



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Pachuca

"2020, Año de Leona Vicario"

INSITITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES
COMPUESTOS KEVLAR-BASE, KEVLAR-CARBÓN Y
KEVLAR-VIDRIO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTA

ING. ALMA GUADALUPE CAMARGO MUCIÑO.

DIRECTOR DE TESIS
DR. EDGAR ERNESTO VERA CÁRDENAS

CO-DIRECTOR
DRA. ERIKA OSIRIS AVILA DÁVILA

SINODAL
DRA. MARISA MORENO RÍOS

60 Páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo noviembre de 2020.



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo. C.P. 42080, A. P. 276.

Tels. : (01 771) 710 52 51, 170 03 45, 170 03 01, 170 06 87

www.tecnm.mx | www.itpachuca.edu.mx



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Pachuca

“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Pachuca, Hidalgo, 18/Septiembre/2020
OFICIO No. DEPI-045-20

**C. ING. ALMA GUADALUPE CAMARGO MUCIÑO
PRESENTE**

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

Caracterización mecánica de materiales
compuestos kevlar-base, kevlar-carbón y
kevlar-vidrio

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

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia


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



C.p. Archivo
ECCO/LMPP

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

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

ACTA

Siendo las 13:00 horas del 15 de febrero de 2020, reunidos en el aula S10, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: Caracterización mecánica de materiales compuestos kevlar-base, kevlar-carbón y kevlar-vidrio, con el siguiente contenido:

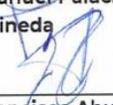
Resumen/Abstract
Nomenclatura
Contenido
Índice de cuadros, gráficas y figuras.
1- Introducción
2- Estado del arte
3- Marco teórico
4- Materiales y métodos
5- Resultados
Conclusiones
Bibliografía
Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que la Ing. Alma Guadalupe Camargo Muciño obtenga el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Édgar Ernesto Vera Cárdenas y la Dra. Erika Osiris Ávila Dávila, profesores de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

ATENTAMENTE

El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia

EL CONSEJO DE POSGRADO

 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Ávila Dávila	 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

Agradecimientos

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

A mi Padre Celestial por la vida y permitirme haber vivido esta experiencia para mi formación académica y crecimiento profesional.

A mi director de tesis el Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas por su apoyo y guía en el desarrollo de la presente investigación.

A mi codirectora de tesis la Dra. Erika Osiris Avila Dávila por su comprensión, guía y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A mi sinodal la Dra. Marisa Moreno Ríos por formar parte de la comisión revisora de la presente investigación.

Al Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas y al M. en C. Saúl Ledesma Ledesma por su apoyo y asesoría para llevar a cabo la elaboración de los materiales compuestos base Kevlar.

A mi familia por su apoyo incondicional en este tiempo, especialmente a mis padres, a mi esposo y mis hijos por su comprensión y apoyo.

A todo el cuerpo académico del área de posgrado por su contribución en mi formación.

A mis compañeros por su apoyo y amistad.

Al Centro de Nanociencias del IPN, Zacatenco y al Dr. Nicolás Cayetano Castro por su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

Al Tecnológico Nacional de México por el apoyo financiero para la realización de esta Tesis, a través de la Convocatoria Proyectos de Investigación Científica 2020, clave de proyecto 7896.20-P.

Resumen

En la actualidad se han realizado diversos estudios relacionados con la amplia gama de aplicaciones de materiales compuestos. Por ejemplo, estos se utilizan en la industria militar, equipo de protección para deportes extremos, como protección de estructuras de puentes y en el mejoramiento de autos de carreras. A su vez, se usan en estructuras o componentes aeroespaciales y aeronáuticos. En este último caso, existe gran interés tecnológico; por tal motivo, se requiere realizar más estudios de los materiales compuestos. El trabajo de investigación está dirigido a caracterizar mecánica y micro estructuralmente los materiales compuestos base kevlar (kevlar-kevlar/carbono, kevlar-vidrio, kevlar-carbono), con un arreglo de fibra bidireccional a una proporción 55/45 resina/fibra, en % aproximado, fabricados mediante proceso de infusión. Cada compuesto obtenido fue analizado química, microestructural y mecánicamente (mediante Espectrometría de Infrarrojo, Difracción de Rayos X, Microscopia Óptica, Microscopia Electrónica de Barrido con EDS, se identificó su Dureza Barcol, su resistencia al Impacto Izod y su Resistencia Tensil). La caracterización mecánica de los especímenes se llevó a cabo bajo las pruebas normadas ASTM D-256, ASTM D-3039 y ASTM D 2583. El trabajo muestra, que los materiales compuestos elaborados por el método de infusión tienen homogeneidad, buena resistencia al impacto, buena resistencia tensil.

Abstract

Studies have now been conducted related to the wide range of composite applications. For example, these are used in the military industry, protective equipment for extreme sports, as protection of bridge structures and in the improvement of race cars. In turn, they are used in aerospace and aeronautical structures or components. In the latter case, there is great technological interest; for this reason, further studies of composite materials are required. That is why, the research work is aimed at mechanically and structurally characterizing kevlar base composite materials (kevlar-kevlar/carbon, kevlar-glass, kevlar-carbon), with a bidirectional fiber arrangement at a ratio of 55/45 resin/fiber, in approximate %, manufactured by infusion process. Each compound obtained was analyzed chemically, microstructurally and mechanically (using Infrared Spectrometry, X-Ray Diffraction, Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy with EDS, its Barcol hardness, its Izod impact resistance and its tensile resistance were identified). The mechanical characterization of the specimens was carried out under the standard ASTM D-256, ASTM D-3039 and ASTM D 2583 tests. The work shows, that the composite materials produced by the infusion method have homogeneity, good impact resistance, good tensile resistance.

Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Planteamiento del problema	1
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Alcance	3
2	Estado del arte	4
3	Marco teórico.....	7
3.1	Materiales compuestos	7
3.1.1	El refuerzo (fibras).....	7
3.1.1.1	Fibra de carbono	8
3.1.1.2	Fibra de kevlar	10
3.1.1.3	Fibra de vidrio	11
3.1.2	La matriz.....	11
3.2	Técnica de manufactura de materiales compuestos	14
3.2.1	Infusión	14
3.3	Técnicas de caracterización de materiales.....	16
3.3.1	Espectrometría de infrarrojo	16
3.3.2	Difracción de rayos X.....	18
3.3.3	Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	19
3.3.3.1	Electrones secundarios	20
3.3.3.2	Electrones retrodispersados	20
3.3.3.3	Electrones de Auger.....	21
3.4	Caracterización mecánica	21
3.4.1	Ensayo de impacto Izod.....	21
3.4.2	Ensayo de tensión	21
3.4.3	Ensayo de dureza	22
4	Materiales y métodos.....	23
4.1	Materiales	23
4.1.1	Fabricación de materiales compuestos	23
4.2	Equipos y procedimientos	26

4.2.1 Preparación de las muestras.....	26
4.2.2 Espectrometría de infrarrojo (FT_IR).....	27
4.2.3 Difracción de rayos X (DR-X)	28
4.2.4 Microscopia óptica (MO)	28
4.2.5 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	29
4.2.5.1 Preparación de muestras para MEB	30
4.2.6 Muestras para el ensayo de impacto Izod	30
4.2.7 Ensayo de tensión	31
4.2.8 Ensayo de dureza.....	32
5. Resultados.....	34
5.1 Densidad de materiales compuestos	34
5.2 Caracterización de material de refuerzo-fibras por microscopia óptica (MO).....	34
5.3 Caracterización por MEB del material de refuerzo-fibras.....	35
5.4 Caracterización de los materiales compuestos por microscopia electrónica de barrido (MEB)	36
5.5 Caracterización por espectrometría de infrarrojo (FT-IR)	40
5.6 Caracterización por Difracción de RX (DR-X).....	41
5.7 Caracterización mecánica.....	43
5.7.1 Ensayo de dureza.....	43
5.7.2 Ensayo de impacto Izod.....	44
5.7.3 Ensayo de tensión	52
6. Conclusiones.....	55
Bibliografía	56
Anexo I. Productos derivados de la tesis.....	60

Lista de figuras

Figura 1. Fibras unidireccionales y bidireccionales	8
Figura 2. Diagrama de esfuerzo-deformación de un material compuesto y sus componentes, a) capacidad elástica de la matriz es menor la de la fibra, b) la capacidad elástica de la matriz es mayor que el de la fibra, c) la capacidad elástica de la matriz y la fibra son iguales.....	13
Figura 3. Proceso de infusión	15
Figura 4. Espectro electromagnético	17
Figura 5. Frecuencias vibracionales para algunos enlaces	18
Figura 6. Esquema de Bragg para la reflexión en distintas familias de planos, d , d_1 , d_2 , que corresponden a los espacios reticulares d_{hkl} . de índices de Miller (hkl).....	18
Figura 7. Relación entre los instrumentos y la capacidad de observación	19
Figura 8. Esquema del volumen de interacción.....	20
Figura 9. Péndulo Izod y colocación de probeta	21
Figura 10. Códigos de fallas típicas en las Pruebas de Tensión de acuerdo con la norma ASTM 3039	22
Figura 11. Durómetro Barcol.....	22
Figura 12. Diagrama de bloques de la metodología	23
Figura 13. Corte de fibra por medios Manuales y Mecánicos. a) Corte con tijeras especiales para cortar fibra de Kevlar, b) corte con sistema de corte G3 L-3200 CV.....	24
Figura 14. Proceso de infusión. 1 condiciones de elaboración, 2 y 3 limpieza de placa metálica, 4 corte de fibra, 5 colocación de fibra y colocación perimetral de cinta poliuretano, 6 colocación de tela peel ply, malla omega flow media sistemas de inyección de resina y vacío, 7 colocación de la bolsa de vacío, 8 verificación de vacío, 9 desgasificación de la resina, 10 medición de vacío, 11 suministro de la resina y 12 placas de material compuesto.....	25
Figura 15. Corte de placas por medios manuales	26
Figura 16. Cortadora metalográfica con sistema de enfriamiento.....	26
Figura 17. Baño ultrasónico y agua destilada para la limpieza de muestras en el laboratorio de metalografía del I.T. Pachuca	27
Figura 18. Espectrómetro infrarrojo/FT-IR, del CINVESTAV unidad Querétaro.....	27

Figura 19. Difractómetro de rayos X, Rigaku (SmartLab), del CIDESI unidad Querétaro	28
Figura 20. Microscopio óptico, Olympus del I.T. Pachuca.....	28
Figura 21. Preparación de las fibras para para analizarse por microscopia óptica en el I.T. Pachuca y por microscopia electrónica de Barrido en el CNMN del IPN	29
Figura 22. Microscopio electrónico de barrido JMB-7800F del CNMN del IPN	29
Figura 23. Evaporadora DESK II DENTON VACUUM.....	30
Figura 24. Probetas para prueba de impacto Izod	30
Figura 25. Prueba de impacto Izod. a) Escala. b) Sujeción de la muestra.....	31
Figura 26. Probetas normadas para prueba de tensión, elaboradas en el laboratorio de posgrado del I.T. Pachuca	32
Figura 27. Máquina universal de tensión, SHIMADZU de 250 KN del laboratorio de pesados de la ESQIE del IPN.....	32
Figura 28. Ensayo de dureza. a) durómetro Barcol GYZJ 934-1, b) calibración, c) marcado de muestras, d) ensayo de dureza Barcol.....	33
Figura 29. Imágenes obtenidas por MO. a) fibra de vidrio, b) fibra de carbono y c) fibra de kevlar	35
Figura 30. Micrografías obtenidas por MEB. a) fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra de kevlar	36
Figura 31. a) Micrografía de material kevlar-vidrio, 102 x, (b) espectro EDS del área en el recuadro de a)	37
Figura 32. a) Micrografía de material kevlar-vidrio, 120 x, b) espectro EDS puntual de a).....	37
Figura 33. a) Micrografía de material kevlar-carbono, 120x, b) espectro EDS del área en el recuadro de a)	38
Figura 34. a) Micrografía de material kevlar-carbono, 120x, b) espectro EDS puntual de a)	38
Figura 35. a) Micrografía de material kevlar-kevlar/carbono, 120x, b) espectro EDS del área en el recuadro de a).....	39
Figura 36. a) Micrografía de material kevlar-kevlar/carbono, 120x, b) espectro EDS puntual de a)	39
Figura 37. Espectro IR de resina Epolam 2015+endurecedor y de los compuestos base fibra de vidrio, carbono y base kevlar/carbono, por separado	40
Figura 38. Espectros obtenidos por DRX de los MC base fibra de: vidrio, Carbono y kevlar/carbono, por separado.....	42

“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

Figura 39. Gráfica esfuerzo-deformación de material compuesto kevlar-vidrio.....	52
Figura 40. Gráfica esfuerzo-deformación de material compuesto kevlar-vidrio.....	53
Figura 41. Gráfica esfuerzo-deformación de material compuesto kevlar-kevlar/carbono	53

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades y aplicaciones de la fibra de carbono.....	9
Tabla 2. Propiedades de la fibra de vidrio	11
Tabla 3. Composición de fibra de vidrio tipo E	11
Tabla 4. Cantidad de películas de fibra para fabricar materiales compuestos.....	24
Tabla 5. Cantidad de resina por endurecedor	25
Tabla 6. Tipo de falla de especímenes de acuerdo con la norma ASTM D 256 Impacto Izod	31
Tabla 7. Densidad de materiales compuestos.....	34
Tabla 8. Resultados de ensayo de dureza Barcol.....	43
Tabla 9. Resultados de pruebas Izod kevlar- kevlar/carbón.....	44
Tabla 10. Resultados de ensayo Izod material kevlar-carbón	47
Tabla 11. Resultados de ensayo Izod material kevlar-vidrio.....	49
Tabla 12. Promedio de resultados de ensayos de ensayos de impacto Izod.....	51
Tabla 13. Tipos de falla en probetas ensayadas en tensión	54

1.Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Desde hace ya algunos años, se han realizado avances en la industria aeronáutica para disminuir el peso de las aeronaves, para lo cual, se han utilizado diferentes materiales como los materiales compuestos debido a su baja densidad y módulo de elasticidad [1]. Actualmente, algunas piezas de la estructura y el fuselaje son hechas de fibra de carbono con una matriz polimérica o resina epóxica, sin embargo, hay mucho campo por explorar dentro de los materiales compuestos. La mayoría son elaborados in situ, mediante procesos de moldeo o infusión de manera que pueden variar los parámetros de fabricación y en consecuencia varían las propiedades químicas y mecánicas de los mismos. Por eso, es importante caracterizar los materiales para tener un conocimiento preciso de sus propiedades [2]. Así, se hizo necesario realizar la caracterización microestructural y mecánica de los compuestos con base en pruebas normadas, en el último caso, de acuerdo con la sección D de la American Society for Testing and Materials-ASTM por sus siglas en inglés.

1.2 Justificación

Se han realizado estudios acerca del desempeño del kevlar en diferentes aplicaciones: equipos de protección, industria militar, seguridad pública, que han demostrado que es un material altamente resistente al corte, al impacto, con un alto módulo de elasticidad y termo estabilidad. Por lo que va en aumento su uso en automóviles de carreras y aún más en la industria aeronáutica y aeroespacial, por ejemplo, como protección de la Estación Espacial Internacional. Por su costo elevado, se ha usado en combinación con otras fibras (carbono y vidrio) en la fabricación de materiales compuestos. En la presente investigación, se manufacturaron materiales base kevlar en combinación con fibras de carbono, vidrio y kevlar/carbono. Con un arreglo con capas de kevlar en la superficie como material de aporte de protección. Cabe resaltar que en México han sido pocos los estudios en materiales compuestos con la aplicación del kevlar como una alternativa de aporte.

Por tal motivo, es importante realizar primero la fabricación del material y, posteriormente realizar la caracterización mecánica y microestructural del mismo, con el fin de obtener resultados de la resistencia del uso de un recubrimiento de kevlar, como material de aporte.

El tipo de matriz es polimérica, resina epóxica, utilizada en el proceso de infusión la cual tiene una buena adherencia a las fibras y una consistencia homogénea, es resistente a los álcalis, tiene buena tolerancia dimensional en la fabricación, por lo que se espera que su uso otorgue excelente fluencia, estabilidad dimensional y control en ambientes corrosivos. De lo anterior, se espera que pueda ser un material útil para la industria aeronáutica. Cabe mencionar que la presente investigación se realiza en vinculación con el CENTA (Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas) donde se fabricaran los materiales compuestos por el método de infusión. Para la caracterización microestructural se contó con el apoyo en infraestructura del CIDESI, unidad Querétaro, área de Ingeniería de Superficies, del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del IPN. Así mismo, para la caracterización mecánica se utilizó el equipo de ensayo de impacto del AACTyM de la UAEH y la máquina universal del laboratorio de pesados de la ESIQIE-IPN, unidad Zacatenco.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Realizar la caracterización mecánica y microestructural de los materiales compuestos base kevlar, kevlar-vidrio, kevlar-carbón y kevlar-kevlar/carbón, con el fin de estudiar su aplicación en el área aeronáutica.

Objetivos específicos

1. Fabricar materiales compuestos base kevlar, mediante proceso de infusión a proporción 55 % fibra / 45 % matriz.
2. Caracterizar mecánicamente los materiales compuestos base kevlar bajo pruebas normadas ASTM D 256, ASTM D 3039, ASTM D 2583.
3. Caracterizar químicamente cada compuesto por espectrometría de infrarrojo y microestructuralmente mediante difracción de rayos X, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido.

1.2 Alcance

Se llevó a cabo la fabricación de materiales base kevlar de 3 diferentes espesores de 2.5, 4 y 6.3 mm mediante proceso de infusión. Se caracterizó el material, química, mecánica y microestructuralmente.

2. Estado del arte

Desde hace algunos años se han usado nuevos materiales en la industria aeronáutica para disminuir el peso de las aeronaves. A continuación, se mencionan algunos de los estudios previos relacionados con el tema de la presente investigación.

V.A. Gómez. C. en 2017 presentó un estudio para encontrar los métodos de fabricación de materiales compuestos donde se obtenga propiedades similares a los obtenidos por la técnica de autoclave. Para ello, analizó cinco técnicas (Infusión, Autoclave, Infusión-presión, Infusión-presión- temperatura y RTM) de manufactura. El comportamiento mecánico se realizó utilizando una máquina de ensayos (Instron) configurada a flexión en tres puntos, una máquina de ensayos bajo configuración de tensión, y se adaptó un sistema de correlación digital de imágenes para detectar el campo de deformación ocurrido durante las pruebas de tensión, esto permitió determinar patrones similares entre ellas y así tener alternativas tecnológicas para el desarrollo de compuestos [3]. Diego Miramontes en 2014 caracterizó mecánicamente las fibras de kevlar, vidrio y carbono para hélices de aerogenerador, con secciones circulares y rectangulares sometiénolas a pruebas de compresión y pruebas a flexión para determinar su resistencia probando después de haberlas sumergido 24 horas en agua. En base a los resultados se estima un alto desempeño si se emplea en la construcción de hélices para aerogenerador, debido a los análisis de los resultados con la presión provocada por el viento, evidencia esencial de las pruebas fue llevar hasta la falla cada espécimen, y repetir la carga, una vez que la muestra recuperaba casi en su totalidad su geometría inicial. Estas condiciones severas de carga no deben darse con regularidad en ningún aerogenerador en uso. De ahí se calcula un grado de seguridad aceptable para hélices construidas con fibra [4]. S.L. Valenca, S. Griza, V. Gomes en 2014 realizaron un estudio en el cual evaluaban el comportamiento mecánico de un compuesto de epoxi reforzado con kevlar 49 y con una fibra híbrida de kevlar 49 - vidrio y un alto módulo de flexión, así como alta resistencia a la tracción, observando que el compuesto hecho de kevlar tiene una menor densidad que el compuesto híbrido. En el híbrido las fibras de refuerzo utilizadas son en arreglo $0^{\circ}/90^{\circ}$, realizando la caracterización de la resistencia tensil mediante la norma ASTM D 3039 considerando que por sus altos valores de resistencia mecánica son una alternativa para su uso en industria [5]. R. M'Saoubi et al en 2015, presentaron un estudio sobre las herramientas de

corte de alto rendimiento para aleaciones aeroespaciales y compuestos utilizados actualmente en aplicaciones aeromotoras y aeroestructurales, así como las condiciones de corte y las características de integridad de las superficies de los materiales difíciles de maquinar como aleaciones a base de níquel, titanio y materiales compuestos centrándose en los procesos de mecanizado y las estrategias de refrigeración [6]. En la guía estándar de pruebas para materiales compuestos de matriz polimérica de la American Society for Testing and Materials menciona las ASTM D 3039 y ASTM D 2583 [7]. Blanca Parga et al. realizaron un estudio de las ventajas y desventajas de algunos materiales compuestos con matriz epóxica y poliéster reforzados con fibra de vidrio, carbono y aramida para su aplicación en embarcaciones deportivas, comparando su densidad y propiedades mecánicas, resaltando que las resinas son las más idóneas para embarcaciones ligeras de altas prestaciones con refuerzo de fibras de kevlar, carbono y vidrio unidireccional o tejido. Las fibras de aramida son ideales por su baja densidad lo cual aligera la estructura y las fibras híbridas de aramida y carbono mejora la resistencia a la compresión y la resistencia al impacto de los laminados de carbono [8]. Guerrero V. et al. realizaron un estudio para la creación de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra de vidrio mediante método de aspersion para la fabricación de tableros de material compuesto, llevando a cabo la caracterización mecánica mediante normativa ASTM mediante ensayos de tensión, flexión e impacto [9]. Anabel Nava et al. hacen un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra de carbono y su matriz polimérica de resina epóxica, la manufactura del material compuesto se realizó mediante Vacuum Bag Wet Lay –up, observando que las probetas de matriz polimérica de resina epóxica generaban burbujas por el mezclado y curado al ambiente, lo cual mejoraba en el material compuesto por el refuerzo y por el proceso de manufactura al vacío [10]. Wilson Webo et al. analizaron el impacto y la dureza de los materiales compuestos de resina epóxica y sisal, realizando la manufactura mediante proceso de infusión, variando los porcentajes de fibra de refuerzo, realizándole pruebas de impacto y dureza encontrando una mejora en ambas conforme aumenta la fibra de refuerzo [11]. H. Mendoza-Nava et al. caracterizaron un material compuesto reforzado con fibra de carbono manufacturado por método de infusión para aplicaciones aeronáuticas, el cual es una alternativa por su relación resistencia-peso, por lo que se busca mejorar las técnicas de manufactura considerando que las fibras son el principal constituyente de carga del material

compuesto, mientras que la matriz transfiere la carga entre las fibras, proporciona resistencia mecánica, estabilidad térmica, resistencia al medioambiente y la corrosión, así como tolerancia al daño. Utilizaron la norma ASTM D 3039 para ensayo de tensión considerando que las propiedades mecánicas del material están estrechamente ligadas al proceso de manufactura [12]. Judith Wollbrett- Britz realizó un estudio sobre el comportamiento mecánico longitudinal y transversal, micro mecanismos de deformación y el efecto de la temperatura en fibras de kevlar 29, comparando con las propiedades mecánicas de las fibras de kevlar, 29,49 y 149 de las que la densidad es de 1.44,1.44 y 1.47 gramos sobre centímetro cubico respectivamente. Así mismo muestra una gráfica esfuerzo-deformación de kevlar 49 la deformación máxima próxima al 2% y el esfuerzo máximo cerca de los 3000 MPa, concluyendo su investigación en que la mejor resistencia tensil de las fibras de kevlar 29 se encuentra a temperatura ambiente y la resistencia mínima es a 150 °C [13].

3. Marco teórico

A continuación, se muestran los principales conceptos teóricos que fundamentan el desarrollo de esta investigación.

3.1 Materiales compuestos

Un material compuesto se compone de dos o más fases físicamente diferentes y mecánicamente separables que se distinguen por sus estructuras químicas diferentes. En la estructura de un material compuesto se distinguen dos partes que son el refuerzo y la matriz, unidos de forma mecánica. El refuerzo se refiere a las fibras que conforman al material compuesto, siendo esta la fase dispersa tal como: carbono, vidrio, kevlar, boro, etc... y otras fibras orgánicas.

Las ventajas de los materiales compuestos son: Mayor resistencia que los materiales convencionales, son más eficientes ya que presentan una excelente distribución entre fuerza y densidad, menor peso con mayor resistencia, reducción del peso de un 20 % en comparación con los materiales metálicos, se pueden manufacturar formas más complejas, mayor vida útil, son resistentes a la corrosión, baja conductibilidad térmica y eléctrica entre otras. Por sus propiedades son utilizados en la industria aeronáutica y aeroespacial, por otra parte, permite un diseño más limpio, sin remaches.

3.1.1 El refuerzo (fibras)

Los refuerzos pueden ser de partículas de fibra larga o corta que pueden estar dispersas aleatoria o uniformemente en forma unidireccional, bidireccional o en forma de tejido como se muestra en la figura 1. El refuerzo proporciona resistencia y rigidez al material compuesto. La disposición de las fibras cortas tiene carácter local y puede proveer isotropía mecánica al compuesto. Por el contrario, si el refuerzo está en forma uniforme, el efecto reforzante es de carácter general, pero de tipo anisotrópico debido a la orientación de las fibras.

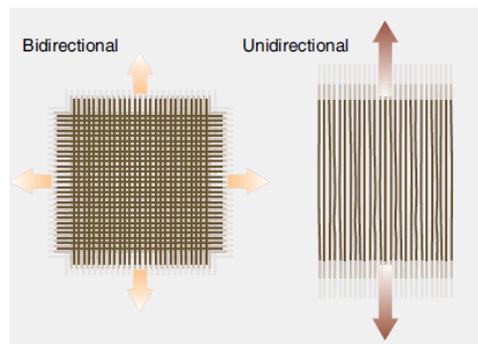


Figura 1. Fibras unidireccionales y bidireccionales [3].

Es importante conocer que un material compuesto laminado requiere de varias capas de fibra, la proporción óptima es de 60% de fibra y 40 % de resina [14].

Por otra parte, las fibras más comunes en el sector aeronáutico son las de fibra de carbono, fibra de vidrio y la fibra de aramida (kevlar) [14].

3.1.1.1 Fibra de carbono

Las fibras de carbono que miden alrededor de 5 a 10 μm de diámetro consisten predominantemente en átomos de carbono. Tiene propiedades tales como:

- una relación resistencia-peso excepcionalmente alta;
- densidad de alrededor de 1.78 g/cm^3
- alta capacidad de refuerzo
- bajo coeficiente de expansión térmica lineal, que proporciona una buena estabilidad dimensional;
- alta resistencia a la fatiga
- alta conductividad térmica
- lubricidad
- capacidad de reducción al desgaste.

También tiene algunas limitaciones como:

- valores bajos de tensión a fallo;
- baja resistencia al impacto;
- mayor conductividad eléctrica, lo que puede causar un corto circuito en máquinas eléctricas sin protección.

Las principales áreas para la aplicación de fibras de carbono son mostradas en la tabla 1.

La estructura de carbono en forma de fibra es similar a la del grafito (un material cristalino) que consiste en láminas de átomos de carbono llamados grafenos dispuestos en un patrón hexagonal.

Las hojas se apilan paralelas entre sí en una forma regular, la unión entre las hojas (fuerzas de Van der Waals) son relativamente débiles, dando al grafito sus características suaves y quebradizas. La estructura cristalográfica proporciona los atributos de resistencia a la tracción y el módulo en la dirección que es normal a las hojas de grafeno [15].

Tabla 1. Propiedades y aplicaciones de la fibra de carbono [16].

Propiedades de las fibras de carbono	Aplicaciones de las fibras de carbono
Fuerza física, dureza específica, peso ligero	Aeroespacial, transporte por carreteras y marino, artículos deportivos, etc.
Alta estabilidad dimensional, bajo coeficiente de expansión térmica, baja abrasión	Misiles, frenos de aviones, aeroespacial antena y estructura de apoyo, telescopios largos, bancos ópticos, guías de onda para una presión estable de alta frecuencia (GHz) marcos medición de alta precisión.
Buena amortiguación de vibraciones, fuerza y tenacidad	Equipo de audio, equipo de altavoces de alta fidelidad, armas de recogida, brazos robóticos, etc.
Sin conductividad eléctrica	Capuchones de automóviles, herramientas, cubiertas y bases para equipo electrónico, EMI (interferencia electromagnética) y RF (radiofrecuencia), blindaje, cepillos, etc.
Inercia biológica y permeabilidad a los rayos x	Aplicaciones médicas en prótesis, equipos de cirugía y rayos x, implantes, reparación de ligamentos, etc.
Resistencia a la fatiga, auto lubricación, alta amortiguación	Aplicaciones de rodamientos secos
Inercia química, alta resistencia a la corrosión	Industria química; campo nuclear; válvulas, sellos, componentes de la bomba en plantas de procesos, etc.
Propiedades electromagnéticas	Grandes anillos de retención del generador, equipos radiológicos, etc.

La fibra de carbono es muy utilizada en aplicaciones estructurales donde se requieren altas resistencias a la fatiga o en aquellas situaciones en las que es necesario un buen comportamiento mecánico bajo condiciones estáticas. La utilización de la fibra de carbono es

menor que la de la fibra de vidrio, debido a que su costo de fabricación es más elevado, aunque actualmente sus costos se han reducido debido al aumento de la demanda por parte de las industrias: aeronáutica, aeroespacial, transporte terrestre, deporte, entre otros.

3.1.1.2 Fibra de kevlar

El kevlar (poliparafenileno tereftalamida) es una poliamida sintetizada por primera vez en 1965 por la química polaco-estadounidense Stephanie Kwolek (1923-2014), quien trabajaba para la empresa DuPont. La obtención de las fibras de Kevlar fue complicada, destacando el aporte de Hebert Blades, que solucionó el problema de qué disolvente emplear para el procesado. Finalmente, DuPont empezó a comercializarlo en 1972. Es muy resistente y su mecanización resulta muy difícil. A finales de los años setenta, la empresa AkzoNobel desarrolló una fibra con estructura química similar que posteriormente comercializó con el nombre de Twaron [13].

El Kevlar, en combinación con Nomex es utilizado en una gran gama de productos hoy en día. Entre ellos, es utilizado para los chalecos y cascos antibalas, también en el desarrollo de cables ópticos, cordones para escalar, llantas, partes para aviones, canoas, raquetas de tenis etc.

Los más usuales son el Kevlar 29, 49 y 149, todas las formas enumeradas están compuestas de mismo monómero; la diferencia de propiedad se debe a cambios en condiciones de proceso que promueven cristalinidad adicional y en consecuencia un módulo alto o un ultra módulo de elasticidad. Estas formas de Kevlar difieren en el grado de cristalinidad. Las propiedades derivan del carácter aromático de la columna vertebral de polímero que puede proporcionar una alta rigidez de la cadena. Los componentes de la fibra de kevlar son: C, O, H y N. La mayoría de las aplicaciones se basan en formas del polímero que se puede preparar como hilado de fibras en seco e hilado húmedo en solución de películas.

La fibra de kevlar usada en este trabajo es Kevlar 49. Por su baja densidad, alta resistencia y modulo elástico se usa para reforzar plásticos de materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales, marina y automotriz.

3.1.1.3 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es comúnmente utilizada en la fabricación de materiales compuestos para la industria aeronáutica por su alta disponibilidad, bajo costo y buenas propiedades mecánicas, la cuales se muestran en la tabla 2. La fibra de vidrio se obtiene a partir de la fusión de sílice con otros óxidos minerales, cuya composición y concentración depende de las características deseadas, y que permiten distinguir los diferentes tipos de vidrio comercial.

Tabla 2. Propiedades de las fibras de Vidrio [3].

Fibra	Diámetro de 1 hilo (µm)	Densidad (kg/m³)	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa).
Vidrio A	5-13	2500	69	3100
Vidrio E	10-20	2580	72.5	3400
Vidrio S	10	2480	86	4590
Vidrio R	10	2590	85	3400-4400

La fibra de vidrio tipo E es la de mayor demanda debido a la mejor relación propiedades/costo la cual está conformada como se muestra en la tabla 3. Este tipo de fibra es la utilizada en el presente trabajo.

Tabla 3. Composición de la fibra de vidrio-E [3]

Componente	Cantidad (%)
SiO ₂	53-55
Al ₂ O ₃	14-15
CaO	17-22
MgO	1
Na ₂ /K ₂ O	0.8
Fe ₂ O ₃	0.3
B ₂ O ₃	6-8

3.1.2 La matriz

La matriz es la fase continua del material compuesto y su función es dar estabilidad al conjunto, transfiriendo las cargas al refuerzo, proteger al refuerzo del deterioro mecánico y

químico y evitar la propagación de grietas por lo cual debe dar una buena adherencia al refuerzo. Y son de los siguientes tipos:

- Matriz metálica o MMC por sus siglas en inglés (metal matrix composites)
 - Matriz cerámica o CMC por sus siglas en inglés (ceramic matrix composites)
 - Matriz de Carbón
 - Matriz orgánica o RP por sus siglas en inglés (reinforced plastics) y dentro de esta clasificación están los más utilizados
- Los materiales compuestos con fibra de carbono y matriz orgánica o CFRP por sus siglas en inglés (carbón fiber reinforced plastics).
 - Los materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz orgánica o GFRP por sus siglas en inglés (glass fiber reinforced plastics).

También se utilizan matrices termoestables, así las matrices orgánicas también conocidas como plásticos pueden ser:

Termoplásticos. - usadas en aplicaciones de bajos requisitos, aunque se están empezando a emplear termoplásticos avanzados para altas prestaciones (resistencia a la tensión, resistencia al impacto, resistencias dieléctricas y temperaturas de uso máximas para algunos) [3].

Elastómeros. utilizadas en neumáticos y cintas transportadoras.

Duro-plásticos o termoestables. son las más utilizadas en materiales compuestos de altas prestaciones.

Entre los duro-plásticos también denominados resinas, mismas que necesitan un proceso de curado para alcanzar su estructura reticulada, encontramos los siguientes tipos de materiales para matrices:

- Epoxis son las de uso más general en altas prestaciones, con una temperatura máxima de uso en torno a los 180°.

Puesto que el material compuesto, está formado por dos materiales diferentes, tiene las mismas restricciones que los materiales que lo conforman, esto quiere decir que, si uno de los materiales que lo conforman falla, el material compuesto falla en el mismo punto, según las

características mecánicas del material que deseamos formar, debemos observar las características mecánicas del material que lo compondrá. Se deberá tomar en cuenta que lo que para un metal es el punto de cedencia en donde abandona su zona elástica y pasa a la plástica, para un material compuesto es mejor conocido como punto de falla o de ruptura, ya que en cuanto llega a los límites de su capacidad mecánica, se rompe. Para ejemplificar utilizaremos las gráficas de esfuerzo (σ) contra deformación (ϵ) y como se relaciona con un material compuesto como se muestra en la figura 2.

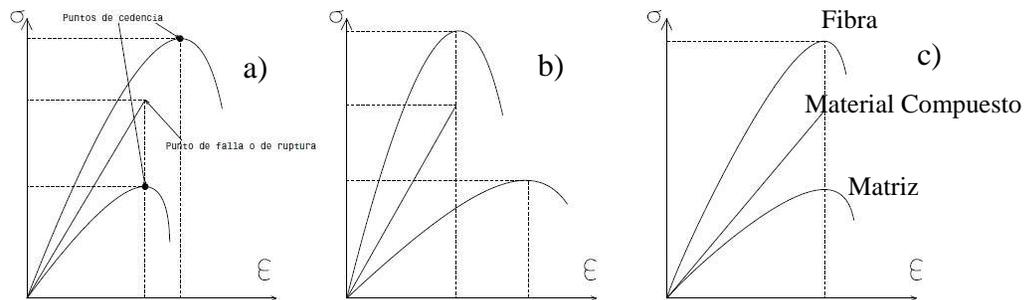


Figura 2. Diagrama de esfuerzo-deformación de un material compuesto y sus componentes, a) capacidad elástica de la matriz es menor la de la fibra, b) la capacidad elástica de la matriz es mayor que el de la fibra, c) la capacidad elástica de la matriz y la fibra son iguales.

En la figura 2 se muestra como el material compuesto tiene una resistencia la cual obtiene a partir de las propiedades de los materiales que lo componen. Sin embargo, la propiedad de deformación siempre será igual a la del material que tenga la menor capacidad de elástica, ya que en cuanto el material compuesto llegue a ese punto, sea la matriz o el refuerzo se romperá. Por ejemplo, las fibras pueden seguir resistiendo, sin embargo, la matriz ya se ha roto y por lo tanto el material compuesto ya no cumple su función. Por lo tanto, es importante que las partes que forman el material compuesto tengan el mismo módulo de elasticidad para una mejor compatibilidad.

El proceso de fabricación de materiales compuestos también tiene un papel fundamental en las propiedades. Por tal motivo, se realizará una breve descripción de los procesos de fabricación de los materiales compuestos utilizados.

3.2 Técnicas de manufactura de materiales compuestos

Existen varios métodos por los cuales los materiales compuestos reforzados con fibras son fabricados, como moldeo por compresión, por transferencia de resina asistido, autoclave, moldeo, infusión, etc. El moldeo por compresión es lo más popular y rentable con un mínimo de infraestructura que se requiere [3].

Para los procesos de manufactura de material compuesto la característica común que tienen es el de combinar algún tipo de fibra como refuerzo, una resina y un agente de curado. Para elegir un proceso de manufactura se debe determinar por varias condiciones como son: tamaño del elemento a fabricar, geometría y forma de la pieza, naturaleza de los materiales (tipo de resina y fibra, características mecánicas que se requieran), acabado de la superficie, número de piezas a fabricar, costo.

Los procesos de manufactura para materiales compuestos pueden ser de molde abierto (hand lay-up, filament winding y autoclave) o molde cerrado (moldeo por prensado en frío/caliente, pultrusión, moldeo por transferencia de resina e infusión) [3].

3.2.1 Infusión

El proceso de infusión también llamado VIP por sus siglas en inglés (Vacuum Infusión Process) es una nueva técnica que utiliza vacío para lograr la impregnación de las fibras de un laminado como se muestra en la figura 3.

Procedimiento: se limpia y se prepara el molde con desmoldante, posteriormente se colocan todas las películas de fibras a utilizar, después se coloca una tela de poliéster (peel ply), encima de esta se coloca una malla (flow media) que se encarga de facilitar el desplazamiento de la resina a través de la fibra, seguidamente se colocan los tubos distribuidores de vacío (spiral Wrap) en forma periférica y se recubren con la tela (peel ply). Así mismo se colocan los tubos alimentadores de resina (omega flow) en los lugares previamente estudiados, se sella todo el borde de la placa con cinta de poliuretano (selant tape AT 200) y se hermetiza todo con la bolsa de vacío (Vacuum bagging WL 7400), una vez obtenido un sellado perfecto, se realiza el vacío hasta obtener valores del orden de los 750 mm de Hg. Se observa como la bolsa se compacta al laminado, asegurando que no existan fugas de vacío y que todos los pasos se hayan seguido de forma correcta ya que una vez que se haga ingresar la resina no se podrá modificar el procedimiento.

Cuando el vacío este correcto, se prepara la resina calculando la cantidad, tomando como base al peso de la fibra que tiene la superficie a impregnar. Generalmente se parte de un laminado con 50% de fibra y 50% de resina, para preparar la cantidad de resina se pesa la fibra y se prepara la cantidad proporcional de resina 100 y 30 de endurecedor, previamente desgasificada se coloca el recipiente con la resina en el o los alimentadores de resina. Se abre el o los alimentadores de resina, la succión producida por la diferencia de presiones hace que la resina ingrese en forma rápida y pareja, impregnando perfectamente todas las fibras y produciendo un laminado sin fallas y sin aire atrapado. La velocidad de avance será distinta para cada caso en particular y se verá afectado por la viscosidad de la resina y el tipo de tejido (fibra) utilizado.

Ya que la zona fue impregnada, se cierra el tubo de alimentación, siempre antes de que la resina se acabe y entre aire. Asegurándose que la pieza está totalmente impregnada se mantiene el vacío hasta que la resina gelifique, momento en el cual se podrá apagar la bomba de vacío, pero nunca antes [17].

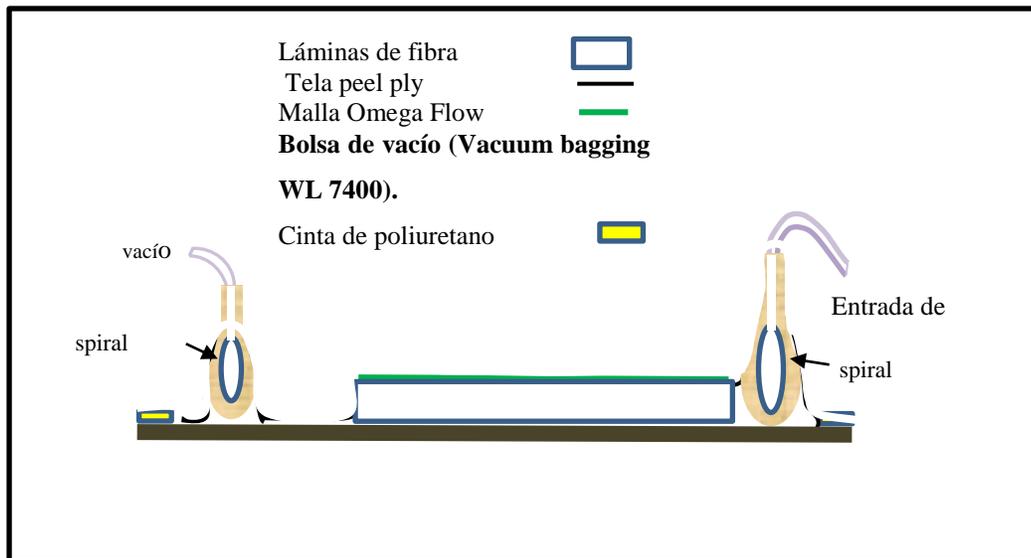


Figura 3. Proceso de infusión

Ventajas de fabricación de laminados compuesto por medio de infusión:

- Buena relación entre fibra-resina.
- Laminado resistente.

- Se reduce la exposición de gases al trabajador.
- Se reduce el uso de resina por el laminado compactada.

3.3 Técnicas de caracterización de materiales

La caracterización de los materiales es una disciplina de la ciencia de los materiales que nos permite conocer las características físicas, mecánicas y químicas específicas de un material mediante técnicas de caracterización tales como: la espectroscopia por infrarrojo, difracción de rayos x, microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido, tensión, dureza e impacto, utilizadas en este estudio. Mediante pruebas experimentales, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de los componentes del material de estudio y de sus propiedades.

3.3.1 Espectrometría del infrarrojo

La espectroscopia del infrarrojo es un tipo de espectrometría de absorción donde se utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético, se utiliza para identificar un compuesto o la composición química de una muestra. Esta técnica se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas que corresponden a los niveles de energía de las moléculas. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular y las masas atómicas.

Los enlaces químicos que unen entre sí a los átomos de una molécula no son rígidos, sino que se comportan con efectos de elasticidad de contracción o alargamiento.

La frecuencia de vibración representa el número de veces por segundo que toma un átomo en volver a pasar por la misma posición, la referencia normalmente se hace al punto de equilibrio. La energía de estas vibraciones se encuentra cuantizadas, en el sentido de que solo determinados valores de la misma son posibles.

El espectro infrarrojo de un compuesto puede dar importante información acerca de su naturaleza química y de su estructura. Más comúnmente, el espectro de infrarrojo es obtenido midiendo la absorción de radiación, aunque también es usada la emisión y la reflexión.

La región infrarroja del espectro electromagnético se considera generalmente en el rango de longitud de onda de los 775 nm hasta los 1000 μm ; siendo el correspondiente en el rango de número de onda de 12,900 cm^{-1} a 10 cm^{-1} . Esta región es frecuentemente dividida en tres subregiones. La región del infrarrojo cercano (cercano al visible) que se extiende de los 775

nm a los 2.5 μm (12,900 cm^{-1} a 4,000 cm^{-1}), el infrarrojo medio de los 2.5 μm hasta 50 μm (4,000 cm^{-1} a 200 cm^{-1}) y el infrarrojo lejano de 50 μm a 1000 μm (200 cm^{-1} a 10 cm^{-1}) como se muestra en la figura 4.

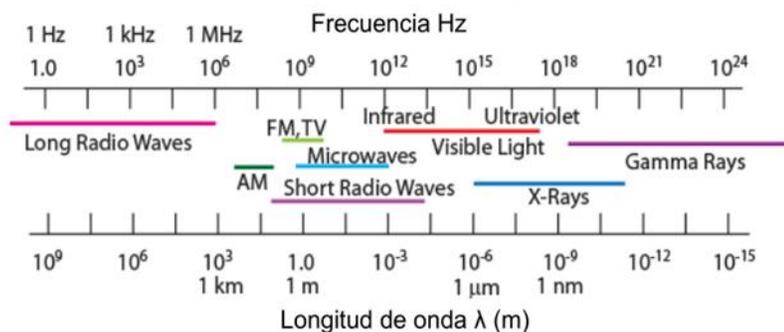


Figura 4. Espectro electromagnético.

Casi todas las moléculas absorben radiación infrarroja, siendo las excepciones las moléculas diatómicas como el O_2 , H_2 , N_2 . El espectro de infrarrojo de una molécula poli atómica puede ser muy complejo debido a la gran variedad de vibraciones posibles, sobre tonos y bandas de combinación. Sin embargo, las bandas de absorción en el infrarrojo son muy características de ciertos grupos funcionales dado esto se puede decir que cada compuesto tiene su huella dactilar y es por lo tanto altamente útil en la identificación de los compuestos.

Este trabajo mostrara un análisis químico cualitativo en la región de IR medio para determinar los grupos funcionales en las muestras de resina Epolam 2015 y los materiales compuestos base kevlar.

En la figura 5 se pueden observar frecuencias vibracionales para algunos enlaces.

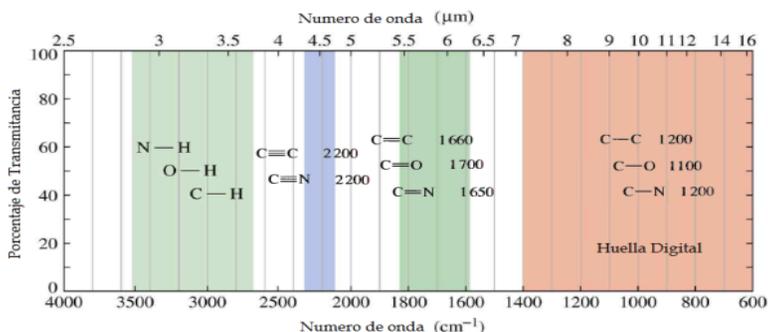


Figura 5. Frecuencias vibracionales para algunos enlaces.

3.3.2 Difracción de rayos X

Es una técnica común de análisis químico cuantitativo de materias primas. Como es bien conocido, los métodos de análisis implican en general, comparar o bien las intensidades directamente medidas para la sustancia a analizar o bien las intensidades de ésta relativas a otra sustancia elegida como standard con los correspondientes valores determinados en mezclas patrones de composición conocida [18].

La difracción de rayos X se debe esencialmente a la existencia de ciertas relaciones de fase entre dos o más ondas.

Cuando se hace incidir un haz de R-X monocromático sobre un cristal, se produce una dispersión de la radiación figura 6. La ubicación de los máximos de intensidad está dada por la ley de Bragg

$$\lambda = 2 d_{hkl} \text{ sen } \theta$$

donde:

d_{hkl} es la distancia o espaciado reticular correspondiente a la familia de planos (h k l).

$n = 1, 2, 3...$ es el número entero que indica el orden de la difracción.

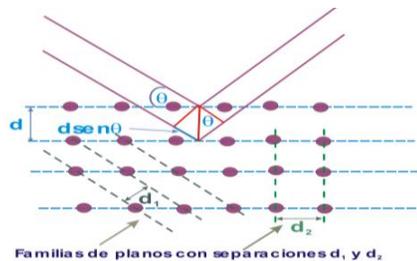


Figura 6. Esquema de Bragg para la reflexión en distintas familias de planos, d , d_1 , d_2 , que corresponden a los espacios reticulares d_{hkl} , de índices de Miller (hkl) [18].

3.3.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido (MEB), utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para poder sobrepasar el límite de resolución de un microscopio óptico es necesario diseñar instrumentos que utilicen otras radiaciones diferentes a la luz visible para formar la imagen. Precisamente, un haz de electrones acelerados por un alto potencial eléctrico (25.000 Voltios) constituye la fuente de radiación de un microscopio electrónico de barrido, como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Relación entre los instrumentos y la capacidad de observación.

Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para interactuar con la muestra. Luego, con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie del espécimen para crear una imagen que refleja las características superficiales del material objeto de estudio, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes. Al incidir el haz de electrones sobre la muestra, interactúa con ella y se producen diversos efectos captados como se muestra en la figura 8 y visualizados en función del equipo utilizado.

En este trabajo se realizó MEB para obtener micrografías que clarifiquen la morfología, tamaño y arreglo de los materiales compuesto base Kevlar (Kevlar-Vidrio, Kevlar-Carbono y Kevlar-Kevlar/Carbono) y de las fibras usadas para reforzar el compuesto. El tipo de electrones utilizados fue Secundarios y Retrodispersados.

Volumen de interacción

Las señales que se utilizan para la obtención de la imagen provienen de un cierto volumen debajo de la superficie de la muestra. El haz de electrones penetra una cierta distancia debajo de la superficie e interactúa con los átomos de la muestra a lo largo de su trayectoria. Volúmenes mayores que el diámetro del haz incidente son los que, finalmente, limitan el poder de resolución de un SEM [19].

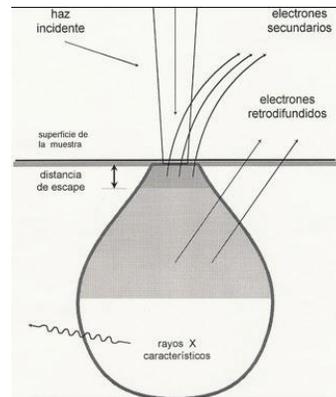


Figura 8. Esquema del volumen de interacción y las señales producidas.

3.3.3.1 Electrones secundarios

Se producen cuando un electrón del haz pasa muy cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionando la suficiente energía a uno o varios de los electrones interiores para saltar fuera de la muestra. Estos electrones son de muy baja energía (por debajo de 5 eV), por lo que deben encontrarse muy cerca de la superficie para poder escapar. Precisamente por eso proporcionan una valiosa información topográfica de la muestra y son los utilizados principalmente en la microscopía óptica de barrido.

3.3.3.2 Electrones retrodispersados

Se producen cuando un electrón del haz choca frontalmente con el núcleo de un átomo de la muestra, siendo repelido en sentido contrario fuera de la muestra. La intensidad de dicho efecto varía proporcionalmente con el número atómico de la muestra. Por esta razón se utilizan para obtener un mapa con información sobre la composición superficial de la muestra, también utilizado en microscopía de barrido.

3.3.3.3 Electrones de Auger

Cuando un electrón secundario es expulsado del átomo, otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar este hueco. El exceso de energía provocado por este desplazamiento puede ser corregido emitiendo un nuevo electrón de la capa más externa. Estos son los llamados electrones Auger, y son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra.

3.4 Caracterización mecánica

3.4.1 Ensayo de impacto Izod

El ensayo de impacto Izod se realiza para determinar la resistencia al impacto de un péndulo oscilante, la imagen del péndulo se muestra en la figura 9. Este ensayo se define como la energía cinética necesaria para iniciar la fractura y continuar la fractura hasta que la muestra se rompe.

La energía de impacto de ASTM se expresa en J m o ft-lb/in. La resistencia al impacto se calcula dividiendo la energía del impacto en J (o ft-lb) por el grosor de la muestra. El resultado de la prueba es típicamente el promedio de 5 especímenes [20].

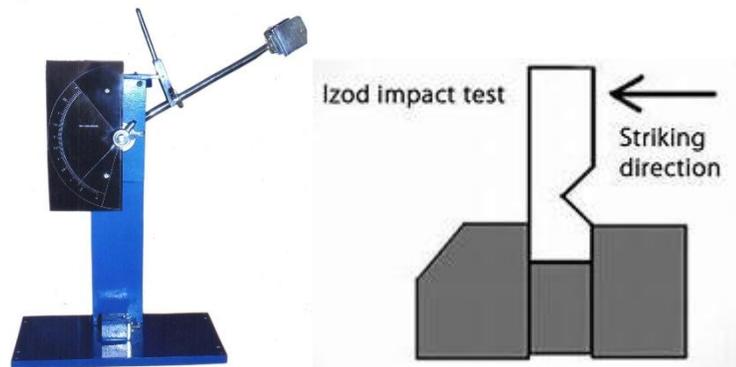


Figura 9. Péndulo Izod y colocación de probeta [21].

3.4.2 Ensayo de tensión

Este ensayo es uno de los más importantes ya que permite determinar la resistencia elástica, la resistencia última a la tensión y la plasticidad del material cuando se somete a fuerzas uniaxiales. Consiste en someter a una probeta normalizada a una carga axial de tensión hasta que presente falla. Para llevarla a cabo es necesario una máquina universal de la capacidad necesaria para llevar a cabo la ruptura de la probeta normalizada, conocer las dimensiones de la probeta (largo, ancho y espesor), así como la velocidad necesaria para cada material, en el caso de materiales compuestos la velocidad es de 2mm por minuto, en la figura 10 se pueden observar los tipos de falla en las probetas ensayadas bajo normas ASTM [22].

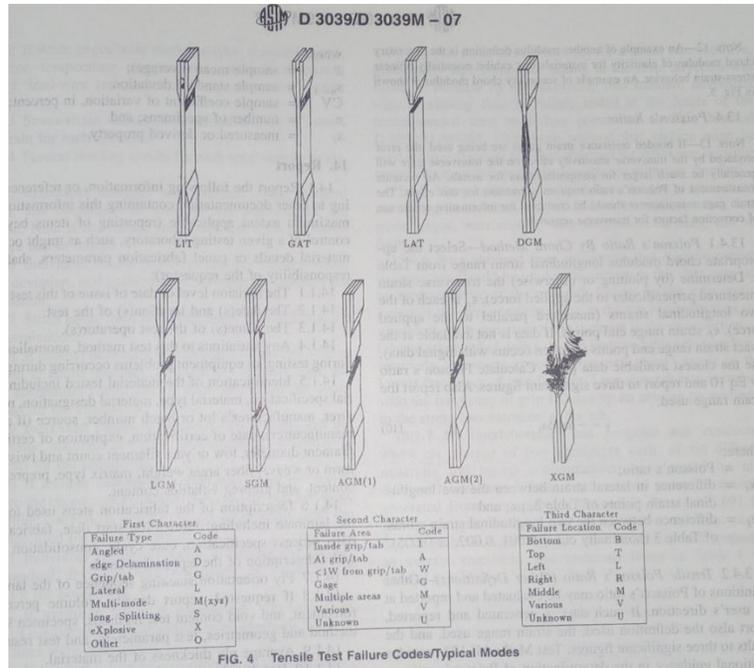


Figura 10. Códigos de fallas típicas en las Pruebas de Tensión de acuerdo con la norma ASTM 3039.

3.4.2 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realiza para determinar la dureza de un material por medio de un indentador como el que se muestra en la figura 11, con el cual se penetra la muestra de material compuesto [23].



Fig. 11 Durómetro Barcol [24]

4. Materiales y Métodos.

La metodología utilizada se muestra en la figura 12. Las etapas indicadas se describen a detalle más adelante.

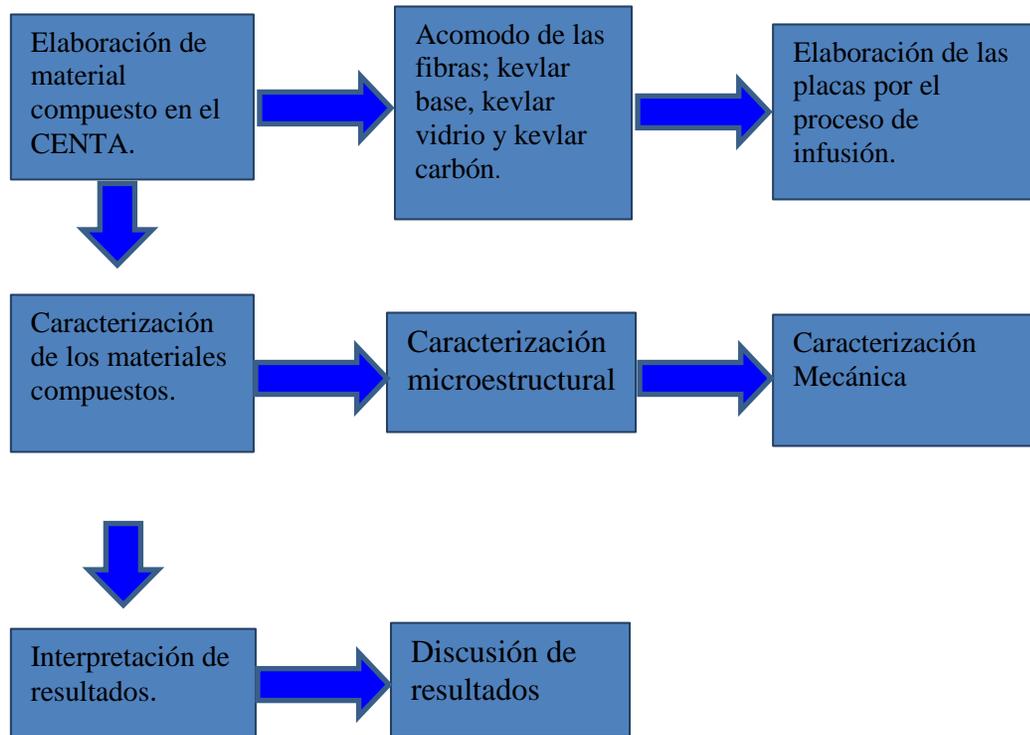


Figura 12. Diagrama de bloques de la metodología.

4.1 Materiales

4.1.1 Fabricación de material compuesto

Para la fabricación de las placas de material compuesto primero se debe saber las dimensiones de las placas a fabricar, para determinar el espesor de las mismas como se muestra en la tabla 4. Es necesario cortar la fibra con una tolerancia de 2 a 3 cm de tolerancia debido a que al realizar la infusión queda una orilla de menor espesor.

Tabla 4. Cantidad de películas de fibra utilizadas para la fabricación de cada placa.

Material de las fibras	Cantidad de películas			Masa total
	Dimensiones	Dimensiones	Dimensiones	
Dimensiones de cada película	25 x 25 (cm)	25 x 35 (cm)	(kevlar) 25 x 35cm	Masa de las películas para cada placa
kevlar-carbón (espesor 0.25mm)	24	15	2	398.5 gr
Vidrio (espesor 0.53mm)	11	7	2	569.2 gr.
Carbón (espesor 0.25mm)	24	15	2	339.1 gr.

Posteriormente, se realiza el corte de las láminas de fibra con tijeras especiales para fibra de kevlar y con un sistema de corte G3 L-3200 CV, como se muestra en la figura 13.

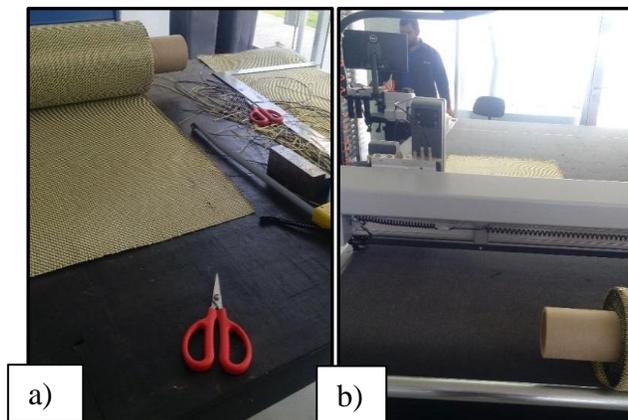


Figura 13. Corte de fibra por medios manuales y mecánicos. a) Corte con tijeras especiales para cortar fibra de Kevlar, b) corte con sistema de corte G3 L-3200 CV.

El proceso de infusión también llamado VIP por sus siglas en inglés (Vacuum Infusión Process) es una nueva técnica que utiliza vacío para lograr la impregnación de las fibras de un laminado.

El procedimiento se llevó a cabo como se menciona en la sección 3.2.1, utilizando la cantidad de Resina Epolam 2015 y endurecedor como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cantidad de resina y endurecedor utilizados durante el proceso de infusión por cada placa.

Material de la placa	Resina (gr)	Endurecedor (gr)	Residuo de la resina (gr)	Masa total de la resina (gr)
Kevlar	430	129	58.6	500.4
Kevlar – vidrio	650	208	374.6	484.6
Kevlar – carbón	650	208	368.2	489.2

Para la matriz se usó la resina epóxica Epolam 2015, en un sistema bifásico 100:30 con el endurecedor. La cantidad es de acuerdo con el peso de las fibras de refuerzo debido a que la proporción deseada es 50% fibra, 50% resina y la ideal es 40% resina 60 % fibra. Una vez que se haya cubierto con la resina el 100 % del refuerzo se cierra la válvula de entrada de la resina cuidando que quede bien cerrada para evitar la entrada de aire debido a que el vacío debe mantenerse hasta que la resina gelifique.

En la figura 14 se observa la elaboración de un material compuesto por proceso de infusión.

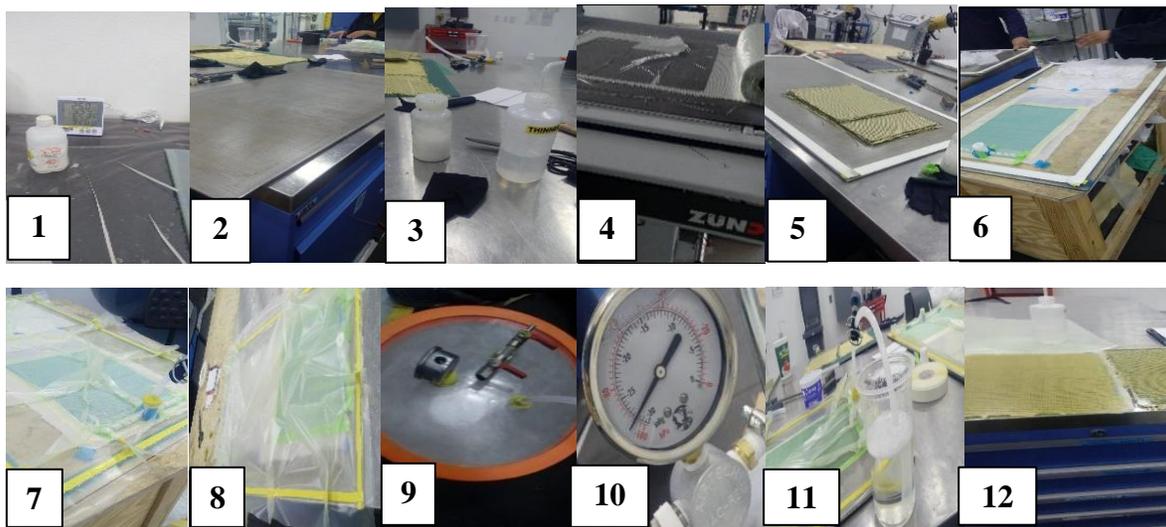


Figura 14. Proceso de infusión. 1 condiciones de elaboración, 2 y 3 limpieza de placa metálica, 4 corte de fibra, 5 colocación de fibra y colocación perimetral cinta de poliuretano, 6 colocación de tela peel ply, malla omega flow media sistemas de inyección de resina y vacío, 7 colocación de la bolsa de vacío, 8 verificación de vacío, 9 desgasificación de la resina, 10 medición de vacío, 11 suministro de resina y 12 placas de material compuesto de dos espesores.

4.2 Equipos y procedimientos

Para llevar a cabo la caracterización de los materiales compuestos base kevlar, a continuación, se realiza una descripción de las técnicas de caracterización y los equipos utilizados para las mismas.

4.2.1 Preparación de las muestras

Una vez obtenidas las placas se procede a la preparación de las muestras para la caracterización. Primero se realizó el corte con segueta para la fabricación de las muestras de un tamaño inferior, como se observa en la figura 15.

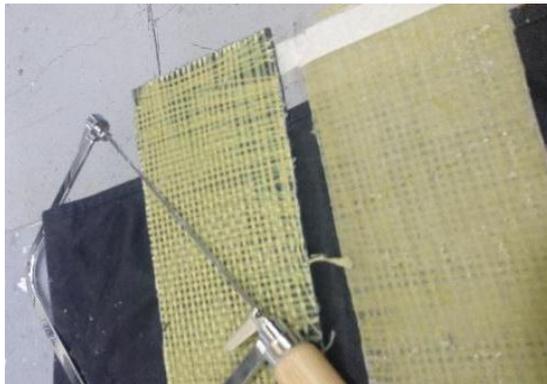


Figura 15. Corte de placas por medios manuales.

Una vez que se obtuvieron las placas de 5 x 10 cm, se cortaron nuevamente en cortadora metalográfica de disco, la cual cuenta con sistema de enfriamiento por agua como se muestra en la figura 16. Obteniendo las muestras de 0.5 cm por 0.5cm.



Figura 16. Cortadora metalográfica con sistema de enfriamiento.

Luego, se realizó la limpieza de todos los especímenes utilizados en la caracterización química y microestructural en un baño ultrasónico con agua destilada como se muestra en la figura 17.



Figura 17. Baño ultrasónico y agua destilada para la limpieza de muestras en el Laboratorio de Metalografía del I.T. Pachuca

4.2.2 Espectrometría del infrarrojo (FT-IR)

La región infrarroja del espectro electromagnético utilizada para realizar un análisis químico cualitativo fue el infrarrojo medio de los $2.5 \mu\text{m}$ hasta $50 \mu\text{m}$ ($4,000 \text{ cm}^{-1}$ a 200 cm^{-1}).

A este respecto, en el primer caso se utilizó un equipo de infrarrojo PERKIN-ELMER (FT-IR) Spectrum GX, ver figura 18, con apoyo del CINVESTAV, unidad Querétaro.



Figura 18. Espectrómetro Infrarrojo/FT-IR, del CINVESTAV unidad Querétaro.

4.2.3 Difracción de rayos X (DR-X)

Para el estudio por DR-X se usó un Difractómetro marca: Rigaku SmartLab(In-plane), (ver figura 19) operando con radiación Cu-K α monocromada, con un intervalo angular 2θ de 15° a 120° e incrementos de 0.02 a una velocidad de barrido de 2 grados por minuto.



Figura 19. Difractómetro de Rayos-X, Rigaku (SmartLab), del CIDESI unidad Querétaro.

4.2.4 Caracterización por microscopía óptica (MO)

La caracterización por microscopía óptica se realizó en el Laboratorio de Metalografía del I.T. P. con un Microscopio Óptico Olympus, como se muestra en la figura 20. En el mismo, se observaron las fibras que refuerzan el material compuesto, obteniendo imágenes de su morfología.



Figura 20. Microscopio óptico Olympus del I.T. Pachuca.

Por otra parte, para realizar la caracterización microestructural de las fibras de refuerzo, éstas se colocaron sobre una superficie conductora, adheridas a la misma con cinta de grafito, como se muestra en la figura 21.



Figura 21. Preparación de las fibras para analizarse microscopía óptica en el taller de Metalografía del I.T. Pachuca y por MEB en el CNMN del IPN.

4.2.5 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Para la caracterización microestructural se utilizó el microscopio electrónico de barrido modelo JMB-7800F propiedad del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional, ver figura 22.



Figura 22. Microscopio electrónico de barrido JMB-7800F del CNMN DEL IPN.

4.2.5.1 Preparación de muestras para MEB

Para realizar la caracterización por microscopía electrónica de barrido cada espécimen fue recubierto con oro-paladio en una evaporadora marca DESK II DENTON VACUUM mostrada en la figura 23.

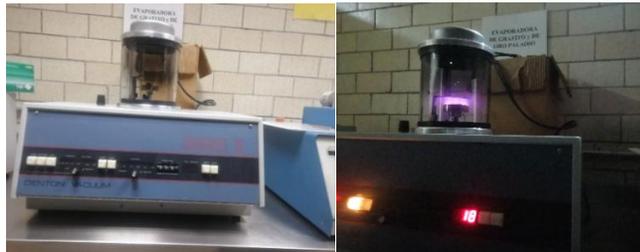


Figura 23. Evaporadora DESK II DENTON VACUUM.

4.2.6 Muestras para el ensayo de impacto Izod

Existe amplia normativa para los materiales utilizados en la industria aeronáutica y aeroespacial por la seguridad que deben tener los vehículos. De acuerdo a la misma, se realizó la caracterización mecánica del material basados en la norma ASTM D 256. La forma de las probetas se muestra en la figura 24.

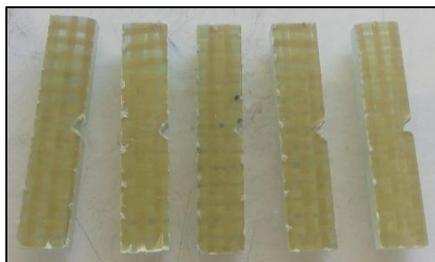


Figura 24. Probetas.

Procedimiento: Se utilizó un péndulo de impacto Izod IT-30, propiedad del área académica de materiales de la UAEH. Previamente calibrado, las muestras se prepararon conforme a la norma. Se colocaron una a una las probetas fijándolas a la base como se muestra en la figura 25 a), colocando la aguja de medición en el rango más alto de la escala, soltando el péndulo y tomando la lectura como se muestra en la figura 25 b) [20].

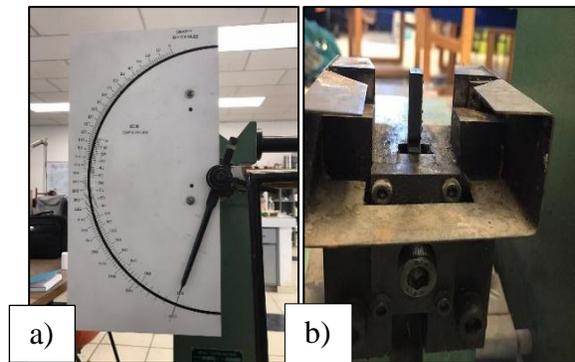


Figura 25. Prueba de impacto Izod. a) Escala. b) Sujeción de la muestra.

El tipo de falla para cada espécimen se registrarán como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Tipo de falla de especímenes de acuerdo con la norma ASTM D256 Impacto Izod.

Tipo	Descripción
C = rotura completa	La muestra se separa en dos o más piezas.
H= rotura de bisagra	La muestra presenta rotura incompleta de tal manera que una parte de la muestra no puede sostenerse por encima de la horizontal cuando la otra parte se sostiene verticalmente (menos de 90° ángulo incluido).
P= rotura parcial	Una ruptura incompleta que no cumple con la definición de rotura de bisagra, pero tiene fractura de al menos el 90% de la distancia entre el vértice y la muesca del lado opuesto.
NB=no rotura	Una ruptura incompleta donde la fractura se extiende menos de 90% de la distancia entre el vértice de la muesca y el lado opuesto.

4.2.7 Ensayo de tensión

Algunas probetas normalizadas ver figura 26 se sometieron a una carga axial de tensión hasta que se presentó la falla como se muestra en la figura 27. Este ensayo no logró concluirse por situaciones extraordinarias fuera del ámbito académico y científico. No obstante, en la sección

de resultados se mostrarán valores obtenidos de literatura, que se espera validar en el futuro próximo con resultados experimentales del ensayo de tensión de estos materiales.



Figura 26. Probetas normadas para pruebas de tensión, elaboradas en el laboratorio de Posgrado del I.T. Pachuca.



Figura 27. Máquina universal de tensión universal, marca Shimadzu de 250 KN del laboratorio de Pesados de la ESIQIE del IPN.

4.2.8 Ensayo de dureza

Se usó un Durómetro Barcol GYZJ 934-1 como se muestra en la imagen 28 a), el cual se calibra previamente a la prueba como se ve en la imagen 28 b). Luego se procede a enumerar 10 puntos en las muestras como se observa en la figura 28 c), posteriormente se toma el durómetro con ambas manos, aplicando fuerza sobre el mismo 3 segundos como se muestra en la figura 28 d), tomando la lectura del medidor. Se repite el procedimiento hasta tomar 10 lecturas por cada muestra como se muestra en la tabla 8 [23]. Las mediciones de dureza se realizaron con el apoyo del centro e investigación CIATEQ, de Cd. Sahagún.

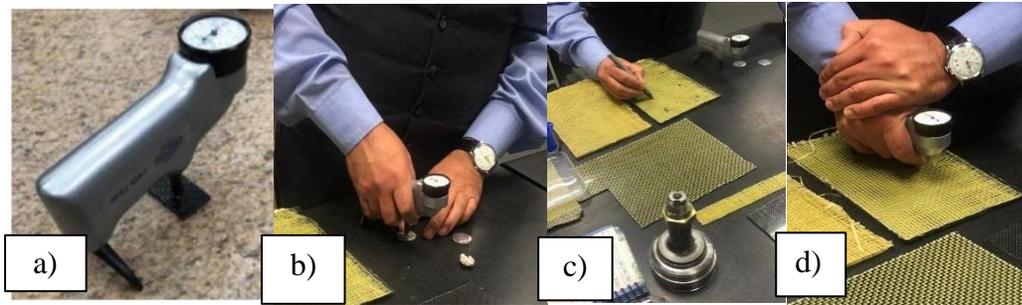


Figura 28. Ensayo de dureza. a) durómetro Barcol GYZJ 934-1, b) calibración, c) marcado de muestras, d) ensayo de dureza Barcol.

5. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la estructura interna de los materiales compuestos objeto de estudio. También, con el propósito de complementar la caracterización antes mencionada se realizó un análisis por MO y MEB del material de refuerzo utilizado, fibra.

5.1 Densidad de los materiales compuestos

La densidad de los materiales compuestos kevlar-base se determinó de acuerdo con el peso y el volumen de cada muestra, se analizaron 6 muestras de cada material. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Densidad de materiales compuestos base kevlar.

Material	Kevlar-Vidrio	Kevlar-carbón	Kevlar-kevlar/Carbono
Muestra	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
1	1.700385471	1.383647799	1.33811905
2	1.735445088	1.357384277	1.334038374
3	1.748872576	1.404558598	1.323413202
4	1.753199881	1.344840332	1.342688831
5	1.764472469	1.363049724	1.342093668
6	1.763638427	1.411178069	1.385056197
Promedio	1.7443	1.3774	1.3442

5.2 Caracterización del material de refuerzo-Fibras por microscopía óptica (MO)

En la figura 29 a)-c) se observan las fibras de vidrio, carbono y kevlar (a diferentes aumentos: 20, 100 y 20x), respectivamente. En las imágenes se puede observar claramente la superficie lisa y uniforme. El color de las figuras 29 a)-c) se presenta en escala de grises a manera de resaltar las características físicas antes mencionadas de la materia prima. No obstante, el color de cada fibra es diferente. Por ejemplo, en el último caso, figura 29 c), la fibra kevlar tiene un color amarillo claro brillante. También resalta que la fibra de vidrio, figura 28 a), tiene fragmentos del mismo material señalados con una flecha, es decir, es muy frágil a diferencia de las otras fibras; y el aspecto de hilos de la fibra kevlar, figura 29 c), señalado en la imagen con una flecha, es decir, cada fibra del kevlar se compone por varios hilos del mismo material.

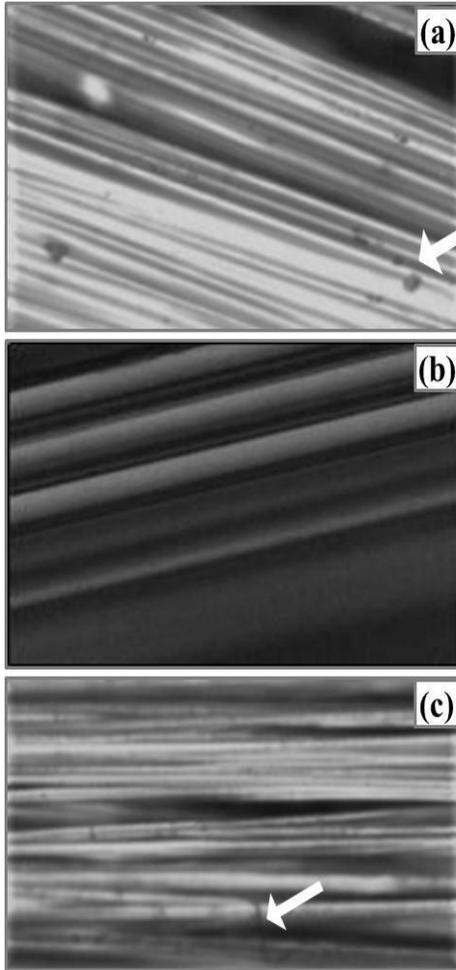


Figura 29. Imágenes obtenidas por MO. a) fibra de vidrio, b) fibra de carbono y c) fibra de kevlar.

5.3 Caracterización por MEB del material de refuerzo-fibras

Para clarificar las características morfológicas y el diámetro de las fibras utilizadas como materia prima, a continuación, se muestran las micrografías obtenidas por MEB, ver figura 30 a)-c), tomadas a 200x, 250x y 300x, respectivamente. En la figura 30 a)-c) claramente se observa que el diámetro de cada fibra es diferente, siendo la más delgada correspondiente al kevlar, figura 30 c), y la más gruesa la de carbono, figura 30 b).

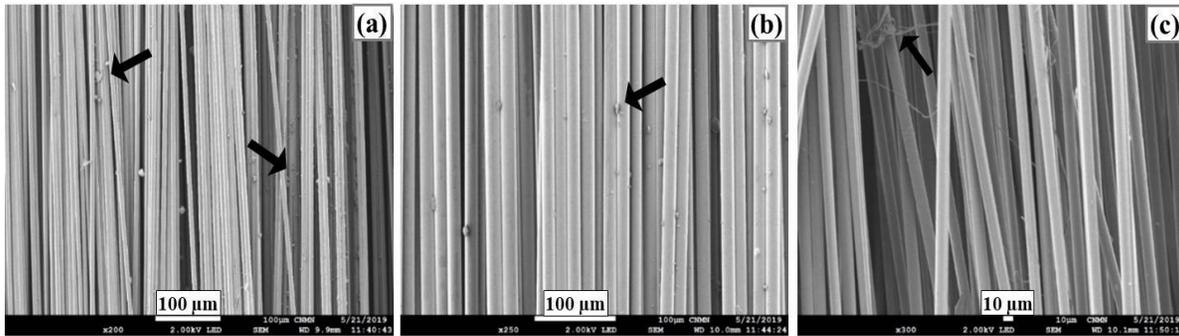


Figura 30. Micrografías obtenidas por MEB. a) fibra de vidrio, b) fibra de carbono y c) fibra de kevlar.

También se aprecia, señalado con flechas negras, la presencia de algunas partículas propias del mismo material sobre algunas fibras, ver figura 30 a)-b), ciertamente en mayor proporción en la fibra de vidrio. Sin embargo, mediante MEB fue posible identificar que también la fibra de carbono tiene partículas pequeñas del mismo material, aunque en menor proporción. Lo anterior, coincide con las observaciones obtenidas por MO, donde aparentemente la fibra de vidrio es más frágil. Por su parte, en la figura 30 c), también señalado con flechas negras, se observan los hilos que forman las fibras de kevlar con mejor claridad respecto a las imágenes obtenidas por MO.

5.4 Caracterización de los materiales compuestos por microscopía electrónica de barrido (MEB)

En la figura 31 a)-b) se observa el análisis del material compuesto de base fibra de vidrio en el cual se observa homogeneidad en el arreglo bidireccional de la fibra, ver figura 31 a). No presenta defectos visibles, como huecos que pudieran mostrar problemas de adherencia entre fibra y matriz o delaminación. Así mismo, se puede observar las orientaciones de la fibra, 0° y 90° (arreglo bidireccional). Por otra parte, se realizó un análisis químico por espectrometría de dispersión de energía de rayos-X (EDS por sus siglas en inglés) el cual se muestra en la figura 31 b), del área señalada por el recuadro de la figura 31 a), obteniendo que los principales elementos en el material son: Si, Ca, C, O, Mg y Al. Es importante recordar que, previamente se mencionó que la fibra de vidrio utilizada, tipo E, contiene principalmente, óxidos de silicio, calcio, aluminio y magnesio. El C corresponde a la matriz epóxica.

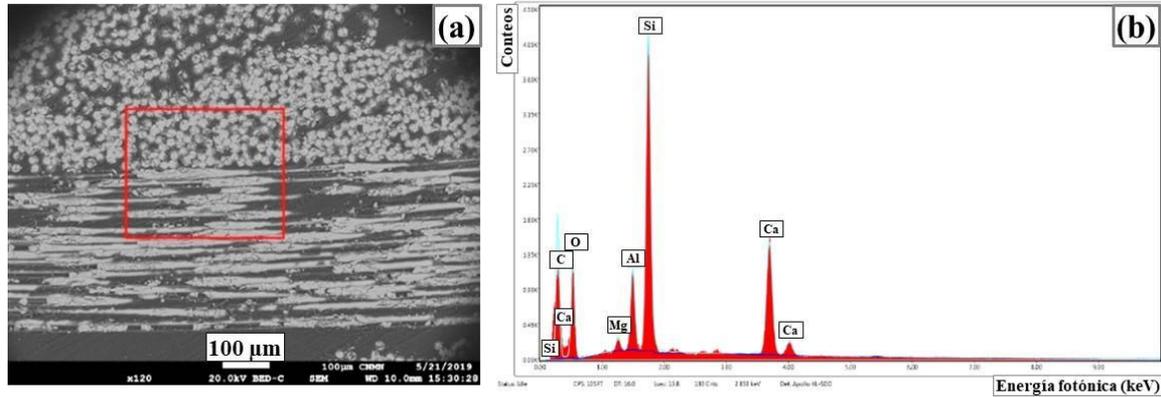


Figura 31. a) Micrografía de material kevlar-vidrio, 120x. b) espectro EDS del área en el recuadro de a).

Se realizó también un análisis químico puntual, EDS, al material compuesto de base fibra de vidrio de la figura 32 a). Los elementos identificados de la figura 32 b), coinciden con aquellos propios de la misma fibra.

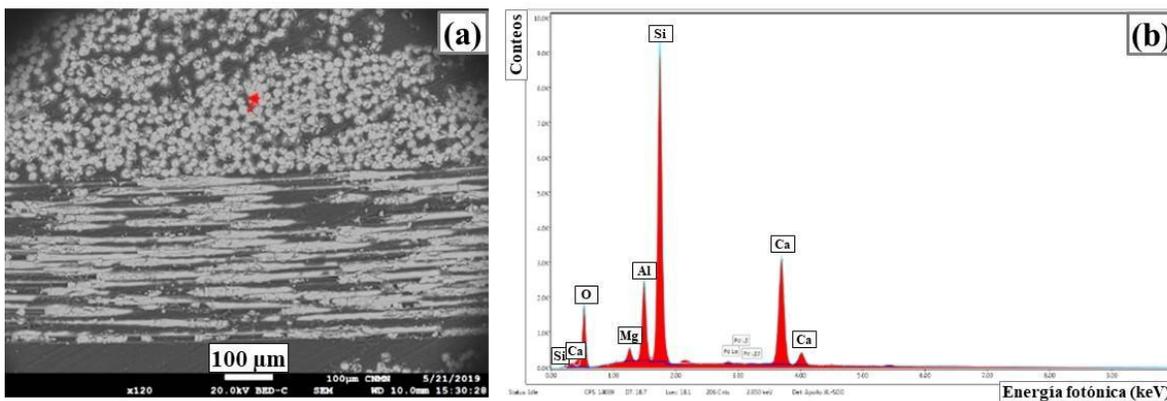


Figura 32. a) Micrografía de material kevlar-vidrio, 120x. b) espectro EDS puntual de a).

La figura 33 a)-b) presenta el análisis del material compuesto de base fibra de carbono en el cual se observa homogeneidad en el arreglo bidireccional de la fibra, ver figura 33 a). No presenta defectos visibles, como huecos o delaminación. Igual que el caso previo, se identifican las orientaciones de la fibra (0° y 90°). La figura 33 b) muestra el análisis químico por EDS realizado al área señalada en el recuadro de figura 33 a).

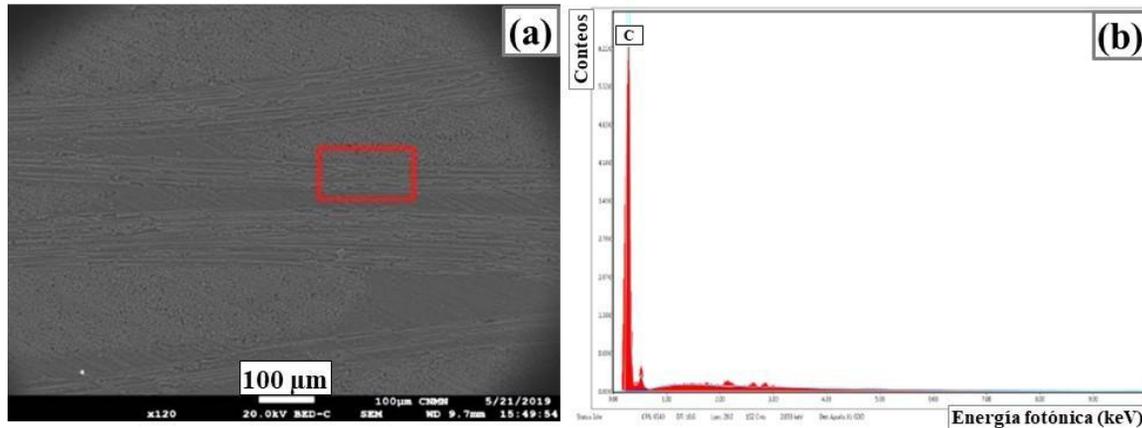


Figura 33. a) Micrografía de material kevlar-carbono, 120x. b) espectro EDS del área en el recuadro de a).

Al igual que el caso previo, se llevó a cabo un análisis químico puntual (EDS), en la región mostrada en la figura 34 a), al material compuesto de base fibra de carbono. De manera general, en ambos análisis, figura 34 b) y figura 34 b), los elementos identificados coinciden con aquellos correspondientes a la fibra de carbono.

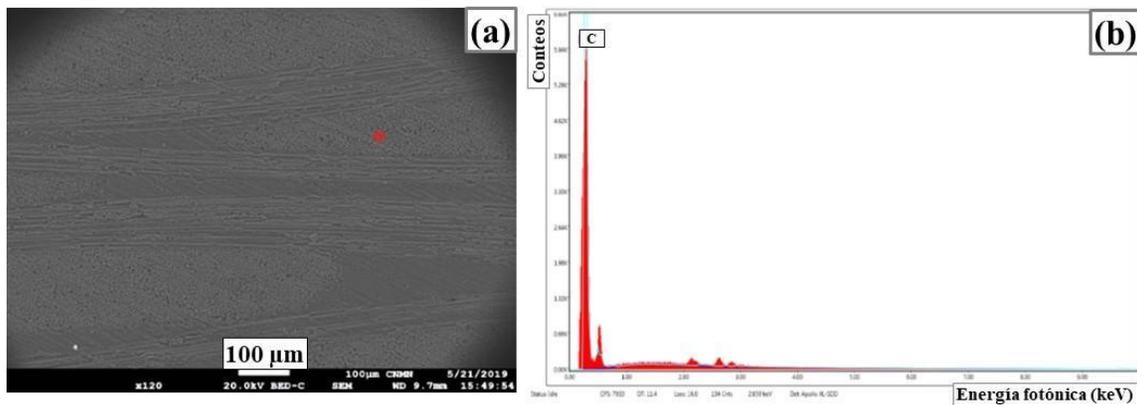


Figura 34. a) Micrografía de material kevlar-carbono, 120x. b) espectro EDS puntual de a).

La figura 35 a)-b) presenta el análisis por MEB del material compuesto de base fibra de kevlar. Se observa homogeneidad en el arreglo bidireccional de la fibra, figura 35 a) y es clara la orientación de la fibra (0° y 90°). Sin embargo, a diferencia de los materiales previos, la micrografía de la figura 35 a) evidencia cierta separación entre la fibra de kevlar, algunos huecos y deformación en la matriz. La deformación se atribuye al proceso de corte realizado y la separación entre la fibra de kevlar evidencia delaminación en el material. En la figura 35 b) se muestra el análisis químico por EDS realizado al área señalada en el recuadro de figura 35

a).

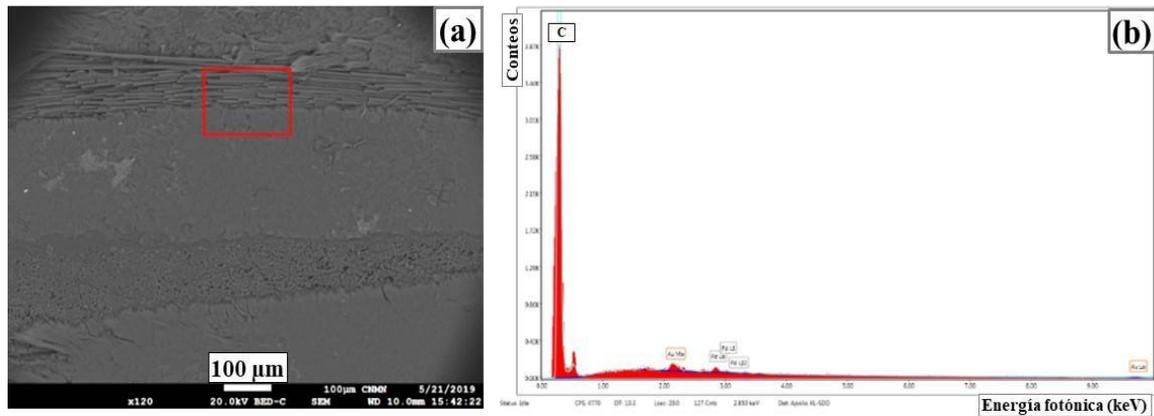


Figura 35. a) Micrografía de material kevlar-kevlar/ carbono, 120x. b) Espectro EDS del área en el recuadro de a).

También, se realizó un análisis químico puntual (EDS), en la zona mostrada en la figura 36(a), al material compuesto de base fibra de kevlar. De manera general en ambos análisis, figura 36(b) y figura 36(b), los elementos identificados coinciden con aquellos correspondientes a la fibra de kevlar.

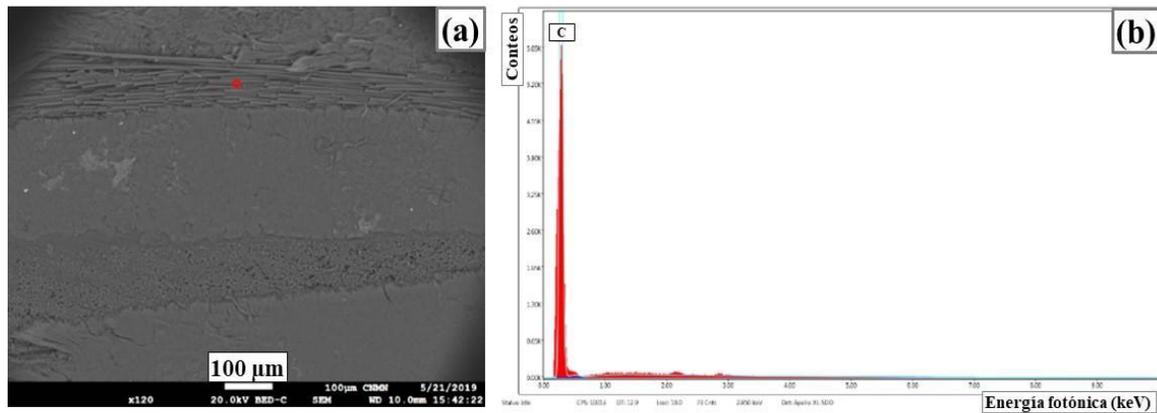


Figura 36. (a) Micrografía de material kevlar-kevlar/carbono, 120x. (b) Espectro EDS puntual de (a).

En este punto se hace importante mencionar que en [25] se muestra el uso del método de colocación manual para fabricar materiales compuestos de Kevlar. En el mismo se muestra un análisis morfológico del material compuesto fabricado de manera bidireccional. En su estudio muestran burbujas de aire derivadas de su proceso de manufactura. Así, cabe mencionar que en este estudio los materiales compuestos se fabricaron por infusión al vacío y no se observaron burbujas de aire, con la excepción del kevlar que mostro delaminación en algunas

secciones. No obstante, es también posible que este fenómeno se deba al proceso de corte realizado al material [26] o a que sea necesario realizar un tratamiento que promueva una mejor adherencia del kevlar con la matriz polimérica [27]. Además, fue visible una buena homogeneidad del arreglo bidireccional del material compuesto usando esta técnica de fabricación.

5.5 Caracterización por espectrometría de infrarrojo (FT-IR)

Los espectros obtenidos de la resina Epolam 2015 con endurecedor y de los materiales compuestos base fibra de vidrio, carbono y kevlar se muestran en la figura 37. Se pueden observar los picos característicos de una molécula de DGBA [5] propios de la resina + endurecedor.

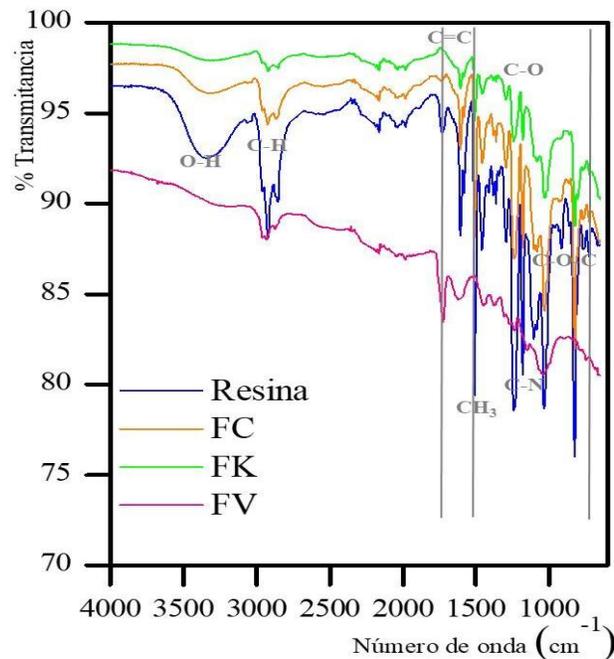


Figura 37. Espectros IR de resina Epolam 2015+edurecedor y de los materiales compuestos base fibra de vidrio, base carbono y base kevlar, por separado.

Las líneas en color gris en la figura 36 se muestran como apoyo para observar la ausencia de una banda característica de vibración en el material compuesto base fibra de kevlar, y dos ausencias de bandas de vibración características en el material compuesto base fibra de vidrio. En éste último caso, próximas a la región del infrarrojo lejano. Es importante mencionar que

en [28] utilizaron como material de relleno resina epóxica EPOLAM 2015 curada con diferentes reactivos. En su estudio identificaron el espectro IR de cada material analizado. Los espectros obtenidos señalan gran similitud con el espectro azul correspondiente a la resina con el endurecedor de la figura 35. En [28] al agente endurecedor + la resina EPOLAM 2015 con el que se observa importante semejanza es del tipo *amina*. Con respecto, a las diferencias (ausencias de bandas características de vibración en los espectros obtenidos de la matriz polimérica reforzada con fibra de kevlar, por un lado, y por otro lado con fibra de vidrio) se espera que estas se deban a la diferente adherencia de la matriz polimérica y la fibra. Esta hipótesis podrá analizarse en la sección de resultados de los ensayos mecánicos al material.

5.6 Caracterización de los materiales compuestos por difracción de rayos-X

Los difractogramas obtenidos de cada material compuesto se muestran en la figura 38. Es observable que aquella muestra que presentó cierto grado de cristalinidad es la correspondiente al material compuesto base fibra de vidrio. Cabe señalar que, debido a ello, se espera que el material compuesto kevlar-fibra de vidrio presente mayor resistencia mecánica con respecto a los otros materiales que, de manera general, muestran un comportamiento amorfo. Los picos característicos de cada material compuesto se compararon con difractogramas obtenidos de literatura y corresponden al material base fibra de: vidrio, carbono o kevlar respectivamente [9].

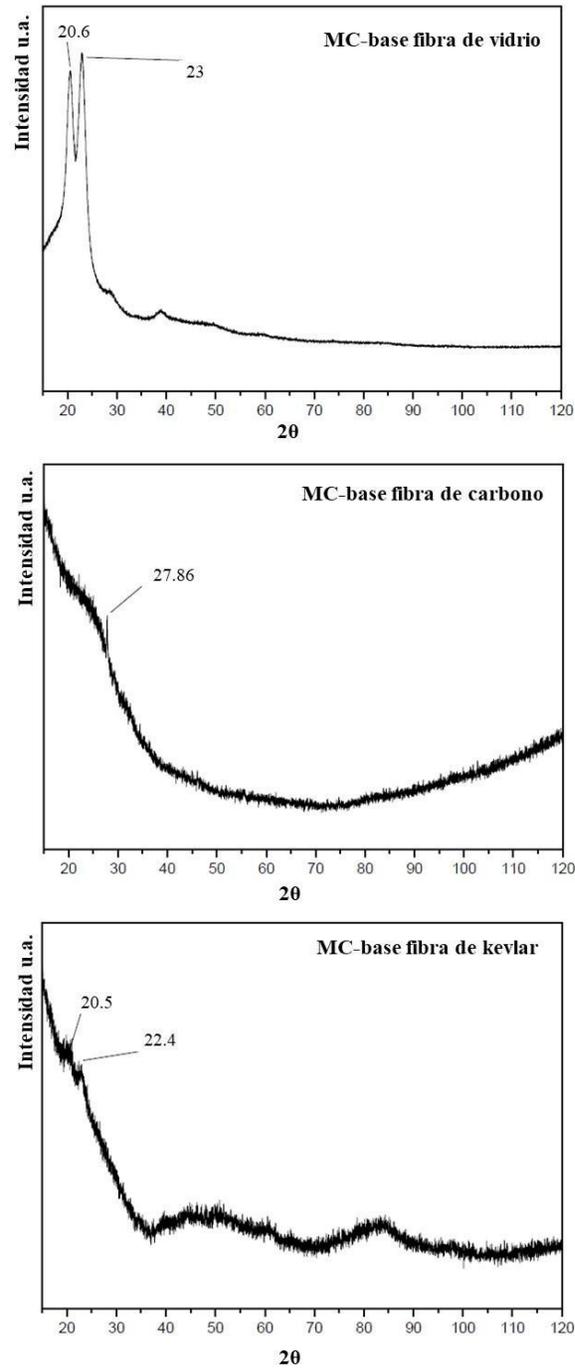


Figura 38. Espectros obtenidos por DR-X de los materiales compuestos base fibra de: vidrio, carbono y kevlar, por separado.

5.7 Caracterización mecánica

Se llevó a cabo la caracterización de los materiales compuestos base kevlar para realizar un análisis de la relación de sus características internas con el comportamiento mecánico del material.

5.7.1 Ensayo de dureza

Los resultados del ensayo de dureza para materiales compuestos de acuerdo con la norma ASTM D 2583 se muestran en la tabla 8 [23].

Tabla 8. Resultados de Ensayo de Dureza Barcol.

Ensayo	6.3mm			2.5 mm		
	K-Carbón	K-Vidrio	K-K/Carbon	K-K/Carbon	K-Carbon	K-Vidrio
1	52	53	50	51	57	58
2	51	54	51	53	67	54
3	52	53	48	59	70	58
4	52	50	38	48	55	51
5	60	35	47	55	48	56
6	52	57	48	57	72	60
7	60	52	50	62	72	58
8	45	40	46	57	61	66
9	47	51	48	54	67	59
10	51	51	44	54	68	43
Promedio	52.2	49.6	47	55	63.7	56.3

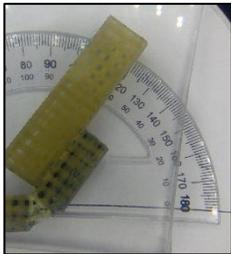
En la tabla número 8 se observa que el material compuesto reforzado con fibra de carbono tiene el valor mayor mientras que el reforzado con kevlar/kevlar-carbono tiene el valor menor. Los valores de dureza se tomaron en dos placas diferentes solo por comparación, es decir, las placas se fabricaron con diferente espesor para las pruebas mecánicas cuyos resultados se mostrarán más adelante. No obstante, tienen un acabado superficial distinto ya que las placas donde se realizó el moldeo son diferentes. Las que tienen un acabado superficial más liso presentaron valores mayores de dureza. Así, se espera relacionar esta información con los valores de resistencia al impacto mencionados a continuación.

5.7.2 Impacto Izod

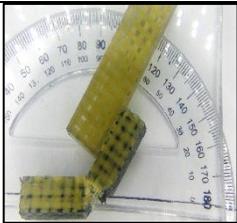
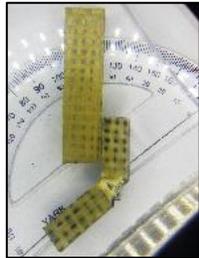
Ensayo de dureza para materiales compuestos ASTM D 256 prueba estándar para determinar la resistencia al impacto del péndulo Izod. Los resultados de todos los métodos de ensayo se muestran en términos de energía absorbida por unidad de ancho de la muestra o por unidad de área bajo la muesca de acuerdo con la sección 5 de la norma [20].

Los resultados del ensayo se muestran en las tablas 9, 10 y 11. Se utilizó lupa de 5x con lámpara de brazo articulado para observar y obtener las imágenes mostradas en cada tabla.

Tabla 9. Resultados de pruebas Izod Kevlar- Kevlar/Carbono

Kevlar – kevlar/Carbono						
Muestra	Ángulo	Tipo de falla de acuerdo con ASTM D 256	Energía absorbida en J/m y kJ/m ² (de acuerdo a norma ASTM D 256)		Imágenes	Observaciones
1	 60°	NB	641.025	101.75	  	Delaminación, con exposición de fibra de kevlar horizontal y vertical y huecos por el aparente desprendimiento de la fibra de la matriz, estiramiento con fractura así como deshilado de las fibras de kevlar, sufriendo ruptura del 80% quedando unida en un 20% de la sección
2	 66°	NB	1,068.376	169.583	 	En estas imágenes se aprecia delaminación en los costados, con exposición de fibra de kevlar y, también, aparente estiramiento en la zona de fractura, así como, deshilado de las fibras de kevlar. Revisando las dimensiones de la sección transversal, es apreciable una ruptura del 70% de la sección, quedando unida

“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

						en un 30%.
3	 63°	NB	747.863	118.708	 	Estas muestras presentan delaminación en los costados, con exposición de fibra de kevlar y estiramiento en la región de fractura, así como deshilado de las fibras de kevlar. Al igual que el caso previo, analizando las dimensiones de la sección transversal, es apreciable una ruptura del 70% de la sección, quedando unida en un 30%.
4	 56°	NB	641.025	101.75	  	Como en los casos previos hay delaminación en los costados con exposición de fibra de kevlar y estiramiento en el área de fractura. Hay fibras de kevlar deshiladas y midiendo la sección de fractura es apreciable una ruptura del 75% de la sección, quedando unida en un 25%. A diferencia de las imágenes previas, se observó exposición de fibra de carbono horizontal en un costado.

“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

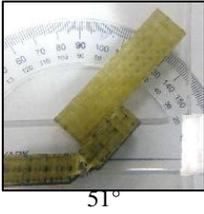
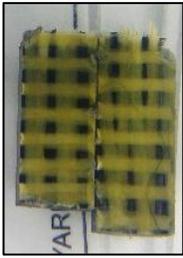
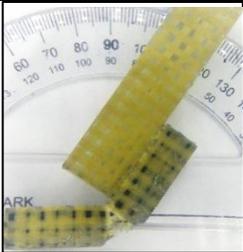
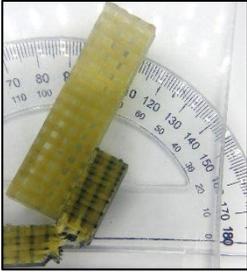
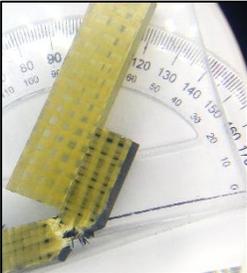
						
5	 51°	NB	641.025	101.75	  	También, hay delaminación con exposición de fibra de kevlar y estiramiento en el área de fractura. Hay fibras de kevlar deshiladas y midiendo la sección de fractura es apreciable una ruptura del 80% de la sección, quedando unida en un 20%. A diferencia de las imágenes previas, hay exposición de fibra de carbono.
		Promedios	747.863	118.708		

Tabla 10. Resultados de ensayo Izod material Kevlar-Carbono.

Kevlar – Carbono.						
Muestra	Angulo	Tipo de falla de acuerdo con ASTMD 256	Energía absorbida en J/m y kJ/m ² (de acuerdo a norma ASTMD 256)		Imágenes	Observaciones
1	 180°	H	427.35	67.833		Se aprecia delaminación bajo la superficie de la muestra. Al medir la sección transversal, la delaminación se presenta a un 20% de la superficie, con exposición de fibra de kevlar. Además, hay huecos en la superficie de fractura por el aparente desprendimiento de fibra de la matriz. De modo general, se aprecia fractura de las fibras, así como, deshilado de las fibras de kevlar. La superficie de fractura se mantiene unida solo por las fibras de kevlar.
2	 59°	NB	641.025	101.75		Hay aparente delaminación, con exposición de fibra. También hay huecos en la superficie de fractura por el desprendimiento de las fibras de carbono. El área fracturada aún se mantiene unida. Al medir esta zona, la unión, representa un 25% de la superficie de fractura.

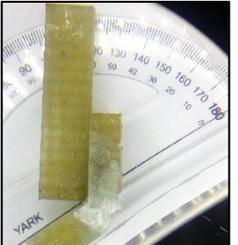
“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

3	 <p>64°</p>	NB	534.188	84.791		<p>No se observa delaminación. Hay exposición de fibras desprendidas de la matriz, así como, huecos en la superficie de fractura. Es visible el arreglo bidireccional y las capas de fibra. El área fracturada aún se mantiene unida. Al medir ésta zona, la unión, representa un 20% de la superficie de fractura.</p>
4	 <p>180°</p>	H	534.188	84.791		<p>En la superficie de fractura hay exposición de fibra con rotura de las mismas. Se aprecia desprendimiento de fibras de la matriz y huecos debidos al desprendimiento. Solo queda unida la superficie de fractura por fibra de kevlar. No se observa delaminación.</p>
5	 <p>62°</p>	NB	641.025	101.75		<p>Exposición de fibra y huecos donde se fractura y desprende la fibra de la matriz. Se aprecia delaminación. Al medir la sección en que se observa, ésta representa un 20% del espesor de la muestra al interior de la misma. Al medir superficie de fractura queda aún unida</p>

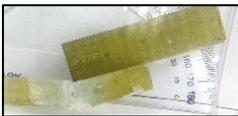
“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

						en un 25% de la sección.
		Promedios	555.555	88.183		

Tabla 11. Resultados de ensayo Izod material Kevlar-Vidrio

Kevlar – Vidrio						
Muestra	Angulo	Tipo de falla de acuerdo con ASTM D 256	Energía absorbida en J/m y kJ/m ² (de acuerdo a norma ASTM D 256)		Imágenes	Observaciones
1	 62°	NB	1,709.4	271.33 3	  	Presenta exposición y desprendimiento de fibra de la matriz, con delaminación visible hacia los costados con mayor afectación hacia el área donde fue sujeta. Se observa color blanco con aparente ruptura de las fibras. Al medir la superficie de fractura, ésta queda unida en un 30% de la sección.
2	 60°	NB	1,709.4	271.33 3	 	Se observa fractura de la fibra de vidrio quedando unida la superficie, al medir, en un 20% de la sección. Nuevamente, en la zona de ruptura se observa de color blanco el material con exposición de fibras fracturadas en y con delaminación en ambos costados

“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

						de la probeta. Hay una fisura por delaminación del centro de la probeta y hacia un costado, observándose fractura detrás del área de la muesca y afectación hacia el área de impacto.
3	 <p>35°</p>	NB	1,495.72	237.41 6	  	Fractura con exposición de fibra de vidrio. Al medir, queda unida en un 20% la superficie de fractura. Se aprecia también fractura en la parte posterior de la muesca con delaminación a hacia los costados. Hay poca área de color blanco y mayor afectación hacia el lado del impacto.
4	 <p>25°</p>	NB	1,709.4	271.33 3	 	Toda la fibra de vidrio se observa fractura. La probeta queda unida solo por la fibra de kevlar. Hay delaminación del área tras la muesca con visible fractura y daño en las fibras de kevlar. Nuevamente, la zona dañada se observa de color blanco en forma semicircular con mayor afectación hacia el área de soporte.

5	 <p>51°</p>	NB	1,709.4	271.33 3		Ruptura con exposición y desprendimiento de fibra de la matriz, con fractura desde la mitad de la probeta hacia un costado. Hay visible delaminación, presentando color blanco en área semicircular del centro al exterior de la probeta, donde se recibe el impacto.
		promedios	1,666.6	264.55		

NB-fractura tipo no break.

H-fractura tipo Bisagra.

En la tabla 12 se observa que el material que presenta mayor valor de energía absorbida es kevlar-vidrio y el material que absorbe menor energía es el kevlar-carbono.

Tabla 12. Promedio de resultados de ensayos de Impacto Izod.

Material	Energía absorbida	
	J/m	kJ/m ²
Kevlar-Kevlar/Carbono	747.86	118,708.45
Kevlar-Carbono	555.55	88,183.42
Kevlar- Vidrio	1,666.66	264,550.26

Relacionando la tabla 12 con los valores de dureza mostrados en la tabla 8, se espera que el material con el valor mayor de dureza presente un comportamiento frágil. A este respecto, el material compuesto kevlar-carbono mostró el valor más alto de dureza y el valor más bajo de energía absorbida durante este ensayo. Por su parte, el material con Kevlar-kevlar-carbono mostró los valores de dureza más bajos, se esperaba así que mostrara mayor resistencia al impacto, no obstante, aquel con los valores más altos de resistencia al impacto corresponde al

compuesto kevlar-fibra de vidrio. Es posible que esto se deba a una mejor adherencia del EPOLAM 2015+endurecedor con el material de refuerzo y en consecuencia una mejor transferencia de la energía de impacto a la matriz, como posiblemente se observa como resultado de la caracterización por FT-IR, figura 36, y en la propia morfología de la fractura en los especímenes de la tabla 12, en donde es evidente mayor daño de los especímenes en la matriz polimérica.

5.7.3 Ensayo de tensión

Para materiales compuestos la norma utilizada es la ASTM D 3039, prueba estándar para determinar la resistencia tensil. En ella se identifica el esfuerzo máximo que soporta el material, así como su módulo de elasticidad [22]. Aún no se han concluido los ensayos de tensión, así como los resultados de tensión por condiciones ajenas al presente estudio. Las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas de cada material compuesto, se muestran en las figuras 39, 40 y 41, así como el tipo de falla en la tabla 13.

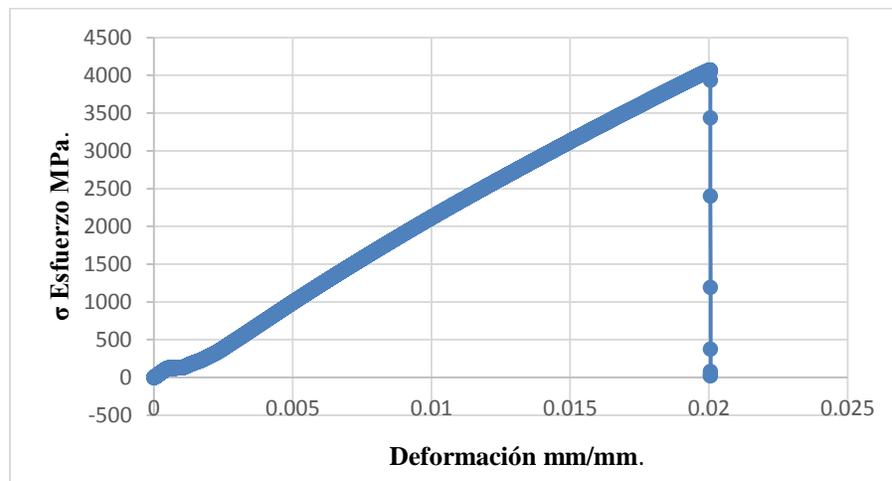


Figura 39. Gráfica esfuerzo-deformación de material compuesto kevlar-vidrio.

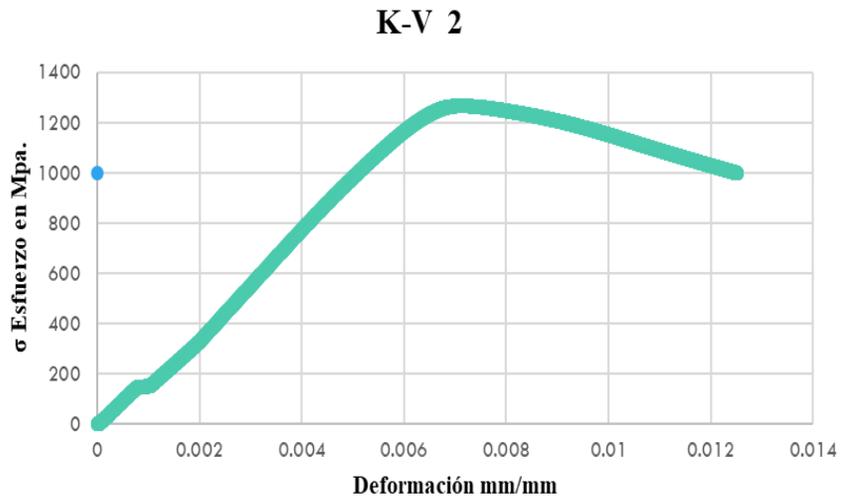


Figura 40. Gráfica esfuerzo-deformación de material compuesto kevlar-vidrio.

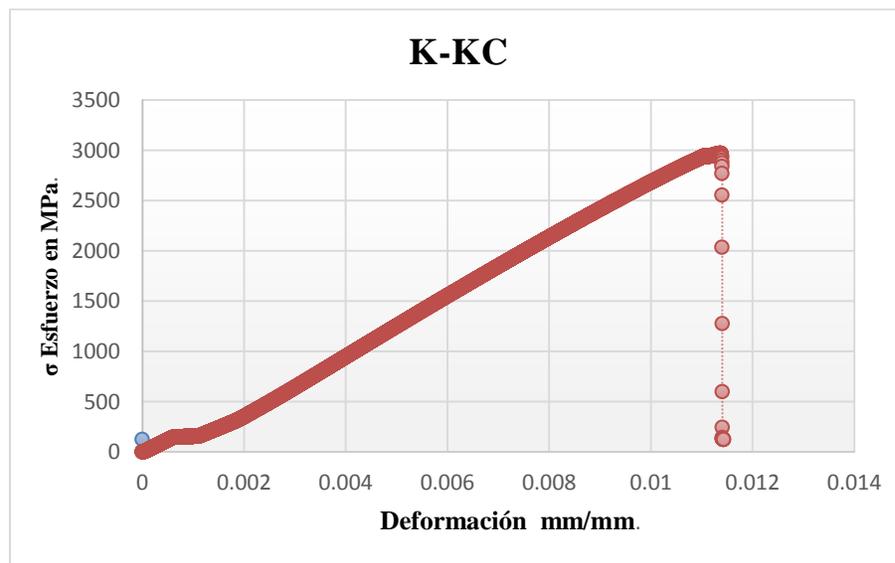


Figura 41. Gráfica esfuerzo-deformación de material compuesto kevlar-kevlar/carbono.

Tabla 13. Tipos de falla en probetas ensayadas en tensión [22].

Material	Muestra	Imagen	Tipo de falla (ver figura 10)
Kevlar –vidrio	1		LIT
Kevlar –vidrio	2		LIT
Kevlar-kevlar/carbono	1		LIT

Aparentemente, los especímenes de material compuesto kevlar-vidrio muestran la mayor resistencia tensil, no obstante, estos ensayos tendrán que realizarse posteriormente en el laboratorio de pesados de la ESIQIE/IPN. Sin embargo, los valores identificados hasta el momento, son inclusive superiores a los reportados utilizando EPOLAM 2015 y fibras con otras características. [30].

6. Conclusiones

Se realizó la fabricación del material compuesto mediante el proceso de infusión al vacío en una proporción aproximada de 55% de fibra 45 % de matriz polimérica determinada por peso de los materiales utilizados en la manufactura.

Se obtuvieron imágenes por MO y MEB de los materiales compuestos donde se observa el acomodo ordenado y uniforme. El kevlar presento consistencia fibrosa. No obstante, las otras fibras mostraron mejor adherencia con la matriz polimérica. Mediante las micrografías se lograron identificar características morfológicas de las fibras.

Se determinaron los grupos funcionales de la resina Epolam 2015 y los materiales Compuestos Kevlar-base.

También se observó que el proceso de infusión al vacío es recomendable para fabricar compuestos ya que el material queda con una distribución uniforme y permite realizarlo in situ.

Al maquinar las muestras, para los diferentes ensayos mecánicos y su caracterización microestructural, se experimentó resistencia al corte, así como delaminación del compuesto cuando se cortó sin refrigerante, por lo que fue necesario realizar cortes de las placas con refrigerante para no afectar las probetas.

Se observó que los resultados obtenidos de la prueba de dureza varían en el mismo material conforme al espesor y acabado superficial de cada placa.

En la prueba de Impacto Izod el material Kevlar-Carbono presentó falla tipo ruptura de bisagra en dos probetas, quedando unidas solo por las fibras de kevlar, lo que nos permite confirmar el aporte de dicho material como refuerzo. En el material Kevlar-kevlar/Carbono se observa homogeneidad en el tipo de falla todos en No rotura, obteniéndose 3 lecturas iguales en la energía absorbida, observando el aporte de las capas de Kevlar que impiden la ruptura del material, además se observó la fractura de las fibras de carbono. En el material Kevlar-Vidrio se observó mayor absorción de energía por el material, así como mayor afectación en el material (delaminación, fractura y desprendimiento de las fibras de vidrio de la matriz) de igual manera se puede observar el aporte de las fibras de Kevlar.

En la prueba de Tensión en las gráficas esfuerzo deformación se identificó la resistencia tensil de cada material analizado. Por el momento, el valor más alto de resistencia se obtuvo en el compuesto kevlar-vidrio.

Bibliografía

- [1] Assel Basim, Emad Saadi, Marwa Subhi, “Effect of carbon nano tubes on erosion wear of carbon fiber, glass fiber & kevlar fiber reinforced un saturated polyester composites”, Journal of Engineering and Sustainable Development, vol. 22, No. 4, July 2018, ISN 2520-0917.
- [2] U.S. Tewari, A.P. Harsha, Solid particle erosion of carbon fibre- and glass fibre- epoxy composites, Composites Science and Technology, 63 2003 549-557.
- [3] V.A. Gomez Culebro, Tesis de Maestría de Caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de Autoclave. marzo de 2017, CIDESI.
- [4] D. Miramontes, “Caracterización mecánica de fibra de Aramida para hélices de aerogenerador”, investigación científica, V 8, abril 2014, 2-9.
- [5] Silvio Leonardo Valenca, Sandro Griza, Vandalucia Gomes de Oliviera, Eliana Midori Sussuchi, Federico Guilherme Carvalho de Cunha, “Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with kevlar plain fabric and glass/ Kevlar hybrid fabric”, Composites: parte B 70 (2015) 1-8.
- [6] Rachid M´Saoubi, Dragos Axinte et al, “High performance cutting of advance aerospace alloys and composite Materials”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015.
- [7] ASTM D 4762 Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials.
- [8] Blanca Parga Landa, Francisco Hernandez Olivares, Nuevos Materiales, Julio, Agosto, Septiembre 1999, DYNA.
- [9] Guerrero V. Rodríguez M. Villavicencio G. Andrade L. “Elaboración de Materiales de Matriz Polimérica Reforzados con Fibra de Vidrio Mediante el Método de Asperción”. Revista Politécnica - Julio 2013, Vol. 32, No. 1, Páginas 37-42.

“Caracterización mecánica y microestructural de materiales compuestos base kevlar”

[10] Anabel Nava Gastelum, Miriam Siqueiros Hernández, Benjamin Gonzales, Yuridia Vega, Ismael Mendoza Muñoz. “Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica”. Revista Materia, V.23, N.02, 2018.

[11] Wilson Webo, Leonard Masu, and Maina Maringa. “ The Impact Toughness and Hardness and Untreated Sisal Fibre-Epoxy Resin Composites”. Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2018, Article ID 8234106.

[12] H. Mendoza-Nava, M. Talavera-Ortega, F. Estrada- De Los Santos, S. Mendoza Facio, O. Jimenez Arevalo. “Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono fabricados por el método de infusión para aplicaciones aeronáuticas”. Tomo IV Avances de la Ingeniería Mecánica en Manufactura y Materiales. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C. Septiembre de 2014. Vol. 978-607-96746-4-9.

[13] Judith Wollbrett-Bitz, Comportement mécanique longitudinal et transverse, micro-mécanismes de deformation et effect de la température sur la fibre Kevlar 29. Ecole National

[14] William F. Smith, Javad Hashemi, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Cap. 12, pag. 452-494, quinta edición, Mc Graw Hill, México 2014.

[15] J. Paulo Davim, Wear of Advance Materials, ISTE WILEY, 2012.

[16] Mallik P.K. Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA,2008.

[17] Carmas Composites, www.carmas.com.ar

[18] A. Ozlos, aplicaciones de la difracción de rayos x, facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2009.

[19] Miguel Ipohorski, Patricia B. Bozzano, Microscopia Electrónica de Barrido, Ciencia e Investigación, tomo 63 N° 3,2013.

[20] ASTM D 256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.

[21] J. González, D. Rivas, M. Beltrán, A. Casarrubias, F. Hernández. “Determinación de la energía de fractura en un material compuesto carbono-epoxi con delaminaciones artificiales sometido a fatiga”. Memorias del XXIII Congreso Internacional anual de la SOMIM 20 al 22 de septiembre de 2017 Cuernavaca, Morelos, México.

[22] ASTM D 3039 Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

[23] ASTM D 2583 Standard Test Methods for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor.

[24] Jesús Cornelio Mendoza Mendoza, Estudio Especial del Desgaste Erosivo en Materiales Compuestos de Fibra de Carbono y Fibra de Vidrio, 2019, Instituto Tecnológico de Pachuca.

[25] S. Rajesh, B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezhian, M. Abhijith, R. Dinesh Riju y K. Kathir Kishan. Investigation of Tensile Behavior of Kevlar Composite, Materials Today: Proceedings 5 (2018) p. 1156–1161.

[26] Rachid M'Saoubi, Dragos Axinte, Sein Leung Soo, Christoph Nobel, Helmi Attia, Gregor Kappmeyer, Serafettin Engin y Wei-Ming Sim. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite Materials. IRP Annals-Manufacturing Technology 64, 2015, p. 557–580.

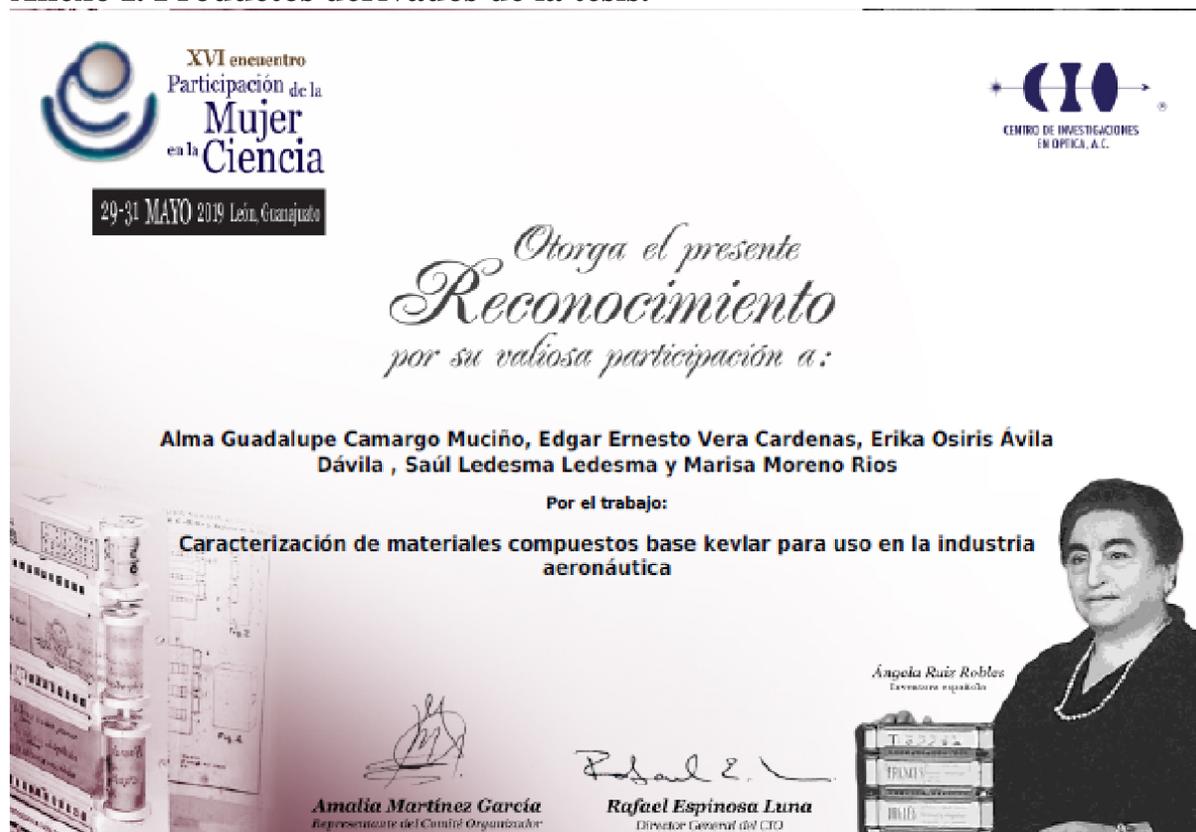
[27] Thingujam Jackson Singh y Sutanu Samanta. Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. Materials Today: Proceedings 2, 2015, p. 1381–1387.

[28] Mohd Saidina Dandan Satia y Mariatti Jaafar. Properties of treated calcium copper titanate filled epoxy thin film composites for electronic applications. J. Appl. Polym. Sci, 133, 2016, 43313.

[29] Pallavi Deshmukh, Jatin Bhatt, Dilip Peshwe, Shaikumar Pathak. Determination of Silica Activity Index and XRD, SEM and EDS Studies of Amorphous SiO₂ Extracted from Rice Husk Ash, *Trans Indian Inst Met*, 65(1), 2012, p. 63–70. S.R. Dhakatea, A. Chaudhary, A. Gupta, A. K. Pathak, B. P. Singh, K. Subhedar, T. Yokozeki. Excellent mechanical properties of carbon fiber- semi aligned electrospun carbon nanofibers hybrid polymer composites. *RSC Advances*. 2016, DOI:10.1039/C6RA02672A. p. 1-20. *POLYMER DATA HANDBOOK*. BRENT D. VIERS. Kevlar. 1999, Oxford University Press, Inc. p 145.

[30] Clément Audibert, Anne-Sophie Andreani, Éric Lainé, Jean-Claude Grandidier. Mechanical characterization and damage mechanism of a new flax-Kevlar hybrid/epoxy composite. *Composite Structures* 195, 2018, p. 126–135. S. Rajesh, B. Vijaya Ramnath, C.Elanchezhian, M. Abhijith, R. Dinesh Riju y K. Kathir Kishan. Investigation of Tensile Behavior of Kevlar Composite. *Materials Today: Proceedings* 5, 2018, p. 1156–1161. Camelia Cerbu. Practical solution for improving the mechanical behaviour of the composite materials reinforced with flax woven fabric. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, p. 1–11. DOI: 10.1177/1687814015582084.

Anexo I. Productos derivados de la tesis.



This is an Accepted Manuscript for the Microscopy and Microanalysis 2020 Proceedings. This version may be subject to change during the production process.

DOI: 10.1017/S1431927620021625

961 – Characterization Microstructural of Kevlar-Based Composites Obtained by Vacuum Infusion Process

Erika Osiris Ávila Dávila¹, Edgar Vera Cárdenas², Alma Guadalupe Camargo Muciño³, Marisa Moreno Rios², Saúl Ledesma Ledesma⁴, Armando Irvin Martínez Pérez⁵ and Nicolas Cayetano Castro⁶

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca, Hidalgo, Mexico, ²TecNM/Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca, Hidalgo, Mexico, ³Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca, Hidalgo, Mexico, ⁴Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Querétaro, Querétaro de Arteaga, Mexico, ⁵Universidad Politécnica de Pachuca, Zempoala, Hidalgo, Mexico, ⁶Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, Distrito Federal, Mexico

Composite materials are widely used as structural engineering materials due to their good mechanical strength and stiffness [1]. These materials have low values of density. Thus, their applications are especially important as components of airplanes, ships, spacecraft, robots, prostheses and automobiles [2]. Particularly, fiber reinforced composite materials are an excellent example of highly strength and stiffness composites [2]. Moreover, the fiber and matrix types used in the composite fabrication are clearly important parameters to obtain high values of mechanical properties. Also, depending on the manufacturing process it is possible to achieve that the values of macroscopic properties in the composite can be close to these ideal properties of the material in a microscopic scale. A longer size of