especímenes FASE 2.	58
Tabla 9. Resumen de resultados de pruebas realizadas.....	66

Lista de abreviaturas

ITP	Instituto Tecnológico de Pachuca
CONAHCYT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología
CIDESI	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
CINVESTAV	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
PRFV	Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio
PRFV-K	Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio-Kevlar®
PRFC-K	Polímero Reforzado con Fibra de Carbono-Kevlar®
PRFH-K	Polímero Reforzado con Fibra Híbrida (Fibra de Carbono-Fibra de Kevlar®)-Kevlar®
EFVM	Resina Epóxica con Fibra de Vidrio Marina
EFK	Resina Epóxica con Fibra de Kevlar®
VFVM	Resina Viniléster con Fibra de Vidrio Marina
VFK	Resina Viniléster con Fibra de Kevlar®
HFVM	Resina Híbrida (Resina Epóxica con Resina Viniléster) con Fibra de Vidrio Marina
HFK	Resina Híbrida (Resina Epóxica y Resina Viniléster) con Fibra de Kevlar®
ASTM	American Society for Testing and Materials
LCD	Liquid Cristal Display
EPS	Erosion por Partículas Sólidas
SEM	Scanning Electron Microscope
FTIR	Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier
SD	Desviación estándar

1. Introducción

El presente trabajo se realiza con el apoyo del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) en donde se fabricaron los materiales compuestos laminados y se realizó la observación por microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés); así como, también del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), en donde se realizó la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Con el uso de los materiales compuestos laminados, como los polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) que ofrecen mejores ventajas con respecto a materiales tradicionales como el acero, aluminio y madera [1], en sus propiedades mecánicas y físicas tales como: rigidez, resistencia mecánica, baja densidad y mayor durabilidad, han convertido a los PRFV en una de las mejores opciones de materiales compuestos reforzados con fibras para propósitos de diseño de componentes estructurales marinos como botes, barcos, plataformas marinas, entre ellos álabes de turbinas eólicas e hidrocínéticas. Sin embargo, cuando estos materiales son expuestos a severas condiciones ambientales y climáticas tales como elevada humedad, cambios en la temperatura (alta o baja), radiación ultravioleta, lluvia y envejecimiento por agua de mar, sus propiedades mecánicas son severamente afectadas [2]. Debido a que no hay demasiada información técnica disponible del desempeño del uso de fibra de Kevlar® como refuerzo superficial en la fabricación de alabes para turbinas hidrocínéticas como materiales resistentes al desgaste por erosión, se realiza este trabajo de investigación con la finalidad de comprender el efecto del desgaste erosivo que se presenta en este material. En este estudio se utilizaron materiales compuestos en condiciones envejecidas (expuestas al agua salina) y no envejecidas (no expuestas al agua salina); en la primera fase se realizaron pruebas de desgaste erosivo en compuestos laminados con fibras individuales de vidrio, carbono e híbrida (carbono con Kevlar®), reforzadas en su superficie con fibra de Kevlar® en resina Epóxica; en la segunda fase, se utilizó compuestos laminados con fibras de vidrio unidireccional reforzadas en su superficie con telas de fibras individuales de tela marina (fibra de vidrio) y de Kevlar® 49, en diferentes resinas: Epolam, Viniléster e híbrida (Epolam con Viniléster). En el proceso de envejecimiento este se llevó a los especímenes de prueba hasta el punto de saturación a 1125 h y 1176 para ambas fases. En la realización de la prueba de desgaste erosivo se consideró 4.5 bar de presión, ángulo de impacto a 90°, velocidad de impacto de 4.8 m/s (primera fase) y 5.8 m/s (segunda fase), como partícula sólida de impacto se utilizó arena de mar de las costas de Oaxaca. Las pruebas realizadas en los

especímenes descritos fueron: medición de rugosidad promedio (Ra), ensayo de dureza Shore D, prueba de erosión, medición de masa perdida a diferentes tiempos (0, 4, 8 y 12 min.), medición de huella de desgaste (perfilometría), observación microscópica (SEM) y análisis por espectrografía infrarroja (FTIR).

1.1 Planteamiento del problema

Los materiales compuestos laminados tales como los fabricados a base de fibras de carbono y fibras de vidrio, que son utilizados en la fabricación de álabes de aerogeneradores instalados principalmente en zonas marítimas, cuando son expuestos a condiciones ambientales severas como alta humedad, altas o bajas temperaturas, radiación ultravioleta, lluvia y envejecimiento por agua de mar; además, donde el impacto agresivo y continuo de la arena sobre la superficie de los alabes provoca erosión y desgaste de los mismos, reflejándose como pérdida de masa en los alabes modificando la geometría de diseño original y disminuyendo la eficiencia de las máquinas hidrocinéticas [3].

1.2 Justificación

El estudio de materiales compuestos reforzados con fibras expuestos en ambientes salinos permite la propuesta de estudiar los efectos que provoca este medio agresivo en estos materiales. La propuesta de utilizar materiales compuestos laminados reforzados con fibra Kevlar® en su superficie pretende analizar las propiedades mecánicas y tribológicas que permitan tener un parámetro diferente a los materiales conocidos actualmente. La incorporación de la capa superficial de recubrimiento de Kevlar® resulta ser algo innovador sobre la manufactura y fabricación de componentes tales como álabes de turbinas hidrocinéticas. El tratamiento de envejecimiento acelerado en agua salina y la utilización de arena de arena de mar como partícula sólida simularán el ambiente salino y el impacto natural por los oleajes o corrientes de agua de mar respectivamente. Los resultados encontrados podrán ser utilizados para la fabricación de álabes de turbina hidrocinéticas lo cual contribuirá en el desarrollo tecnológico para una fuente de energía alterna, esto permitirá mitigar los efectos medioambientales por el uso de fuentes a base de fósiles como son el petróleo y gas natural.

1.3 Hipótesis

La incorporación de capas de fibra de Kevlar® como recubrimiento en la superficie externa de materiales compuestos durante su manufactura mejorará sus propiedades tribológicas y preservará sus propiedades mecánicas protegiendo a la matriz del compuesto laminado cuando estos materiales estén sujetos a ambientes marinos como el agua de mar.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto del desgaste erosivo en materiales compuestos laminados reforzados con fibras, envejecidos y no envejecidos en agua salina, en sus propiedades tribológicas; reforzadas superficialmente con fibra de Kevlar® y fibra de vidrio marina en diferentes matrices utilizando resina Epolam 2015, Viniléster e híbrida, mediante análisis y caracterización experimental.

Objetivos específicos

1. Diseñar y fabricar materiales compuestos laminados reforzados utilizando fibra de Kevlar®, fibra de vidrio y fibra híbrida (fibra de carbono con fibra de Kevlar®) en resina Epolam 2015.
2. Diseñar y fabricar materiales compuestos laminados reforzados utilizando fibra de Kevlar®, fibra de vidrio marina en diferentes resinas; resina Epolam 2015, Viniléster y resina híbrida (resina Epolam 2015 con resina Viniléster).
3. Desarrollar la metodología experimental de la prueba de desgaste erosivo a diferentes tiempos de exposición al flujo de arena de los materiales compuestos laminados reforzados.
4. Caracterizar los materiales compuestos laminados envejecidos y no envejecidos mediante rugosidad superficial (Ra), dureza (Shore D), SEM y FTIR.
5. Identificar los tipos de mecanismos de desgaste por erosión en los materiales compuestos laminados y determinar la tasa de desgaste por erosión por masa pérdida.

2. Antecedentes

A continuación, se presenta una revisión bibliográfica sobre investigaciones anteriormente realizadas que tiene relación con el tema en cuestión. Se realizaron consultas de artículos científicos relacionados al desgaste erosivo y aplicaciones de fibras de vidrio, carbono y Kevlar®, tesis y algunos textos de libros sobre tribología y materiales compuestos.

F. Rubino et al. (2020) en su revisión de “Marine application of fiber reinforced composites: A review”, menciona que las hélices de los barcos y submarinos suelen estar fabricados con una aleación de níquel-aluminio-bronce, debido a su excelente resistencia a la corrosión y alto límite elástico; por otro lado, la fabricación de palas de hélices en esa aleación es costosa debido a su forma compleja y no se resuelven algunos problemas relacionados con las malas propiedades de amortiguación acústica que conducen a un ruido de vibración excesivo. Estas limitaciones motivaron a los ingenieros navales a evaluar la viabilidad de materiales alternativos a las aleaciones de níquel-aluminio-bronce para fabricar palas, siendo el acero inoxidable, las aleaciones de titanio y los polímeros reforzados con fibra de vidrio (PFRV) los candidatos más destacados. Las primeras hélices compuestas, de hasta 2 metros de longitud, se probaron en barcos de pesca soviéticos durante la década de 1960, luego se introdujeron en grandes barcos comerciales a principios de la década de 1970, alcanzando diámetros de aproximadamente 6 metros. Las hélices compuestas dieron rendimientos similares a los del metal en términos de velocidad de navegación, consumo de combustible, carga de trabajo motor y ciclos de vida. Además, redujeron la amplitud de las vibraciones de resonancia en el motor y el eje de transmisión en aproximadamente un 25%, con la consiguiente reducción de las vibraciones y el ruido en el casco. Por otro lado, las hélices compuestas presentan mayor costo de fabricación, grandes desviaciones de la punta de la pala y menor resistencia al impacto que las fabricadas por la aleación de níquel-aluminio-bronce [1]. Trujillo et al. (2021) hacen referencia en su publicación “Proceso de fabricación de un álabe de turbina hidrocínética de material compuesto reforzado con fibras mediante moldeo por transferencia de resina” sobre los polímeros reforzados con fibra de vidrio que debido a sus elevadas propiedades mecánicas como resistencia y rigidez, baja densidad y gran durabilidad, los han convertido en una de las mejores opciones de materiales compuestos reforzados con fibras para propósitos de diseño de componentes estructurales marinos como botes, barcos, plataformas,

alabes de turbinas entre otras [2]. J.C.M. Mendoza (2019) en su tesis de maestría “Estudio experimental del desgaste erosivo en materiales compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio” menciona que una de las variables críticas 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, hasta hace poco era suficiente diseñar palas eólicas con un perfil aerodinámico deseable y de estructura liviana. Sin embargo, con la expansión de la infraestructura eólica, un número cada vez mayor de aerogeneradores se instala en zonas climáticas distintas, como ambientes helados, regiones húmedas y ambientes con vientos agresivos cargados de arena. En lo referente 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 al adelgazamiento del material, bordes irregulares y deterioro del mismo [3]. En los estudios realizados por E. Asmatulu et al. (2013) en su estudio “Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept” definen a los compuestos como una combinación de dos o más materiales (matriz y refuerzo), para crear un nuevo material de ingeniería. En la actualidad, los materiales compuestos son importantes en la ingeniería debido a su mayor resistencia, rigidez y resistencia a la corrosión; así como, un menor peso. Aunque la vida útil de estos materiales en diversas aplicaciones en promedio es de 15 a 20 años, generalmente estos materiales a menudo mantienen sus propiedades físicas más allá de ese tiempo [4]. A.G.C. Muciño et al. (2021) en sus investigaciones desarrollaron materiales de compuestos de matriz polimérica por medio de infusión al vacío basados en fibras de vidrio carbono y carbono Kevlar® con la intención de crear un material útil para proteger los bordes de ataque de las alas de los aviones del desgaste erosivo con un costo inferior al que representa la fabricación únicamente con fibras de Kevlar® como refuerzo en una matriz polimérica, concluyendo que el compuesto con mayor tenacidad fue el material híbrido de fibra de Kevlar® con fibra de vidrio [5]. En otros estudios reportados por E. O. A. Dávila et al. (2020) “Characterization Microstructural of Kevlar®-based Composites Obtained by Vacuum Infusion Process” mencionan que además de los tipos de fibra y matriz utilizados en la fabricación de compuestos de fibras de vidrio, carbono y carbono Kevlar® que son parámetros muy importantes para obtener altos valores de propiedades mecánicas y dependiendo del proceso de fabricación es posible lograr que los valores de propiedades macroscópicas en el compuesto, puedan estar cerca de estas propiedades ideales del material en una escala microscópica ya que a mayor tamaño del

material compuesto aumenta la posibilidad de generar imperfecciones o impurezas que modifiquen las características del material a granel, lo que internamente afectaría a los valores de resistencia mecánica y rigidez en el material [6]. En lo reportado por R. A. Chowdhury et. al. (2014) su artículo “Self-healing epoxy composites: preparation, characterization and healing performance” mencionan que el daño por impacto a baja velocidad es común en los compuestos reforzados con fibra lo que conduce a microfisuras interfaciales donde el daño microscópico es invisible. Propusieron la utilización de microcápsulas de urea-formaldehído que contienen un sistema de resina epoxi de curado a temperatura ambiente, con la esperanza de extender la vida útil de estos materiales compuestos en su uso de aplicaciones estructurales. La fabricación del compuesto se logró con éxito a través de la disposición manual seguida de moldeo con bolsa de vacío. La técnica de fabricación adecuada confirmó la protección de las microcápsulas en el material compuesto reforzado con la fibra. La prueba de impacto a baja velocidad con cargas de impacto confirmó la delaminación, las microfisuras en los materiales compuestos, la curación posterior y la autorrecuperación observada en términos de reducción de área dañada y restauración de las propiedades mecánicas [7]. En la información presentada por R. A. Singh et al (2016) en el artículo “Wear and Friction of Advanced Composites” mencionan que los compuestos son materiales bifásicos que tienen refuerzos duros y rígidos incorporados en matrices metálicas o cerámicas, los compuestos tienen propiedades mecánicas superiores que contribuyen a la mejora en su rendimiento tribológico con propiedades mejoradas de fricción y desgaste. El desgaste está determinado por mecanismos de desgaste operativos subyacentes. La fricción de los materiales compuestos puede o no seguir una dependencia similar de los parámetros aplicados de velocidades y cargas como la del desgaste y concluyen que el desgaste de los compuestos es proporcional a la dureza, la incorporación de nanocompuestos exhiben una propiedad de fricción más baja; así como, la formación de tribopelículas que promueven la capacidad de autorrecuperación; así como, los mecanismos de desgaste dominantes en los compuestos son la delaminación y la oxidación [8]. C. H. Shen y G. S. Springer (1976) en su investigación “Efectos de la humedad y la temperatura en la resistencia a la tracción de los materiales compuestos” mencionan que las propiedades mecánicas pueden verse afectadas cuando el material se expone a entornos de alta temperatura y humedad por lo tanto para utilizar todo el potencial de los materiales compuestos es necesario conocer su comportamiento a temperaturas elevadas y con altos contenidos de humedad, investigaron los cambios en la resistencia a la tracción de materiales expuestos al aire en la que la

humedad relativa variaba de 0 a 100 por ciento y la temperatura oscilaba entre los 200 K y los 4000 K, concluyendo que tanto la temperatura como la humedad afectan significativamente la resistencia a la tracción [9]. En sus investigaciones Y. Menail et al. (2009) “The effects of water aging on the mechanical properties of glass-fiber and Kevlar®-fiber epoxy composite materials” mencionan que, a pesar de la escasez de datos sobre el uso a largo plazo de estos materiales, no se puede probar su uso exitoso y la razón principal puede ser su durabilidad, ya que la durabilidad de los materiales compuestos depende directamente de las propiedades de los elementos estructurales individuales. El ambiente húmedo que actúa a largo plazo sobre estos materiales caracterizando sus propiedades físico-químicas como, la temperatura, la composición, etc., su acción agresiva aparece bajo varios aspectos de propiedades biológicas químicas, físicas y mecánicas al alterar los materiales provocando una falla en alguna de las características mecánicas con el tiempo. Las interacciones agua-polímero y la distribución del agua en las estructuras compuestas, así como, la acción mecánica y daño de la estructura son los factores más críticos de la degradación de los compuestos y se introduce como un fenómeno de plastificación o envejecimiento físico como resultado de la distribución del agua en la matriz polimérica a nivel de la interfaz fibra matriz el fenómeno de hidrólisis o envejecimiento químico tiene lugar a nivel de cadenas micromoleculares generando eventualmente daños por fisuración osmótica. El objetivo que se buscó fue el de estimar los efectos del agua del grifo sobre el comportamiento de dos materiales compuestos por resina epoxi con fibra de vidrio y con fibra de Kevlar®; así mismo en este estudio también se analizan los efectos de estos materiales en el comportamiento de la fatiga y el envejecimiento en el agua del grifo por tiempo de inmersión hasta 1000 horas. Los dos materiales estudiados (fibras de vidrio y laminados de fibras de Kevlar®) presentan similitudes en el comportamiento a la fatiga, pero difieren en la resistencia a la tracción [10]. En sus estudios C. S. de la Rosa et al. (2017) “Erosion-corrosion of X-52 steel pipe under turbulent swirling impinging jets” realizaron ensayos de erosión corrosión en chorros de agua sin remolino y con remolino girando débilmente hasta alcanzar la rotura del vórtice, velocidad de flujo a 3.2 m/s, medio corrosivo de agua destilada con 2 g/l de NaCl y partículas abrasivas de óxido de aluminio suspendida en solución. El fenómeno de erosión-corrosión causa desgaste cuando las partículas abrasivas están presentes en una solución líquida, por ejemplo, agua, causada por el movimiento relativo de los sólidos con respecto a la superficie, tal desgaste es más frecuente cuando el fluido se ve obligado a cambiar de dirección o donde se producen altas tensiones de cizallamiento. Básicamente, las partículas deben de penetrar en la

subcapa laminar con suficiente fuerza para eliminar el efecto pasivo de la aleación. Por esta razón, a menudo se requiere altas tensiones de cizallamiento. La situación anterior puede causar daños significativos en sistemas que transportan agua salada y sólidos. Los resultados experimentales muestran que la tasa de corrosión máxima se observó con números de remolino elevados; además, este régimen de remolino es más severo que la condición sin remolino, lo que mejora la formación de picaduras [11]. U. S. Tewari et al. (2003) “Solid particle erosion of carbon fibre–and glass fibre–epoxy composites” en sus investigaciones se ha caracterizado el comportamiento de erosión de partículas sólidas de compuestos epoxi reforzados con fibra de vidrio y carbono unidireccional. El desgaste erosivo de estos compuestos se ha evaluado en diferentes ángulos de pinzamiento (15° - 90°) y en tres diferentes orientaciones de fibra (0° , 45° , 90°). Las partículas utilizadas para las mediciones de erosión fueron bolas de acero con un diámetro de 300-500 μm y una velocidad de 45 m/s. Los compuestos epoxis reforzados con fibra de vidrio y carbono unidireccional mostraron un comportamiento de erosión semi-ductil, con una tasa de erosión máxima en un ángulo de impacto de 60° . La orientación de las fibras tiene una influencia significativa en el desgaste erosivo de los compuestos. La erosión es mayor cuando las partículas impactan sobre las fibras normalmente, los estudios de SEM (Scanning Electron Microscope) revelaron que la erosión se caracteriza por un microfisuramiento y el desprendimiento de las fibras de la matriz [12]. M. Muaralidharan et al. (2021) en su investigación sobre “Evaluation of tensile strength retention and service life prediction of hydrothermal aged balanced orthotropic carbon/glass and Kevlar®/glass fabric reinforced polymer hybrid composites” en su búsqueda para reducir los desafíos de alto peso estructural y costo de los componentes metálicos; ha llevado a su reemplazo con compuestos de polímero reforzado con fibras de carbono y Kevlar®. Estos problemas mencionados anteriormente se pueden resolver aún más mediante la hibridación de fibras de carbono-vidrio y Kevlar®-vidrio para reducir el costo de fabricación y el uso de materiales no en detrimento de sus propiedades, en sus resultados reportan que la máxima absorción de humedad se da a los 60°C en 300 días de envejecimiento hidro térmico [13]. C. P. Gao et al. (2016) en sus investigaciones sobre “Tribological behaviors of epoxy composites under water lubrication conditions” su objetivo es investigar el comportamiento tribológico de los compuestos epoxi en condiciones de lubricación con agua a velocidades de deslizamiento variables y constantes en fibras de refuerzo (fibras de carbono y de vidrio), lubricantes sólidos y nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2), en sus resultados reportan que ambas fibras mejoran significativamente la resistencia al desgaste

atribuyéndose principalmente a la alta resistencia a la abrasión y la formación de tribopelículas [14]. C. R. González et al. (2020) en su artículo “Low-velocity impact behavior of glass fiber-MWCNT/ polymer laminates exposed to seawater and distilled water aging” investigan experimentalmente la influencia del envejecimiento del agua corriente y agua destilada en el comportamiento de impacto a baja velocidad de los laminados de fibra de vidrio-polímero con y sin nanotubos de carbono de paredes múltiples. Los resultados obtenidos mostraron que el contenido de absorción de humedad de los laminados compuestos expuestos al envejecimiento es considerablemente mayor en las muestras a base epoxi con respecto a la resina Viniléster, las pruebas de impacto revelaron que la fuerza máxima de impacto medida y la energía absorbida en muestras húmedas son significativamente más bajas en comparación con las muestras secas debidos al efecto de plastificación de la matriz [15]. E. J. Trujillo et al. (2018) en su artículo “Seawater ageing effect on the mechanical properties of composites with different fiber and matrix types” evaluaron el efecto del envejecimiento del agua de mar sobre las propiedades mecánicas de diferentes compuestos fabricados con fibra de vidrio unidireccional y fibra de carbono en resina epóxica, Viniléster y poliéster, se evaluó el comportamiento de las muestras con y sin envejecimiento acelerado en agua de mar y sometidas a cargas de tracción, compresión, flexión y corte. Concluyendo que cuando estas estructuras compuestas de matriz polimérica se exponen al medio de agua de mar se produce una degradación de las propiedades del material que afecta la fiabilidad. La observación de la superficie de fractura mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló delaminación, desprendimiento de fibras y desmoronamiento de la resina debido al efecto del agua de mar [16]. B. Liu et al. (2018) en sus investigaciones “Effects of Hot Water Absorption and Desorption on Solid Particle Erosion of Poly(Ethylene Terephthalate)-Based Composites” se encontró que el envejecimiento por agua de mar es una de las causas de la degradación de los termoplásticos reforzados con fibra durante el servicio a largo plazo, afecta no solo a las propiedades mecánicas sino también a su erosión por partículas sólidas. El objetivo de su estudio fue investigar la absorción y desorción de agua caliente en la erosión de partículas sólidas de compuestos de poli (tereftalato de etileno) (PET) reforzado con fibra de carbono, se encontró que la tasa de erosión aumenta con el aumento del tiempo de inmersión y disminuye después envejecimiento [17]. J. A. R. González et al. (2020) en investigaciones sobre “Seawater effects on interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy laminates modified with multiwall carbon nanotubes” reportan que el efecto del envejecimiento del agua de mar sobre la tenacidad a

la fractura interlaminar modo I y modo II. Se han desarrollado e investigado en laminados de fibra de vidrio/epóxica tejidos a base de preimpregnación con y sin nanotubos de carbono de pared múltiple. El análisis de microscopia electrónica de barrido realizado en la superficie de fractura de las muestras revela la transición de frágil (superficie lisa) a dúctil (superficies rugosas) en la morfología de los laminados compuestos debido a la influencia del envejecimiento del agua de mar en la matriz polimérica y la interfaz fibra-matriz lo que resulta en una reducción de la resistencia a la corrosión [18]. S. Biradar et al. (2021) en su artículo “Investigation on mechanical behaviour of filament wound glass/epoxy composites subjected to water absorption and also tribological studies using Taguchi method”, en su estudio se enfocan principalmente en muestras compuestas de vidrio/epoxi enrolladas en filamentos tomadas directamente del recipiente de presión compuesto. El aspecto importante de este estudio es comprender e investigar el porcentaje de reducción o aumento en las diversas propiedades mecánicas y tribológicas bajo la influencia de la humedad. Concluyen que la presencia de moléculas de agua mejora la resistencia mecánica a medida que las partículas de agua llenan el espacio o retrasan los vacíos o imperfecciones de las muestras para alcanzar los límites. Además de la tasa de erosión del compuesto de vidrio/epoxi tiene la mayor influencia de las partículas de arena de gran tamaño con una concentración de arena de 900 g, a una velocidad del eje de 1000 rpm. Mientras que las partículas de arena más pequeñas con menor concentración de arena tienen un impacto menor en la tasa de erosión. [19]. Tomando como base lo investigado y la propuesta descrita en esta investigación, cabe resaltar que diversos sectores industriales y académicos podrían ser usuarios del conocimiento científico desarrollado en esta propuesta, lo cual impactará en un amplio rango de aplicaciones para el beneficio de la sociedad en nuestro país.

3. Marco teórico

3.1 Fundamentos de tribología

El término tribología se utilizó por primera vez en Inglaterra en un informe confeccionado por P. Jost en el año de 1966 este neologismo proviene de las palabras griegas “tribos”, que significa fricción, y “logos”, que significa estudio; utilizándose para designar la ciencia de las superficies friccionantes, es decir, de las superficies en contacto con movimiento relativo entre ellas. La tribología abarca los procesos de fricción, desgaste y lubricación de los cuerpos en contacto, fenómenos que en la práctica de ingeniería se analizan por separado [20].

3.2 Tipos de desgaste

El desgaste es una de las causas principales del deterioro de piezas y componentes, y del consiguiente fallo del funcionamiento de máquinas y aparatos. Por lo tanto, la reducción del desgaste mediante la elección apropiada de materiales, recubrimientos, diseño de las superficies o lubricación, cobra una gran importancia económica. Aun cuando el rozamiento y el desgaste siempre aparecen juntos en la práctica, son fenómenos cualitativamente diferentes. El desgaste puede producirse bien por el efecto de una fuerza normal o carga, o por un movimiento tangencial. Si bien en la mayoría de los casos el desgaste se percibe como un fenómeno indeseado, es también la base de muchos procesos tecnológicos deseables como el afilado, limado, pulido o arenado.

Según el mecanismo físico que lo genera, se suele hacer la siguiente distinción entre los tipos de desgaste:

- Desgaste por abrasión o abrasivo, el cual ocurre cuando dos cuerpos de dureza muy diferente entran en contacto, o bien cuando la capa intermedia contiene películas sólidas.
- Desgaste por adherencia o adhesivo, el cual ocurre siempre que exista un contacto entre cuerpos de igual dureza, o muy parecida.
- Desgaste por corrosión o corrosivo, el cual está asociado a transformaciones químicas en la superficie, y al consiguiente desprendimiento de capas superficiales.
- Desgaste por fatiga superficial o simplemente fatiga superficial, que ocurre siempre que la superficie se someta repetidamente a un ciclo de carga que cause deslizamiento o rodadura y que, en caso de aplicarse una vez, no produzca cambios aparentes en la superficie. [21].

3.3 Desgaste erosivo

Las pérdidas de material en la superficie por el contacto con un líquido que contiene en suspensión cierta cantidad de partículas abrasivas como se muestra en la figura 1, siendo esencial el movimiento relativo entre el fluido y la superficie, ya que la fuerza de las partículas, que de hecho son responsables del daño, se aplica cinéticamente. “En el desgaste erosivo es donde el movimiento relativo de las partículas sólidas es casi paralelo con las superficies erosionadas se denomina erosión abrasiva, por otro lado, la erosión en la que el movimiento relativo de las partículas es casi normal (perpendicular) a la superficie erosionada se conoce como erosión bajo impacto” [22].

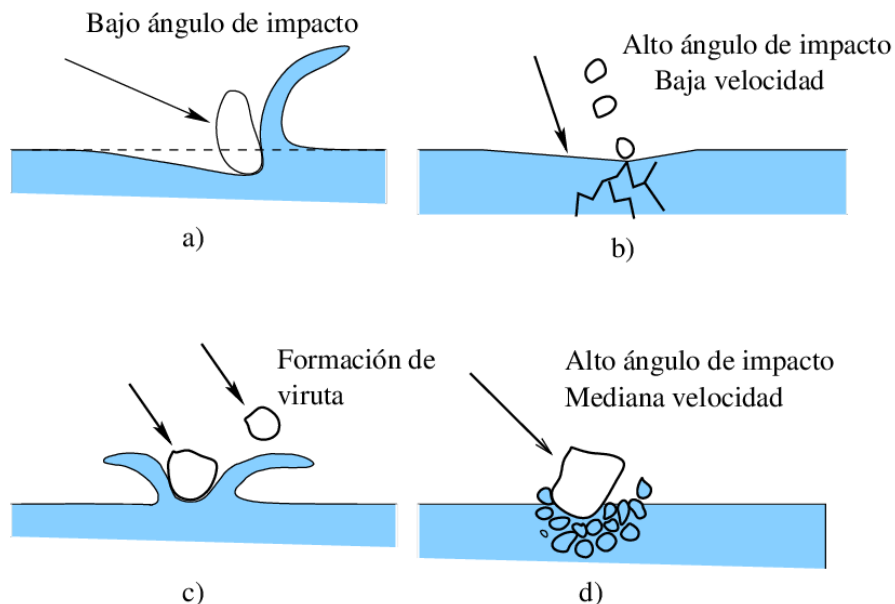


Figura 1. Desgaste erosivo [23]

3.4 Medición del desgaste

Generalmente el desgaste se mide en forma indirecta, “por medio de pérdida de masa, medición lineal o de área del desgaste. Solo en algunos casos es necesario el cálculo en forma directa, esto cuando la región desgastada es demasiado irregular y asimétrica, o bien, cuando se requiere de un resultado con alto grado de exactitud.” Es una de las maneras más confiables para medir el desgaste, debido a que se establece su valor en forma cuantitativa y que la mayor parte de los laboratorios tiene acceso al equipo para establecer el cambio de peso en gramos (g) de los cuerpos, es necesario que las probetas se pesen antes y después de las pruebas de desgaste, con la diferencia de estos se obtiene el cambio de masa. Por lo que es fundamental que la balanza o báscula deba tener la

sensibilidad adecuada para determinar esta diferencia. Un problema en este tipo de medición es que se necesita tener demasiado cuidado en la limpieza de las probetas, lo que puede contribuir a un buen pesado. Así mismo se tiene que contemplar que el uso de sustancias para la limpieza que puedan ser absorbidas por la probeta [24].

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 superior a 1 m/s, el efecto de la EPS provoca un cambio en la rugosidad superficial [3]. Es conveniente precisar la diferencia entre los mecanismos de erosión y abrasión, ya que comúnmente se 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. Las variables que afectan la erosión pura son básicamente de tres tipos: las que se refieren al flujo, la de las partículas y las del material. Las primeras tienen que ver con la velocidad, el ángulo de ataque (es el que se forma en dirección de la partícula con la superficie que impacta) y la concentración de partículas en el flujo. Se debe considerar las variables propias de las partículas: forma, tamaño y dureza. La velocidad de erosión se expresa habitualmente como masa o volumen perdido por unidad de masa del material que erosiona [3].

3.6 Propiedades de las partículas

- Dureza. La dureza es una de las propiedades esenciales en las partículas incidentes. Aquellas con mayor dureza que la superficie a impactar, causan un mayor desgaste que otras partículas con menor dureza.
- Forma. La intensidad del desgaste depende fuertemente de la forma de la partícula, donde aquellas que sean angulares causan mayor desgaste que las que muestran forma redonda.
- Tamaño de la partícula. 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 la cantidad de desgaste es menor cuando el tamaño de las partículas es menor a 100 μm [25].

3.7 Materiales compuestos

Un material compuesto se compone de dos o más fases físicamente diferentes y mecánicamente separables [26]. En la estructura de un material compuesto se distinguen dos partes: el refuerzo y la matriz, como se muestra en la figura 2.

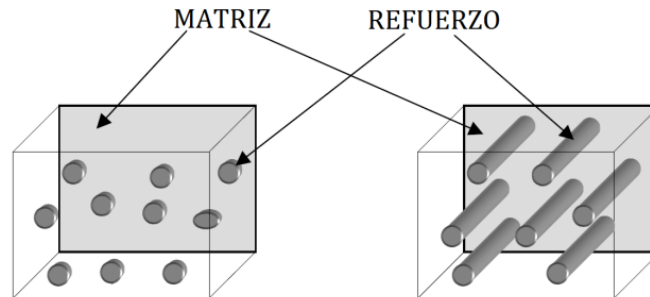


Figura 2. Material compuesto. [26]

La matriz corresponde a la parte más estable y continua, se encarga de proteger y alojar al refuerzo, mientras que el refuerzo es totalmente disperso y es el encargado de mejorar las propiedades mecánicas de la matriz. Los refuerzos pueden ser de partículas o fibras (larga o corta), las cuales pueden estar dispersas aleatoria o uniformemente. El refuerzo proporciona resistencia y rigidez al material compuesto [26].

Los materiales compuestos son elementos fabricados con el objetivo de mejorar las propiedades que cada uno de sus componentes presentan por separado o bien generar o activar características no aprovechadas para un mejor comportamiento. El gran número de materiales compuestos que existe en la actualidad se ha creado para obtener mejoras en la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tensión y flexión, en condiciones ambientales normales y a elevadas temperaturas. De acuerdo al tipo de material y uso, se define el tipo de fibra a utilizar, estas pueden ser de vidrio, plástico carbono, y acero entre otras. Generalmente están formados por dos fases: la matriz, que es continua y rodea a la otra fase, que se denomina fase dispersa; las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases, de sus proporciones relativas y de la forma, tamaño, distribución y orientación de la fase dispersa [27]. En la figura 3 se muestra la clasificación de los materiales compuestos.

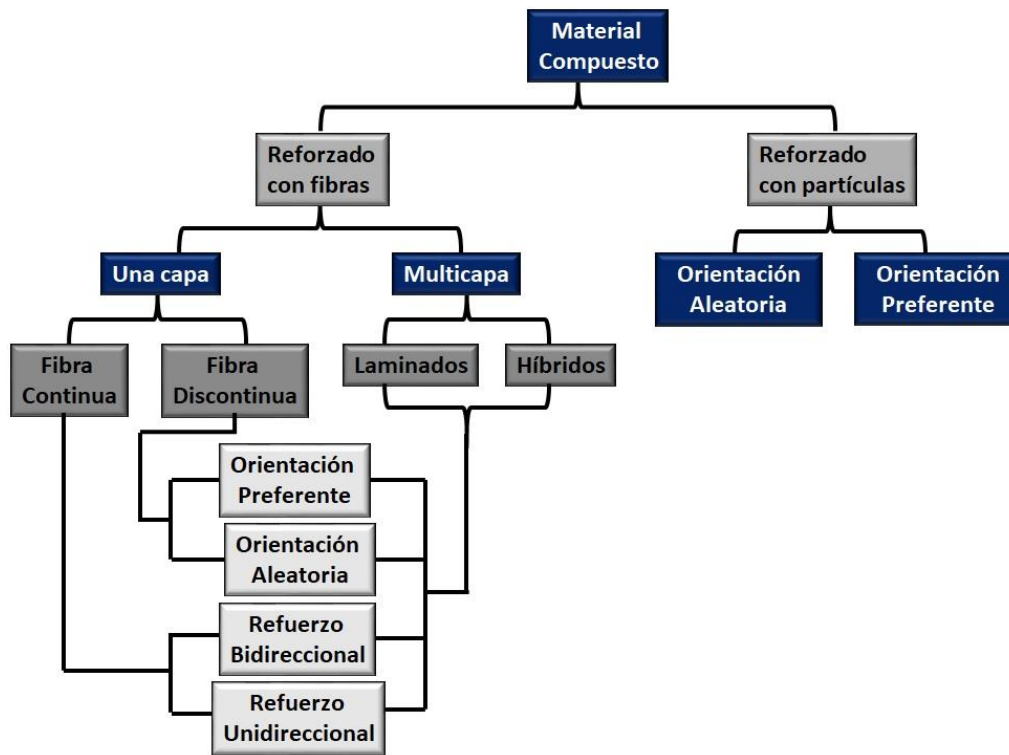


Figura 3. Clasificación de materiales compuestos. [28]

3.8 Fibras (refuerzo)

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 la resina; los principales factores que determinan esta relación (cantidad de fibra y resina) son los procesos de fabricación (infusión, moldeo por transferencia de resina, autoclave, etc.), el tipo de material (fibra seca, preimpregnados, etc.), así como, el control que se tenga sobre estos mismos. 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: la densidad, resistencia a la tensión, resistencia a la compresión y resistencia a la fatiga [3].

Fibra de vidrio. Se utiliza principalmente debido a su bajo costo en aplicaciones para la fabricación de palas de aerogeneradores, elementos deportivos y estructuras con baja sollicitación mecánica. Presenta características de rigidez muy inferiores a la fibra de carbono, pero similar a

las aleaciones metálicas de aluminio (70 GPa). En cuanto a valores de resistencia mecánica se tiene un amplio rango (2400-4600 MPa), densidad elevada 2.5 g/cm^3 [29].

Fibra de carbono. Fibra de carbono es utilizada ampliamente en el sector aeroespacial, debido a sus altas propiedades mecánicas específicas. El rango del módulo elástico abarca los (200-500 GPa), resistencia a la tracción (3000-5500 MPa) y densidad ($1.76 - 2.25 \text{ g/cm}^3$) [29].

Fibra de Kevlar®. También conocida como fibra de aramida es una fibra polimérica de alta resistencia mecánica (3000 - 4100 MPa), amplio modulo elástico (701 - 120 GPa) y menor densidad que las dos anteriores 1.44 g/cm^3 . El Kevlar® es una aramida sintetizada por Stephanie Kwolek, una química de la firma Dupont, en 1965. Sus fibras consisten en largas cadenas de poliparafenileno tereftalamida, molécula que soporta altas temperaturas con la que se puede construir equipos ligeros, resistentes hasta veinte veces más fuerte que el acero y resistente a la corrosión. Ampliamente utilizadas en aplicaciones de absorción de energía de impacto. Sin embargo, tiene problemas bajo cargas de compresión, absorción de humedad, dificultad de mecanizado, dificultad de impregnación y degradación bajo exposición a los rayos UV [29].

La figura 4 muestra de forma general las fibras de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio.



Figura 4. Fibras de carbono, aramida y vidrio. [30]

3.9 Resinas (Matriz)

En un material compuesto la matriz desempeña varias funciones. Fundamentalmente es la fase continua, la cual engloba y sostiene los elementos de refuerzo, otorgando consistencia y

continuidad al material. Entre las funciones básicas se tienen las siguientes: aglutinar los refuerzos, transferir las cargas aplicadas sobre la matriz hacia los refuerzos, proteger la superficie de los refuerzos de la abrasión mecánica y proveer al refuerzo de una barrera contra los efectos del medio ambiente tales como: la humedad y en caso de que el material este reforzado con fibras, la matriz debe proveer soporte lateral contra la posibilidad de pandeo de las mismas bajo cargas de compresión [31].

Resina Epolam 2015. La resina Epolam 2015, es utilizada para el diseño de estructuras compuestas por métodos de laminación. Adecuada para la colocación manual, embolsado al vacío, RTM y bobinado de filamento. Presenta propiedades de baja viscosidad (1550 mPas), baja densidad (1.15g/cm^3) adecuado para aplicaciones marinas, así como buenas propiedades mecánicas [32].

Resinas Viniléster. La resina Viniléster ofrece resistencia a una gran variedad de ácidos, álcalis, blanqueadores y compuestos orgánicos para su uso en muchas aplicaciones de la industria de procesos químicos. Por su alta resistencia química se recomienda para la fabricación de cisternas, depósitos, etc., usados en la manipulación de: Álcalis (compuestos clorados y solventes), ácidos (amplio rango de compuestos químicos corrosivos inorgánicos y orgánicos). Presenta propiedades de viscosidad baja (250 - 450 mPas) una vez sólida presenta buenas propiedades mecánicas [33].

3.10 Manufactura de materiales compuestos

Para elegir un proceso de manufactura se va a determinar por: tamaño del elemento a fabricar, geometría y forma de la pieza, naturaleza de los materiales: tipo de resina y fibra, características mecánicas que se requieren, acabado de la superficie, número de piezas a fabricar y costo. Existen diferentes métodos para trabajar con materiales compuestos y pueden clasificarse en dos grupos, métodos de molde cerrado y molde abierto. Entre los métodos de los métodos de molde cerrado, se encuentran el moldeo por laminado de componentes, el moldeo por transferencia de resina, moldeo centrífugo, moldeo por inyección, moldeo por pultrusión, y moldeo por molde perdido [34]. Los procesos a molde cerrado se presentan en la figura 5.

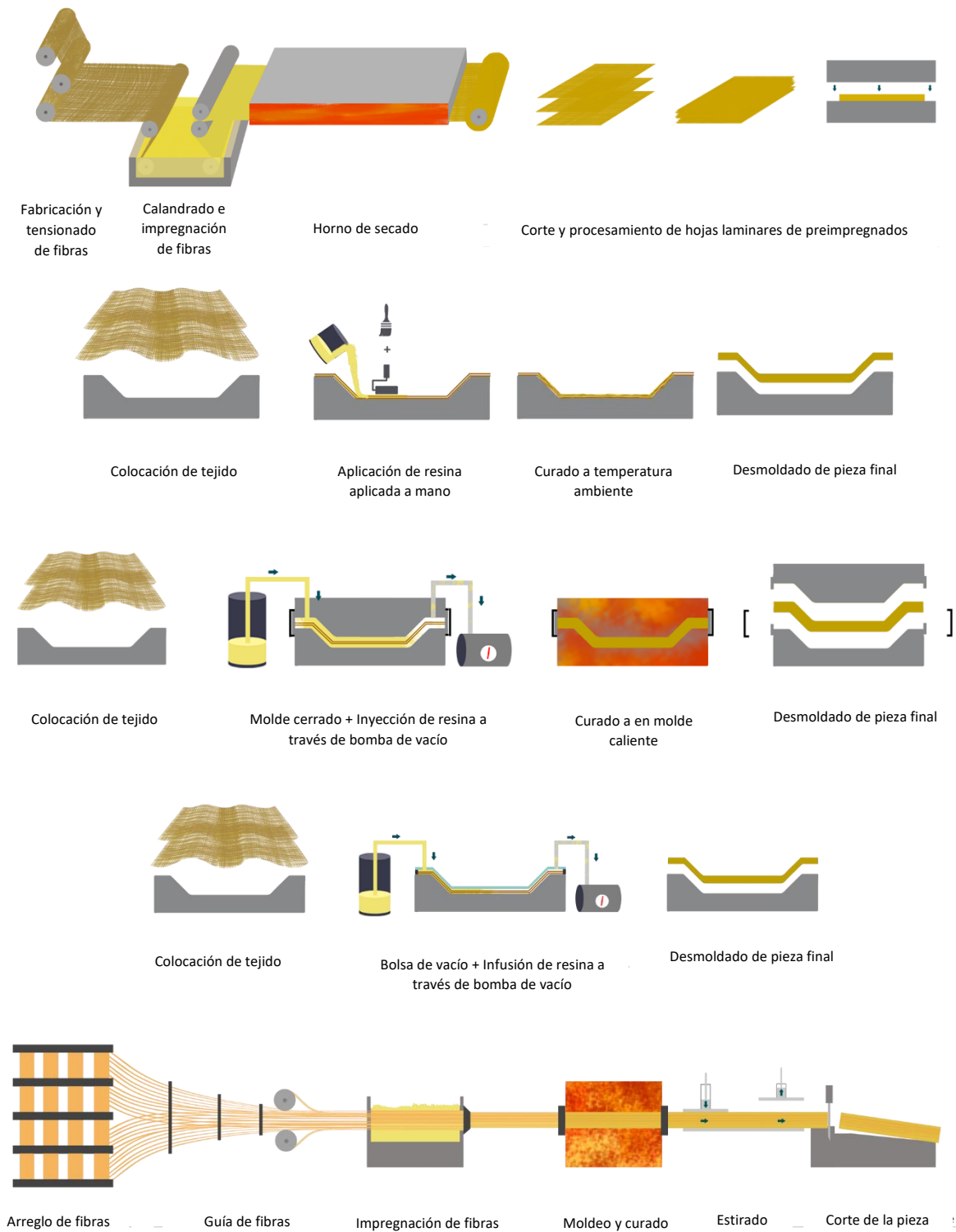


Figura 5. Procesos de manufactura. [34]

Arreglo de fibras

La combinación de materiales compuestos y materiales homogéneos, se clasifican en dos tipos de compuestos estructurales que son: materiales laminados: (constituidos por apilamiento de láminas) y paneles tipo sándwich (compuestos de un núcleo y tapas) como se observa en la figura 6.

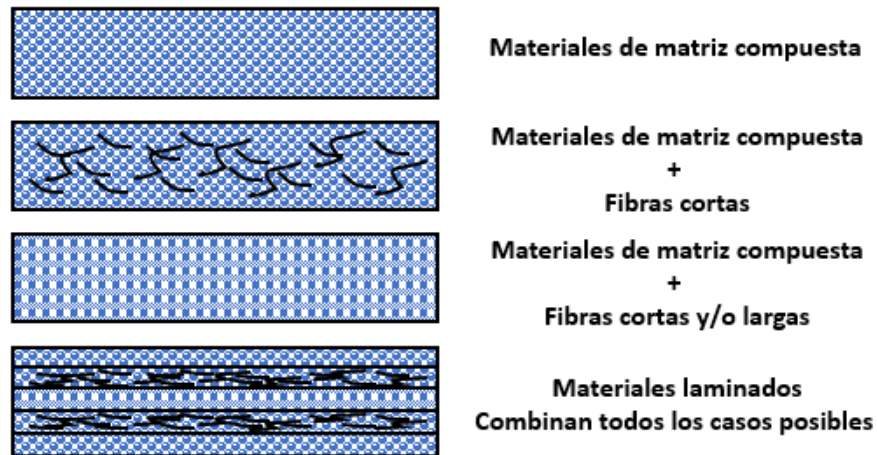


Figura 6. Clasificación de los materiales compuestos según su tipología [35]

Al desarrollar un material compuesto, se debe poseer una buena comprensión del comportamiento del compuesto, como también un buen conocimiento de los tipos de fibras y los materiales de la matriz [36].

3.11 Proceso de envejecimiento

El ensayo de envejecimiento acelerado en agua salina consiste en exponer la pieza u objeto a ensayar a un ambiente salino (niebla o soluciones con altas concentraciones salinas) durante un cierto período de tiempo en el interior de la cámara, bajo condiciones de presión y temperaturas controladas. Durante el tiempo de exposición de la pieza u objeto comienza el ataque de la corrosión y proporciona información en gran medida de la capacidad de resistencia del material constituyente o del recubrimiento a dicho ataque [37].

Absorción de humedad en materiales compuestos. La absorción de humedad de materiales compuestos expuestos por periodos largos en ambientes de aire húmedo y agua provoca una

inestabilidad dimensional, hinchamiento y pérdida de composición química de la fibra y matriz, observándose en una pérdida o disminución de propiedades mecánicas como la rigidez, resistencia a la flexión, tensión e impacto. Uno de los efectos de la humedad, dependiendo de las condiciones ambientales y del estado del material, este absorbe o pierde humedad lo que se manifiesta en un aumento o pérdida de peso. La concentración de humedad en la superficie del material compuesto está relacionada directamente con la humedad del ambiente a que es expuesto. [9]

Efectos del agua salina en materiales compuestos. El efecto de soluciones acuosas de cloruro sódico en la durabilidad de los compuestos tiene especial importancia en infraestructuras marinas. En estas condiciones y debido a la absorción de agua, los compuestos pueden incrementar su peso, además puede producirse plastificación e hinchamiento de la matriz. El porcentaje de porosidad en el material compuesto está directamente relacionado con la calidad del mismo. La porosidad presente en los compuestos hace que se acumule el agua que el vapor de agua junto con las moléculas gaseosas de estireno no reaccionado durante el curado del compuesto presione contra la resina y la interfase fibra-matriz, generando tensiones en perjuicio de las propiedades del material. De ahí que conocer la distribución del agua en la matriz de polímero, permite obtener información más detallada para comprender los mecanismos de difusión en la matriz y sus efectos, que es imprescindible para predecir el comportamiento para largo tiempo de exposición [38]

4. Desarrollo experimental

4.1 Introducción

Para el alcance del objetivo general y los objetivos específicos que se presentan en este trabajo la metodología fue la siguiente, en el Instituto Tecnológico de Pachuca (ITP), se seleccionaron los materiales y se realizaron las pruebas mecánicas y tribológicas; con el apoyo del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) Unidad Querétaro, se fabricaron los materiales compuestos laminados, se realizó el proceso de envejecimiento y la microscopía electrónica de barrido (SEM); de igual manera en los laboratorios del Centro de investigación y estudios avanzados (CINVESTAV) Unidad Querétaro, se realizó el análisis por el método de espectrografía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), siguiendo la metodología mostrada en la figura 7.



Figura 7. Metodología experimental.

4.2 Fabricación de materiales compuestos

La fabricación de los materiales compuestos laminados, esta se llevó a cabo en dos fases. En una primera fase se utilizaron fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra híbrida (fibra de carbono con Kevlar®) como las mostradas en la figura 8, adicionando al arreglo de cada una de ellas dos capas de fibras de Kevlar® en la superficie externa como refuerzo y como matriz de utilizó resina Epolam 2015. En el apilamiento de las fibras se consideró un arreglo bidireccional 0/90°, mostrado en la figura 9.

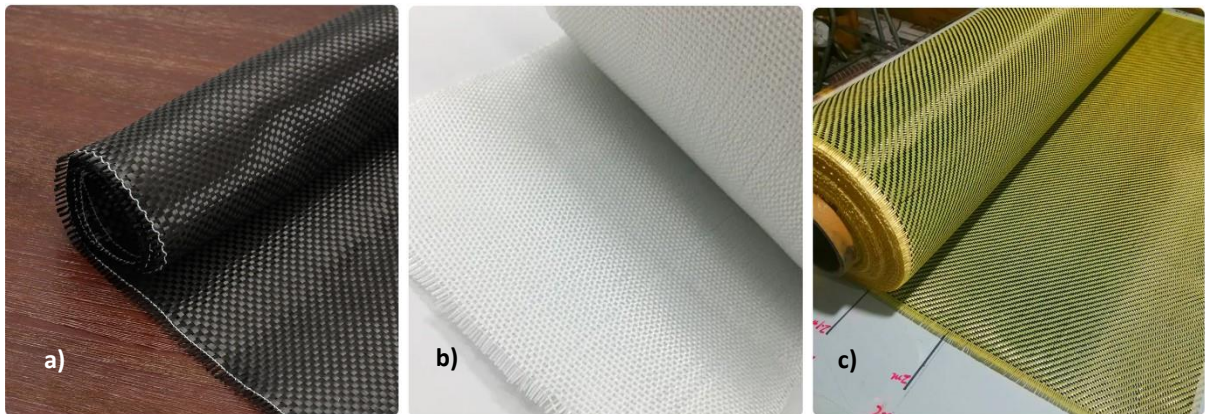


Figura 8. Tejidos de fibra: a) Fibra de carbono, b) fibra de vidrio y c) fibra de Kevlar® [39].

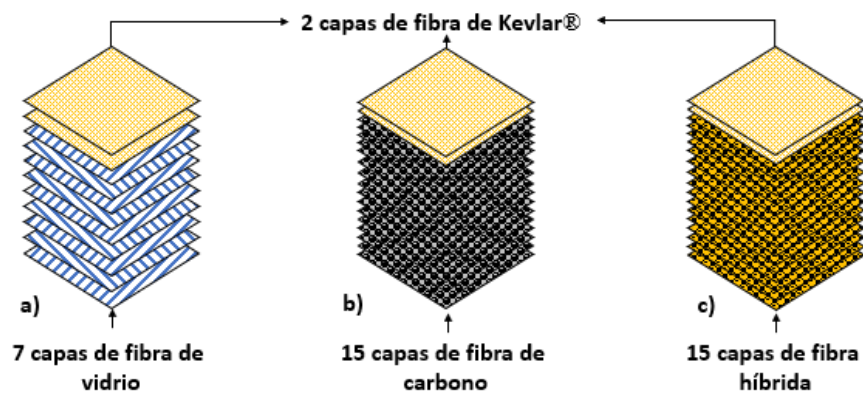


Figura 9. Arreglo de fibras. a) Fibra de vidrio, b) Fibra de carbono y c) fibra híbrida.

En una segunda fase se utilizaron fibra de vidrio unidireccional como la mostrada en la figura 10a, mientras que en la figura 10b se aprecia de fibra de vidrio marina y en la figura 10c la fibra de Kevlar®, adicionando al arreglo de cada una de ellas una capa de fibra de vidrio marina y una capa de fibra de Kevlar® en la superficie externa como refuerzo y como matriz de utilizaron resina Epolam 2015, Viniléster e híbrida (Epolam con Viniléster). En el apilamiento de las fibras se consideró un arreglo bidireccional 0/90°, mostrado en la figura 11.



Figura 10 Tejidos de fibra de vidrio marina y Kevlar® [39].



Figura 11. Compuestos laminados reforzados en su superficie. a) Con fibra de vidrio marina, b) Con fibra de Kevlar®.

4.3 Obtención de especímenes

Para la obtención de los materiales laminados compuestos se utilizó el proceso de manufactura por infusión de resina asistida por vacío. El molde para la fabricación de los compuestos laminados consistió en una placa plana de acero inoxidable. Se limpió la placa con acetona y se aplicó una pasta desmoldante para facilitar la separación del compuesto laminado una vez curado. Se apilaron las fibras como se muestra en la figura 9 y en la figura 11; para los materiales utilizados en la primera fase y segunda fase respectivamente. En la figura 12, se aprecia el orden de apilamiento de las fibras del compuesto laminado.

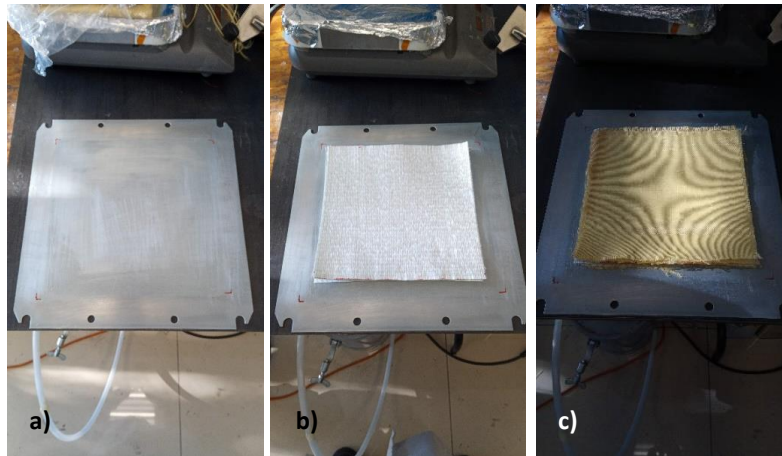


Figura 12. a) Molde metálico, b) Fibra de vidrio y c) Fibra de Kevlar®.

Después del apilamiento de las fibras se colocó la tela antiadherente, la malla de distribución y se colocaron los tubos de alimentación de resina como se ilustra en la figura 13. La cantidad utilizada fue de acuerdo con el peso de las fibras de refuerzo debido a que la proporción deseada es 50% fibra y 50% resina.

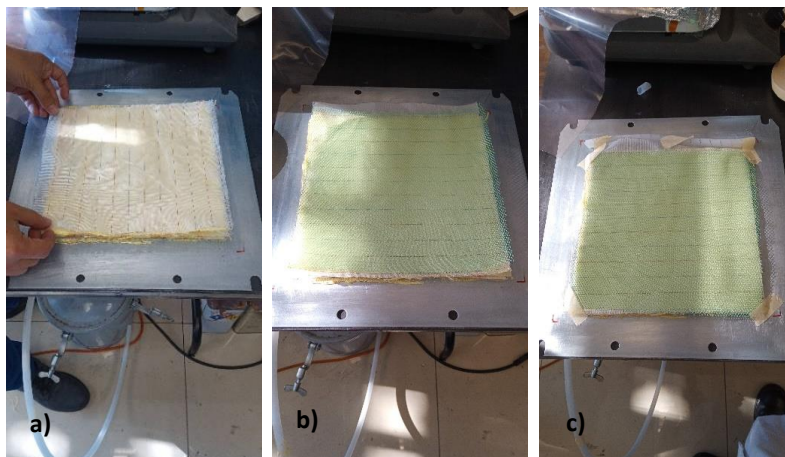


Figura 13. a) Tela antiadherente, b) Malla de distribución y c) tubos de alimentación de resina.

Se cubrió todo el borde de la placa con cinta de poliuretano y se hermetizó todo el sistema con la bolsa de vacío como se ilustra en la figura 14.

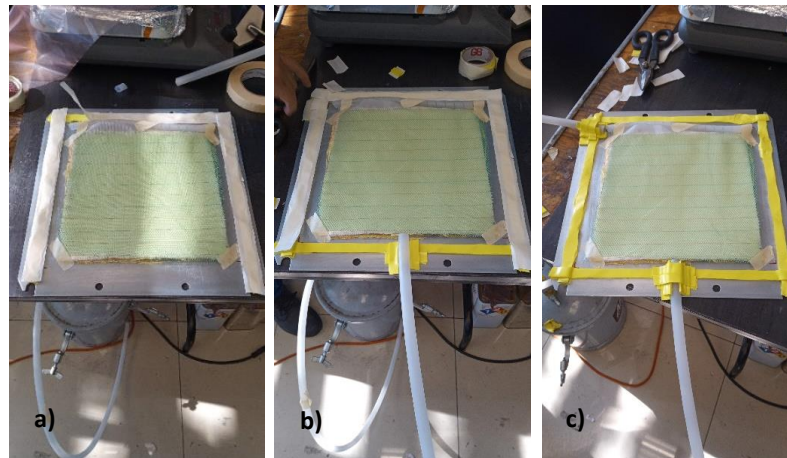


Figura 14. a) Bolsa de vacío, b) cinta de poliuretano y c) aplicación de vacío.

Una vez obtenido un sellado adecuado, se aplicó presión de vacío hasta obtener valores del orden de los 750 mm de Hg, asegurándose que no existieran fugas en el sistema como se muestra en la figura 15. Posteriormente se impregnaron las fibras con la resina Epolam 2015, se cerró la válvula de entrada de la resina para evitar la entrada de aire debido a que el vacío debe mantenerse hasta que la resina gelifico.

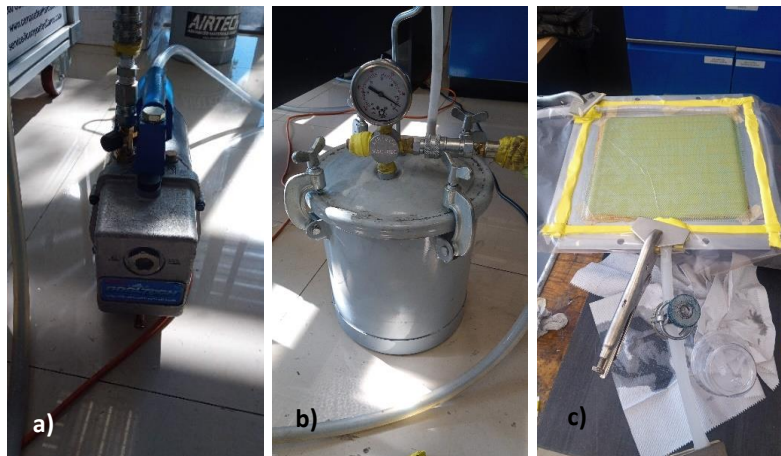


Figura 15. a) Bomba de vacío, b) trampa de resina y c) Curado de laminado.

En la figura 16 se muestra el esquema del arreglo de las fibras junto con el sistema de infusión asistida por vacío.

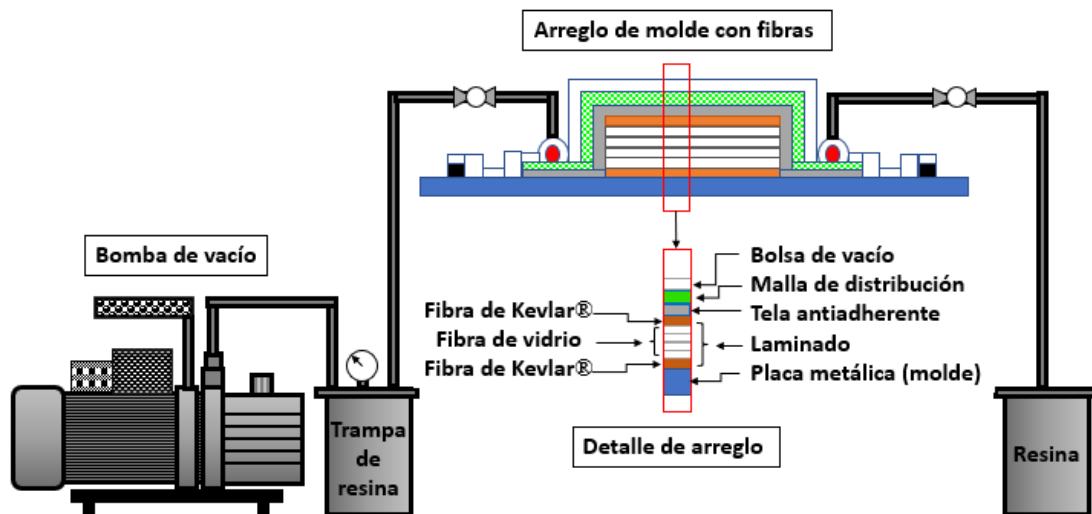


Figura 16. Esquema de infusión al vacío con el arreglo de fibras.

Ya curada la resina, se obtuvieron los laminados y se procedió al corte de las muestras utilizando un sistema de corte convencional de sierra cinta. Los especímenes se cortaron y se les denominó con la nomenclatura especificada según se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura de materiales compuestos

Nomenclatura y cantidad de especímenes obtenidos			
Fase	Nombre	Nomenclatura	Cantidad
1	Polímero reforzado con fibra de carbono y Kevlar®	PRFC-K	8
	Polímero reforzado con fibra híbrida y Kevlar®	PRFH-K	8
	Polímero reforzado con fibra de vidrio y Kevlar®	PRFV-K	8
2	Epolam 2015 con fibra de Kevlar®	EFK	10
	Vinilester con fibra de Kevlar®	VFK	10
	Híbrida con fibra de Kevlar®	HFK	10
	Epolam con fibra de vidrio marina	EFVM	10
	Vinilester con fibra de vidrio marina	VFVM	10
	Híbrida con fibra de vidrio marina	HFVM	10

En la figura 17 se observan los especímenes de los materiales de los compuestos laminados obtenidos por el proceso de infusión asistido por vacío.

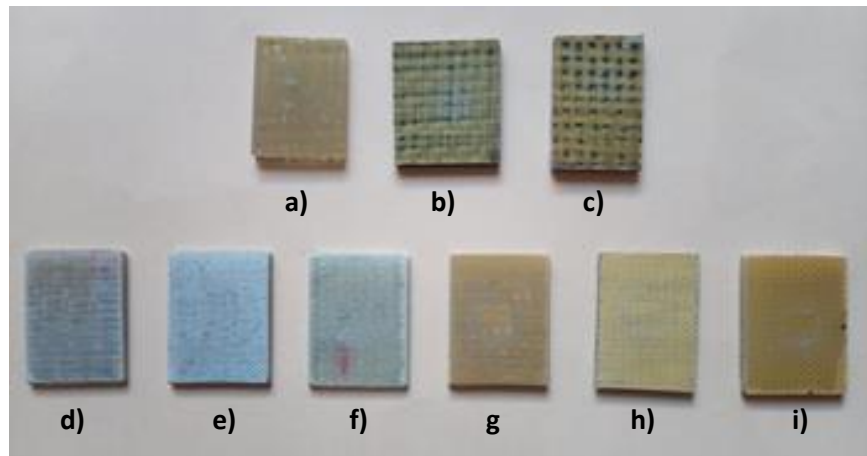


Figura 17. Especímenes de compuestos laminados: a) PRFV-K, b) PRFH-K, c) PRFH-K, d) EFVM, e) VFVM, f) HFVM, g) EFK, h) VFK e i) HFK.

Las dimensiones de los especímenes fueron de 40 mm de largo, 30 mm de ancho y 4 mm de espesor (considerando la horma para desgaste del banco de pruebas de erosión), como se observa en la figura 18, mientras que en la figura 19 se muestra el espesor de los materiales PRFC-K, PRFH-K y PRFV-K.

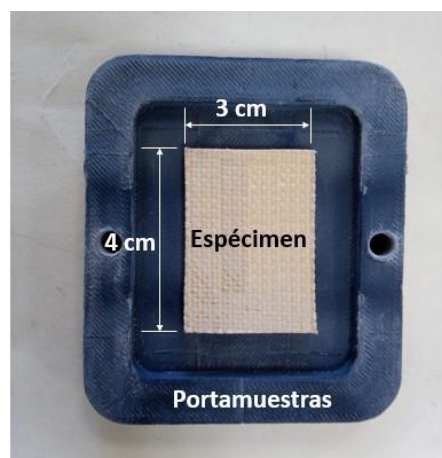


Figura 18. Dimensiones de espécimen en porta muestras.



Figura 19. Espesor de materiales compuestos: a) PRFC-K, b) PRFH-K y c) PRFV-K.

4.4 Proceso de envejecimiento

El proceso de envejecimiento acelerado se realizó por inmersión en agua salina usando un baño termostático con una capacidad de 20 L de la marca Cole-Parmer®. El agua salina fue preparada mezclando agua purificada y “pellets” de sal de la marca Morton Systems Saber II® hasta alcanzar 3.5% de salinidad. Para ello, se mezcló manualmente una cantidad total de ~700 g de pellets de sal en 20 L de agua hasta obtener una solución homogénea con un pH de 6.8. Cierta cantidad de agua salina fue vertida en un contenedor de plástico para la inmersión de todas las probetas como lo muestra la figura 19a. Antes de realizar la inmersión de las muestras en el agua salina, estas fueron acondicionados en un horno de convección (como el mostrado en la figura 20a), a ~60 °C durante 24 h con la finalidad de extraer toda humedad absorbida por el medio ambiente. Posteriormente, los especímenes fueron pesados en una balanza analítica (OHAUS®) con precisión de 0.1 mg como se muestra en la figura 20b. En el equipo termostático fue colocada una base metálica y sobre esta se colocó el contenedor de plástico con los especímenes en su interior completamente sumergidos en el agua. La temperatura del agua salina dentro del baño termostático fue de 70 °C.

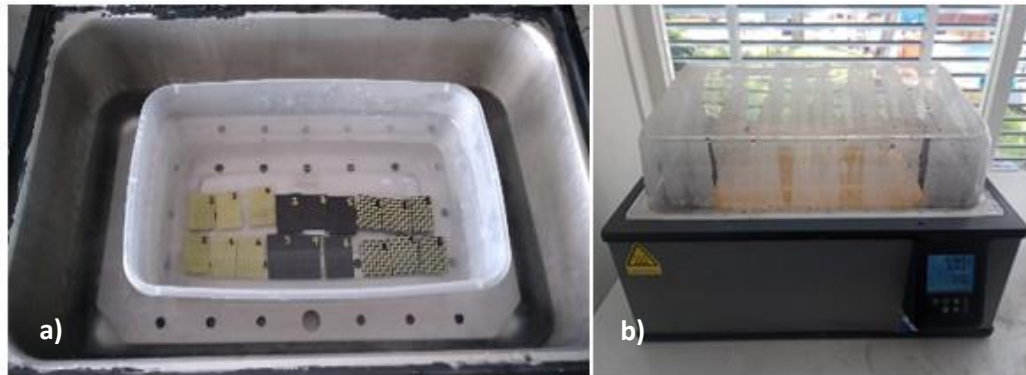


Figura 20. Equipo de envejecimiento: a) Probetas inmersas en agua salina y b) Cámara salina a 70°C.

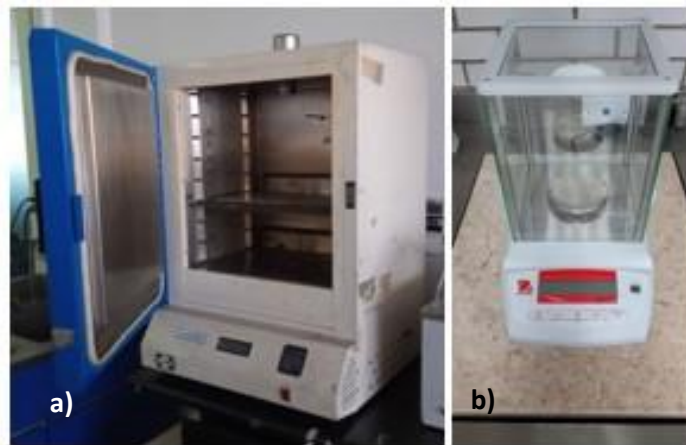


Figura 21. a) Horno de secado y b) balanza analítica.

4.5 Determinación del porcentaje de humedad

A periodos específicos de tiempo, los especímenes fueron sacados del contenedor de agua salina, secados con papel absorbente y pesados en la balanza analítica. Este paso fue repetido a distintos tiempos de inmersión hasta alcanzar la saturación de humedad en los especímenes. Para la determinación del porcentaje de humedad absorbido por los especímenes se utilizó la siguiente fórmula [16]:

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde, M_t es el peso de muestra seca (antes de la inmersión en agua de mar) y W_t es el peso de muestra húmeda en el tiempo t (después de la inmersión en agua de mar).

Para la determinación del coeficiente de difusión de los compuestos laminados el contenido de la absorción de humedad se graficó contra el tiempo de la raíz cuadrada ($t^{1/2}$). La difusividad se calculó a partir de la pendiente lineal utilizando la siguiente ecuación [16].

$$D = \pi \left(\frac{h}{4M_m} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{(t_2 - t_1)}} \right) \quad (2)$$

Donde, h es el espesor de la muestra, M_m es la máxima absorción de humedad y M_1 y M_2 son los contenidos de absorción de humedad en el tiempo t_1 y t_2 respectivamente.

4.6 Caracterización de probetas

4.6.1 Medición de rugosidad superficial

Para la medición de la rugosidad superficial promedio (R_a) de la superficie reforzada de los especímenes fabricados de PRFV-K, PRFC-K, PRFH-K, EFK, VFK, HFK, EFVM, VFVM y HFVM envejecidos y no envejecidos, se realizaron 10 mediciones de forma distribuida en toda la superficie a fin de tener una medición promedio representativa de la superficie; para ello, se utilizó un perfilómetro marca Mitutoyo, modelo SJ-410 como el mostrado en la figura 21, usando como referencia [40].

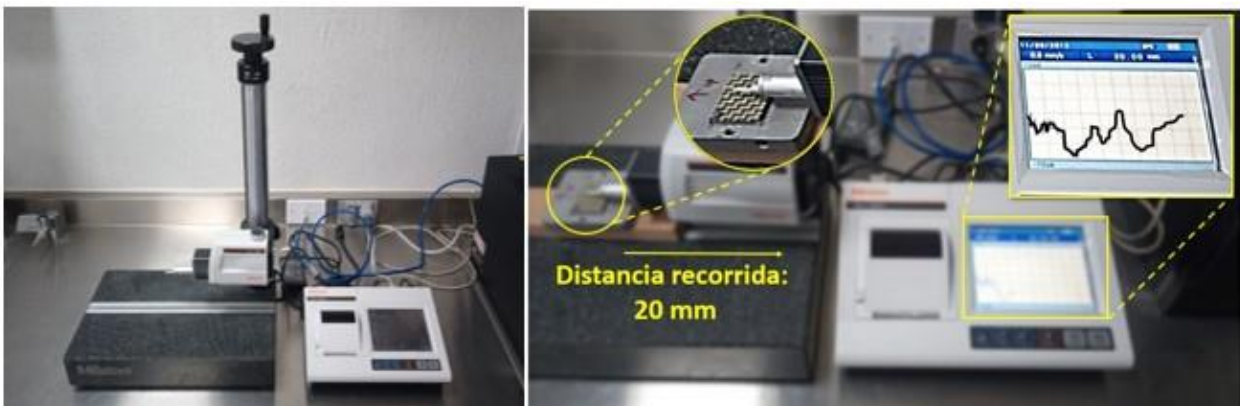


Figura 22. Rugosímetro.

4.6.2 Medición de dureza Shore D

Para la medición de la dureza se realizaron 10 mediciones de dureza Shore D de forma distribuida, a fin de tener una medición homogénea. Se utilizó un durómetro modelo: Digital Shore D, marca DLXD SHORE como el que se muestra en la figura 22, graficando el promedio y la desviación estándar para cada muestra de los diferentes materiales en ambos casos.

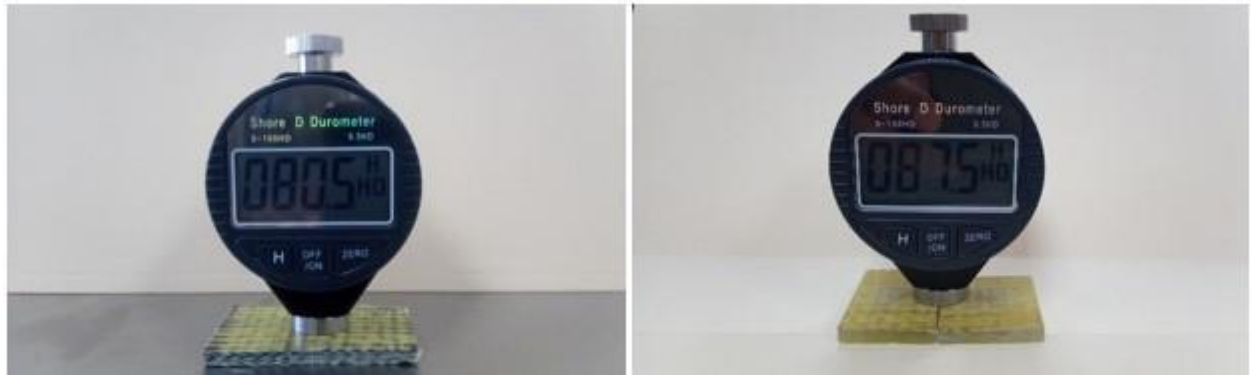


Figura 23. Durómetro para dureza Shore D.

4.6.3 Ensayo de desgaste erosivo

Los especímenes fueron lavados con agua y detergente líquido en un baño ultrasónico marca Cole Parmer®, modelo 8848 como el mostrado en la figura 23, por espacio de 5 minutos para cada muestra, a fin de retirar algún agente extraño o grasa impregnada en alguna de sus superficies.



Figura 24. Baño termostático.

Una vez concluido el tiempo de lavado de los especímenes, estos fueron secados a temperatura ambiente. Una vez secos los especímenes, se registró su masa inicial utilizando pinzas de

laboratorio para su manipulación, que consiste en la colocación del espécimen en la cámara de erosión, retiro de la misma y pesado en una balanza analítica marca OHAUS®, modelo Pioneer, proceso repetido para cada tiempo de exposición del espécimen al flujo de arena, como se muestra en el siguiente esquema de la figura 24.

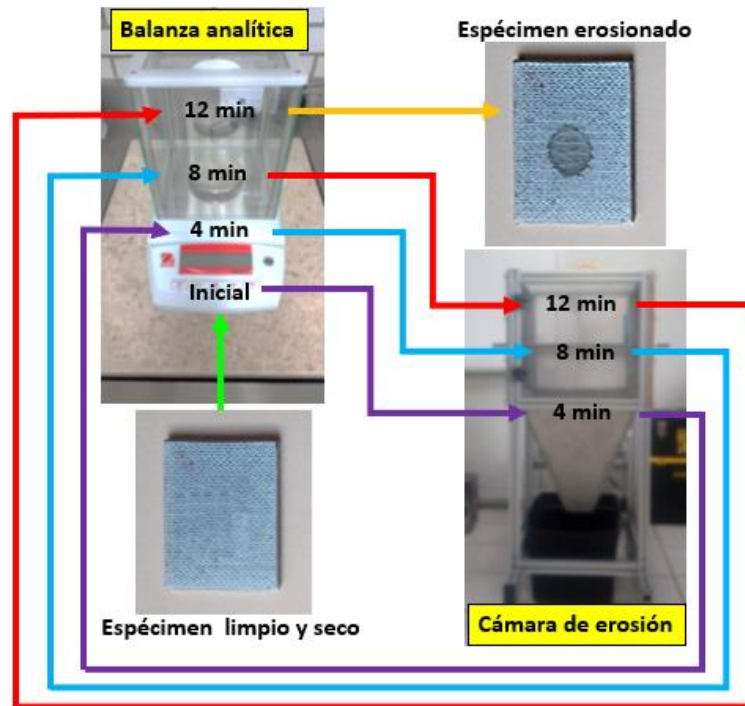


Figura 25. Esquema de proceso de erosión.

En la figura 25a se aprecian detalles de la cámara de erosión en donde se aprecia una vista general en la figura 25b y 25c, el contenedor de arena y el espécimen listo para la prueba de erosión.



Figura 26. a) Vista general, b) Contenedor de arena y c) espécimen en el portamuestras.

Una vez registrada la masa inicial el espécimen fue colocado en la cámara de erosión, se expone por cuatro minutos al flujo de arena, concluido este tiempo se saca de la cámara de erosión y se lleva a la balanza analítica; se registra su peso, el espécimen es nuevamente colocado en la cámara de erosión y se vuelve a exponer durante otros cuatro minutos, los pasos anteriores se repiten hasta alcanzar 12 minutos de exposición. La metodología descrita en la figura 24 se lleva a cabo para para cada uno de los especímenes de los materiales compuestos. La plataforma para pruebas de erosión se muestra en la figura 26.

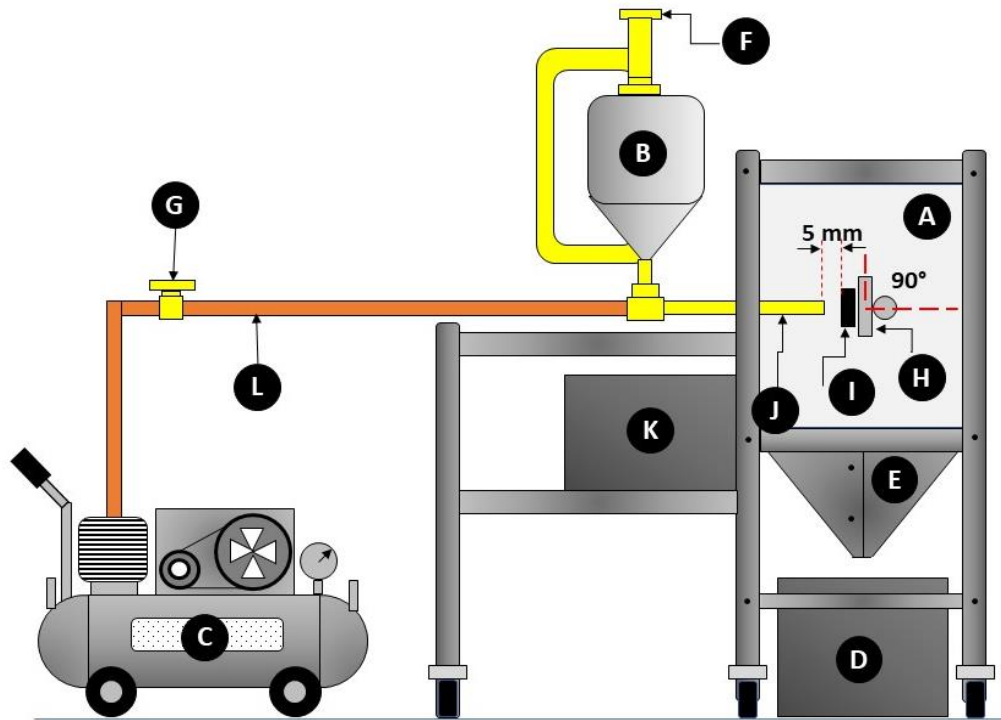


Figura 27. Plataforma para pruebas de erosión por partículas sólidas. a) Cámara de erosión, b) alimentación de arena, c) compresor, d) recuperación de arena, e) tolva, f) alimentación de arena, g) válvula de aire, h) porta espécimen, i) espécimen, j) tubería de flujo, k) controlador de temperatura, l) tubería de flujo de aire.

Para la realización del ensayo de desgaste erosivo se consideró: velocidad de impacto de la arena de mar de 4.7 m/s para la primera fase y para la segunda fase 5.8 m/s, considerada como la velocidad promedio del agua de mar en las costas del océano pacífico [41, 42], esta fue medida con anemómetro marca PEAKMETER, modelo PM6252B como se muestra en la figura 27a.

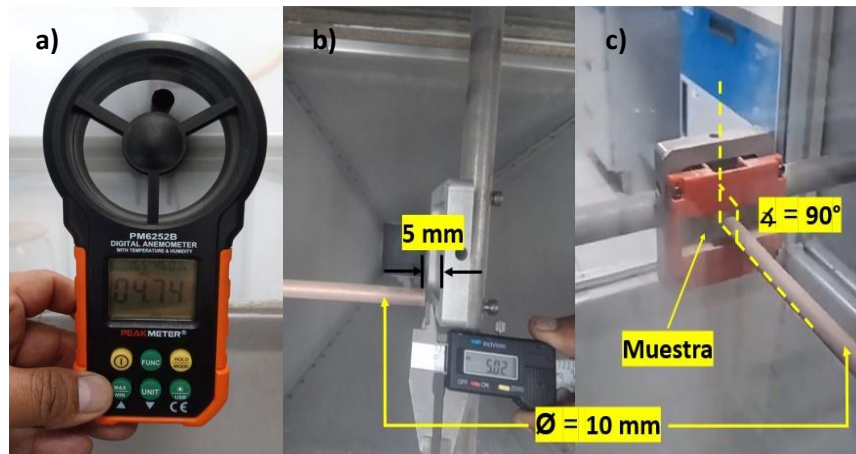


Figura 28. a) anemómetro b) distancia de boquilla a la muestra y c) ángulo de impacto.

El diámetro de la boquilla de flujo de arena fue de 10 mm, medida estándar de la plataforma para pruebas de erosión; la distancia de separación entre la boquilla de flujo de arena y el espécimen de 5 mm ambos mostrados en las figuras 27b y 27c. La separación de la boquilla con respecto al espécimen fue considerada con la finalidad de tener una huella de desgaste mejor definida. Ángulo de impacto a 90° como se observa en la figura 27c; este ángulo es considerado con base al choque perpendicular de las partículas de arena en la superficie de los álabes expuestos en los medios marinos. La presión de flujo de arena promedio de 4.5 bar (450 kPa), registrado con manómetro marca PROBLOCK, a temperatura ambiente a 20 °C. Los valores de la masa perdida de los especímenes sometidos al proceso de erosión se muestran en las tablas 6 y 7 para la fase 1 y la fase 2 respectivamente.

4.6.4 Medición de huella de desgaste (perfilometría)

Una vez concluida la prueba de erosión realizada a todos los especímenes envejecidos y no envejecidos; se realizó la medición de la huella de desgaste en la zona erosionada; para ello, se utilizó un perfilómetro marca Mitutoyo, modelo SJ-410 como se muestra en la figura 28.



Figura 29. Perfilómetro

El perfilómetro recorrió 20 mm de distancia garantizando con ello cubrir toda la zona de desgaste provocada por el impacto del flujo de arena como se muestra en la figura 29.

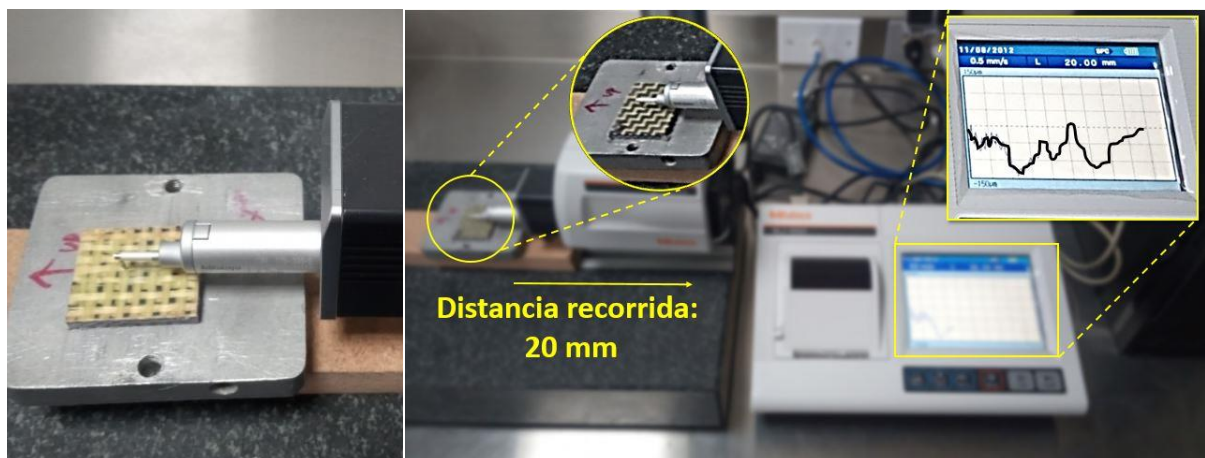


Figura 30. Perfil de huella de desgaste.

4.6.5 Microscopia óptica y SEM

Después de la realización de la perfilometría se realizó el análisis de la superficie de los especímenes envejecidos y no envejecidos. Para la microscopia óptica se utilizó un estereoscopio marca OLYMPUS modelo SZ61 y lentes de 100X y 50X como el mostrado en la figura 30.



Figura 31. Estereoscopio.

La microscopía electrónica de barrido permite observar la microestructura de los materiales en las cuales se pueden apreciar, poros, microgrietas, orientación de las fibras, distribución de capas de fibras, falta de adherencia, deformación plástica, etc. Los especímenes que son sometidos a esta técnica de observación son recubiertos con una capa de un material altamente conductor (generalmente oro), lo que permite poder observar la superficie de las huellas de desgaste en el microscopio electrónico de barrido [3]. Para la observación de las superficies sometidas a desgaste erosivo de los materiales compuestos por medio de esta técnica, se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6610LV a diferentes aumentos mostrado en la figura 31.



Figura 32. Microscopio Electrónico de barrido.

4.6.6 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Para el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) realizado en los especímenes envejecidos y no envejecidos realizado en las instalaciones del CINVESTAV, Unidad Querétaro, se utilizó un método ATR con punta de diamante, numero de escaneos de 24 y resolución de 4 cm^{-1} para cada muestra. El equipo utilizado se muestra en la figura 32, que corresponde a un Espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) modelo Spectrum GX, marca Perkin Elmer.



Figura 33. Espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).

4.7 Caracterización de la partícula sólida

La morfología de las partículas sólidas influye fuertemente en la tasa de erosión, las partículas con diferentes picos tienden a causar mayor desgaste que las partículas redondas [3]. Como partícula sólida erosiva se utilizó arena de mar como la mostrada en la figura 33. Para observar la morfología de las partículas sólidas erosivas utilizadas en la prueba de erosión, se utilizó el estereoscopio mostrado en la figura 32. El propósito de usar arena de mar como partícula sólida erosiva, es debido a que los álabes de las turbinas hidrocinéticas están sometidas al impacto en su superficie con esta partícula sólida. La arena utilizada fue previamente tamizada con tamaño de malla de 1 mm, con la finalidad de tener un tamaño de grano homogéneo. Esta partícula fue utilizada a temperatura ambiente.

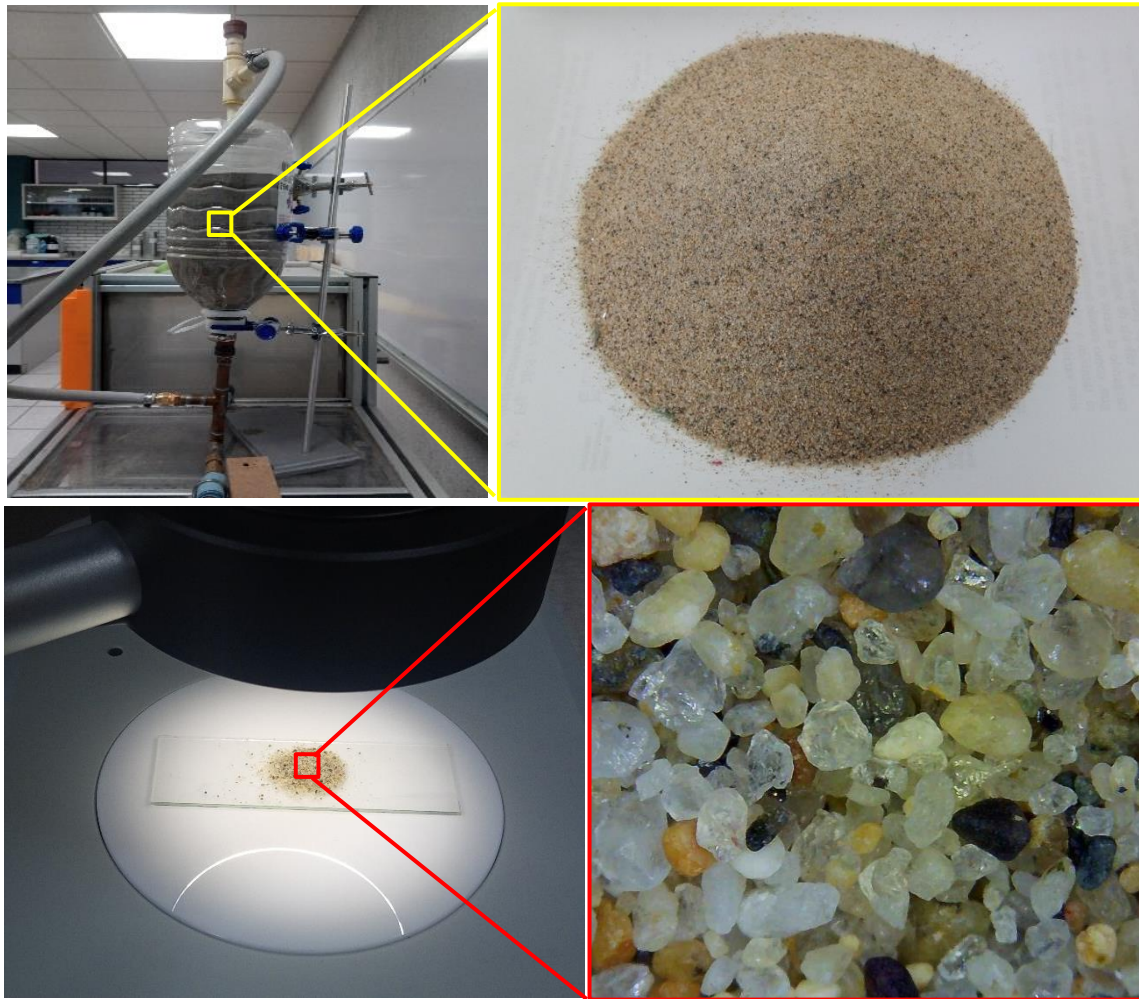


Figura 34. Arena de mar.

5. Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas (medición de rugosidad Ra, dureza Shore D, ensayo de erosión, perfilometría, observación óptica) a los materiales compuestos laminados tanto envejecidos y como no envejecidos; de igual manera, complementando la caracterización presentada en el capítulo anterior, se agrega el análisis de la partícula erosiva utilizada en ambas fases y el análisis por SEM y FTIR realizado a los materiales compuestos para cada una de las fases.

5.1 Distribución de tamaño de partícula erosiva

Para obtener la distribución del tamaño de grano de la partícula erosiva, se aplicó el método de análisis estático de imagen [41], se consideró una muestra de arena y se llevó al estereoscopio, mediante el software incluido se obtuvieron imágenes como las mostradas en la figura 34, en ellas se tomó la lectura de los diámetros de la partícula de una muestra de 550 mediciones.

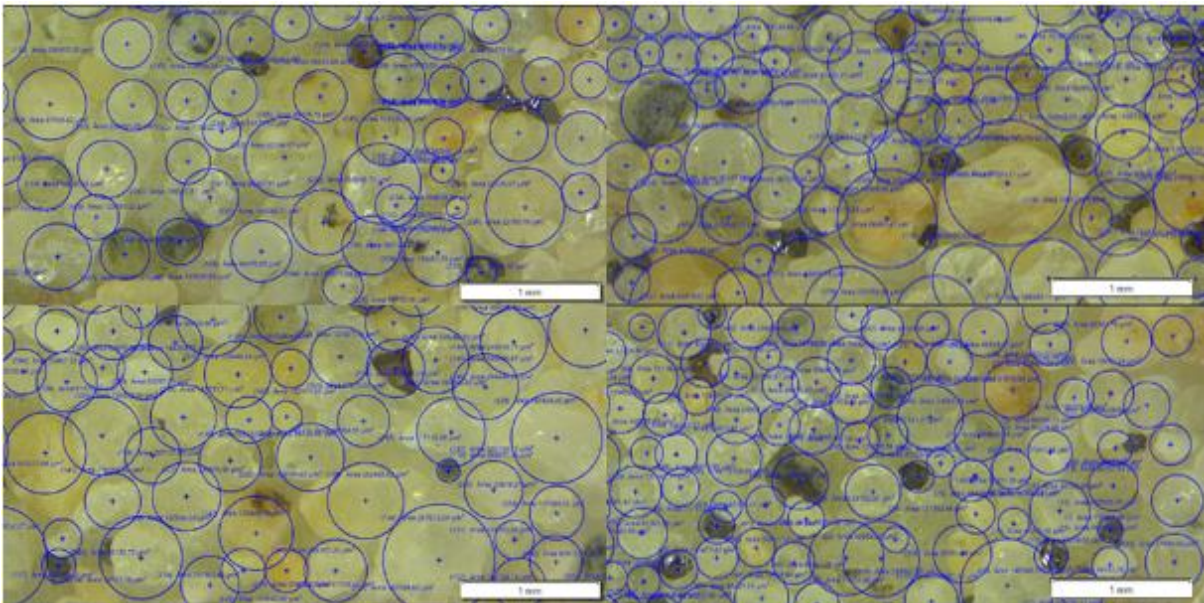


Figura 35. Diámetros de partículas erosivas.

Una vez determinado el diámetro de las partículas se calculó el área, considerando el diámetro de la partícula como el tamaño de grano se procedió a graficar un histograma como el mostrado en la figura 35. Mediante los valores obtenidos en el histograma se determinó que el tamaño promedio de la partícula fue de 356 μm .

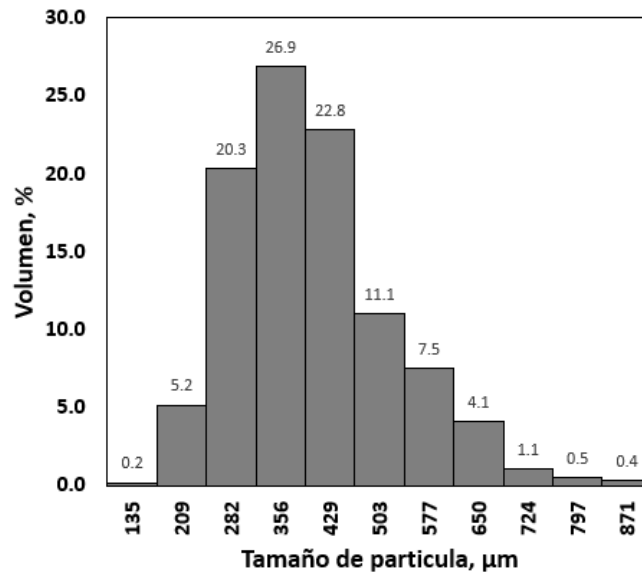


Figura 36. Distribución del tamaño de partículas erosivas.

5.2 FASE 1 Compuestos laminados reforzados con fibra de vidrio, carbono y Kevlar®

5.2.1 Análisis de % de absorción de humedad

Los materiales compuestos laminados por sus propiedades físicas y químicas estos no son hidrofílicos al agua; en este caso a la humedad, sin embargo, en periodos largos de exposición a un ambiente húmedo, la fibra de Kevlar® por sus propiedades químicas es más hidrofílica que la fibra de vidrio y la fibra de carbono. En el arreglo de la fabricación de los especímenes, el compuesto laminado que contiene mayor fibra de Kevlar® son los especímenes híbridos (en el tejido va entrelazada con fibra de carbono). En la figura 36 se observan los resultados obtenidos de la absorción de humedad de los especímenes PRFC-K, PRFH-K y PRFV-K, sometidos al proceso de envejecimiento acelerado durante 1122 horas en agua salina. Para determinar el coeficiente de difusión o la difusividad en los compuestos laminados, se puede obtener a partir de la aplicación de la ecuación 2 de los datos graficados del contenido de absorción de humedad se frente a la raíz cuadrada del tiempo [16].

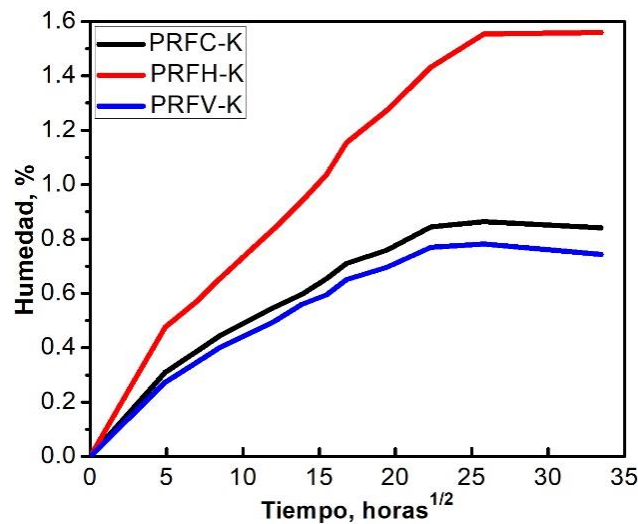


Figura 37. Gráfica de % de absorción de humedad en función del tiempo.

Los resultados obtenidos muestran que el PRFH-K con superficie reforzada con Kevlar® es la que más humedad absorbe reflejando un valor de 1.6%. Por otro lado, el PRFV-K reforzada con Kevlar® absorbió un 50% menos de humedad con respecto a la PRFH-K. Esto se debe a que el PRFH, al contener fibra de Kevlar® químicamente absorbe mayor humedad en comparación con los PRFV y PRFC en condiciones de un ambiente húmedo, el agua al ser un lubricante actúa como un agente externo que se absorbe por la fibra de Kevlar®, en el caso de los materiales híbridos por la presencia fibra de Kevlar® siendo más hidrofílico que las fibras de vidrio y carbono [44] en el tejido estos presentan una mayor plasticidad en la matriz con respecto a las fibras de vidrio y carbono [6, 45]. La región lineal de las curvas de absorción de humedad se puede utilizar para calcular el coeficiente de difusión del material utilizando la ecuación 2. El coeficiente de difusión para el PRFH-K presenta un valor de 1.86×10^{-6} mm/s, mientras que para el PRFC-K un valor de 1.52×10^{-4} mm/s y para el PRFV-K de 1.29×10^{-6} mm/s.

5.2.2 Rugosidad

Los resultados obtenidos de la rugosidad promedio (Ra) realizados en la superficie reforzada con fibra de Kevlar®, de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos, se muestran con sus

respectivas desviaciones estándar (SD) en la tabla 2; mientras que en la figura 37 se aprecia la dispersión de los valores cada espécimen analizado.

Tabla 2. Rugosidad en especímenes de FASE 1

RUGOSIDAD (Ra)						
Especímen	SIN ENVEJECIMIENTO			ENVEJECIDAS		
	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K
1	1.509	0.175	0.554	2.842	1.616	1.324
2	1.528	0.494	0.692	2.309	0.793	2.085
3	1.431	0.154	0.583	2.249	1.239	1.429
4	1.424	0.160	0.906	2.080	1.214	1.463
Promedio	1.473	0.246	0.684	2.370	1.216	1.575
SD	0.053	0.166	0.160	0.329	0.336	0.345

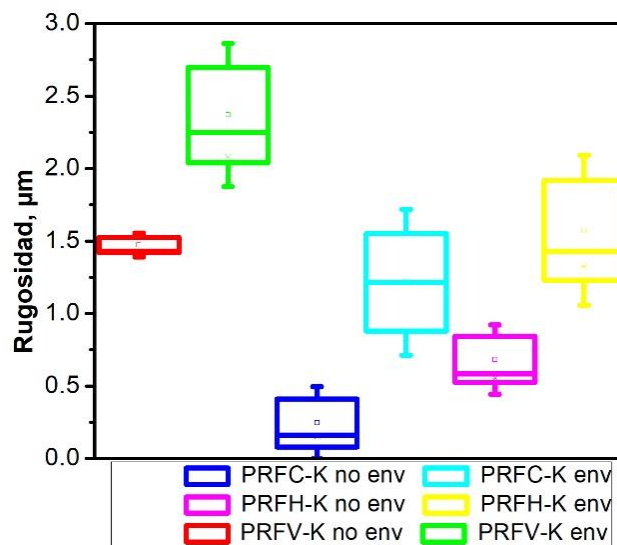


Figura 38. Gráfica de rugosidad.

Los resultados obtenidos de la rugosidad promedio (Ra) demuestran que las mediciones realizadas en la superficie reforzada con Kevlar® sin envejecimiento presentan menor rugosidad en la superficie; por ejemplo, el PRFV-K presenta mayor rugosidad con un valor de 1.473 en relación al PRFC-K que presenta un valor de 0.246 siendo esto un 83.3% más de absorción de humedad; mientras que en la superficie de las muestras envejecidas que presentan una mayor rugosidad, el

PRFC-K se observa este tiene un valor de 2.370 y el PRFV en los resultados obtenidos se aprecia que se sigue la misma tendencia al ser el PRFV-K un valor de 1.216, siendo esto un 48.69 % más de absorción de humedad; debido a la contracción volumétrica (esta se podría medir considerando la Ra promedio desde la cresta al valle en las muestras envejecidas con las no envejecidas) de la matriz que se produce con el tiempo de exposición al envejecimiento [17, 46].

5.2.3 Dureza Shore D

Los resultados obtenidos de la medición de dureza Shore D y su SD para los especímenes de los materiales compuestos laminados envejecidos y no envejecidos se muestran en la tabla 3; mientras que en la figura 38, al igual que en el apartado anterior se muestra la dispersión de los valores obtenidos para cada espécimen analizado.

Tabla 3. Dureza Shore D en especímenes FASE 1.

DUREZA (Shore D)						
Especimen	SIN ENVEJECIMIENTO			ENVEJECIDAS		
	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K
1	89.65	90.75	88.50	90.00	89.15	87.60
2	89.30	89.60	88.40	88.95	89.10	88.55
3	88.15	85.90	90.15	88.40	89.45	88.25
4	87.55	87.50	85.85	87.55	88.85	88.90
Promedio	88.66	88.44	88.23	88.73	89.14	88.33
SD	0.98	2.16	1.78	1.03	0.25	0.55

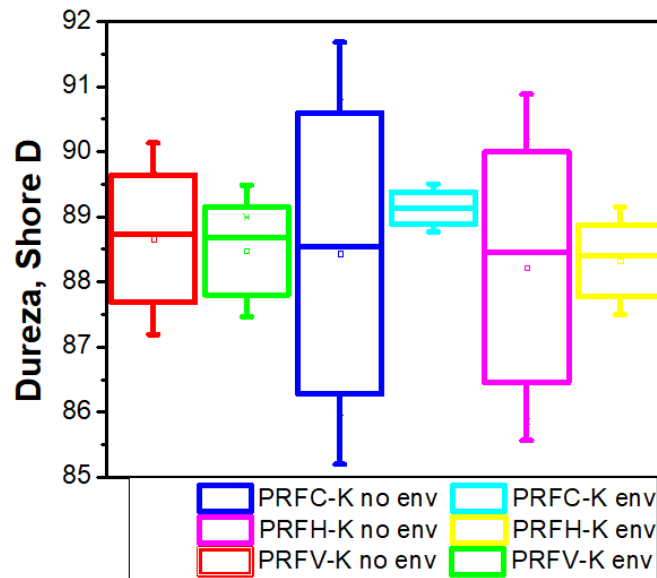


Figura 39. Gráfica de dureza Shore D.

Los resultados promedio obtenidos de la dureza Shore D, en todas las muestras envejecidas y no envejecidas, son muy similares en un rango de 88.225 a 89.138 Shore D, rango considerado extraduro para plásticos industriales (dureza en cascos de seguridad), la desviación estándar de las muestras envejecidas muestra valores en donde se aprecia una menor dispersión de los valores con respecto al promedio, la dureza más alta la presenta el PRFC-K envejecido, que representa el 1.02 % mayor con respecto al material PRFH-K no envejecido, lo anterior se atribuye a que el PRFH-K es el material que absorbió más humedad y por consiguiente es el material que presenta una mayor plasticidad de la matriz [17, 46].

5.2.4 Pérdida de masa

Los resultados obtenidos de pérdida de masa, después de la prueba de erosión realizadas en las superficies de refuerzo con fibra de Kevlar® para cada una de las muestras a diferentes tiempos, inicial (antes de ser sometida al proceso de erosión), 4, 8 y 12 minutos de exposición al desgaste erosivo por el flujo de arena, se muestran en la tabla 4; mientras que, en la en la figura 39 se observan los valores promedio graficados de pérdida de masa vs tiempo de exposición al desgaste erosivo.

Tabla 4. Masa perdida promedio de especímenes FASE 1.

PERDIDA DE MASA (g) valores promedio						
Tiempo	SIN ENVEJECIMIENTO			ENVEJECIDAS		
	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K
0	7.5932	6.1925	5.7039	7.6168	6.3585	5.5643
4	7.5922	6.1911	5.7029	7.6155	6.3572	5.5632
8	7.5899	6.1895	5.7015	7.6146	6.3559	5.5623
12	7.5881	6.1880	5.7001	7.6133	6.3545	5.5609
Masa perdida	0.0052	0.0044	0.0038	0.0034	0.0040	0.0034
SD	0.0023	0.0019	0.0017	0.0015	0.0017	0.0014

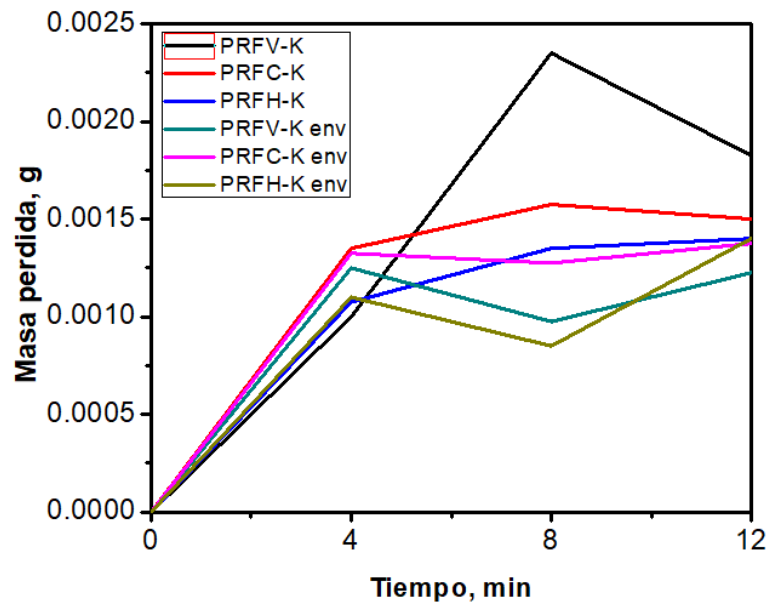


Figura 40. Gráfica de pérdida de masa.

Los resultados obtenidos de la prueba de erosión aplicada en las superficies de refuerzo con Kevlar® de las muestras envejecidas muestran una menor pérdida de masa en comparación con las no envejecidas del mismo material. Lo anterior se debe a que la tasa de erosión disminuye después del tratamiento de envejecimiento; ya que la resina se hincha y se plastifica [16]; absorbiendo la energía de impacto por partículas sólidas primero deformando la superficie y desprendiendo masa posteriormente, ya que el envejecimiento hidrotérmico conduce a la plastificación de la matriz (resina) [16, 46] y según estudios de [3] menciona que el ángulo de impacto, para mayor

desprendimiento en materiales dúctiles se obtiene entre 20° y 30°, mientras que el realizado en este estudio se llevó a cabo a 90° en donde se estudia el impacto directo sobre la superficie, probando la resistencia al desgaste de la fibra de Kevlar®. En la figura 40 se muestran los valores de masa perdida total por cada espécimen.

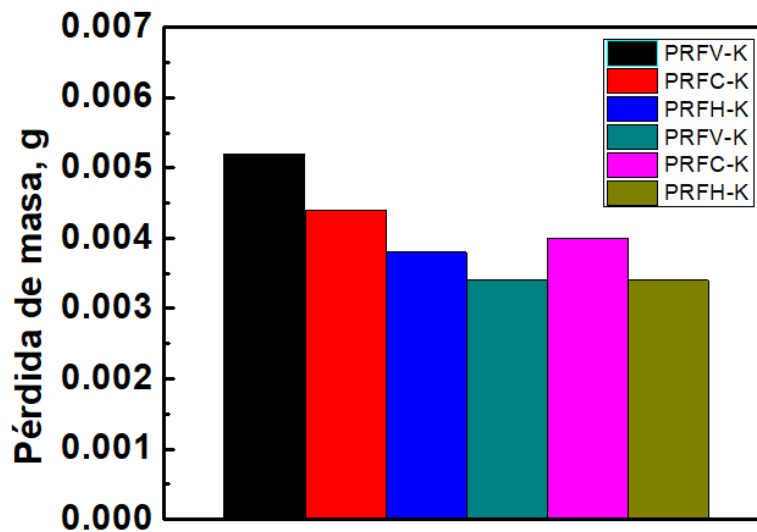


Figura 41. Pérdida de masa total.

5.2.5 Perfilometría (medición de huellas de desgaste)

Los resultados obtenidos de la profundidad de la huella de desgaste provocado por las partículas de arena, medidas por el perfilómetro fueron determinadas por una distancia recorrida 20 mm a una velocidad de 0.5 mm/s. Las gráficas de estos resultados son mostradas en la figura 41.

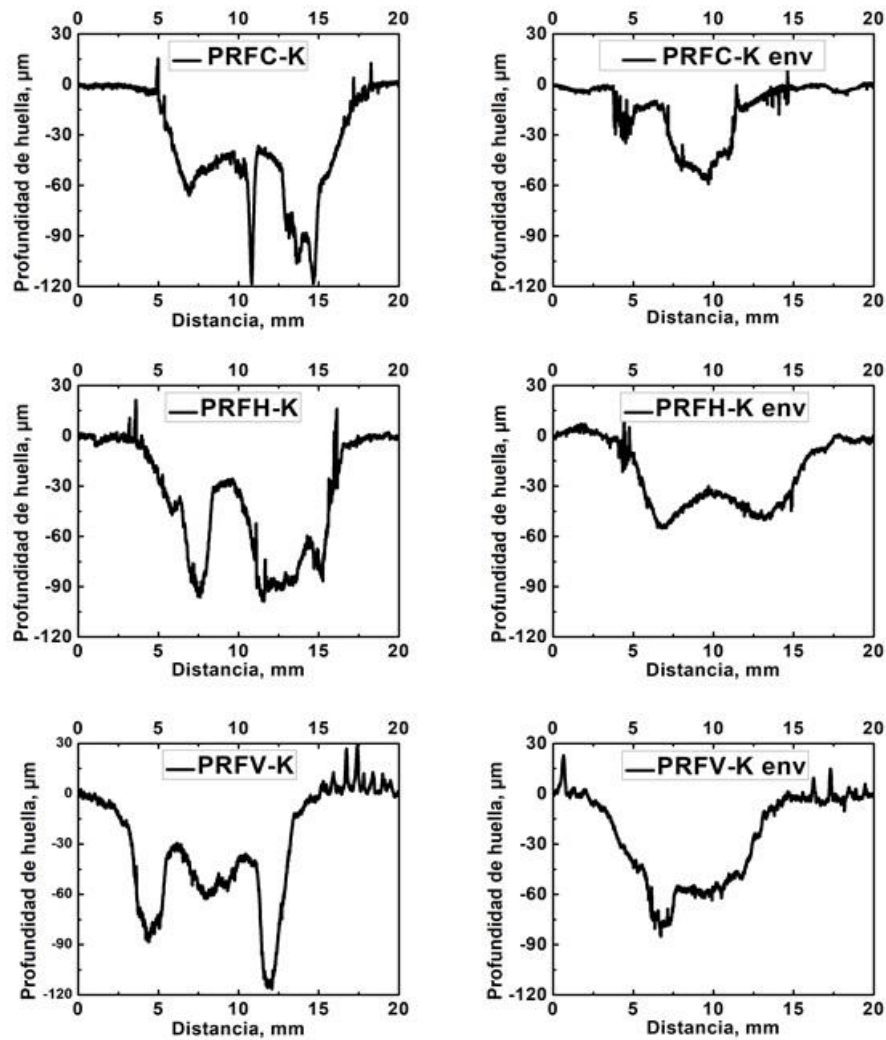


Figura 42. Perfilometría en muestras base y muestras envejecidas.

Los especímenes envejecidos presentan una menor profundidad de huella de desgaste con respecto a los especímenes no envejecidos, debido a la plasticidad en la matriz por el proceso de envejecimiento que presentan los materiales envejecidos lo que les permite absorber mayor energía de impacto y como consecuencia menor desprendimiento de masa [16]; se puede considerar otra forma de corroborar los resultados obtenidos en la dureza y en la pérdida de masa de los materiales envejecidos, los cuales al perder menos masa, presentan una menor huella de desgaste como se observa en las gráficas de cada espécimen de la figura 41.

5.2.6 Análisis por microscopía óptica

La observación por microscopía óptica a través del estereoscopio realizada en la huella de desgaste, para cada uno de los materiales compuestos se aprecia en las imágenes mostradas en la figura 42.

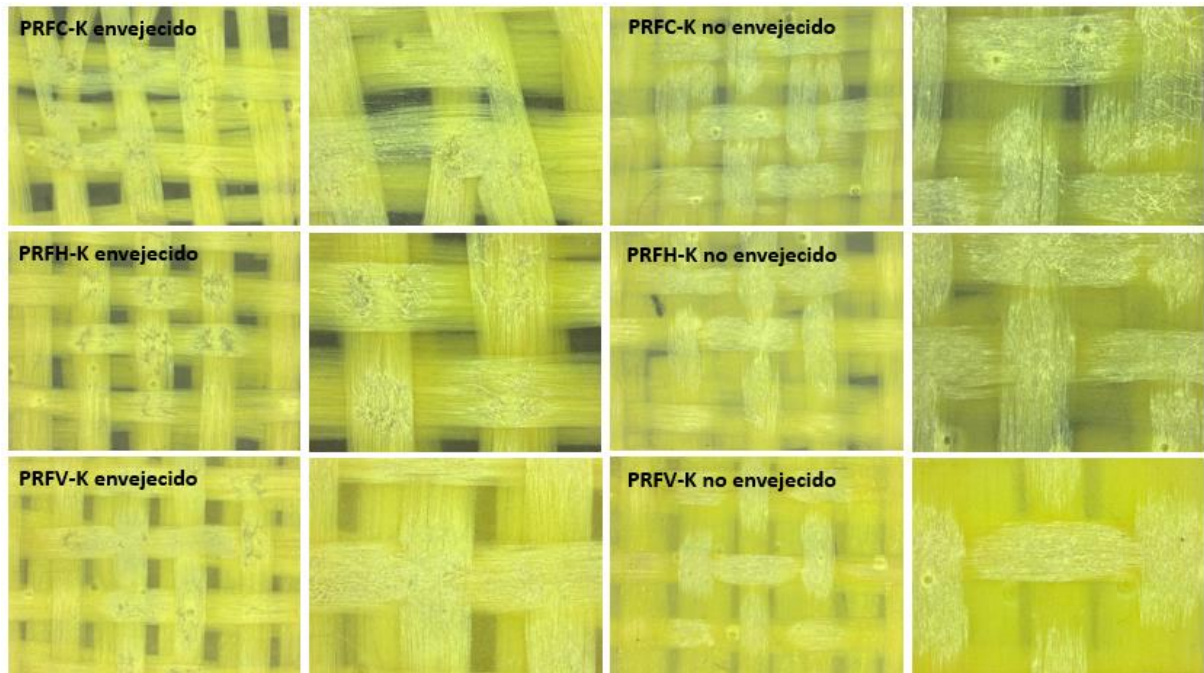


Figura 43. Huella de desgaste en especímenes con refuerzo de Fibra de Kevlar.

En la figura 42 se revela el daño erosivo provocado por la arena en la superficie de refuerzo de las muestras expuestas al desgaste erosivo; se aprecia la superficie de la muestra de PRFC-K, que representa el mayor rompimiento de los hilos de Kevlar® en comparación con la muestra PRFH-K, es la que absorbe mayor humedad, por lo que pierde mayor cantidad de masa y se refleja en el mayor rompimiento de hilos de Kevlar® manifestándose en la rotura de algunos de los hilos de la fibra de Kevlar®, con ello corroborando lo que [5] presenta en las propiedades de esta fibra como material resistente al impacto, sin llegar a la rotura total de la primera capa de fibra de Kevlar®.

5.2.7 Análisis por microscopía SEM

En las micrografías de la Figura 43 tomadas en la huella de desgaste de los especímenes del compuesto laminado híbrido envejecido y no envejecido analizados, debido a que el desgaste

erosivo se lleva en las capas de refuerzo de fibras de Kevlar se considera solo presentar estos especímenes.

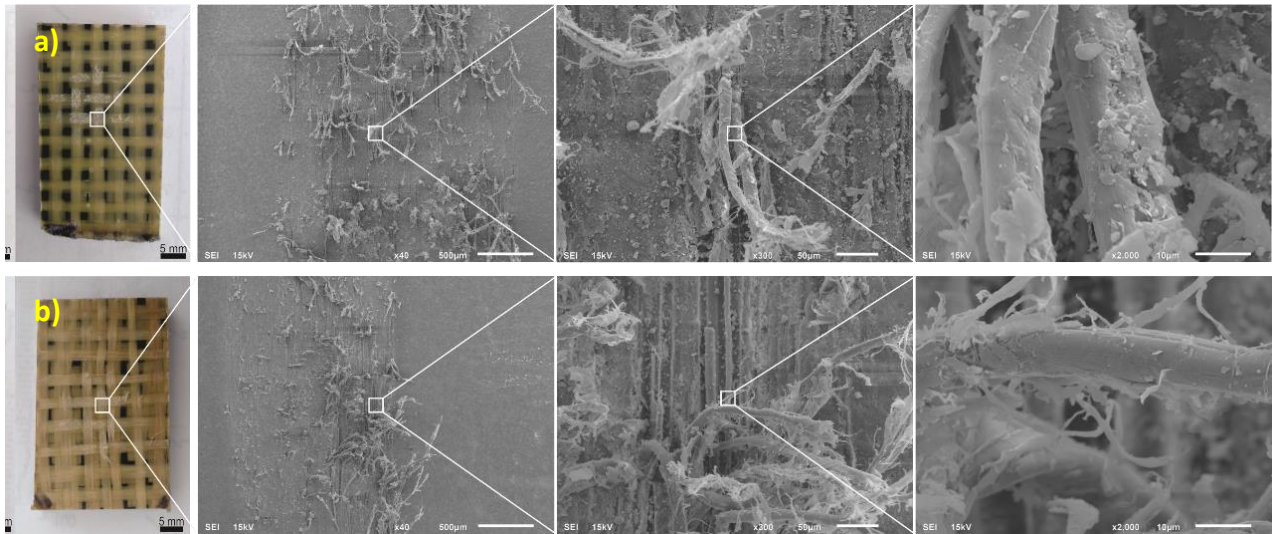


Figura 44. Observación con microscopio electrónico de barrido: a) PRFH-K no envejecido, b) PRFH-K envejecido.

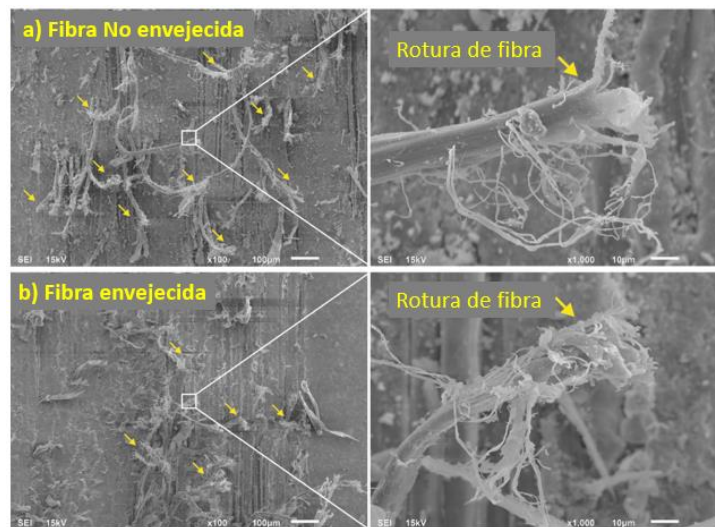


Figura 45. Observación MEB en Fibra: a) PRFH-K no envejecido y b) PRFH-K envejecida.

En la figura 44 se observa el efecto de la erosión por partículas sólidas provocado en las fibras, en donde se aprecia el mecanismo de deformación plástica y la acción cortante provocado por el impacto de las partículas de arena, siendo más evidente la deformación plástica en las fibras de los compuestos laminados sometidos al proceso de envejecimiento con respecto a los compuestos

laminados no envejecidos; que se manifiesta como una menor deformación plástica en la matriz que no fue expuesta al envejecimiento siendo más dura y menos dúctil, de igual manera se refleja como un mayor desgarre de las fibras [47]; de acuerdo a la imagen las flechas indican el sentido de la deformación plástica que presenta la matriz de los compuestos envejecidos.

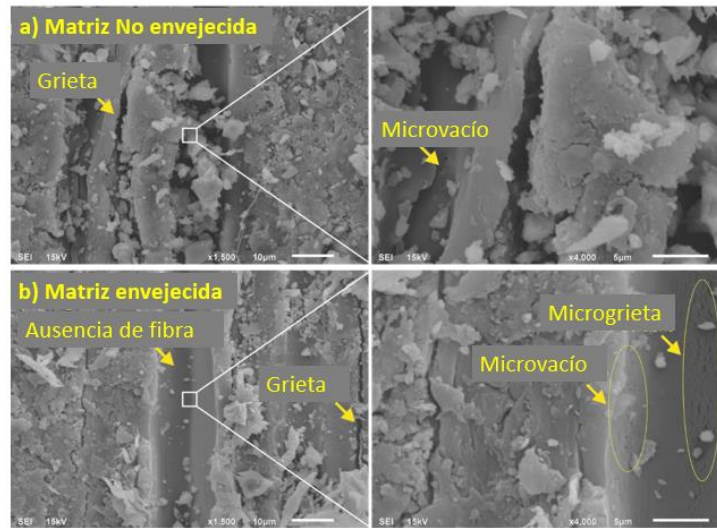


Figura 46. Observación MEB en Matriz: a) PRFH-K no envejecido y b) PRFH-K envejecida.

En la Figura 45 se observa el efecto de la erosión por partículas sólidas provocado en la matriz, en el espécimen no envejecido se observa una gran cantidad de microfisuras y microhuecos; así como, el desprendimiento de uno de los hilos de fibra lo cual puede ser atribuido a lo frágil de la matriz; mientras que en los compuestos laminados envejecidos la matriz presenta una menor cantidad de microgrietas y microhuecos [47].

5.2.8 Análisis por espectroscopia infrarroja

En la Figura 46 se muestran los análisis por medio de la técnica de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) para todas las muestras de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos.

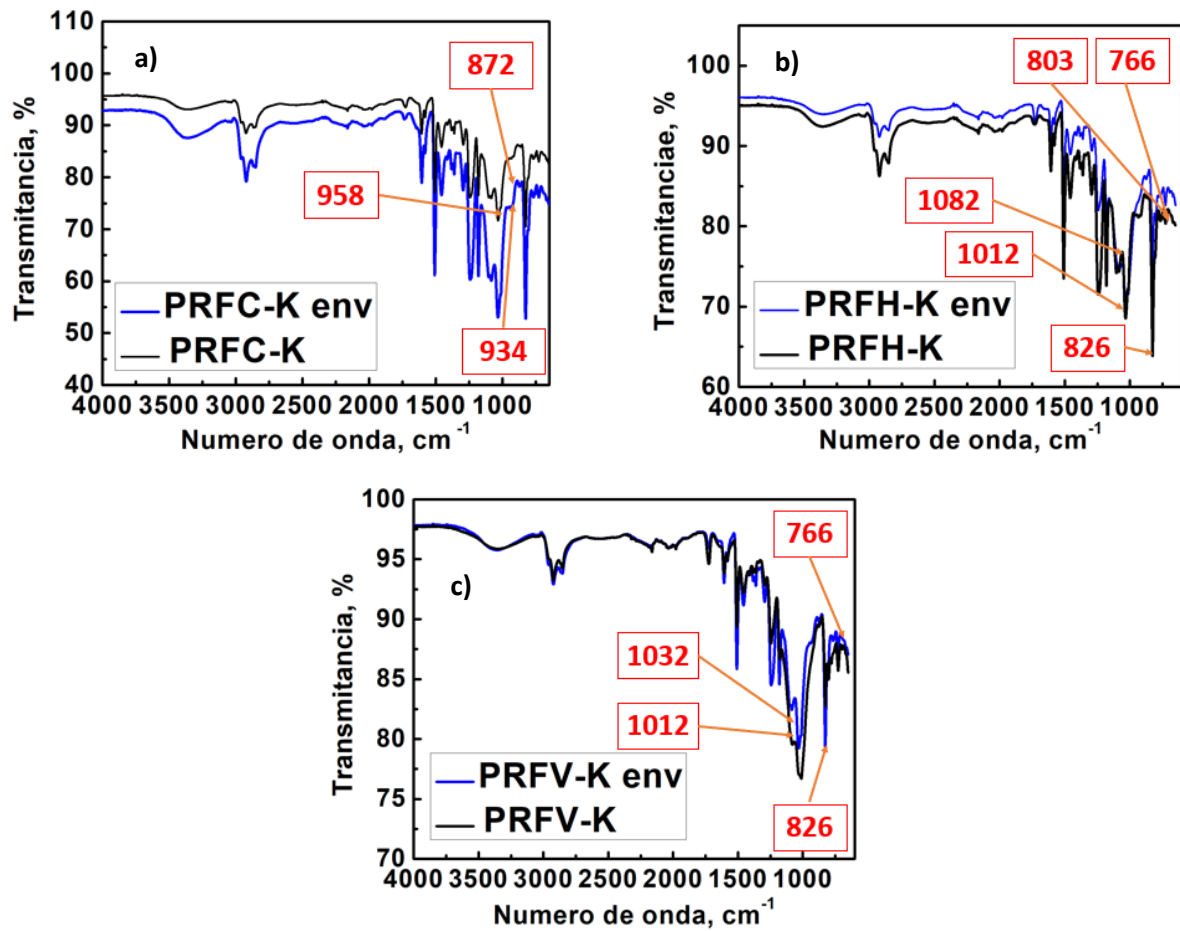


Figura 47. Espectrografía infrarroja de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos: a) PRFC-K, b) PRFH-K y c) PRFV-K.

En los laminados compuestos PRFC-K, se observó un cambio significativo en la banda infrarroja en el intervalo de 877 a 926 cm^{-1} , que corresponde a las vibraciones de anillo epoxi con un valor de 914.16 cm^{-1} [48, 49, 50]. Mientras que para los laminados compuestos PRFH-K, se presentan un cambio significativo en la banda infrarroja en el intervalo de 756 a 814 cm^{-1} teniendo una proximidad al grupo -CH del plano de cepa aromática lo que según [44] tiene un valor de 829.29 cm^{-1} . Otro cambio relevante se aprecia en la banda que va desde 1013 hasta 1046 cm^{-1} donde se encuentra el tramo aromático simétrico CO que tiene un valor de 1033.72 cm^{-1} . [48, 49, 50]. Por otro lado, en los compuestos laminados PRFV-K se aprecia un cambio significativo en la banda infrarroja en el intervalo de 759 a 810 cm^{-1} teniendo una proximidad con el grupo -CH del plano de deformación aromática que tiene un valor de 829.29 cm^{-1} según [44]. Otro cambio importante

se aprecia en la banda de intervalo de 1020 a 1105 cm^{-1} donde se encuentra el tramo aromático simétrico CO que tiene un valor de 1033.72 cm^{-1} como se reporta en [48, 49, 50]. Los resultados mostrados en las muestras envejecidas y no envejecidas corroboran que el proceso de envejecimiento provocó algunos cambios en los valores de grupos funcionales de la matriz epóxica, lo que corrobora que el proceso de envejecimiento se llevó a cabo y comprobado en los resultados de dureza, rugosidad en la superficie y cambios en la matriz debido a la pérdida de masa en los especímenes envejecidos y no envejecidos.

En la tabla 5 se presentan de forma resumida los resultados promedio obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los materiales compuestos laminados.

Tabla 5. Resumen de resultados de pruebas realizadas.

MATERIAL COMPUESTO LAMINADO						
Prueba	SIN ENVEJECIMIENTO			ENVEJECIMIENTO		
	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K	PRFV-K	PRFC-K	PRFH-K
% Humedad	-	-	-	0.73	0.80	1.56
Rugosidad (Ra)	1.47	0.25	0.68	2.37	1.22	1.57
Dureza (Shore D)	88.66	88.44	88.23	88.73	89.14	88.33
Pérdida de masa (g)	0.0052	0.0044	0.0038	0.0034	0.0040	0.0034
Profundidad de huella (μm)	-113.63	-117.5	-95.6	-83.98	-57.71	-54.19

5.3 FASE 2 Compuestos laminados reforzados con fibra de vidrio marina y Kevlar®

5.3.1 Análisis de % de absorción de humedad

En la figura 47 se observan los resultados obtenidos de la absorción de humedad de los especímenes EFK, VFK, HFK, EFVM, VFVM y HFVM, sometidos al proceso de envejecimiento acelerado durante 1176 horas en agua salina.

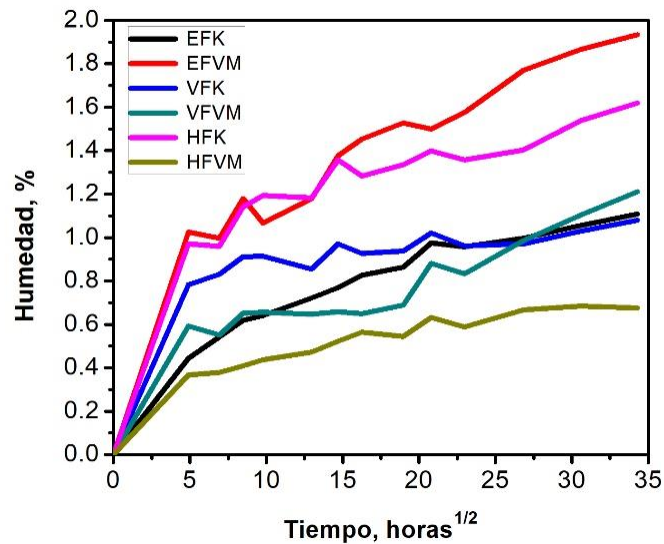


Figura 48. Gráfica de % de absorción de humedad.

El material compuesto laminado reforzado con fibra de Kevlar® en su superficie que más absorbe humedad es el HFK con 1.61% con respecto a los EFK y VFK que absorben 1.10% y 1.07 % de humedad respectivamente; siendo esto un 31.67% más de absorción de humedad con respecto a los EFK y VFK que absorben prácticamente el mismo % de humedad. El material compuesto laminado reforzado con fibra de vidrio marina que más absorbe humedad es el EFVM con un % de 1.93, seguido del VFVM con un % de 1.21 y del HFVM con un % de 0.67. Siendo esto un 37.30 % más de humedad absorbida de EFVM con respecto a VFVM y un 65.28% con respecto a HFVM. Esto se atribuye a que el HFVM, al contener una matriz híbrida; es decir, una mezcla de ambas resinas esta cambia sus propiedades químicas absorbe mayor humedad en comparación con los otros materiales. Se utilizó la región lineal de las curvas de absorción de humedad para calcular el coeficiente de difusión del material; utilizando la ecuación 2. El valor del coeficiente de difusión para los materiales reforzados con fibra de Kevlar®, el material EFK es de 1.29×10^{-3} mm/s, mientras que para el VFK es de 8.71×10^{-4} mm/s, y para el HFK de 1.68×10^{-6} mm/s; por otro lado, el coeficiente de difusión para los materiales reforzados con fibra de vidrio se tiene para el EFVM el valor de 9.14×10^{-4} mm/s, para el VFVM de 8.452×10^{-4} mm/s, y para el material HFVM un valor de 9.52×10^{-4} mm/s.

5.3.2 Rugosidad

Los resultados obtenidos de la rugosidad promedio (Ra) realizados en la superficie reforzada con fibra de vidrio marina y fibra de Kevlar® de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos, se muestran en la tabla 6; mientras que en la figura 48 se aprecia la gráfica de estos valores en donde se consideró la desviación estándar para los valores promedio de cada espécimen analizado.

Tabla 6. Rugosidad en especímenes de FASE 2

Especímen	RUGOSIDAD (Ra)											
	SIN ENVEJECIMIENTO						ENVEJECIDAS					
	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM
1	0.880	2.370	3.208	1.361	3.627	2.413	1.064	1.682	5.973	3.199	9.762	2.142
2	0.914	1.876	6.883	1.359	3.054	2.337	0.936	1.894	7.229	2.126	8.428	2.319
3	1.050	1.098	6.065	1.389	2.673	2.234	1.248	2.753	4.002	2.148	2.959	3.033
4	1.215	1.472	6.925	1.251	2.170	1.968	1.426	3.162	4.702	1.699	3.659	2.918
5	0.808	1.524	7.277	0.967	2.296	1.736	1.578	4.872	3.982	1.666	7.766	2.504
Promedio	0.974	1.668	6.072	1.265	2.764	2.138	1.250	2.873	5.178	2.168	6.515	2.583
SD	0.161	0.480	1.661	0.175	0.594	0.281	0.260	1.272	1.403	0.620	3.024	0.383

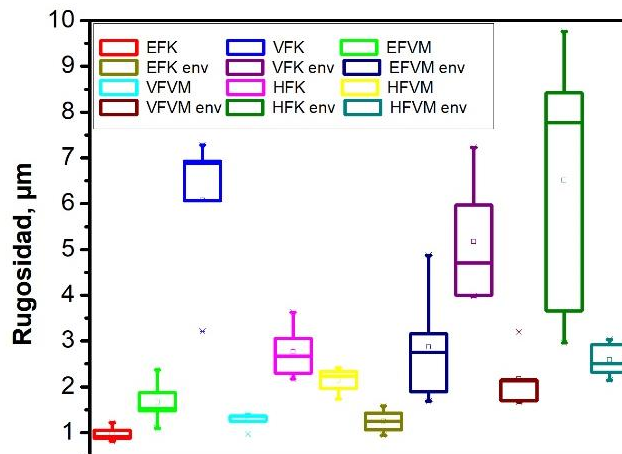


Figura 49. Gráfica de rugosidad.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que los compuestos envejecidos son los que presentan mayor rugosidad en la superficie, con respecto a los no envejecidos, esto se atribuye a la

contracción volumétrica y transformación de dúctil a frágil en la superficie de los especímenes envejecidos [46]. En los compuestos laminados no envejecidos, el compuesto con la mayor rugosidad obtenida lo presenta en el material VFK con 6.07 μm , con respecto a la EFK con 0.94 μm , que representa una diferencia del 84.51 %; mientras que, en los compuestos laminados envejecidos, el compuesto con la mayor rugosidad obtenida lo presenta en el material HFK envejecido, con 6.51 μm , con respecto a la EFK envejecido, con 1.25 μm , que representa una diferencia del 80.98 %.

5.3.3 Dureza Shore D

Los resultados obtenidos de la medición de dureza Shore D para los especímenes de los materiales compuestos laminados envejecidos y no envejecidos se observan en la tabla 7; mientras que en la figura 49, al igual que en el apartado anterior se consideró la desviación estándar al momento de graficar los valores promedio para cada espécimen analizado.

Tabla 7. Dureza Shore D en especímenes FASE 2.

DUREZA (Shore D)												
Especímen	SIN ENVEJECIMIENTO						ENVEJECIDAS					
	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM
1	90.25	89.35	85.45	89.60	88.45	88.55	88.65	87.15	84.45	88.20	88.45	87.55
2	91.00	87.20	84.80	89.90	88.05	88.80	89.35	86.85	82.20	88.75	80.65	86.65
3	90.00	88.35	85.10	90.00	86.70	88.05	87.60	87.30	85.05	88.75	87.05	87.25
4	90.45	90.85	79.45	90.10	87.90	87.60	88.35	87.50	85.75	89.65	86.55	87.75
5	91.30	89.50	85.20	90.05	87.80	88.80	88.65	86.10	84.25	88.95	78.70	87.05
Promedio	90.60	89.05	84.00	89.93	87.78	88.36	88.52	86.98	84.34	88.86	84.28	87.25
SD	0.54	1.36	2.55	0.20	0.65	0.52	0.63	0.55	1.33	0.52	4.32	0.43

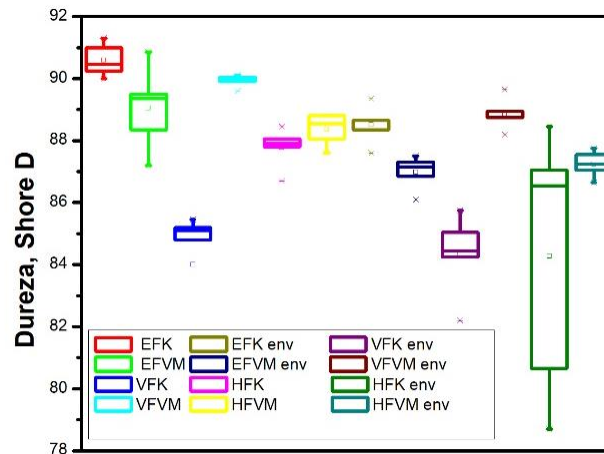


Figura 50. Gráfica de dureza Shore D.

Los compuestos envejecidos son los que presentan menor dureza en la superficie, con respecto a los no envejecidos, se atribuye a la plasticidad en la matriz y la transformación de dúctil a frágil debido al proceso de envejecimiento [46]. En los compuestos laminados envejecidos, el compuesto con la mayor dureza obtenida lo presenta en el material VFVM envejecido con 88.86, con respecto a la HFK envejecido con 0.94, lo que representa una diferencia del 5.15 %; mientras que, en los compuestos laminados no envejecidos, el compuesto con la mayor dureza obtenida lo presenta en el material EFK, con 90.60, con respecto a la VFK, con 84, lo que representa una diferencia del 7.28 %.

5.3.4 Pérdida de masa

Los resultados obtenidos de pérdida de masa, después de la prueba de erosión realizadas en las superficies de refuerzo con fibra de vidrio marina y fibra de Kevlar® para cada una de las muestras a diferentes tiempos, inicial (antes de ser sometida al proceso de erosión), 4, 8 y 12 minutos de exposición al desgaste erosivo por el flujo de arena se muestran en la tabla 8. Mientras que en la figura 50a y 50b se aprecian las gráficas de estos valores y en la figura 51 se observan los resultados de la pérdida de masa total para cada uno de estos especímenes de los diferentes compuestos laminados.

Tabla 8. Masa perdida promedio de especímenes FASE 2.

PERDIDA DE MASA (g) valores promedio												
Tiempo	SIN ENVEJECIMIENTO						ENVEJECIDAS					
	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM
0	7.2446	6.6542	6.8258	6.6583	7.0202	6.6651	7.2237	6.7550	6.8382	6.6818	6.9474	6.5931
4	7.2433	6.6460	6.8249	6.6377	7.0185	6.6544	7.2220	6.7542	6.8363	6.6760	6.9478	6.5848
8	7.2417	6.6313	6.8229	6.6151	7.0163	6.6378	7.2212	6.7495	6.8348	6.6640	6.9468	6.5787
12	7.2398	6.6208	6.8209	6.6023	7.0151	6.6298	7.2203	6.7420	6.8334	6.6502	6.9452	6.5705
Masa perdida	0.0047	0.0335	0.0049	0.0560	0.0052	0.0353	0.0034	0.0131	0.0048	0.0316	0.0022	0.0225
SD	0.0020	0.0149	0.0022	0.0248	0.0023	0.0159	0.0015	0.0060	0.0021	0.0140	0.0011	0.0095

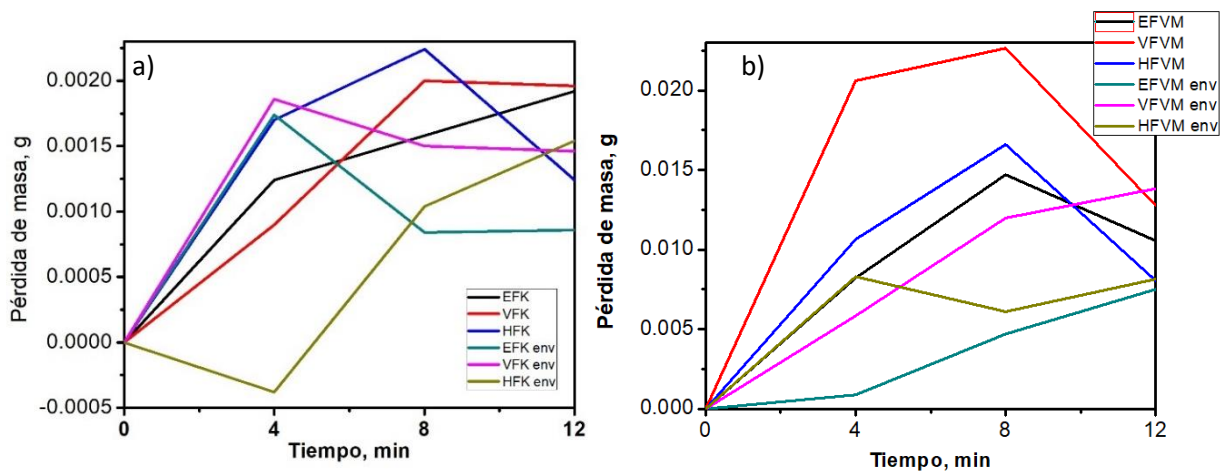


Figura 51. Gráfica de pérdida de masa.

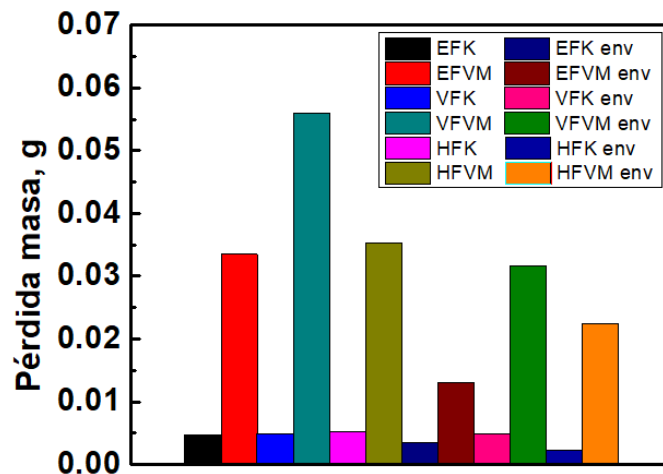


Figura 52. Pérdida de masa total.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que los materiales de los compuestos laminados los compuestos envejecidos son los que presentan menor pérdida de masa, con respecto a los no envejecidos. En los compuestos laminados envejecidos, el compuesto con la mayor pérdida de masa lo presenta en el material VFVM con 0.0316 g, con respecto a la HFK con 0.022 g, que representa una diferencia del 93.03 %; mientras que, en los compuestos laminados no envejecidos, el compuesto con la mayor pérdida de masa lo presenta en el material VFVM, con 0.0560 g, con respecto a la EFK, con 0.047 g, que representa una diferencia del 91.60 %. Esto se corrobora con las propiedades físicas y químicas que presenta la tela de fibra de Kevlar® con respecto a la fibra de vidrio marina [44, 51]. En HFK envejecida el valor negativo a los 4 minutos de desgaste erosivo, se atribuye a que en la matriz se incrustaron partículas de arena lo que aumento su masa.

5.3.5 Perfilometría (medición de huellas de desgaste)

Los resultados obtenidos de la profundidad de la huella de desgaste provocado por las partículas de arena, medidas por el perfilómetro fueron determinadas por una distancia recorrida 20 mm a una velocidad de 0.5 mm/s. Las gráficas de estos resultados son mostradas en la figura 52.

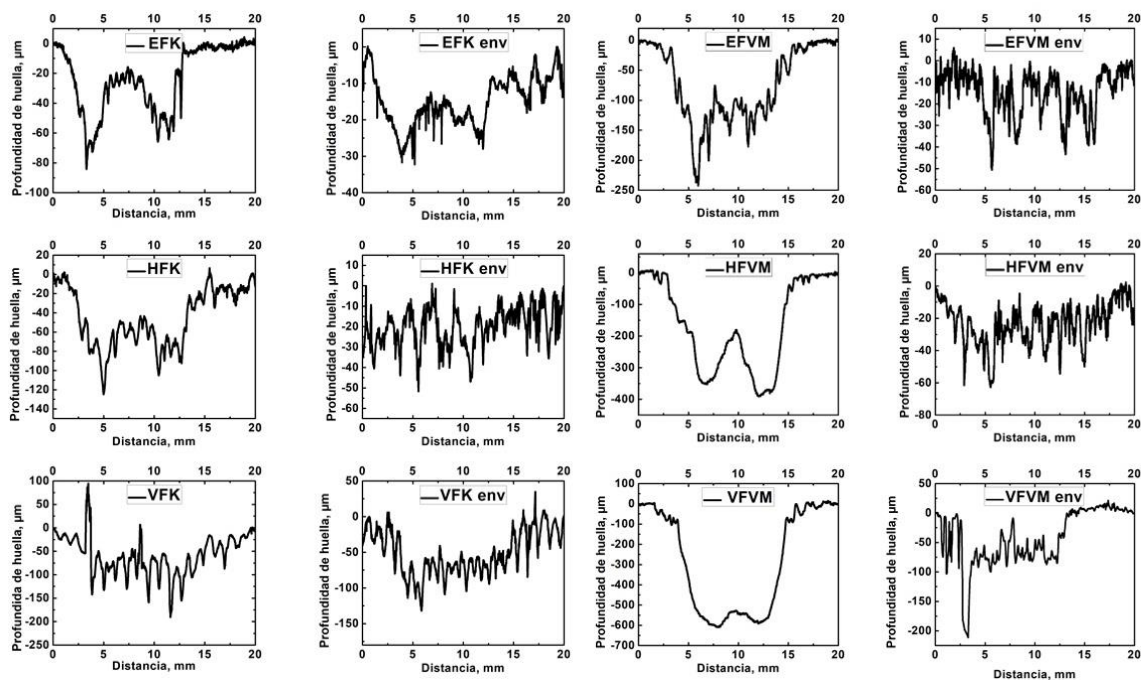


Figura 53. Perfilometría en muestras base y muestras envejecidas.

Los especímenes envejecidos presentan menor profundidad en la huella de desgaste con respecto a los especímenes no envejecidos. En los compuestos laminados envejecidos, el compuesto con la mayor profundidad de huella de desgaste lo presenta en el material VFVM con $210.51 \mu\text{m}$, con respecto a la EFK con $31.51 \mu\text{m}$, que representa una diferencia del 85.03 %; mientras que, en los compuestos laminados no envejecidos, el compuesto con la mayor profundidad de huella de desgaste lo presenta en el material VFVM, con $606.55 \mu\text{m}$, con respecto a la EFK, con $84.52 \mu\text{m}$, que representa una diferencia del 86.06 %. [44, 51], de esta manera se corroboran los resultados obtenidos en la dureza (menor) debido al comportamiento plástico que se presenta en la matriz debido al proceso de envejecimiento y al menor desgaste de los especímenes envejecidos que pierden menos masa y por consiguiente se tiene una menor huella de desgaste.

5.3.6 Análisis por microscopía óptica

La observación por microscopía óptica a través del estereoscopio realizada en la huella de desgaste, para cada uno de los materiales compuestos se aprecia en las imágenes de las figuras 53 y 54.

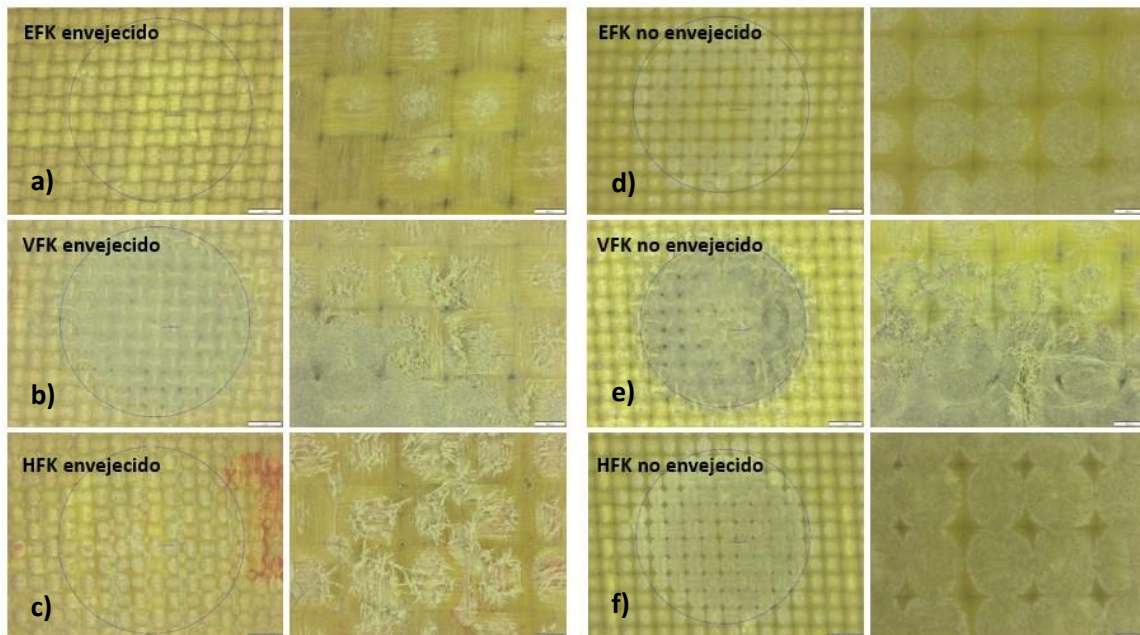


Figura 54. Huella de desgaste en especímenes con refuerzo de Fibra de Kevlar.

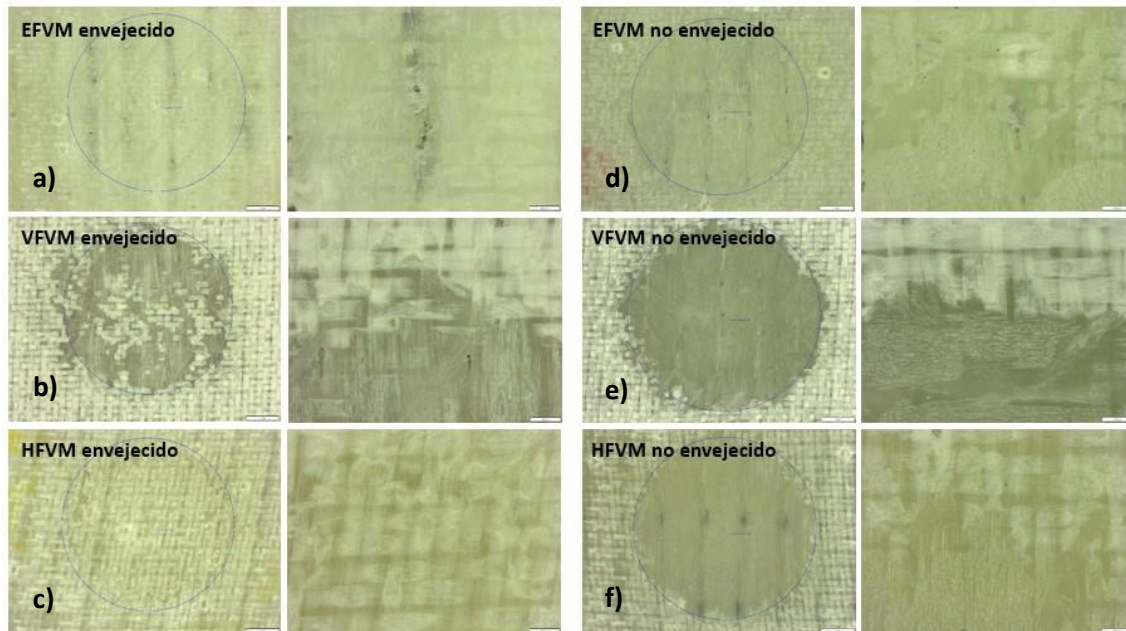


Figura 55. Huella de desgaste en especímenes con refuerzo de Fibra marina de vidrio.

En la figura 53 se revela el daño erosivo provocado por la arena en la superficie de refuerzo de las muestras expuestas al desgaste erosivo, manifestándose en la rotura de algunos de los hilos de la fibra de Kevlar®, con ello corroborando lo que [5] presenta en las propiedades de esta fibra como material resistente al impacto, sin llegar a la rotura total de la primera capa de fibra de Kevlar®. En la figura 53 se aprecian las huellas de desgaste provocadas en la superficie de refuerzo de fibra de Kevlar®, en donde se puede apreciar que el material que presenta un mayor desgaste lo presenta el VFK (figura 53b) no envejecido; en relación a los otros materiales de EFK (figura 53a) y HFK (figura 53c), corroborando lo presentado en la figura 50 para el mismo material en donde este presenta la mayor profundidad de huella de desgaste; de igual manera, en la figura 54 se aprecian las huellas de desgaste provocadas en la superficie de refuerzo de fibra de vidrio marina, en donde se puede apreciar que el material que presenta un mayor desgaste lo presenta el VFVM (figura 54b), en comparación con resultados mostrados en las figuras 54a y 54c para EFVM y HFVM no envejecido respectivamente, y mostrado en la figura 52 para el mismo material en donde este presenta la mayor profundidad de huella de desgaste.

5.3.7 Análisis por microscopía SEM

La observación por microscopía electrónica de barrido obtenidas en la huella de desgaste de los especímenes de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos se muestran en las micrografías mostradas en las figuras 55 y 56 respectivamente.

En la figura 55 se aprecian las imágenes obtenidas para los especímenes reforzados con tela de fibra de Kevlar® y fibra de vidrio marina no envejecidos. En donde se observa que estos especímenes presentan poca ductilidad lo que permite la generación de microporos, microgrietas y ausencia de fibras producto de una matriz frágil. En el acercamiento para el material VFK, se aprecia una fibra rota debido a la acción de corte que le provocó el impacto de la arena. La mayor cantidad de indicaciones mencionadas lo presenta el material HFVM, en donde aprecia una mayor deformación plástica. Mientras que en la figura 56 se aprecian las imágenes obtenidas para los especímenes envejecidos, en los cuales se observa que estos presentan una mayor ductilidad en la superficie, reflejada con mayor deformación plástica. Se aprecia la presencia de una menor presencia de microgrietas, microporos y microhuecos en relación a los especímenes no envejecidos. El espécimen VFVM presenta una mayor deformación plástica y la ausencia de algunas fibras, en relación a los otros especímenes envejecidos.

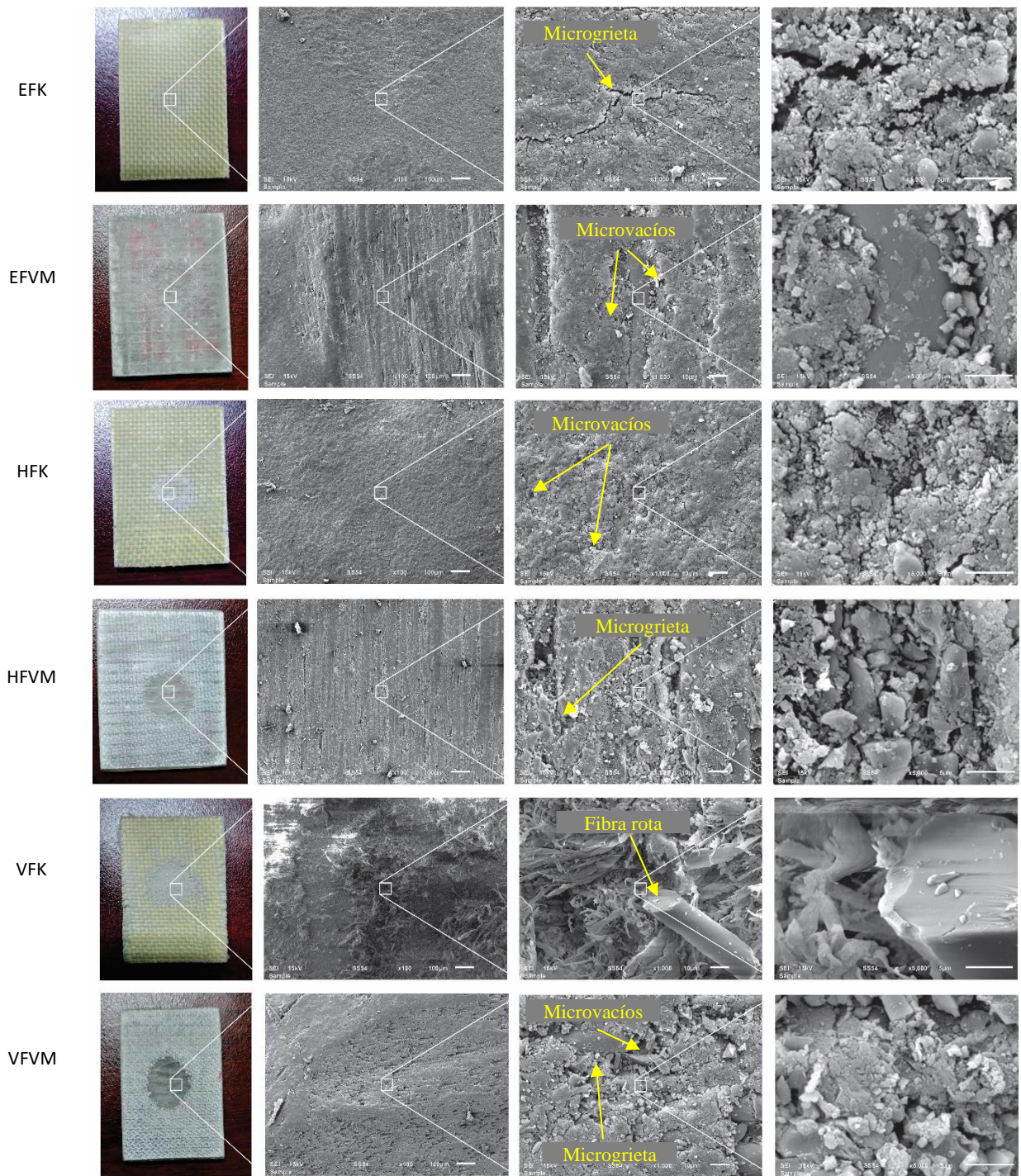


Figura 56. Observación con microscopio electrónico de barrido. Especímenes NO envejecidos.

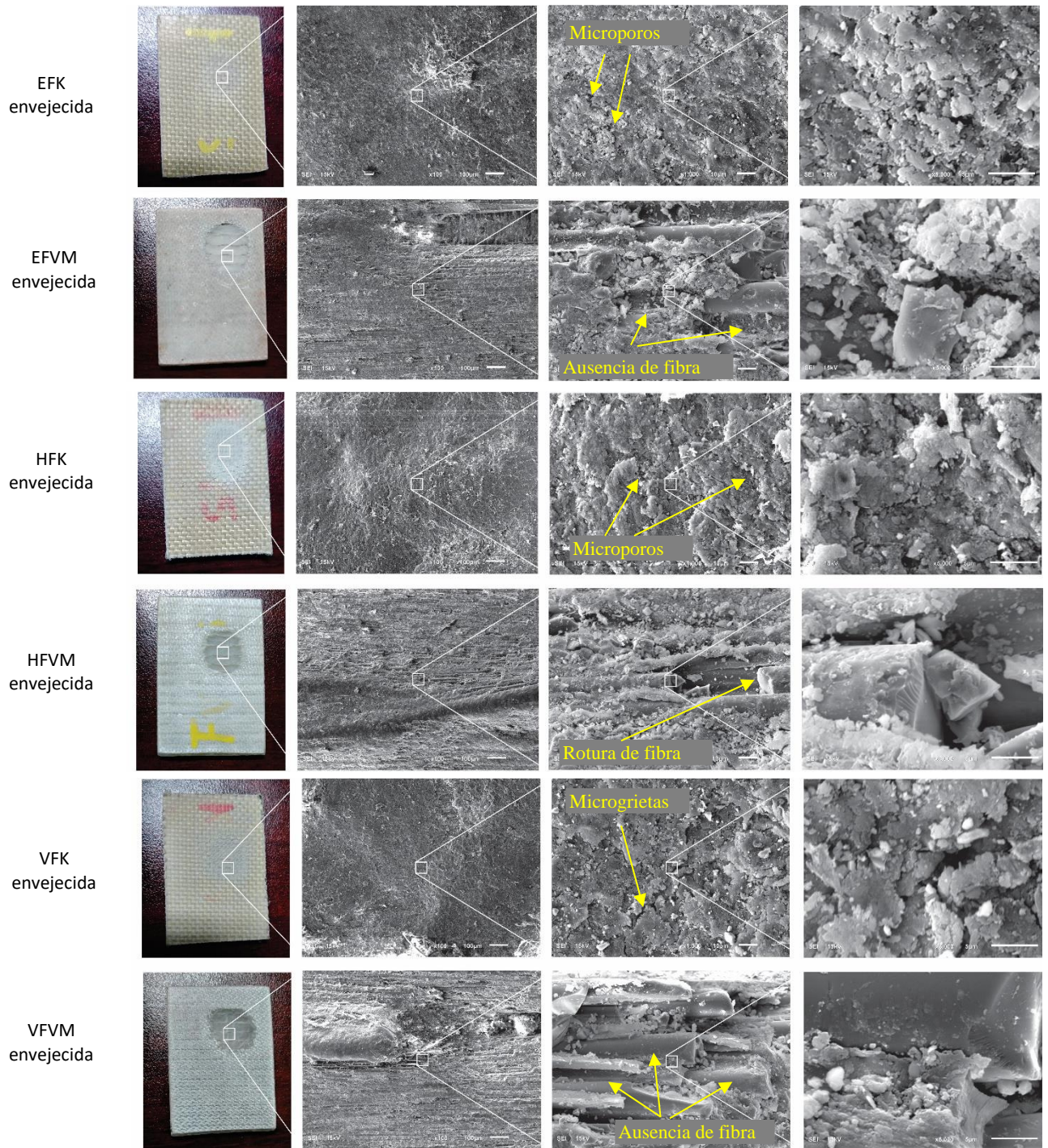


Figura 57. Observación con microscopio electrónico de barrido. Especímenes envejecidos.

5.3.8 Análisis por espectroscopia infrarroja

En la Figura 57 se muestra el análisis por medio de la técnica de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) para todas las muestras de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos.

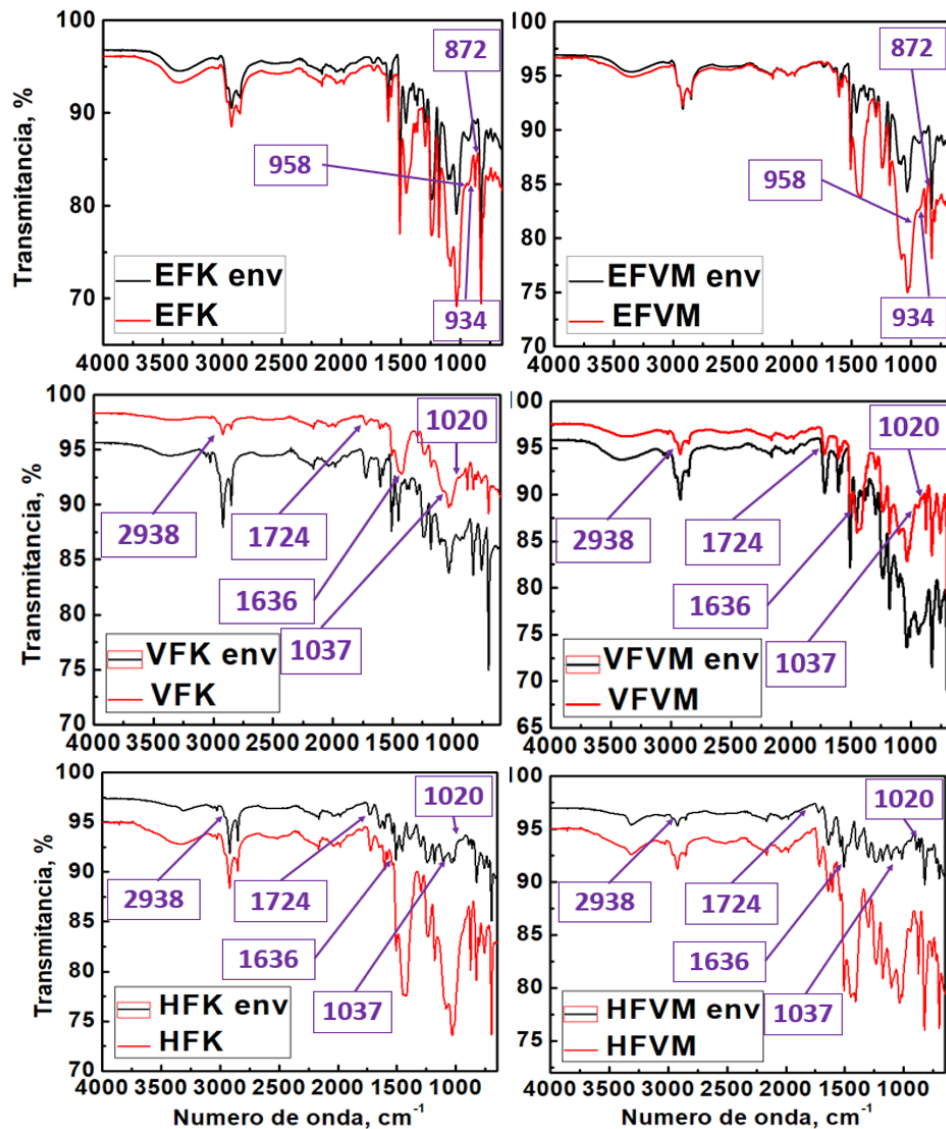


Figura 58. Espectrografía infrarroja de los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos: a) EFK, b) EFVM, c) VFK, d) VFVM, d) HFK y e) HFVM.

En los compuestos laminados EFK y EFVM se observó un cambio significativo en la banda infrarroja en el intervalo de 877 a 926 cm^{-1} , debido al proceso de envejecimiento al cual fueron sometidos los especímenes, y que corresponde a las vibraciones de anillo epoxi con un valor de

914.16 cm^{-1} [48, 49, 50]. Mientras que en los compuestos laminados VFK y VFVM se aprecia un cambio significativo en la banda infrarroja en el intervalo de 1716 a 1724 cm^{-1} que se refiere al grupo carbonilo de éster; así mismo, las bandas de absorción debidas a la vibración de estiramiento y flexión de los grupos de vinilo se presentan en el intervalo de 1631 a 1636.82 cm^{-1} y 1026.05 a 1037.63 cm^{-1} respectivamente lo que confirma la formación de vinilo [52, 53, 54]. Por otro lado, para los compuestos laminados HFK y HFVM, la estructura química de la resina epóxica no aprecia un cambio significativo en la banda del anillo epoxi en que comprende el intervalo de 877 a 926 cm^{-1} , los cambios significativos se presentan en las bandas infrarrojas en el intervalo de 1020 a 1724 cm^{-1} , que corresponden a la resina viniléster, que abarca varios grupos funcionales, principalmente a grupos carbonilo éster y de vinilo, que se atribuye a la mezcla de ambas resinas y que el proceso de envejecimiento afecta directamente a esta matriz, [53, 54, 55]. Los resultados mostrados en las gráficas de los especímenes envejecidos y no envejecidos para cada uno de los materiales en las diferentes matrices corroboran que el proceso de envejecimiento provocó el desplazamiento de algunas bandas correspondientes a grupos funcionales específicos de cada resina, siendo esto un indicador de que la matriz sufrió cambios en sus propiedades físicas y químicas, ya los resultados de las pruebas realizadas muestran que los especímenes envejecidos presentan una matriz más suave, que se ve reflejada en ser las menos afectadas por el proceso erosivo. En la tabla 5 se presentan de forma resumida los resultados promedio obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los materiales compuestos laminados.

Tabla 9. Resumen de resultados de pruebas realizadas.

MATERIAL COMPUESTO LAMINADO												
Prueba	SIN ENVEJECIMIENTO						ENVEJECIMIENTO					
	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM	EFK	EFVM	VFK	VFVM	HFK	HFVM
% de Humedad	-	-	-	-	-	-	1.10	1.93	1.07	1.21	1.61	0.67
Rugosidad (Ra)	0.97	1.67	6.07	1.27	2.76	2.14	1.25	2.87	5.18	2.17	6.51	2.58
Dureza (Shore D)	90.60	89.05	84.00	89.93	87.78	88.36	88.52	86.98	84.34	88.86	84.28	87.25
Pérdida de masa (g)	0.0047	0.0335	0.0049	0.0560	0.0052	0.0353	0.0034	0.0131	0.0048	0.0316	0.0022	0.0225
Profundidad de huella (μm)	-84.52	-241.81	-190.15	-606.55	-124.18	-387.71	-31.51	-50.26	-131.75	-210.51	-51.08	-62.76

6.- Conclusiones

Se caracterizaron, en la primera fase compuestos laminados reforzados en la superficie con fibras de Kevlar® en resina epóxica y en la segunda fase con fibra de vidrio marina y fibra de Kevlar® en matrices de resina epóxica, Viniléster e híbrida. Con base a los resultados obtenidos de las pruebas tribológicas realizadas en los materiales compuestos reforzados con fibras envejecidos y no envejecidos, se concluye que:

1. La fabricación de los compuestos laminados por el método de infusión asistida por vacío se realizó de manera exitosa lo que dio lugar a la realización de las pruebas aplicadas.
2. Se desarrolló y aplicó la metodología para la realización de pruebas de erosión por partículas secas utilizando arena de mar como partícula sólida de impacto.
3. La rugosidad de los especímenes envejecidos en ambas fases tiene un comportamiento similar en donde los especímenes que fueron sometidos al proceso de envejecimiento presentan una mayor rugosidad en relación a los especímenes no envejecidos debido a que el proceso de envejecimiento plastifica la matriz.
4. Debido a la plastificación de la matriz por el proceso de envejecimiento provoca en los materiales compuestos una menor dureza superficial con respecto a los compuestos laminados que no se envejecieron.
5. Como consecuencia del proceso de envejecimiento, los especímenes envejecidos pierden menos masa debido a que la matriz plastificada es más dúctil lo que le permite absorber mayor energía de impacto y por consiguiente se desprende menos material, observándose en una menor profundidad en la huella de desgaste; en comparación con los compuestos laminados que se envejecieron.
6. Por medio de la observación óptica, se aprecia que en todos los compuestos laminados envejecidos y no envejecidos de la primera fase, se aprecia el rompimiento de algunos hilos de la fibra de Kevlar®, debido al proceso de desgaste erosivo sin llegar al rompimiento total de la primera capa de refuerzo de Kevlar®. Los mismos resultados se obtienen en la segunda fase, para los compuestos laminados reforzados con fibra de Kevlar®, independiente mente de la matriz; mientras que, los para los compuestos laminados reforzados con la fibra de vidrio marina, en estos materiales si se llega al material que

refuerza la matriz ya que en todos los casos el refuerzo desaparece.

7. El proceso de envejecimiento realizado a los materiales compuestos laminados viene a favorecer a la matriz que se plastifica, debido a la absorción de humedad, permite absorber mayor energía de impacto, que favorece a una menor pérdida de material por el impacto de partículas sólidas, lo que de alguna forma también favorece mantener su geometría sin presentar una deformación superficial; de tal manera que la propuesta de utilizar fibra de Kevlar® como refuerzo superficial podría ser usada como estrategia para mejorar la resistencia al desgaste por impacto de partículas sólidas en los materiales compuestos usados para la fabricación de álabes de turbinas hidrocínicas y con ello se presenta una alternativa del uso de las industrias verdes, en la obtención de electricidad e ir dejando la dependencia del uso de combustibles fósiles.
8. La propuesta del uso de fibras de Kevlar® como refuerzo superficial en la fabricación de álabes de hidroturbinas es una aportación tecnológica que se apuesta como una alternativa de nuevos materiales compuestos laminados.

7.- Bibliografía

- [1] F. Rubino, A. Nisticò, F. Tucci, P. Carlone. *Journal of Marine Science and Engineering. Marine Application of Fiber Reinforced Composites* (2020). <https://doi.org/10.3390/jmse8010026>
- [2] E. J. Trujillo, C. R. González, J. A. R. González. 1er. Congreso internacional CEMIE-Océano. Proceso de fabricación de un alabe de turbina hidrocínética de material compuesto reforzado con fibras mediante moldeo por transferencia de resina. <https://cemieoceanomx/libro-resumenes-congreso.html>
- [3] J. C. M. Mendoza. Estudio experimental del desgaste erosivo en materiales compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Pachuca. Pachuca de Soto Hgo. 2019.
- [4] E. Asmatulu, J. Twomey and M. Overcash. Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *Journal of Composite Materials*. 2013
- [5] A. G. C. Muciño, J. A. C. Hernández, E. E. V. Cárdenas, E. O. A. Dávila, A. I. M. Pérez, S. L. Ledesma, A. E. Navarro. Caracterización de materiales compuestos híbridos para su aplicación en estructuras aeronáuticas con alto desgaste erosivo. Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM 22 al 24 de septiembre de 2021 Pachuca, Hgo., México.
- [6] E. O. A. Dávila, E. V. Cárdenas, A. G. C. Muciño, M. M. Ríos, S. L. Ledesma, A. I. M. Pérez. N. C. Castro. Microscopy Society of America. Characterization Microstructural of Kevlar®-based Composites Obtained by Vacuum Infusion Process, (2020) . doi:10.1017/S1431927620021625
- [7] R. A. Chowdhury, M. V. Hosur, M. Nurrudina, A.Tcherbi-Narteh, A. Kumar, V. Boddub, S. Jeelani. Self-healing epoxy composites: preparation, characterization and healing performance. Elsevier. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014.
- [8] R. A. Singh, S. Jayalakshmi, M. Gupta. Wear and Friction of Advanced Composites. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*. 2016

- [9] C-H- Shen. G. S. Springer. Effects of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials. Department of Mechanicals Engineering, the University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109. 1976
- [10] Y. Menail, A. E. Mahi, M. Assarar, B. Redjel, A. Kondratas. The effects of water aging on the mechanical properties of glass-fiber and kevlar-fiber epoxy composite materials. Research Gate. 2009.
- [11] C. S. de la Rosa, M. V. Torres, J. G. G. Salcedo, E. A. G. Hernández, R. C. Melendez, L. I. F. Cabrera. Erosion-corrosion of X-52 steel pipe under turbulent swirling impinging jets. Elsevier Wear. 2017
- [12] U.S. Tewari, A. P. Harsha, A. M. Ha¨ger, K. Friedrich. Solid particle erosion of carbon fibre– and glass fibre–epoxy composites. Elsevier. Composites science and Technology. 2003.
- [13] M. Muralidharan, T. P. Sathishkumar, N. Rajini, P. Navaneethakrishnan, S. A. Kumar, S. O. Ismail, K. Senthilkumar, S. Siengchin. Evaluation of tensile strength retention and service life prediction of hydrothermal aged balanced orthotropic carbon/glass and Kevlar/glass fabric reinforced polymer hybrid composites. Applied Polymer, Wiley. 2021.
- [14] C. P. Gao, G. F. Guo, F. Y. Zhao, T. M. Wang, B. Jim, B. Wetzel, G. Zhang, Q. H. Wang. (2016). Tribological behaviors of epoxy composites under water lubrication conditions, journal homepage: www.elsevier.com/locate/triboint. 2016.
- [15] C. R. González, E. J. Trujillo, J. A. R. González, A. Mornas, A. Talha. Low-velocity impact behavior of glass fiber-MWCNT/ polymer laminates exposed to seawater and distilled water aging, Polymer Composites. 2020; 1–17. <https://doi.org/10.1002/pc.25530>. 2019.
- [16] E. José-Trujillo, C. Rubio-González y J. A. Rodríguez-González. Seawater ageing effect on the mechanical properties of composites with different fiber and matrix types, Journal of composite Materials. 2018. pp 1, 2.
- [17] B. Liu, P. Zhu, L. M. Bao. Effects of Hot Water Absorption and Desorption on Solid Particle Erosion of Poly (Ethylene Terephthalate)-Based Composites, Journal of Fiber Bioengineering and Informatics. 2018

- [18] J. A. R. González, C. R. González. Seawater effects on interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy laminates modified with multiwall carbon nanotubes, *Journal of composite Materials*. 2020
- [19] S. Biradar, S. Joladarashi, S.M. Kulkarni. Investigation on mechanical behaviour of filament wound glass/epoxy composites subjected to water absorption and also tribological studies using Taguchi method, *Journal homepage: www.elsevier.com/locate/matpr*. 2021.
- [20] W. P. C. Herrera y O. G. T. Cunalata. Principios de tribología aplicados a la ingeniería mecánica. *Ingeniería y tecnología. Área de Innovación y Desarrollo, S.L.* 2019 pp. 11
- [21] V. L. Popov. Principios y aplicaciones de mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia. Traducción Susana Moreno Flores. Edición José Miguel Martín Martínez. *Publicacions de la Universitat D’ Alacant*. 2020 pp. 334
- [22] E. S. Guerrero. “Estudios de los tratamientos térmicos en el acero AISI 1045 en un sistema acuoso evaluado con la norma ASTM G-105-89 que permitirá determinar la velocidad de desgaste del material”. Trabajo estructurado. Facultad de ingeniería civil y mecánica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. 2015
- [23] S. L. Beatove, M. J. G. Ruiz, F. Avellan, B. Q. Arboleda, S. O. Bustamante. Simulación numérica de turbinas Francis. Fondo Editorial Universitario EAFIT, Editorial UAO. Septiembre 2017 pp. 58
- [24] C. A. R. León, C. A. L. Arce. E. S. Guerrero. Puesta a punto de la cámara salina y equipo de desgaste por abrasión según normas técnicas ASTM B117 y ASTM G-65, ubicados en el laboratorio de molinos de la Universidad Libre. Universidad Libre de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Bogotá D. C. 2017
- [25] E. S. Guerrero. “Estudios de los tratamientos térmicos en el acero AISI 1045 en un sistema acuoso evaluado con la norma ASTM G-105-89 que permitirá determinar la velocidad de desgaste del material”. Trabajo estructurado. Facultad de ingeniería civil y mecánica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. 2015

- [26] J. A. Criollo. Influencia de la exposición a la intemperie en el desgaste de un material compuesto de látex y partículas de gránulo de caucho reciclado. Trabajo experimental, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2021. pp 6
- [27] V. A. G. Culebro. Caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de autoclave. Tesis, Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología. CIDESI, Santiago de Querétaro, Qro, 2017
- [28] D. L. F. Lalinde Castrillon. Estudios de compuestos de GRC y adiciones activas: propiedades mecánicas, envejecimiento acelerado y durabilidad. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Valencia. Valencia, 2020.
- [29] A. R. Pozo, Agüemes. Af. Lopez. Materiales compuestos de fibras naturales. Departamento de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad politécnica de Madrid, Madrid, 2019.
- [30] <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>
- [31] V. H Guerrero. Nuevos materiales, aplicaciones estructurales. Víctor Hugo Guerrero editor. Quito ecuador. 2011
- [32] TDS Epolam 2015 Resin.
- [33] Ficha técnica. Vinilester V-117 NAZZA
- [34] <https://www.composites-ate.com/tecnologias-de-fabricacion/>
- [35] S. Oler. Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuestos. Monografía CIMME No. 74, abril 2003. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona España.
- [36] R. L. L. Armando. Fabricación y caracterización de material compuesto de matriz polimérica reforzadas con fibra de vidrio. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. 2018
- [37] P. A. Quintero. “Caracterización en cámara de niebla salina de los biomateriales Ti6Al14V y 316L”. Proyecto de grado. Facultad de ingeniería mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, 2016.

- [38] O. Sahuquillo. Estudio de la degradación de materiales compuestos base poliéster reforzados con fibra de vidrio en medios neutros y alcalinos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 2012
- [39] <https://es.aliexpress.com/i/32458889076.html>
- [40] ISO 4287, Quick guide to surface roughness measurement, Reference guide for laboratory and workshop. Bulletin No 2229. Mitutoyo America Corporation www.mitutoyo.com One Number to Serve You Better 1-888-MITUTOYO (1-888-648-8869)
- [41] Langton M, Hermansson A M. Image analysis determination of particle size distribution. Food Hydrocolloids 1993; 7: 11-22 [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(09\)80021-0](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80021-0)]
- [42] Z. O. Miguel. Estado actual de la energía mareomotriz en México. Tesis de licenciatura. ESIME. IPN. (2019) pp. 39.
- [43] E. I. G. Santiago, M. Edgar, R. Silva. Estimación teórica de la potencia disponible en las fuentes de energía marina en México. Tecnología y ciencias del agua, (2022) ISSN 2007-2422, DOI: 10.24850/j-tyca-13-05-08.
- [44] Kevlar® Aramid Fiber Technical Guide. Dupont Kevlar®. <https://www.dupont.com/news/Kevlar®-properties.html>
- [45] S. L. Valença, S. Griza, V. G. de Oliveira, E. M. Sussuchi, F. G. C. de Cunha. Elsevier composites, Part B Engineering. Evaluation of the mechanical behavior of the epoxy compound reinforced with plain Kevlar® fabric and glass/Kevlar® hybrid fabric. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.040>
- [46] M. Fang, N. Zhang, M. Huang, B. L., K. Lamnawar, C. Liu y C. Shen. Effects of Hydrothermal Aging of Carbon Fiber Reinforced Polycarbonate Composites on Mechanical Performance and Sand Erosion Resistance, Polymers MDPI Article. 2021.
- [47] M. V. Torres, J. R. L. Camacho, R. E. B. Castillo, E. A. G. Hernández, E. E. V. Cárdenas, J. V. Torres. Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles. Wear 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.07>. Elsevier.

- [48] M. Cosnita, C. Cazan, A. Duta. Effect of waste polyethylene terephthalate content on the durability and mechanical properties of composites with tire rubber matrix. *Journal of Composite Materials* 2017, Vol. 51(3) 357–372. DOI: 10.1177/0021998316645850. SAGE.
- [49] A. M. Visco, V. Brancato, N. Campo. Degradation effects in polyester and vinyl ester resins induced by accelerated aging in seawater, 2011. *Journal of Composite Materials* 46(17) 2025–2040. DOI: 10.1177/0021998311428533. SAGE.
- [50] J. O. Flórez, M. M. T. Luque. Resistencia a la corrosión de recubrimientos orgánicos por medio de espectroscopía de impedancia electroquímica. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 16 (1): 43-5, enero-junio de 2012. ISSN 0123-2126. Pag. 6
- [51] Derakane® Momentum 411-350 Resina epoxy Viniléster.
<http://plastiformas.com.mx/pdf/resinas/DERAK-MOM-411-350-ESP>
- [52] F. Abdelmol, L. A. Carlsson. Water uptake in epoxy matrix with voids: Experiments and modeling. (2018). *Journal, of composite materials*, SAGE
- [53] <https://www.quimicaorganica.org/espectroscopia-infrarroja/783-espectro-infrarrojo-de-eteres.html>
- [54] P. Gupta, P. Chandaliya, B. L. Hiran. Synthesis & Characterization of Vinyl Ester Resin f p-Cresol and Tertiary Butyl Phenol. *International Journal of Chemistry and Applications*. ISSN 0974-3111 Volume 4, Number 3, (2012) pp 175-185
- [55] C. Alia, J. a. Jofre-Roche, J. C. Suarez, J. M. Arenas, J. M. Martín-Martínez. Characterization of the chemical structure of vinyl ester resin in a climate chamber under different conditions of degradation. *Polymer Degradation and Stability*. Elsevier

ANEXO 1. Artículo: XXVIII CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM



MEMORIAS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN MÉXICO
XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
21 AL 23 DE SEPTIEMBRE DE 2022 BOGOTÁ, COLOMBIA



Tema A2a. Materiales: (*Materiales avanzados con aplicaciones estructurales*)

“Estudio del desgaste erosivo por impacto de partículas de arena en materiales compuestos laminados reforzados con fibras de Kevlar® sometidos a ambiente salino”

Abel Eslava Hernández^a, Julio A. Rodríguez González^b Edgar E. Vera Cárdenas^a, Armando I. Martínez Pérez^a, Carlos Rubio González^b

^aTecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca (DEPI), Carretera México-Pachuca Km. 87.5, C. P. 42080, Colonia Veta Prieta, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

^bCentro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDEI), Departamento de Energía. Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, C. P. 76125, Santiago de Querétaro, Qro, México.

Autor Contacto: m21201047@pachuca.tecnm.mx

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consiste en estudiar el efecto que provoca el ambiente salino en materiales compuestos reforzados con fibras de Kevlar® cuando son sometidos a desgaste erosivo por partículas sólidas de arena. Se estudiaron materiales compuestos de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra híbrida (aramida + carbono), los cuales fueron reforzados con dos capas de fibra de Kevlar® en la superficie externa de los laminados. La manufactura de los laminados fue por el proceso de infusión de resina asistida por vacío y después de su curado se obtuvieron especímenes de prueba para ser sometidos a un proceso de envejecimiento acelerado en agua salina durante 1122 h. Se utilizó arena de mar como partícula sólida con el fin de emular las condiciones de desgaste erosivo de componentes estructurales marinos. Para la realización de la prueba de desgaste erosivo se consideraron los siguientes parámetros: 4.5 bar de presión, velocidad de impacto de 4.7 m/s en un ángulo de 90°. Los resultados obtenidos demuestran que los materiales envejecidos en agua salina absorben mayor energía de impacto con respecto a los materiales no envejecidos, provocando en ellos una menor pérdida de masa, menor profundidad en la huella de desgaste, una menor dureza y una mayor rugosidad debido a la plasticidad de la matriz.

Palabras Clave: Material compuesto, Kevlar, proceso de envejecimiento, desgaste erosivo, arena de mar.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the effect of a saline environment on composite materials reinforced with Kevlar® fibers when subjected to erosive wear by solid sand particles. Composite materials of epoxy resin reinforced with glass fiber, carbon fiber, and hybrid fiber (aramid + carbon) were studied, which were reinforced with two a layer of Kevlar® fiber on the external surface on the laminates. The manufacture of the laminates was by vacuum-assisted resin infusion process and after curing test specimens were obtained to be subjected to an accelerated aging process in saline water for 1122 h. Sea sand was used as solid particle in order to emulate the erosive wear conditions of marine structural components. To carry out the erosive wear tests, the following parameters were considered: pressure of 4.5 bar, impact speed of 4.7 m/s, at a 90° angle. The results obtained show that materials aged in saline water absorb greater impact energy than non-aged materials, causing less mass lost, less, depth in the wear mark, less hardness and greater roughness due to the plasticity of the materials matrix.

Keywords: Composite material, Kevlar, aging process, erosive wear, sea sand.

ANEXO 2. Constancia: XXVIII CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM



20 Aniversario
SOMIM
Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A.C.
otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a

Abel Eslava Hernández

al presentar el artículo

A2_55 "Estudio del desgaste erosivo por impacto de partículas de arena en materiales compuestos laminados reforzados con fibras de Kevlar® sometidos a ambiente salino"

durante el XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, VI CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y VII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL celebrado del 21 al 23 de septiembre de 2022 en la Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.


Dr. Simón Martínez Martínez
Presidente de la SOMIM A.C.



ANEXO 3. Artículo: XXIX CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM

MEMORIAS DEL XXIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
20 al 22 DE SEPTIEMBRE DE 2023 CIUDAD JUÁREZ, CHIHUAHUA, MÉXICO

DOI: 10.59920/SEFR3545

Tema A2a. Materiales: (Materiales avanzados con aplicaciones estructurales)

“Estudio del desgaste erosivo por impacto de partículas de arena en materiales compuestos laminados reforzados con fibra de vidrio marina y fibra de Kevlar®”

Abel Eslava Hernández^a, Julio A. Rodríguez González^b Edgar E. Vera Cárdenas^a, Armando I. Martínez Pérez^a, Carlos Rubio González^c

^aTecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca (DEPI), Carretera México-Pachuca Km. 87.5, C. P. 42080, Colonia Veta Prieta, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

^bCentro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDEI), Departamento de Energía. Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, C. P. 76125, Santiago de Querétaro, Qro, México.

^cTecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Epigmenio Gonzalez 500, Fracc. San Pablo, C. P. 76130, Santiago de Querétaro, Qro, México.

Autor Contacto: m21201047@pachuca.tecnm.mx

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consiste en estudiar el desgaste erosivo provocado por el impacto de partículas sólidas en materiales compuestos laminados. Se estudiaron materiales compuestos laminados a base de resina Epolam 2015, resina viniléster y resina híbrida (resina Epolam 2015 con resina viniléster), reforzados con fibra de vidrio unidireccional y adicionando una capa de tejido de fibra de vidrio marina y fibra de Kevlar® en ambas superficies externas. La manufactura de los laminados fue realizada por el proceso de infusión de resina asistida por vacío y posterior a su curado se obtuvieron los especímenes de prueba. Para la prueba de desgaste erosivo se consideró utilizar arena de mar como partícula de impacto, 4.5 bar de presión, velocidad de partícula de impacto de 5.8 m/s y ángulo de impacto de 90°. Los resultados obtenidos demostraron que los materiales a base de resina Epolam 2015 reforzados con fibra de Kevlar®, pierden menos masa con respecto a los demás materiales compuestos laminados.

Palabras Clave: Material compuesto, Kevlar®, fibra de vidrio marina, desgaste erosivo, arena de mar.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the erosive wear caused by the impact of solid particles in laminated composite materials. Laminated composite materials based on Epolam 2015 resin, vinyl ester resin and hybrid resin (Epolam 2015 resin with vinyl ester resin), reinforced with unidirectional fiberglass and adding a layer of marine fiberglass fabric and Kevlar® fiber on both external surfaces. The manufacture of the laminates was carried out by the vacuum-assisted resin infusion process and, after curing, the test specimens were obtained. For the erosive wear test, it was considered to use sea sand as the impact particle, 4.5 bar pressure, impact particle speed of 5.8 m/s and an impact angle of 90°. The results obtained showed that the Epolam 2015 resin-based materials reinforced with Kevlar fiber lose less mass with respect to other laminated composite materials.

Keywords: Composite material, Kevlar®, marine fiberglass, erosive wear, sea sand.

1. Introducción

En los últimos años, los materiales compuestos laminados reforzados con fibras se han utilizado cada vez más en lugar de los materiales tradicionales como el acero, aluminio y madera, debido a sus propiedades

mecánicas y físicas superiores como la resistencia mecánica, rigidez, baja densidad y gran durabilidad [1, 2]. El uso de dos o más fibras para formar compuestos puede compensar los inconvenientes de usar un solo material [3]. Estas ventajas han convertido a los materiales compuestos laminados como una de las mejores opciones de materiales para propósitos de diseño

ANEXO 4. Constancia: XXIX CONGRESO ANUAL DE LA SOMIM

The certificate features a blue and yellow background with a diagonal split. On the left, there is a circular logo for the 'CONSEJO DIRECTIVO 2022-2024' of SOMIM (Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C.), with the text 'SOMIM Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica' below it. On the right, there is a circular logo for 'UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ' and the acronym 'UACJ' in large blue letters. The main text of the certificate reads: 'La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C. otorga el presente RECONOCIMIENTO a Abel Eslava Hernández'. Below the name is a signature line. At the bottom right, there is a signature of 'Dr. José Manuel Riesco-Ávila' and his title 'Presidente de la SOMIM A.C.'. A small logo for the 'XXIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM' is located at the bottom left, with the slogan 'Por una vida científica, por una ciencia vital'.

CONSEJO DIRECTIVO
2022-2024
SOMIM
Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
UACJ

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C.
otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a

Abel Eslava Hernández

Por su destacada participación como PONENTE con el tema "Estudio del desgaste erosivo por impacto de partículas de arena en materiales compuestos laminados reforzados con fibra de vidrio marina y fibra de Kevlar®", durante el XXIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, celebrado del 20 al 22 de septiembre de 2023 en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Dr. José Manuel Riesco-Ávila
Presidente de la SOMIM A.C.

XXIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
"Por una vida científica, por una ciencia vital"