



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA DE  
CARBONO CON MATRIZ DE RESINA EPOXI

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Automotriz

AUTOR: JOSÉ DIEGO RENDÓN TAPIA

TUTOR: ING. MARY JOSEFINA VERGARA PAREDES. PhD

Guayaquil – Ecuador

2022

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, José Diego Rendón Tapia con documento de identificación N° 0705396729 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 28 de febrero del año 2022

Atentamente,



---

José Diego Rendón Tapia  
0705396729

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, José Diego Rendón Tapia con documento de identificación No. 0705396729, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Caracterización mecánica de un material compuesto de fibra de carbono con matriz de resina epoxi”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 28 de febrero del año 2022

Atentamente,



---

José Diego Rendón Tapia  
0705396729

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mary Josefina Vergara Paredes con documento de identificación N° 1757970247, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ DE RESINA EPOXI, realizado por José Diego Rendón Tapia con documento de identificación N° 0705396729, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 28 de febrero del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Mary Josefina Vergara Paredes, PhD  
1757970247

**DEDICATORIA**

*Con amor y gratitud dedico este trabajo a mi madre por el apoyo incondicional durante todo mi periodo académico.*

*A mi familia y seres queridos, todo mi esfuerzo y dedicación.*

Diego

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres y abuelos por ser el soporte y apoyo en el cumplimiento de mis sueños y metas.*

*A mi familia, hermana y tíos que forman parte de un éxito más en mi rol académico.*

*A mi tutor de trabajo de titulación y docente, Dra. Mary Vergara, por incentivar me a desarrollar proyectos de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, y la transmisión de sabiduría y conocimiento.*

*A mis amigos más cercanos de mi círculo universitario.*

*A la planta docente y laboratoristas de la UPS, al grupo de investigación FSAE de la sede Cuenca y sede Guayaquil por brindarnos los recursos y conocimientos para el desarrollo de este proyecto.*

Diego

## Resumen

El uso de los materiales compuestos en la actualidad se ha expandido a varias industrias, como la automotriz, aeronáutica y otras ramas de ingeniería relacionadas. La fibra de carbono debido a su buen comportamiento mecánico y una excelente relación de la resistencia con su poco peso, ha llevado al uso del mismo en automóviles de alto rendimiento y categorías de competición. El presente estudio tiene el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de fibra de carbono con matriz de resina epoxi con ensayos de tracción siguiendo la normativa ASTM D3039 que alimentaran una simulación numérica de campos de esfuerzos y deformación bajo cargas determinadas. En la primera fase de desarrollo, se manufacturarán 10 probetas del material compuesto mediante el proceso de laminación de la tela 3k de 200g por metro cuadrado con resina pre impregnada con dos configuraciones de apilamiento, una ángulo de 0 grados de laminación entre cada capa y una segunda configuración alternando 0 y 45 grados entre las capas respectivamente, esto bajo el método de curado en horno bajo una presión de vacío determinada. Posteriormente, se realizara una investigación por lo que se tendrá que hacer varios ensayos e tracción en la máquina Shimadzu 300KN con el objetivo de obtener el esfuerzo último de tracción y las propiedades mecánicas asociadas, al mismo tiempo se medirán las variables de sonido, desplazamiento y temperatura con instrumentos de medición durante el ensayo. Los datos obtenidos se compararán con la simulación realizada en Ansys, donde se diseñará el material con las propiedades físicas proporcionadas por el fabricante. Adicionalmente, se tomarán datos de temperatura, sonido y vibración para definir posibles correlaciones de estas variables. Finalmente, se presenta un análisis detallado de la relación de las propiedades mecánicas del material diseñado con las mediciones obtenidas con los instrumentos de medición, donde se determinaron coeficientes de correlación fuertes solo en las variables de frecuencia y aceleración durante el fallo del material compuesto.

**Palabras claves:** *Fibra de carbono, matriz epoxi, probetas, tracción, termoestable, correlación.*

## Abstract

The use of composite materials has nowadays expanded to several industries, such as automotive, aeronautics and other related engineering branches. Carbon fiber, due to its good mechanical behavior and excellent strength to weight ratio, has led to its use in high performance automobiles and racing categories. The present study has the objective of analyzing the mechanical behavior of carbon fiber with epoxy resin matrix with tensile tests following ASTM D3039 standards that will feed a numerical simulation of stress and deformation fields under given loads. In the first phase of development, 10 specimens of the composite material will be manufactured through the lamination process of the 3k fabric of 200g per square meter with pre-impregnated resin with two stacking configurations, an angle of 0 degrees of lamination between each layer and a second configuration alternating 0 and 45 degrees between the layers respectively, this under the oven curing method under a given vacuum pressure. Subsequently, an investigation will be carried out so that several tensile tests will have to be done in the Shimadzu 300KN machine with the objective of obtaining the ultimate tensile stress and the associated mechanical properties, at the same time the variables of sound, displacement and temperature will be measured with measuring instruments during the test. The data obtained will be compared with the simulation performed in Ansys, where the material will be designed with the physical properties provided by the manufacturer. Additionally, temperature, sound and vibration data will be taken to define possible correlations of these variables. Finally, a detailed analysis of the relationship of the mechanical properties of the designed material with the measurements obtained with the measuring instruments is presented, where strong correlation coefficients were determined only in the variables of frequency and acceleration during the failure of the composite material.

***Keywords: Carbon fiber, epoxy matrix, specimens, tensile, thermosetting, correlation.***



## ÍNDICE

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Capítulo I. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.2 Problema.....	2
1.2.1 Antecedentes .....	2
1.2.2 Delimitación .....	2
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
<b>2. Capítulo II. Revisión de la literatura .....</b>	<b>4</b>
2.2 Procesos de Conformado .....	7
2.3 Fabricación y Ensayos .....	9
2.4 Ansys Workbench .....	10
2.5 Análisis de Datos .....	11
<b>3. Capítulo III. Marco metodológico .....</b>	<b>13</b>
3.1 Fase 1: Diseño del material compuesto y condiciones del ensayo.....	14
3.2 Fase 2: Fabricación y ejecución de los ensayos tensiles .....	18
3.3 Fase 3: Análisis y correlación los datos experimentales .....	23
3.4 Fase 4: Configuración del material y simulación en Ansys Workbench.....	31
<b>4. Capítulo IV Resultados y Discusión .....</b>	<b>35</b>
4.1 Ensayos tensiles del material compuesto .....	35
4.2 Correlación de Variables .....	39
4.3 Análisis de resultados .....	48
<b>Conclusiones .....</b>	<b>51</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>52</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>56</b>
A. Ficha Técnica.....	57

B. Diagramas Esfuerzo – Deformación.....	58
C. Gráficas Estadísticas.....	59
D. Gráficas de Temperatura.....	61

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Esquema de desarrollo desagregado.....	4
Figura 2.2 Representación comparativa de compuestos estructurales típicos (Villa, 2018) .....	5
Figura 2.3. Esquema del proceso de impregnación mediante resina líquida (Rodríguez Montes, Castro Martínez, & Del Real Romero, 2006).....	7
Figura 2.4. Proceso general de moldeo por transferencia (Rodríguez Montes, Castro Martínez, & Del Real Romero, 2006) .....	8
Figura 2.5. Esquema de consolidación Prepeg (Rodríguez Montes, Castro Martínez, & Del Real Romero, 2006). .....	9
Figura 3.1. Geometría de la probeta.....	15
Figura 3.2. Arquitectura de la composición del laminado .....	16
Figura 3.4. Esquema de las cargas aplicadas en los ensayos. ....	17
Figura 3.5. Proceso de manufactura de probetas de fibra de carbono .....	18
Figura 3.6. Arquitectura de la composición del laminado .....	19
Figura 3.7. Enfundado del material.....	19
Figura 3.8. Ciclo de curado establecido por el fabricante.....	20
Figura 3.9. Placas de fibra de carbono.....	20
Figura 3.10. Mecanizado de las probetas.....	21
Figura 3.11. Montaje de las probetas .....	22
Grafico 3.12. Montaje de los instrumentos de medición .....	23
Grafico 3.13. Señal de aceleración del ensayo 1A.....	24
Figura 3.14. Espectro de frecuencia de la aceleración antes del fallo del ensayo 1A .....	25
Figura 3.15. Espectro de frecuencia de la aceleración durante el fallo del ensayo 1A.....	25
Figura 3.16. Prueba de normalidad antes del fallo en el ensayo 1A.....	26
Figura 3.17. Correlación de variables antes del fallo en el ensayo 1A.....	27
Figura 3.18. Gráfico de dispersión con línea de tendencia de los valores medidos antes del fallo en el ensayo 1A.....	27
Figura 3.19. Gráfica de Niveles de sonido del ensayo 1A.....	29
Figura 3.20. Prueba de normalidad en valores de sonido del ensayo 1A.....	28

Figura 3.21. Gráfica de correlación de variables en valores de sonido del ensayo 1A.....	29
Figura 3.22. Toma de temperaturas durante ensayo 1A .....	31
Figura 3.23. Esquema de proceso de simulación en Ansys Workbench .....	31
Figura 3.24. Configuración y mallado de fibra unidireccional.....	31
Figura 3.25. Configuración y mallado de la tela bi direccional.....	32
Figura 4.1. Fallas típicas en materiales compuestos con matriz polimérica.....	34
Figura 4.2. Configuración de la simulación estática estructural.....	35
Figura 4.3. Gráfica de dispersión de la correlación de variables antes del fallo del material.....	40
Figura 4.4. Gráfica de dispersión de la correlación de variables durante el fallo del material.....	41
Figura 4.5. Característica de fallo en probeta 1A, 2A y 5A.....	41
Figura 4.6. Detalle de tipo de fallo de probeta 3A.....	6
Figura 4.7. Gráfica de dispersión de la correlación de variables antes del fallo del material.....	44
Figura 4.8. Gráfica de dispersión de la correlación de variables durante el fallo del material.....	45
Figura 4.9. Tipo de fallo en Probeta 2B, 3B y 4B .....	46
Figura 4.10. Tipo de fallo en Probeta 1B y 5B.....	46
Figura A.1. Ficha técnica del fabricante.....	56
Figura A.2. Diagrama Esfuerzo vs Deformación Ensayo 3A.....	57
Figura A.3. Diagrama Esfuerzo vs Deformación Ensayo 4A.....	57
Figura A.4. Prueba de Normalidad Ensayo 1A.....	58
Figura A.5. Prueba de Normalidad Ensayo 2A.....	58
Figura A.6. Prueba de Normalidad Sonometro Ensayo 1A.....	59
Figura A.7. Toma de temperatura antes de la falla del material en ensayo 1A.....	60
Figura A.8. Toma de temperatura despues de la falla del material en ensayo 1A.....	60

## Lista de Tablas

Tabla 2.1 Principales propiedades de la fibra de carbono (Besednjak, 2005). .....	5
Tabla 2.2 Representación comparativa de compuestos estructurales típicos (Villa, 2018). .....	10
Tabla 3.1. Propiedades físicas del material XC110 .....	14
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del material XC110. ....	14
Tabla 3.3. Distribución de probetas en secuencia de laminación. ....	14
Tabla 3.4. Distribución de probetas en secuencia de laminación. ....	21
Tabla 3.5. Dimensiones y peso de las probetas mecanizadas. ....	22
Tabla 3.6. Dimensiones y peso de las probetas mecanizadas. ....	25
Tabla 4.1. Caracterización del tipo de fallo en las probetas de fibra de carbono .....	36
Tabla 4.2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono configuración de apilamiento A. ....	38
Tabla 4.3. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono configuración de apilamiento B. ....	38
Tabla 4.4. Resumen estadístico de los esfuerzos de tracción promedio. ....	39
Tabla 4.5. Coeficiente de correlación para probetas de categoría A y B. ....	47
Tabla 4.6. Datos de temperatura durante ensayos de probetas de categoría A .....	49
Tabla 4.7. Valores esfuerzos y deformación obtenidos bajo simulación de la categoría A .....	50
Tabla 4.8. Valores esfuerzos y deformación obtenidos bajo simulación de la categoría B. ....	50

## **1. Capítulo I. Introducción**

El desarrollo de los materiales compuestos tiene como fin obtener materiales con mejores propiedades, en donde se combine varias propiedades como una buena resistencia y tenacidad. La utilización de materiales compuestos está en un rápido crecimiento, implantándose en una gran variedad de sectores industriales, esto es gracias a sus magníficas propiedades mecánicas, así como su baja densidad; ya que con ellos se pueden obtener materiales ligeros, resistentes, dúctiles y resistentes a altas temperaturas. Los materiales compuestos de fibra de carbono en matriz polimérica, tienen actualmente un amplio campo de aplicaciones, en la industria aeronáutica, automotriz y médica, donde sus propiedades mecánicas y ligereza son muy importantes. Teniendo en cuenta que día a día crece la oportunidad de optimizar el diseño de materiales compuestos, se puede afirmar que es necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales que se van a construir, ya sea para su empleo en diferentes sectores industriales.

El presente estudio tiene como objetivo conocer a fondo las propiedades del material compuesto, así como las de su refuerzo y matriz termoestable, aplicando normas para su caracterización y para el proceso de manufactura de los especímenes de resina epoxi. Con el fin de comparar las propiedades del compuesto respecto con su matriz polimérica, y así comprobar que el incremento de las propiedades mecánicas del material compuesto reside más en el refuerzo empleado, en este caso fibra de carbono 3K, y analizar la relación de las vibraciones obtenidas de los instrumentos de medición en los intervalos de tiempo en lo que se produce la falla del material, así para obtener valores de correlación entre variables de frecuencia, aceleración, sonido y temperatura, relacionando los tipos de falla que se producen en las probetas ensayas con los valores de coeficientes de relación calculados.

## **1.2 Problema**

### **1.2.1 Antecedentes**

La fibra de carbono es un material que se desarrolló en la industria aeroespacial, gracias a sus excelentes prestaciones mecánicas, representaba una nueva alternativa para la fabricación de refuerzos estructurales. Con la reducción de los costos de manufactura, se pudo expandir a otras industrias. En el sector automotriz se ha venido trabajando en este material con el fin de conseguir geometrías más complejas que demandan las condiciones de diseño modernas para alcanzar la máxima eficiencia en los vehículos, ya sean comerciales o monoplazas de competición.

En Ecuador se han desarrollado varios trabajos sobre el uso de los materiales compuestos en la industria nacional. En la Universidad Politécnica Salesiana se ha desarrollado estudios de la fabricación de matrices reforzadas con materiales compuestos de fibra de carbono para la utilización de los mismos en proyectos de diseño como lo es el FSAE, desarrollado por el Grupo de investigación en ingeniería de transporte (GIIT) en la sede Cuenca, donde se han manufacturado matrices con refuerzo de fibras naturales, de vidrio y fibras de carbono. (Villa, 2018)

A pesar de realizar importantes aportes al conocimiento del comportamiento de este tipo de material, estos trabajos fueron realizados en la ciudad de Cuenca. En lo que respecta a la sede Guayaquil, existe poco conocimiento de los procesos de manufactura y comportamiento de materiales compuestos en lo que respecta a sus diferentes configuraciones.

### **1.2.2 Delimitación**

Para la fabricación de las probetas se utilizará los laboratorios de procesos aditivos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. Aquí se utilizará el horno para materiales compuestos para el curado del material de laminados de fibra de carbono; mientras que para los ensayos de tracción se utilizará el laboratorio de ensayos de la carrera de ingeniería civil, donde se trabajará con la máquina de ensayo Shimadzu 300kN.

El material que se usará para la laminación de las probetas es la tela de fibra de carbono 210g pre impregnada de resina epoxi.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Definir el comportamiento mecánico de compuestos con fibra de carbono y matriz de resina epoxi según ensayos de tracción para determinar el comportamiento del mismo y comparar con simulaciones de software CAE.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Fabricar probetas reforzadas con fibras de carbono mediante el proceso de curado en horno para caracterizar las propiedades mecánicas del material bajo ensayos de tracción bajo la normativa ASTM D3039.
- Crear el material ensayado en un software CAE para simular bajo las condiciones de falla del material y comparar los resultados.
- Determinar la relación existente entre el sonido, temperatura y desplazamiento a través de la vibración medidas durante los ensayos mecánicos.



## 2. Capítulo II. Revisión de la literatura

La historia de éxito de los nuevos materiales se debe a la fibra PAN (Poliacrilonitrilo), en cuyo desarrollo William Watt participó significativamente en Gran Bretaña. La historia de la fibra de carbono en realidad pertenece al siglo pasado con la invención de la bombilla. (Marsh, Edward, & Rodriguez, 1997) Es un material que se ha venido desarrollando con más velocidad en las dos últimas décadas, gracias a la aplicación de industrias con gran impacto comercial, como lo son la aeronáutica y la industria automotriz, esta última de gran interés en el desarrollo de la presente investigación.

La revisión realizada parte del hecho de que diseño del material compuesto cubre los elementos asociados a las definiciones inmersas en: las propiedades mecánicas, proceso de manufactura y las etapas asociadas a la simulación que es uno de los aportes de la investigación experimental realizada. Así de forma disgregada se presenta cada definición apoyada en el esquema de la figura 2.1.

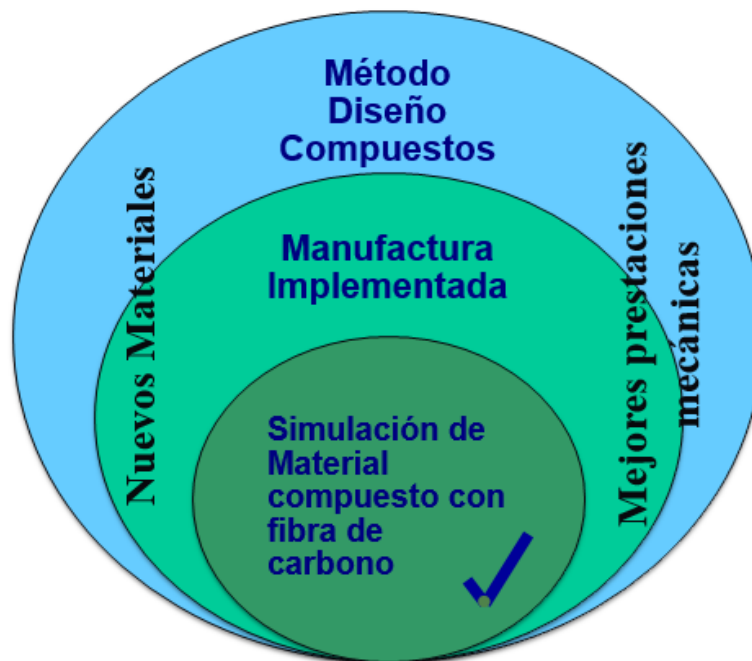
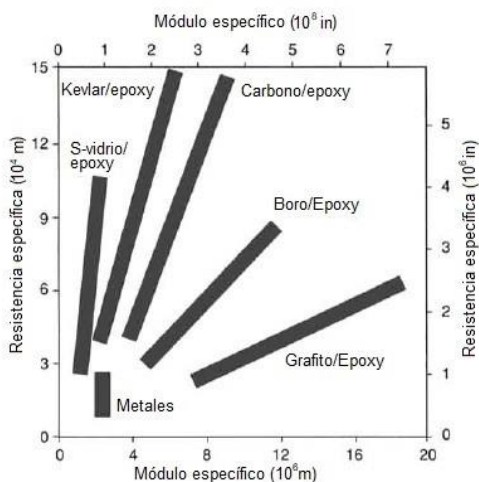


Figura 2.1 – Esquema de desarrollo desagregado 2.1 Material

### 2.1.1 Compuesto de fibra de carbono

Los materiales compuestos son la unión de varios materiales para así poder formar propiedades más resistentes, siendo estas superiores a las características de los materiales individuales entre sí. (Villa, 2018) En la figura 2.2 mostrada continuación podemos observar varios tipos de materiales. Estos tienen un módulo específico diferente por lo tanto hace que las propiedades cambien y su distribución de fases también sea diferente.



**Figura 2.2** – Representación comparativa de compuestos estructurales típicos (Villa, 2018)

La fibra de carbono se compone de filamentos de carbono con matrices epoxies, resultan materiales compuestos que se caracterizan por poseer una elevada resistencia y un elevado módulo de elasticidad, siendo sin embargo un material sumamente ligero (Besednjak, 2005). Para la obtención de este material se necesita una oxidación y carbonización controlada de las fibras a altas temperaturas que can desde los 1200 °C hasta los 3000 °C.

### 2.1.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas van a depender mucho del proceso de manufactura del material compuesto, principalmente del matriz epoxi. Una característica interesante de las mismas es su coeficiente de expansión térmica negativo en dirección de las fibras y positivo en el sentido transversal (Besednjak, 2005). Teniendo una configuración determinada se puede conseguir un comportamiento del material donde pueda soportar mayor deformación térmica en un amplio rango de temperatura. En la tabla 2.1 se presentan las características típicas del material.

*Tabla 2.1 Principales propiedades de la fibra de carbono (Besednjak, 2005).*

<i>Tipo</i>	<i>Carbono HT</i>	<i>Carbono HM</i>	<i>Carbono IM</i>
<i>Resistencia a la tracción (GPa)</i>	<i>2,6 – 5</i>	<i>2,0 – 3,2</i>	<i>3,4 – 5,9</i>
<i>Módulo elástico (GPa)</i>	<i>228 - 238</i>	<i>350 - 490</i>	<i>280 - 400</i>
<i>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>1740 - 1830</i>	<i>1790 - 1910</i>	<i>1730 - 1800</i>
<i>Alargamiento a la rotura (%)</i>	<i>1,2 – 2</i>	<i>0,4 – 0,8</i>	<i>1,1 – 1,9</i>
<i>Resistencia específica (GPa * cm<sup>3</sup>/g)</i>	<i>1,5 - 2</i>	<i>1,1 – 1,7</i>	<i>2,0 – 3,1</i>
<i>Módulo E específico (GPa * cm<sup>3</sup>/g)</i>	<i>127 - 134</i>	<i>190 - 260</i>	<i>160 - 200</i>
<i>Chef. Transmisión térmica (10<sup>-6</sup>/°K)</i>	<i>-0,1 a -0,7</i>	<i>-0,5 a -1,3</i>	<i>--</i>
<i>Diámetro del filamento (µm)</i>	<i>7 - 8</i>	<i>6,5 - 8</i>	<i>5 - 7</i>

### 2.1.3 Arquitectura del refuerzo

La arquitectura del tejido de la fibra va en relación a la aplicación de esfuerzos sobre la que se va a diseñar la pieza. Teniendo las formas más comerciales como:

- **Tela:** Es la forma más utilizada en la industria, este tipo de telas facilita conseguir mayores contenidos de refuerzo. Estas pueden ser pre impregnadas o no de la resina epoxi. Existen distintos tipos de tejidos, tranzados y tricotados.
- **Cinta unidireccional:** Esta presentación debe ser siempre pre impregnada para evitar que la tela se deforme. Presenta un espesor de alrededor de 0.2 mm con unos 3000 filamentos. La configuración de los filamentos se dan en una sola dirección, y esto da las máximas propiedades mecánicas que se pueden alcanzar.
- **Felpudo:** Consta de una tela con fibras cortas con haces de unas 100 a 300, con la diferencia de que las fibras están dispuestas aleatoriamente, resultando de un comportamiento más impredecible debido a la dirección de la fibra.

### 2.3.4 Laminado Con Fibra De Carbono

Estas laminas se trata de fibras con alta resistencia y modulo en una matriz ya se polimétrica, cerámica o metálica. El ensamble de las capas en el laminado puede generar propiedades que incluyen rigidez dentro del plano a la resistencia y la flexión.

Esto ofrece da una ventaja para poder utilizar al máximo características de resistencia en lo materiales compuestos, según su dirección de cada lamina.

Existen diferentes tipos los más utilizados son los laminados simétricos y es el que se utilizó para esta investigación, para realizar este proceso se necesitaran ciertos criterios como:

- Se determinara láminas del exterior hacia el interior.
- El número del ángulo del corte de la fibra y de láminas que poseerá este.
- Se definirá el orden del apilamiento y se colocara un subíndice para indicar que el laminado ha concluido, en este caso que es el simétrico, se manifestara el orden del apilado de un lado y se colocara un subíndice S para concluir que el laminado finalmente es simétrico.

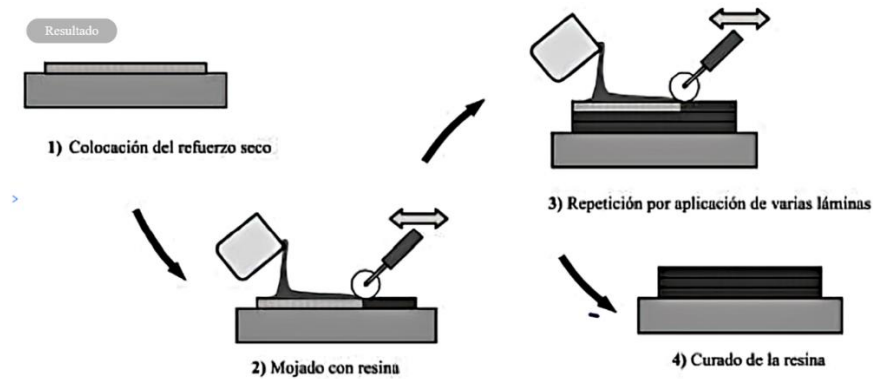
## **2.2 Procesos de Conformado**

Para la obtención de una pieza estructural con materiales compuestos, existen diferentes tipos de procesos de manufactura, los cuales de alguna manera afectan en el comportamiento mecánico de la misma. A continuación se presentan los procesos más comunes para la fabricación de piezas en fibra de carbono.

### **2.2.1 Impregnación manual de la resina líquida**

Proceso utilizado para piezas cuyos requerimientos no son demasiados exigentes. Este tipo de proceso es muy utilizado en la pequeña industria de la reparación de piezas de vehículos.

Se trata de verter la resina liquida sobre la tela de fibra pre ubicada cobre un molde de manera manual, forzándola a penetrar en la preforma con la ayuda de una brocha o rodillo para tratar de eliminar posibles burbujas de aire. El proceso se repite por el número de capas de tela que se fuera a aplicar al molde. En la figura 2.3 se muestran las fases principales del método.

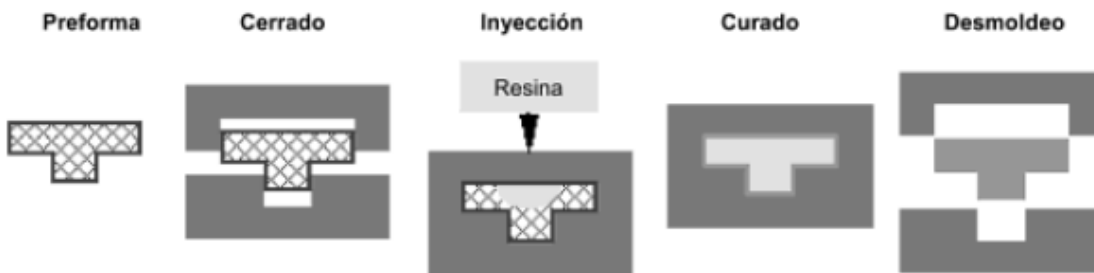


**Figura 2.3.** Esquema del proceso de impregnación mediante resina líquida (Rodríguez Montes, Castro Martínez, & Del Real Romero, 2006).

### 2.2.2 Moldeo por transferencia de resina

En este proceso se introduce la resina líquida al molde mediante presión (Ver figura 2.4), donde previamente se debe introducir las capas de tela y sellar al vacío, con el fin de no tener vacantes de oxígeno en la matriz. Una vez endurecida la pieza se puede extraer del molde.

En este proceso se obtienen piezas con superficies bien terminadas por las dos caras, al contrario que el proceso anterior donde una de las superficies presenta un mal acabado.

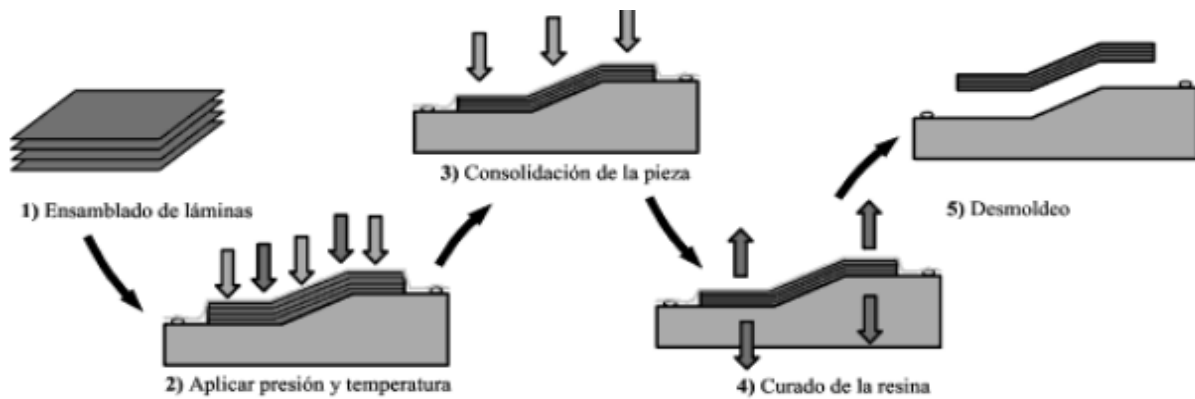


**Figura 2.4 –** Proceso general de moldeo por transferencia (Rodríguez Montes, Castro Martínez, & Del Real Romero, 2006).

### 2.2.3 Consolidación de prepeg

También conocido como curado al horno, consiste en realizar un apilamiento de láminas de fibra pre impregnadas de resina, de forma manual, la condición de la tela permite que se pueda cortar

sin sufrir deshilacha miento para conseguir una mejor adaptación de la misma al molde, logrando trabajar con piezas de geometría más complejas. Una vez realizado este paso, se procede a aplicar calor y presión constante para fundir la resina y consolidar la pieza. La figura 2.5 muestra el proceso de manufactura desde el laminado del material hasta el curado de la resina.



**Figura 2.5.** Esquema de consolidación Prepeg (Rodríguez Montes, Castro Martínez, & Del Real Romero, 2006).

## 2.3 Fabricación y Ensayos

La estructura de la fibra de carbono está compuesta por el 92% de carbono siendo este un material anisotrópico y su estructura resulta compleja al momento de un análisis. Los paneles constan de fibras de alto módulo y alta resistencia que están incrustadas en una matriz polimérica, metálica o cerámica. Las fibras comúnmente utilizadas son carbono, vidrio, boro y carburo de silicio, mientras que las matrices más comunes incluyen el uso de resinas termoplásticas y termo endurecibles, cerámica y metal.

Realizando pruebas, es posible determinar las propiedades básicas del material compuesto y también determinar los cambios en sus propiedades debido a las condiciones de uso. Las pruebas mecánicas de materiales compuestos se realizan generalmente utilizando las normas típicas ASTM (Marsh, Edward, & Rodriguez, 1997), en la tabla 2.2 se muestra las normativas para materiales compuestos con matriz polimérica, donde incluye la normativa ASTM D3039, utilizada para el desarrollo de esta investigación.

Tabla 2.2 Representación comparativa de compuestos estructurales típicos (Villa, 2018).

N° ASTM	Título
D 790	Método de ensayo estándar para propiedades de flexión de plásticos no reforzados, reforzados y materiales aislantes eléctricos.
D 2344/D 2344M	Método de ensayo estándar para la resistencia al corte de haz corto de materiales compuestos de matriz polimérica y sus laminados.
D 3039/D 3039M	Método de ensayo estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica
D 3410/D 3410M	Método de ensayo estándar para propiedades de compresión de materiales compuestos de matriz polimérica con sección de calibre no soportado por carga de corte
D 3479/D 3479M	Método de ensayo estándar para la fatiga tensión-tensión de materiales compuestos de matriz polimérica
D 4255/D 4255M	Guía estándar para probar las propiedades de corte en el plano de los laminados compuestos

## 2.4 Ansys Workbench

Es un software que de simulación CAE para la simulación por elementos finitos y su análisis, ayudara a la investigación con simulaciones verificando el diseño junto al experimento en real, es decir, el análisis teórico con los resultados prácticos.

Es estructurado por distintos procesos que comprenden de: preparación de mallado, ejecución y post-proceso en donde se realiza un análisis de la pieza en las que se someten a fenómenos físicos, vibración, fluidos y esfuerzos térmicos.

### 2.4.1 Geometría

El programa utiliza una arquitectura abierta que permite la integración con las principales aplicaciones utilizadas para desarrollar proyectos de ingeniería, como Mechanical Desktop, AutoCAD, etc. Tales capacidades permiten asociar geometría a modelos más complejos que pueden generarse en otra aplicación con más recursos gráficos y luego importarse para su análisis en el entorno ANSYS.

### 2.4.2 Materiales

Tenemos que proporcionar al programa las propiedades de los materiales y componentes de los elementos estructurales. Las principales características de este caso son: módulo elástico (E), relación de Poisson, masa específica y módulo de rigidez.

### 2.4.3 Generación de malla

Es necesario definir las características del elemento, que dependerán de la granularidad del resultado. Con el modelado sólido, el programa puede generar una malla automática a partir de entidades geométricas creadas previamente, con o sin control del usuario.

## 2.5 Análisis de Datos

Una vez que se presenta el diseño del material considerando su manufactura y posterior simulación, es importante resaltar que los datos de fractura del compuesto serán analizados con parámetros los clásicos de estadística y el análisis de correlación de datos se realizará de acuerdo con el comportamiento de datos, como se detalla en cada una de las propuestas del siguiente capítulo.

El coeficiente de correlación se trata de una medida estadística entre dos series de números. Los números pueden representar cualquier tipo de datos, si las dos series van hacia la misma dirección, crean una correlación positiva y si van a dirección contraria, tienen una correlación negativa.

Se utilizan diferentes coeficientes de correlación para realizar este análisis ya sea con variables cualitativas o cuantitativas, dentro de estos tenemos la correlación de Kendall, Spearman, Pearson, Chebyshev, Minkovsky. Las más utilizadas son:

- Pearson: Esta analiza la relación lineal entre 2 variables continuas. Cuando el cambio en la variable está relacionado con un cambio proporcional en la otra variable, la relación es lineal.
- Spearman: Realiza una relación monótona entre 2 variables ordinales o continuas. En la relación monótona, las variables cambian de manera simultánea, pero no constantemente.



Este coeficiente se basa en la clasificación del valor de cada variable que es datos no procesados.

Para determinar el método a utilizar para el cálculo de los coeficientes de correlación primero se debe realizar una prueba de normalidad a los datos tabulados. El análisis de correlación de Pearson requiere que las variables a correlacionar mantengan una distribución normal bivariada.

El coeficiente elegido para el proyecto fue el de Spearman, método utilizado para muestras donde las variables se miden en una escala ordinal o de intervalo, el cual no exige una prueba de distribución normal de los datos.

### **3. Capítulo III. Marco metodológico**

En este trabajo de investigación se implementa un método de investigación cuantitativa, estableciendo fases donde se detallan estrategias para el desarrollo del trabajo propuesto, asociado con las propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica y refuerzos de fibras de carbono, bajo ensayos de tracción.

Los resultados obtenidos mediante los ensayos tensiles se compararán con las simulaciones realizadas en el software Ansys Workbench bajo las condiciones específicas de los ensayos realizados y propiedades físicas del material.

El trabajo se divide en las siguientes etapas:

#### **3.1 Fase 1: Diseño del material compuesto y condiciones del ensayo**

En esta fase establecen las características físicas y mecánicas del material compuesto de fibra de carbono, además de establecer las condiciones y mediciones necesarias para estudiar el comportamiento del material bajo una carga específica.

#### **3.2 Fase 2: Fabricación y ejecución de los ensayos tensiles**

En esta fase se incluyen los procesos de manufactura para obtener las probetas, definiendo el método específico, los ciclos de temperatura para la consolidación del material y la obtención de los especímenes individuales. Luego se ejecutan las pruebas mecánicas para obtener las propiedades tensiles de la fibra de carbono, paralelamente tomando mediciones de variables específicas como temperatura, sonido y vibración durante el ensayo.

#### **3.3 Fase 3: Análisis y correlación los datos experimentales**

Se realiza un estudio correlacional de los resultados obtenidos de las vibraciones medidas con un acelerómetro comparando los valores en intervalos específicos durante el ensayo. Además se analiza las estadísticas de los resultados de las variables de temperatura y niveles de sonido obtenidos.

#### **3.4 Fase 4: Configuración del material y simulación en Ansys Workbench**

Se analiza e interpreta los datos obtenidos del área experimental para alimentar la simulación del material bajo las condiciones específicas, considerando características y propiedades relacionadas con la orientación de las láminas en el proceso curado al horno.

### 3.1 Fase 1: Diseño del material compuesto y condiciones del ensayo

Los materiales necesarios para las probetas fueron adquiridos bajo importación directa debido a la baja disponibilidad en el mercado local. El producto que se va a utilizar para la elaboración de los especímenes es una tela de fibra de carbono pre impregnada de resina epoxi, desarrollada por la empresa Easy Composite específicamente para un proceso fuera de autoclave, donde el material se debe curar bajo ciclos específicos de temperatura establecidos por el fabricante, manteniendo una presión de vacío constante durante todo el proceso térmico. Las propiedades físicas del material se detallan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades físicas del material XC110

<b>Nombre comercial</b>	<b>Xc110</b>
<b>Dimensión de la tela</b>	1250 mm x 1000mm
<b>Espesor consolidado</b>	0.25 mm
<b>Color</b>	Negro
<b>Orientación de la fibra</b>	0°, 90°
<b>Matriz</b>	Resina epoxi
<b>Recuento de filamentos</b>	3k
<b>Diámetro del filamento</b>	7µm

Las propiedades mecánicas del material bajo la normativa BS EN ISO 527-4:1997 se detallan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del material XC110

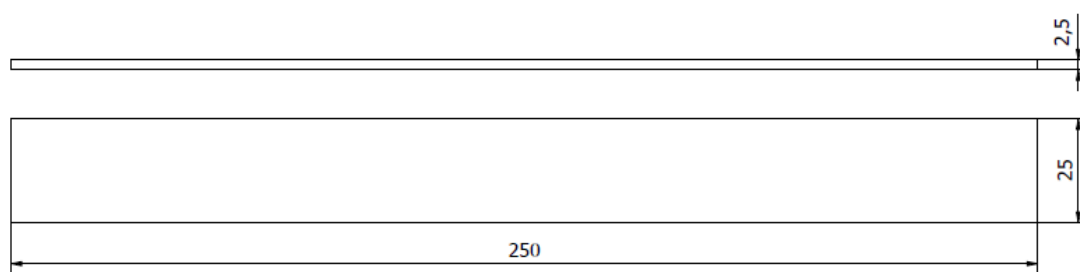
Resistencia a la Tracción	521 MPa
Módulo de elasticidad	55.1 GPa
Resistencia a la compresión	483 MPa
Esfuerzo de flexión	777 MPa
Módulo de flexión	46.7 GPa

Se establece un total de 10 probetas y se clasifican según el ángulo de laminación entre cada una de las capas superpuestas, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.3. Distribución de probetas en secuencia de laminación.

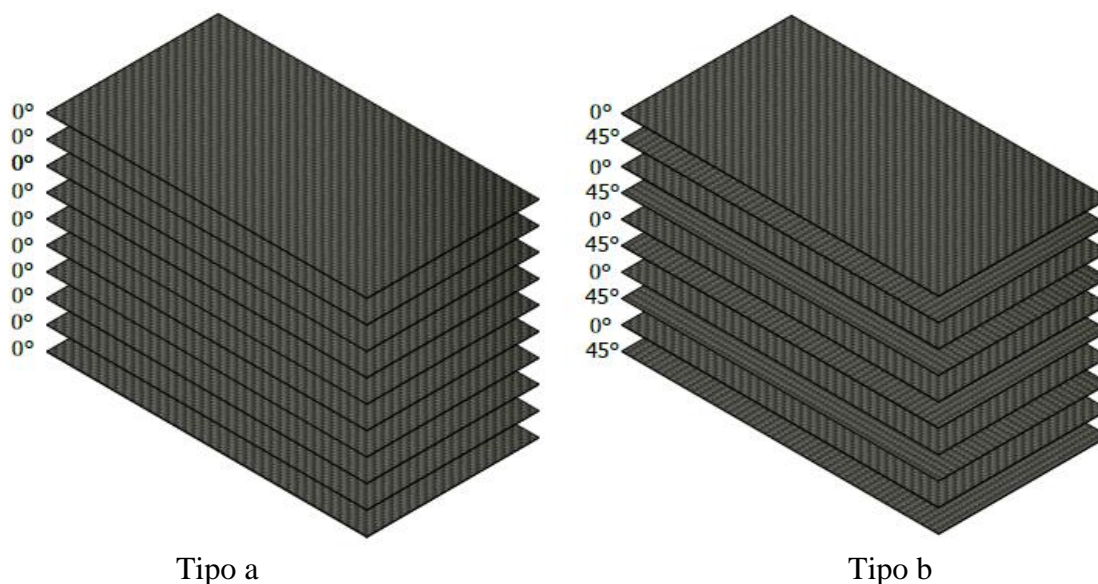
Cantidad	Secuencia de ángulo de laminación	Designación de la probeta
5	$(0^\circ)_{10}$	1A, 2A, 3A, 4A, 5A
5	$[(0^\circ), (45^\circ), (0^\circ) \dots]_{10}$	1B, 2B, 3B, 4B, 5B

Las dimensiones de la geometría de las diez probetas manufacturadas se estandarizan de acuerdo a lo establecido por la ASTM D3039 (ver Tabla 2.2), como se muestra en la Fig. 3.1, donde el ancho es de 25mm, con longitud total de la probeta de 250 mm y un espesor de 2.5 mm.



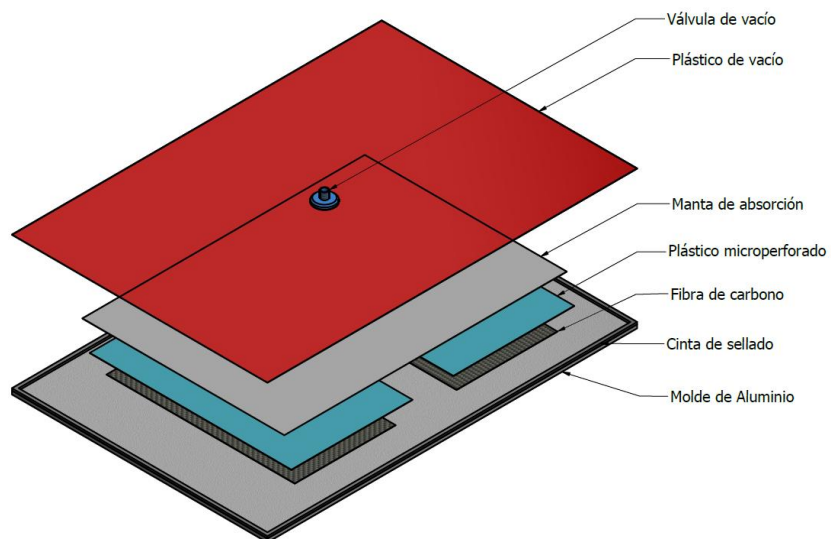
**Figura 3.1.** Geometría de la probeta

En función de esta geometría, se optimizan láminas de fibra de carbono prepeg con unas dimensiones de 150 mm de ancho con una altura de 280 mm. La composición del apilamiento se comprende de mejor manera en la figura 3.2, donde se detalla el ángulo de laminación de una capa con respecto a la siguiente superpuesta. En el tipo a se presenta una configuración donde no se varía el ángulo de ubicación. En el tipo b se observa una variación de  $45^\circ$  de la segunda capa con respecto a la primera, este patrón se repite hasta completar las 10 láminas necesarias para completar el espesor mínimo que establecido por la normativa.



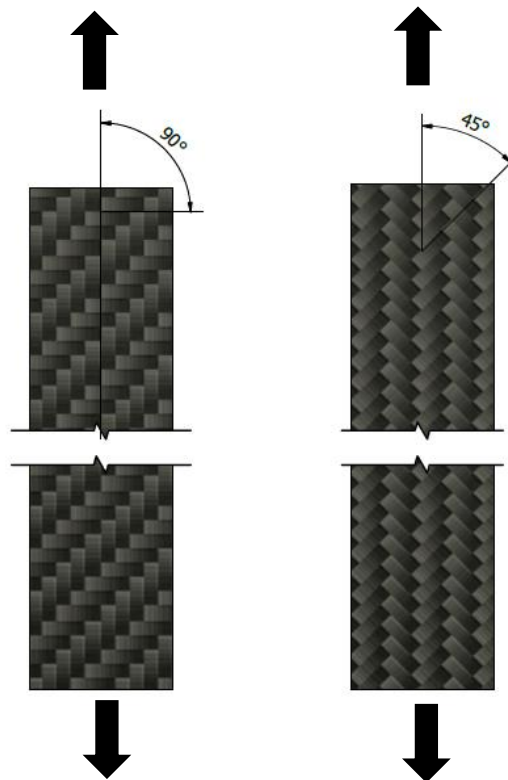
**Figura 3.2.** Arquitectura de la composición del laminado

Las láminas recortadas se adhieren a un molde de aluminio, las cuales se deben cubrir con un plástico microperforado y manta de absorción, esta última evita que la resina de la matriz se pegue con cualquier otro material. Por último, todo se cubre con un plástico de vacío sellado con una cinta de butilo resistente a altas temperaturas. La ubicación de cada uno de los materiales mencionados se ilustra en la figura 3.3.



**Figura 3.3.** Esquema de preparación

Para la caracterización mecánica del material se realizan ensayos tensiles donde la probeta se somete a cargas de tracción hasta llevar a la falla del material. Se utiliza la máquina de ensayos universal SHIMADZU AUTOGRAPH AGX-V 300kN, ubicada en el laboratorio de resistencia de materiales 2 en la Universidad Politécnica Salesiana campus centenario. La dirección en que se aplica la carga varía en función del laminado de las probetas. En la figura 3.4 se detalla la dirección de la carga para cada una de las composiciones de laminación manufacturadas, de lado izquierdo se observa que la carga forma un ángulo de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente con cada una de las orientaciones de las fibras, esto debido a la composición de la misma. En la segunda probeta se observa que el ángulo que forma sobre la fibra es de  $45^\circ$ . Esta carga se genera en las láminas dispuestas en este ángulo de laminación, mientras que para las demás capas se aplica el principio de la probeta anterior. La normativa ASTM D3039 también establece la velocidad de avance del ensayo, siendo esta de 2mm/min, y mantener una temperatura ambiente de  $23^\circ\text{C}$ .



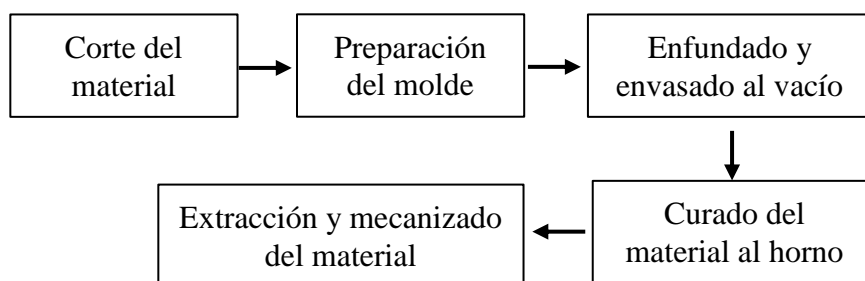
**Figura 3.4** Esquema de las cargas aplicadas en los ensayos.

Durante el ensayo, se utilizó un extensómetro biaxial para determinar los intervalos de fuerza para que el software de la máquina de ensayo calcule el módulo de elasticidad del material. Al mismo tiempo, durante el ensayo se realiza la medición de las variables propuestas a analizar, como lo son la aceleración con un acelerómetro Kryptoni de la marca Dewesoft, cuya señal se procesa en el software del fabricante, donde la medición de los datos se realiza desde el inicio del ensayo hasta llegar a la falla del material. Para la toma de temperatura se utiliza la cámara termográfica FLIR TG297, tomando dos muestras, una durante el ensayo y una segunda toma de temperatura instantáneamente en el punto donde el material produce la rotura. Para la última variable se utiliza el sonómetro REED SD-4023, tomando el mismo protocolo de medición que se utiliza con el acelerómetro.

### 3.2 Fase 2: Fabricación y ejecución de los ensayos tensiles

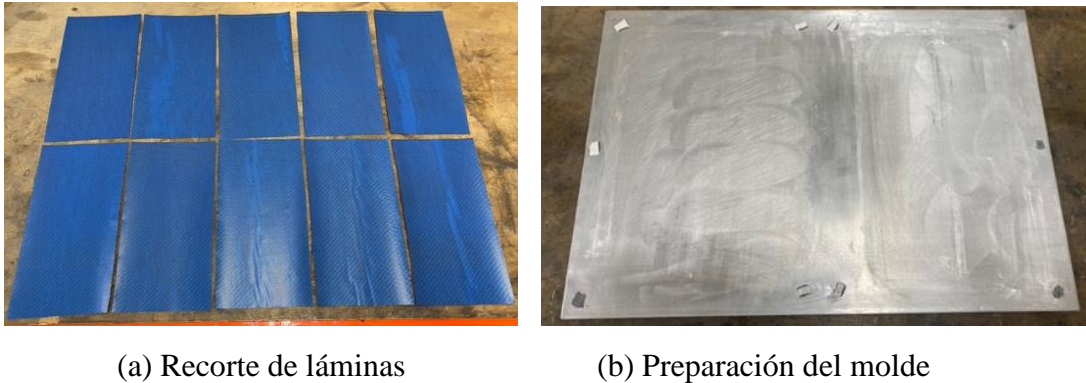
#### 3.1.1 Fabricación de especímenes

En esta fase, se considera desde el corte del material base hasta la extracción de este, como se presenta en la figura 3.5.



**Figura 3.5** – Proceso de manufactura de probetas de fibra de carbono

Para cortar el material, previa optimización, se obtienen láminas de fibra de carbono para cada una de las arquitecturas, como se detalla en el literal a de la figura 3.6. Luego se debe preparar el molde de aluminio aplicando cera desmoldante para evitar que se adhiera la resina epoxi durante el proceso de curado de la tela (ver literal b). Se ubica las láminas recortadas sobre el molde de aluminio, siguiendo la secuencia de laminación preestablecida.

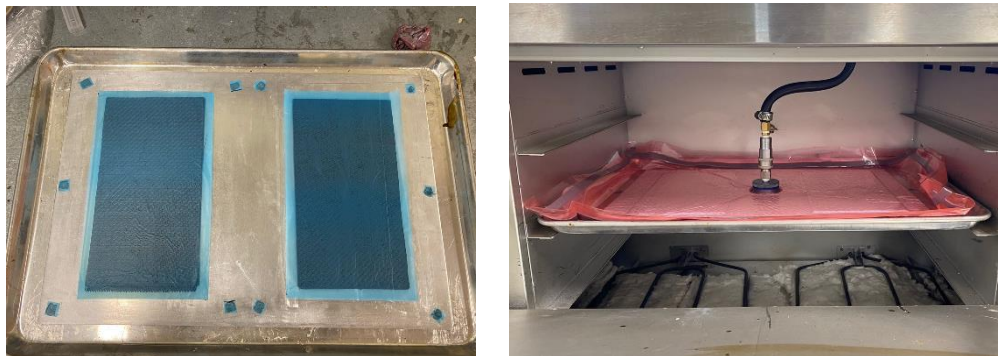


(a) Recorte de láminas

(b) Preparación del molde

**Figura 3.6.** Arquitectura de la composición del laminado

El siguiente paso es colocar el plástico micro perforado, la manta de absorción como se detalla en la Figura 3.7 y cubrir con el plástico de vacío sellando con la cinta de butil instalando la válvula de extracción de aire. Comprobando que se disponga de un sellado completamente hermético, se procede a llevar a una presión de vacío de 70KPa, comprobando una correcta consolidación de los insumos apilados y eliminar la presencia de burbujas de aire dentro del enfundado.



(a) Laminación sobre el molde

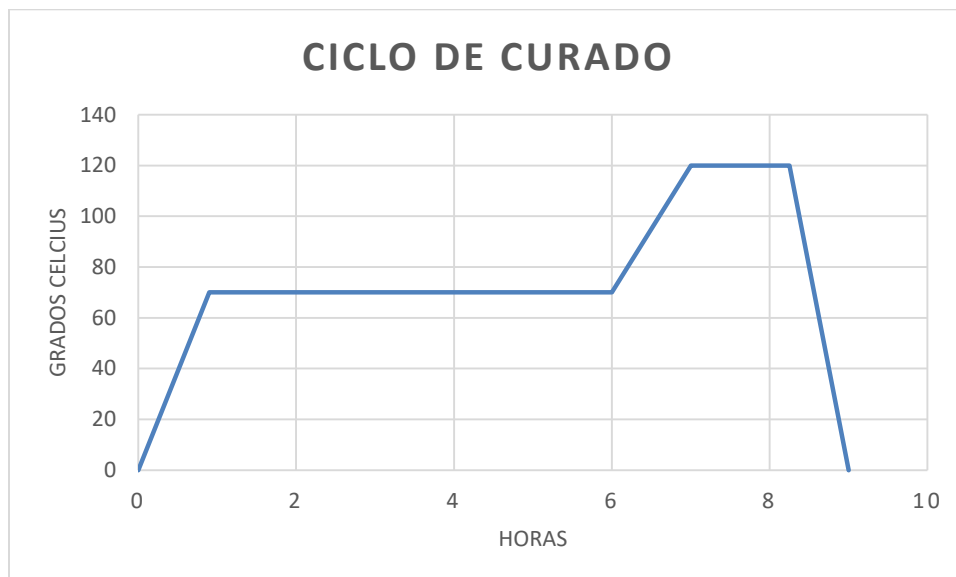
(b) sellado al vacío

**Figura 3.7.** Enfundado del material

Para el proceso de curado del material se programa el horno con los ciclos de temperatura proporcionados por la guía de procesamiento del fabricante. Se parte de la temperatura ambiente hasta llegar a una temperatura de 70 °C durante una hora, para luego mantener este valor durante 6 horas, esta primera etapa es necesaria para un correcto flujo de la resina a través de toda la matriz de los laminados. La siguiente etapa comprende el curado del material, se eleva la temperatura hasta 120 °C durante una hora, aquí se solidifica la resina para obtener la pieza final. Finalmente

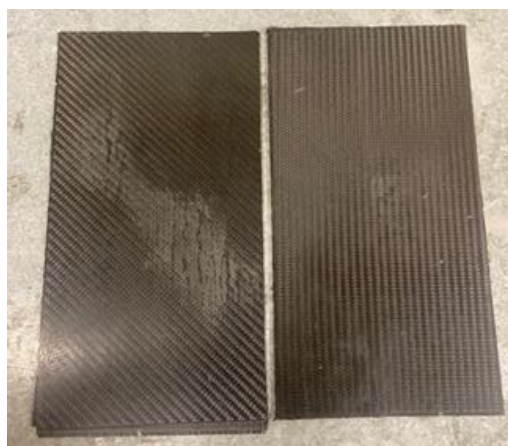


se debe esperar a que la temperatura disminuya a 60°C para poder retirar el molde del horno. El ciclo extendido se detalla en la figura 3.8.



**Figura 3.8.** Ciclo de curado establecido por el fabricante.

Una vez finalizado el proceso de curado del material, se extraen las placas del molde, este proceso se facilita gracias a la previa aplicación de la cera desmoldante una vez que el molde se encuentre en una temperatura ambiente. En la figura 3.9 se ilustran las placas obtenidas del proceso de curado.



**Figura 3.9.** Placas de fibra de carbono

Para la fabricación de las probetas se empleó una fresadora a control numérico del laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad Politécnica Salesiana campus centenario. Como se muestra en la figura 3.8, para la sujeción de las muestras se utilizan unos anclajes sujetos con pernos en las esquinas de las placas. Las velocidades de rotación de la herramienta y avance del husillo se fijaron según tabla 3.4 respectivamente. El paso en la profundidad de desbaste se estableció en 0.5 mm con un total de 5 pasadas de la fresa de desbaste sobre el material.

Tabla 3.4. Distribución de probetas en secuencia de laminación.

<b>Parámetros de corte</b>	
<b>Velocidad de Husillo</b>	15000 rpm
<b>Velocidad de avance</b>	40 mm/seg

En la parte a de la figura 3.10 se observa la obtención del contorno completo de la probeta. La geometría final y la denominación del ciclo de construcción de las probetas se muestran en la parte b.



(a) Perfilado de la probeta



(b) Geometría final

**Figura 3.10.** Mecanizado de las probetas

A continuación se detalla las dimensiones y peso final de las probetas mecanizadas en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Dimensiones y peso de las probetas mecanizadas.

N° de Probeta	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
1A	251	25,5	2,65	22
2A	251	25,3	2,7	22
3A	252	25	2,6	22
4A	252	26	2,6	22
5A	252	25	2,6	22
1B	252	25	2,6	22
2B	251	25	2,6	22
3B	251	25	2,6	22
4B	251	25	2,6	22
5B	252	25	2,6	22

### 3.1.2 Ejecución de ensayos

Los ensayos realizados son de tracción simple, aplicando una carga unidireccional sobre la longitud total de la probeta (ver grafico 3.1). En la figura 3.11 se muestra el montaje de la probeta sin extensómetro y con extensómetro biaxial en la máquina de ensayo.



(a) Montaje sin extensómetro

(b) Montaje con extensómetro

Figura 3.11. Montaje de las probetas

Paralelamente se organizan los instrumentos de medición, donde el sonómetro se ubica en la parte frontal a 30 cm de la probeta. El sensor magnético del acelerómetro se instaló en la mordaza inferior de la máquina de ensayo, ya que esta al estar fija evita censar vibraciones contaminantes que podrían no proporcionar información sobre el ensayo. Por último, la cámara termográfica está situada en parte la izquierda de la máquina de ensayo, a una distancia de 50cm. Los detalles explicados se aprecian en la figura 3.12.



**Grafico 3.12.** Montaje de los instrumentos de medición

Para medición de los datos del acelerómetro y sonómetro, se inició desde el inicio del ensayo hasta 5 segundos después de presentarse la fractura del material. De otra manera, la toma de temperatura con la cámara termográfica se realizó dos tomas, una durante el ensayo y la segunda en el instante de la falla del amaterial.

### **3.3 Fase 3: Análisis y correlación los datos experimentales**

Para realizar esta correlación de los resultados se debe tabular los datos procesados por cada uno de los instrumentos de medición.

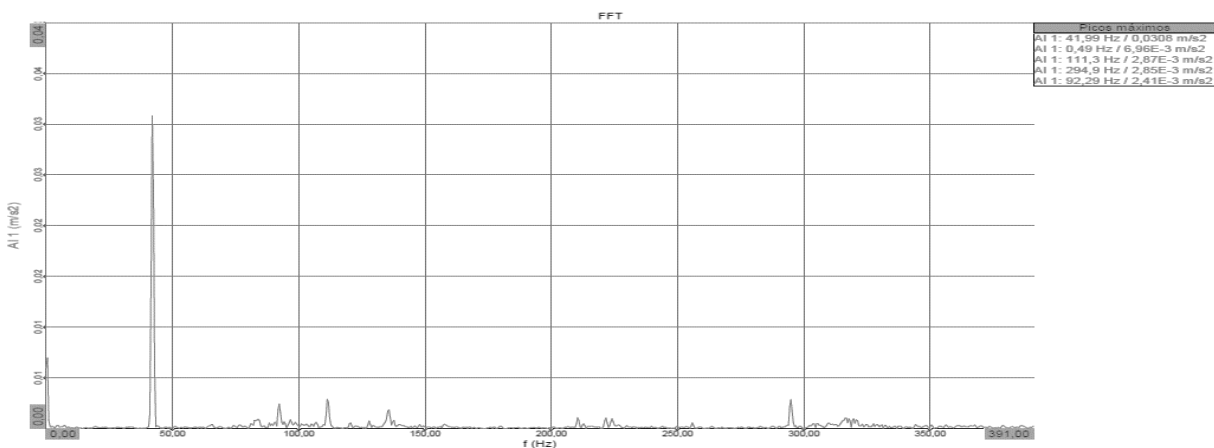
### 3.3.1 Acelerómetro

El sensor de acelerómetro almacena los datos medidos a través de las vibraciones generadas por la máquina de ensayo, y las procesa con el software Dewesoftx, el cual toma la señal de la aceleración en función del tiempo (ver figura 3.13) con un ancho de frecuencia de 1000Hz. En función de esta medida, el software también determina la señal de desplazamiento y velocidad.



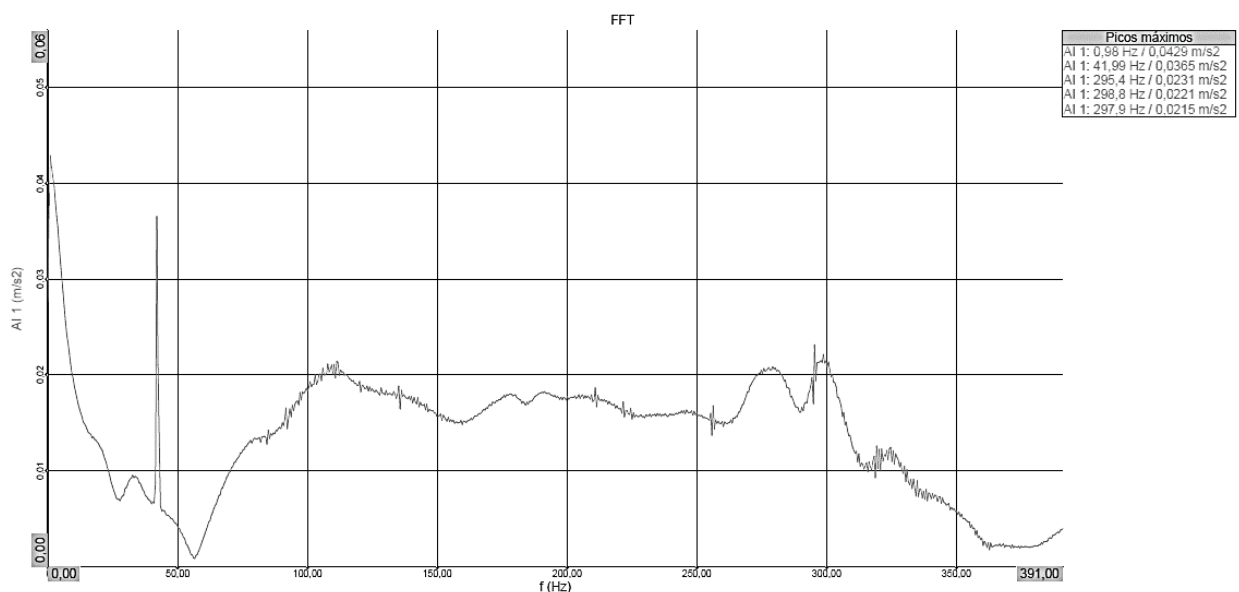
**Gráfico 3.13.** Señal de aceleración del ensayo 1A

El software permite obtener el espectro de frecuencia con las magnitudes máximas de aceleración en función de la señal de aceleración procesada expuesta anteriormente. En la figura 3.14 se puede observar las magnitudes en función de la frecuencia. Aquí podemos obtener los 5 picos de magnitud máxima en función de dichas frecuencias para luego ser tabulados y correlacionados.



**Figura 3.14.** Espectro de frecuencia de la aceleración antes del fallo del ensayo 1A

Para el análisis de datos se estableció dos tomas en intervalos específicos de tiempo, una 3 segundos antes del fallo, y la segunda durante en el punto de aceleración máxima, relacionado directamente al fallo del material. A priori se aprecia un cambio en el gráfico del espectro de frecuencia durante el fallo del material (ver figura 3.15).



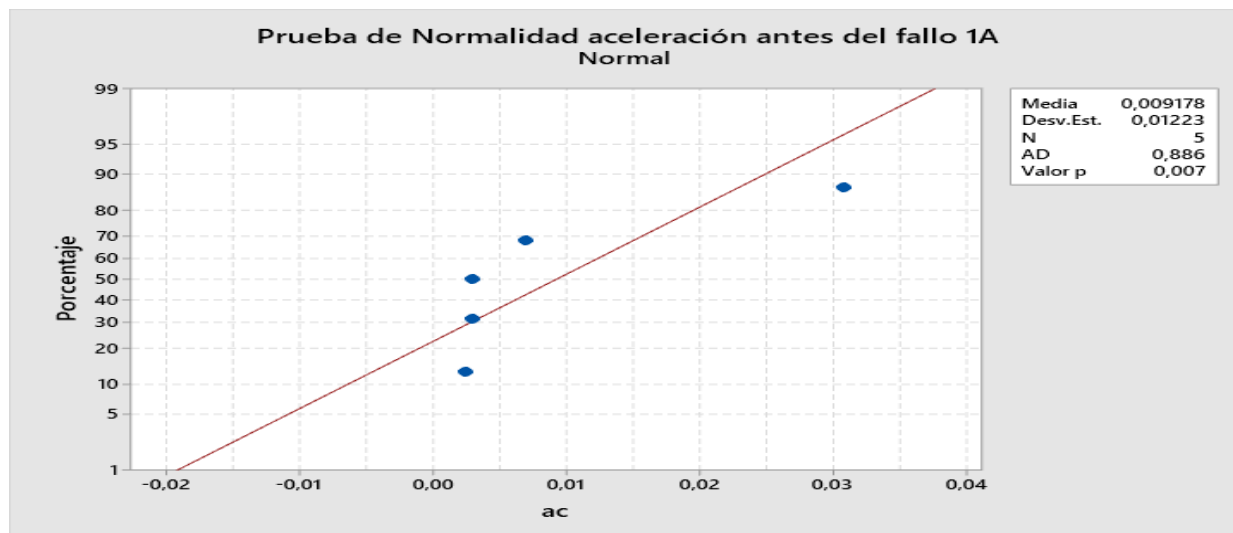
**Figura 3.15.** Espectro de frecuencia de la aceleración durante el fallo del ensayo 1A

A partir de estos datos, se realiza la tabulación de los picos de frecuencia de todos los ensayos medidos. En la tabla 3.6 se muestra los valores tabulados del primer ensayo de la categoría A.

*Tabla 3.6. Dimensiones y peso de las probetas mecanizadas.*

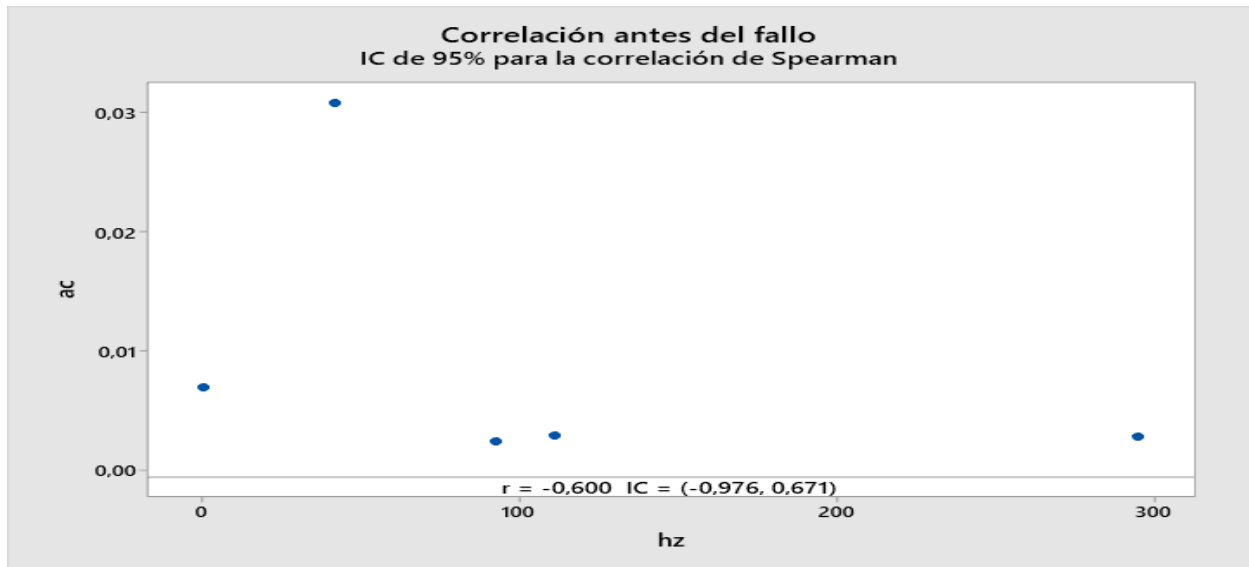
Antes del fallo		Durante el fallo	
Frecuencia (Hz)	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )	Frecuencia (Hz)	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )
0,49	6,96E-03	0,98	0,0429
41,99	3,08E-02	41,99	0,0365
92,29	2,41E-03	295,4	0,0231
111,3	2,87E-03	297,9	0,0215
294,9	2,85E-03	298,8	0,0221

A partir de esta tabla se procede a realizar una prueba de normalidad, para determinar que método de correlación se utilizará. Esta prueba se la realiza en el Software Minitab®, versión de prueba para estudiantes (Minitab, 2022). El valor “p” determinado en los datos de aceleración del ensayo 1A es de 0.007 (ver gráfica 3.16), lo cual determina que el método a utilizar para calcular la correlación es el de Spearman.



**Figura 3.16.** Prueba de normalidad antes del fallo en el ensayo 1A

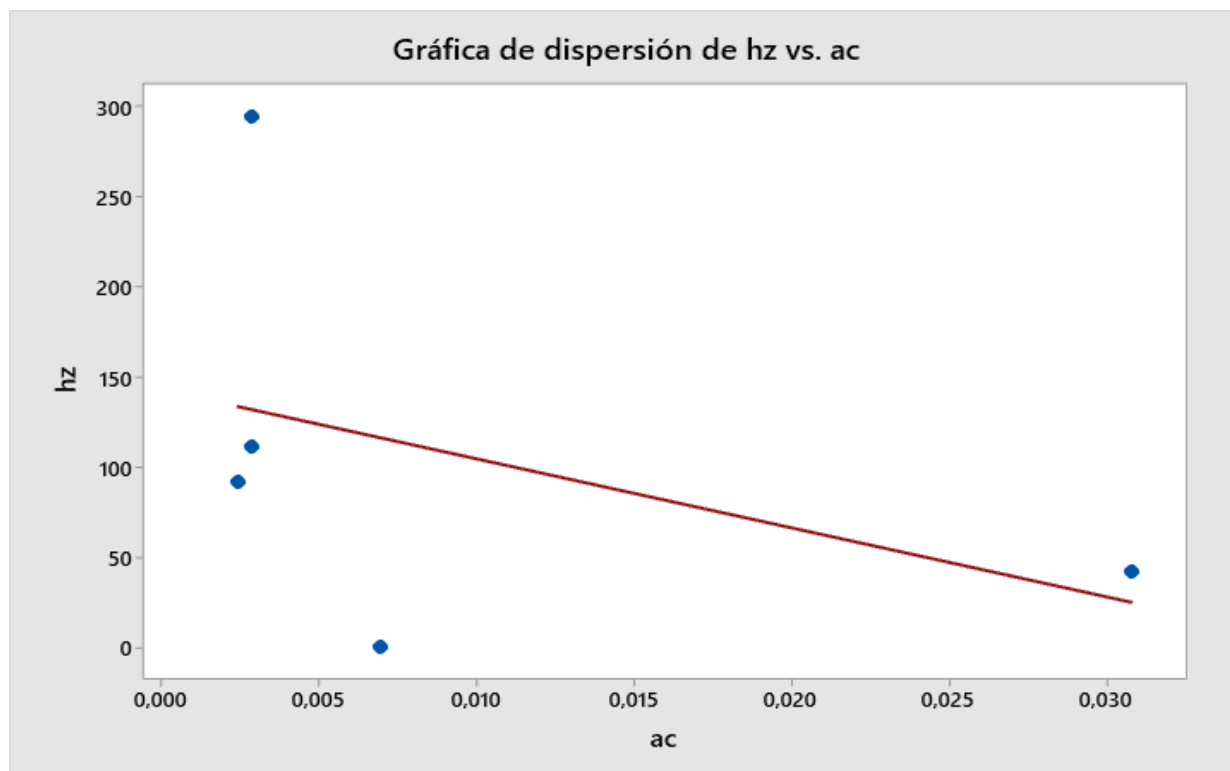
Luego generamos el cálculo del coeficiente de correlación de Spearman, el software Minitab nos proporciona la gráfica de correlación con el valor de “r” el cual nos muestra la fuerza de correlación que existe entre la variable de frecuencia con respecto a la magnitud de aceleración. El valor generado se muestra en la figura 3.17



**Figura 3.17.** Correlación de variables antes del fallo en el ensayo 1A

Para un mejor análisis se genera una gráfica de dispersión con regresión, para determinar la línea tendencia de los datos recopilados. En la figura 3.18 se observa una tendencia negativa, corroborando el dato del coeficiente de relación inversa de las variables analizadas.

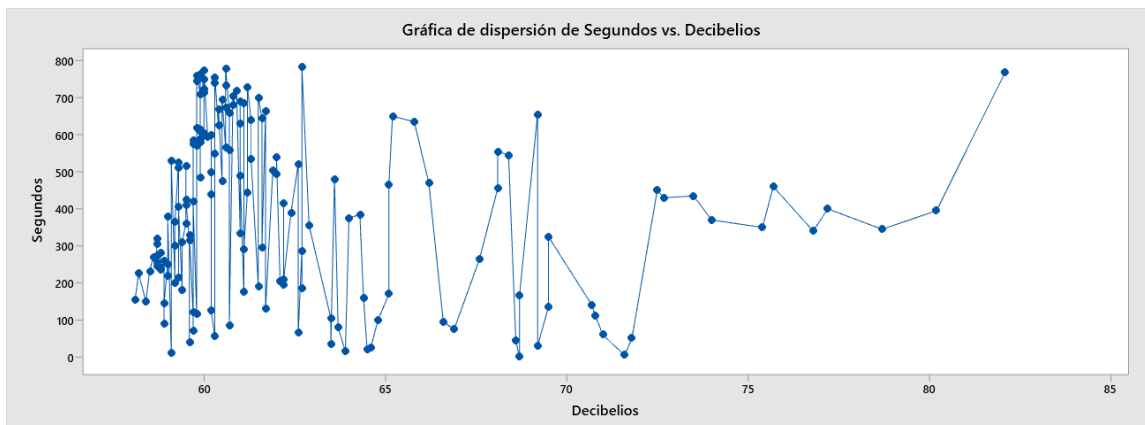




**Figura 3.18.** Gráfico de dispersión con línea de tendencia de los valores medidos antes del fallo en el ensayo 1A

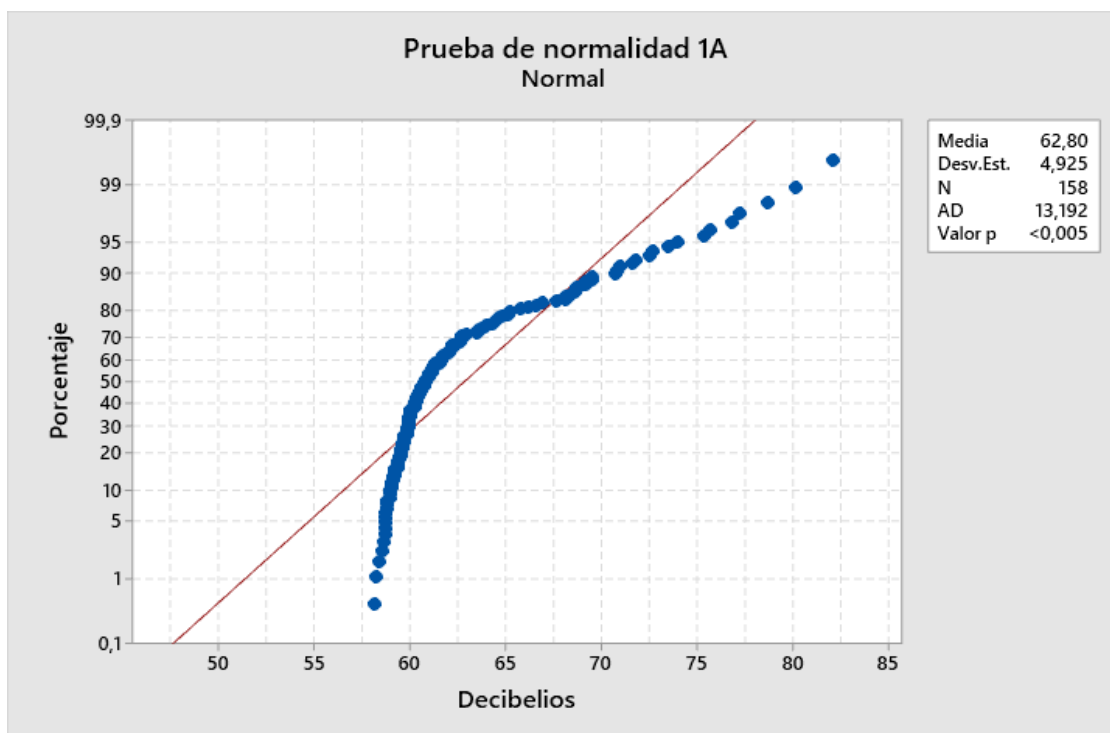
### 3.3.2 Sonómetro

El instrumento de Sonómetro recepta los valores de niveles de audio en función del tiempo, tabulando datos de decibelios vs segundos, teniendo un intervalo de toma de muestra de 5 segundos para la segunda variable mencionada, y la toma se realizó desde el inicio del ensayo hasta 5 segundos luego del fallo del material. Los valores generados se almacenan en una tarjeta SD en el dispositivo, los cuales deben ser exportados en formato Excel para su posterior análisis. En la figura 3.19 se muestran los valores generados durante la primera toma de mediciones en el ensayo 1A.



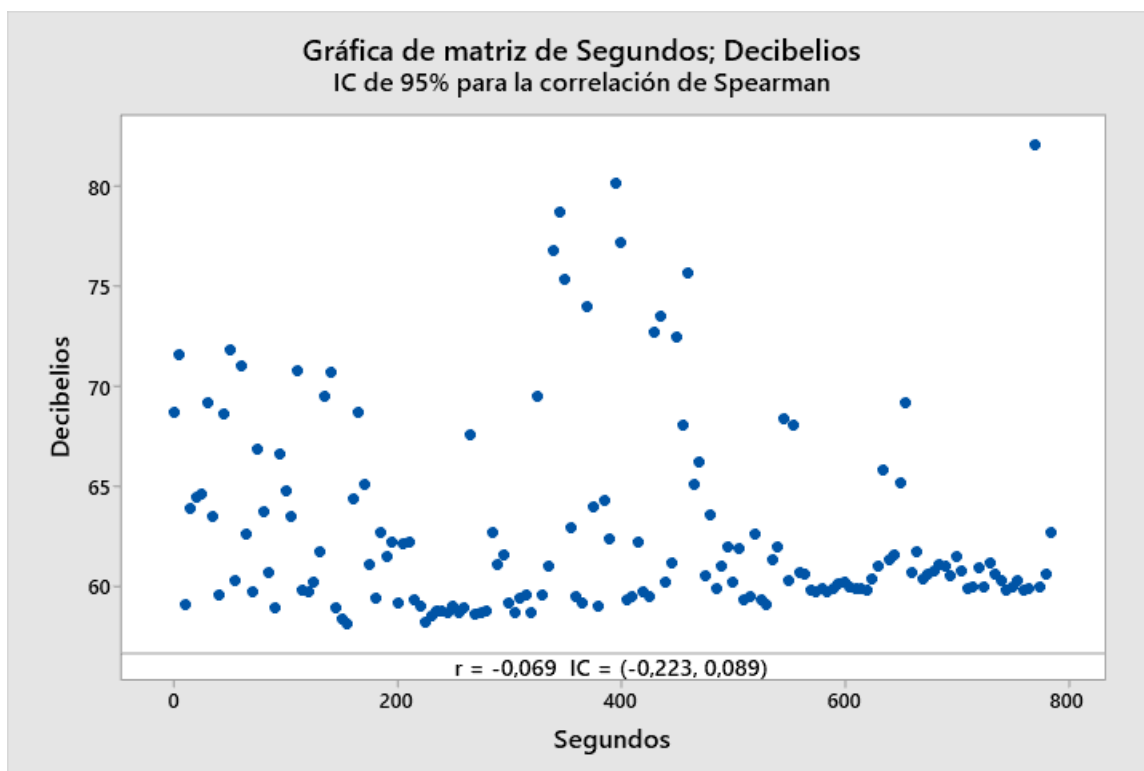
**Figura 3.19.** Gráfica de Niveles de sonido del ensayo 1A

Con los valores generados de los ensayos se exportan al software Minitab para el proceso de prueba de normalización y correlación de datos. En la figura 3.20 se muestra la prueba de normalidad del ensayo 1A, obteniendo un valor “p” inferior a 0.005, indicando que se debe utilizar el método de Spearman para realizar el cálculo de coeficiente de correlación.



**Figura 3.20.** Prueba de normalidad en valores de sonido del ensayo 1A

En la figura 3.21 muestra la gráfica de la correlación de datos de las variables generadas en el ensayo 1A, con el valor de “r” el cual nos muestra la fuerza de correlación que existe entre la variable del tiempo con respecto a la magnitud de sonido. Este tipo de análisis permite definir rangos donde los niveles de sonido alcanzan valores específicos que se pueden relacionar directamente con la falla del material.

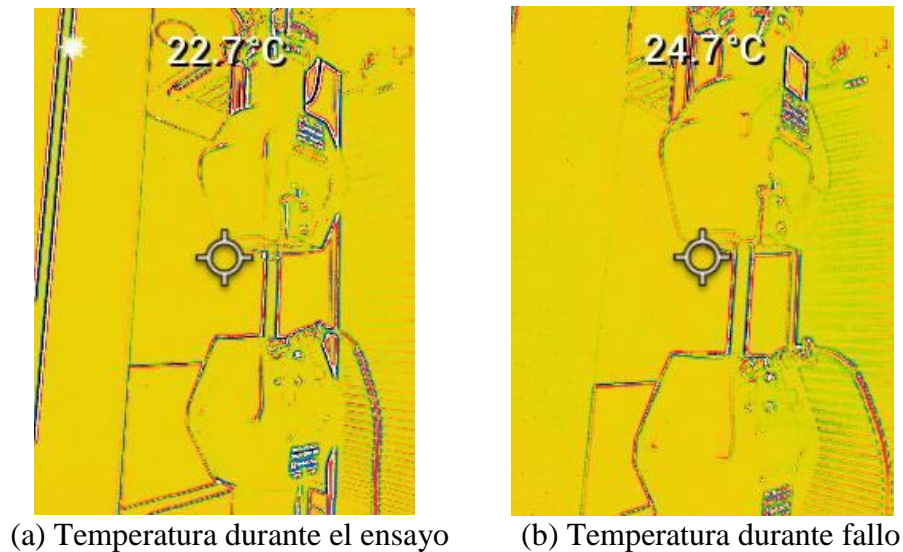


**Figura 3.21.** Gráfica de correlación de variables en valores de sonido del ensayo 1A

### 3.3.3 Cámara Termográfica

Con la cámara termográfica se tomaron los datos de temperatura al espécimen de manera gráfica en un punto específico, tomando este como el punto máximo de temperatura para luego mostrar un espectro de colores para escalar la temperatura del resto de la imagen capturada. Se realizaron dos tomas de temperatura, al inicio del ensayo y otra inmediatamente cuando fallo el material, en el lugar de la fractura de la probeta como se observa en la figura 3.22. Debido al tamaño de la muestra no se muestra factible realizar un análisis de correlación de variables, sin embargo, se

puede establecer la tasa de cambio de temperatura durante el ensayo como una característica de fallo.



**Figura 3.22.** Toma de temperaturas durante ensayo 1A

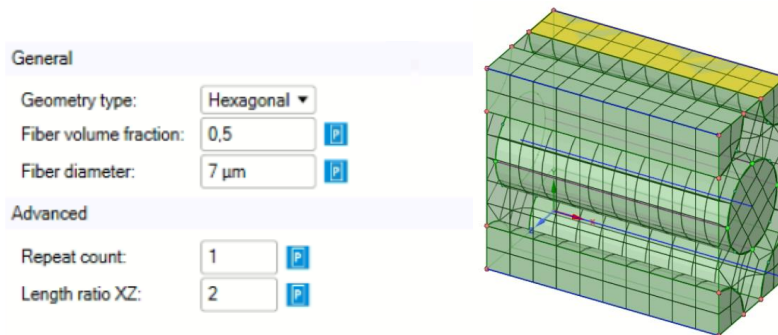
### 3.4 Fase 4: Configuración del material y simulación en Ansys Workbench

En la última fase se desarrolla la configuración del material utilizado para la manufactura de las probetas de fibra de carbono, donde se toma específicamente las propiedades físicas de la tela (revisar tabla 3.1) para poder realizar simulaciones bajo las condiciones determinadas en los ensayos y poder comparar los resultados. Para ello se establecen una serie de pasos para llevar a cabo la simulación. En la figura 3.23 se detalla el esquema de proceso para la configuración hasta la simulación con el material compuesto.



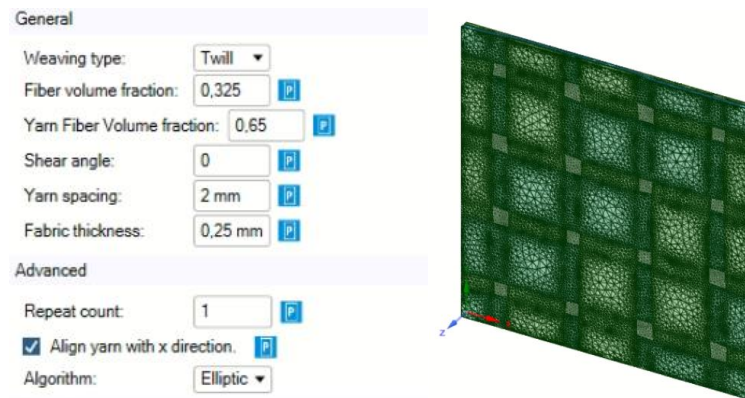
**Figura 3.23.** Esquema de proceso de simulación en Ansys Workbench

1. Con la herramienta de Material Designer de Ansys Workbench, se procede a configurar en primera instancia una fibra unidireccional con las características físicas de la fibra de carbono XC110. En la figura 3.24 se observa la configuración y mallado de la fibra unidireccional.



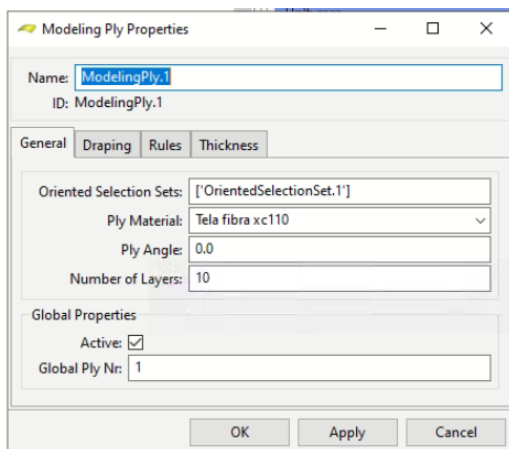
**Figura 3.24.** Configuración y mallado de fibra unidireccional

2. Se inserta otro módulo de material designer, enlazando la configuración almacenada posteriormente, para crear la tela con la tipo de tejido específico del material. En la figura 3.25 se muestra las características ingresadas de la tela, como más importante el espesor y distancia entre fibras de la misma, con su respectivo mallado.



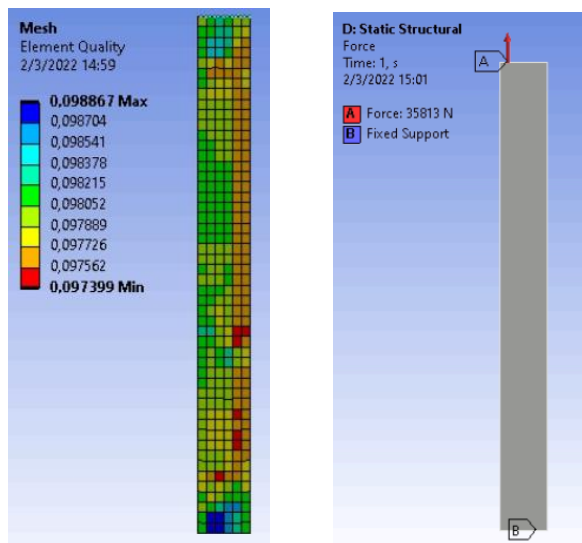
**Figura 3.25.** Configuración y mallado de la tela bi direccional

3. Una vez guardado esta configuración del material, se utiliza la herramienta ACP (PRE), donde se configura el laminado con la geometría de la probeta. En esta ventana creamos las capas de tela de fibra de carbono, donde especificamos características específicas como el espesor de la tela, orientación de laminado y ángulo de laminación. La configuración se puede visualizar en la figura 3.26.



**Figura 3.26.** Configuración y mallado de la tela bi direccional

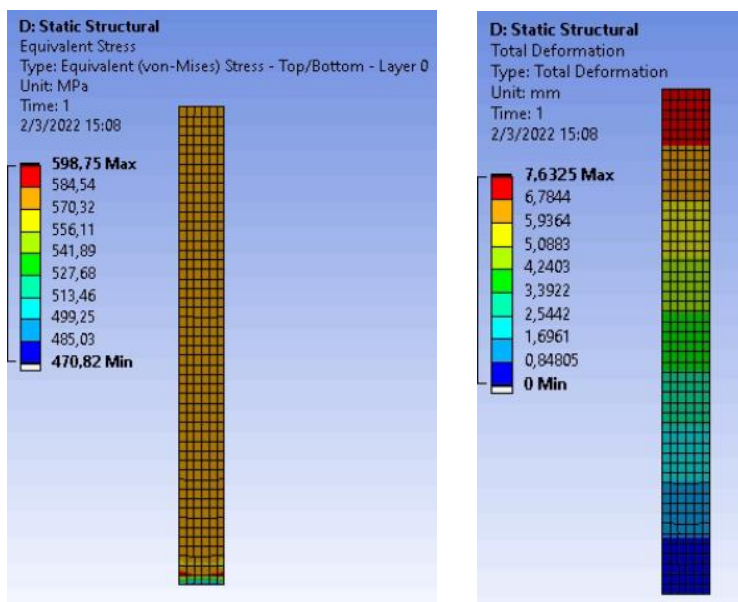
4. Realizada la configuración del compuesto de la probeta se inserta un análisis estructural para realizar la simulación. En este paso se introducen las condiciones establecidas en los ensayos físicos, aplicando restricciones y fuerzas sobre la probeta para realizar el cálculo de esfuerzos. Es factible aplicar un refinamiento de malla para sobre la geometría de la probeta, hasta obtener valores de alta calidad de los elementos particulares de la malla, dichos valores se evidencian en la figura 3.27 y las condiciones de simulación.



(a) Calidad de elemento de malla      (b) Condiciones de simulación

**Figura 3.27.** Configuración de la simulación estática estructural

5. En el último paso se selecciona los resultados que se requiere analizar, siendo estos el esfuerzo equivalente (Von Mises) y deformación total en milímetros. En la figura 3.28 se visualiza la simulación de la probeta configurada bajo las condiciones de fallo del ensayo 1A.



(a) Esfuerzo equivalente (Von Mises)      (b) Deformación total

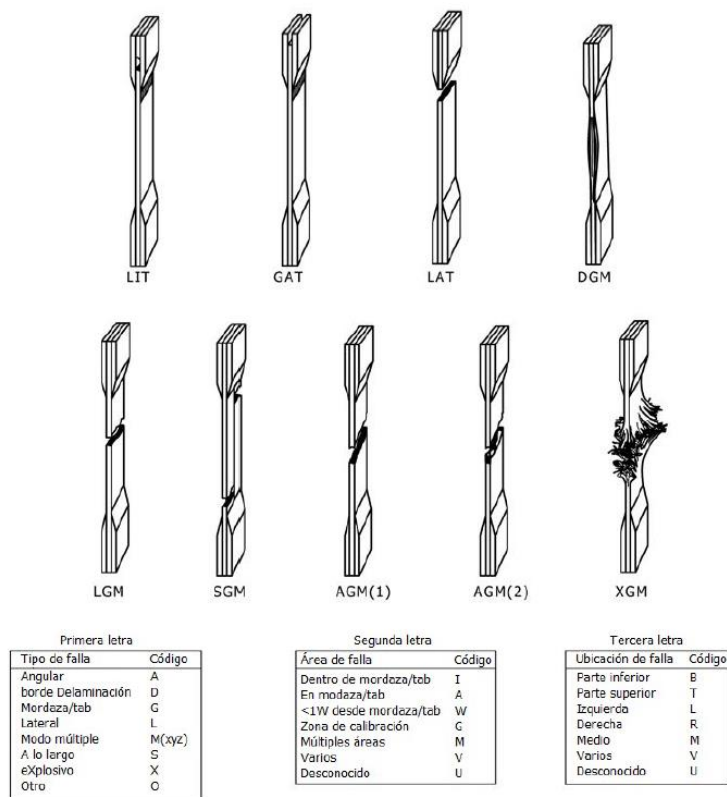
**Figura 3.28.** Resultado de simulación bajo condiciones del ensayo 1<sup>a</sup>

## 4. Capítulo IV Resultados y Discusión

Este capítulo se centra en definir los resultados más relevantes obtenidos, con su respectivo análisis, los cuales son el resultado de la metodología descrita en el apartado anterior. Así, se comparan de forma preliminar la aplicación del ensayo según la norma ASTM D3039 y la forma como fallaron las probetas del compuesto desarrollado en este trabajo de investigación. Se añaden además correlaciones de las variables según la fractura, amplitud de vibración, sonido y temperatura útiles para caracterizar el material.

### 4.1 Ensayos tensiles del material compuesto

Según la Norma ASTM D3039 se puede presentar fallos típicos una vez realizadas las pruebas destructivas sobre el material, los cataloga por una nomenclatura de 3 letras que se detallan en la figura 4.1. En este se detalla la categoría de fallo en función al tipo de fallo, área de falla y ubicación de la falla.



**Figura 4.1.** Fallas típicas en materiales compuestos con matriz polimérica

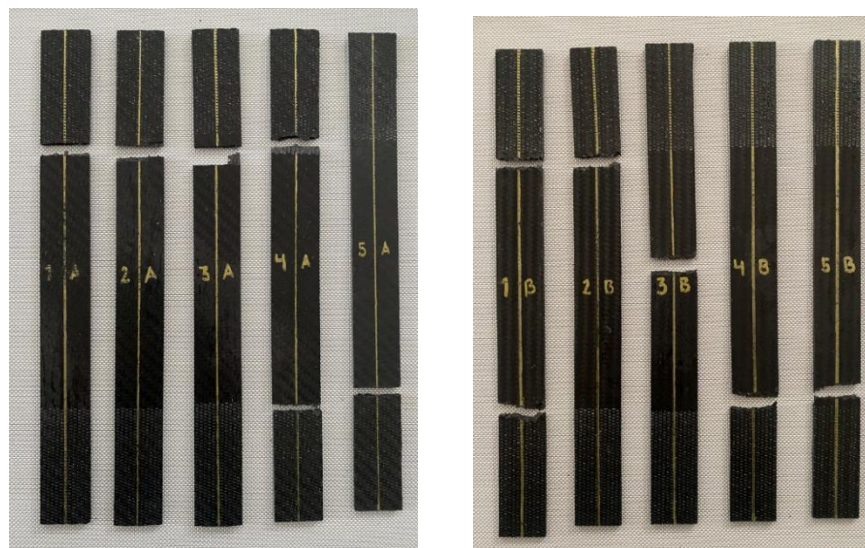


En la tabla 4.1 se detalla los tipos de fallos presentados en las pruebas realizadas al material mediante un reconocimiento visual de todas las probetas ensayadas.

*Tabla 4.1. Caracterización del tipo de fallo en las probetas de fibra de carbono*

<b>Designación de probeta</b>	<b>Secuencia de ángulo de laminación</b>	<b>Fallo</b>
1A	$(0^\circ)_{10}$	LAT
2A	$(0^\circ)_{10}$	LAT
3A	$(0^\circ)_{10}$	MGT
4A	$(0^\circ)_{10}$	LAV
5A	$(0^\circ)_{10}$	LAB
1B	$[(0^\circ), (45^\circ), (0^\circ) \dots]_{10}$	LAV
2B	$[(0^\circ), (45^\circ), (0^\circ) \dots]_{10}$	LAT
3B	$[(0^\circ), (45^\circ), (0^\circ) \dots]_{10}$	LGM
4B	$[(0^\circ), (45^\circ), (0^\circ) \dots]_{10}$	LAB
5B	$[(0^\circ), (45^\circ), (0^\circ) \dots]_{10}$	LGB

Se evidencia un patrón de falla tipo lateral en casi todas las probetas, independientemente de la configuración de ángulos de laminado trabajados, como se muestra en la figura 4.2.



(a) Probetas ensayadas de categoría A (b) Probetas ensayadas de categoría B

**Figura 4.2.** Configuración de la simulación estática estructural

Otra característica que se presencia con frecuencia es la ubicación de la falla, siendo esta en la parte superior en la mayoría de las muestras. De todas las probetas analizadas, se puede destacar una particularidad en el espécimen 3B, cuya fractura se produjo en la zona de calibración.

Los resultados de las propiedades mecánicas del material se muestran en la tabla 4.2 y 4.3, separando la tabulación de los datos por categoría de configuración del laminado respectivamente. Además se presenta los datos estadísticos de promedio y desviación estándar de los resultados estudiados. Se especifica con un “\*” los ensayos en los cuales se utilizó el extensómetro biaxial.

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono configuración de apilamiento A

Designación de la probeta	Secuencia de ángulo de laminación	Esfuerzo máximo (MPa)	Fuerza máxima (kN)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Deformación máxima (%)	Desplazamiento máximo (mm)
1A*	(0°) <sub>10</sub>	550,97	35,81	54,85	1,91847	4,79618
2A*	(0°) <sub>10</sub>	502,91	32,69	53,47	1,76882	4,42205
3A	(0°) <sub>10</sub>	535,70	34,82	29,13	1,88319	4,70797
4A	(0°) <sub>10</sub>	546,47	35,52	29,77	1,85052	4,62631
5A	(0°) <sub>10</sub>	510,16	33,16	29,27	1,81412	4,53531
Promedio	(0°) <sub>10</sub>	529,24	34,40	39,30	1,85	4,62
Desviación estándar	(0°) <sub>10</sub>	21,61	1,40	13,58	0,06	0,15

Tabla 4.3. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono configuración de apilamiento B

Designación de la probeta	Secuencia de ángulo de laminación	Esfuerzo máximo (MPa)	Fuerza máxima (kN)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Deformación máxima (%)
1B	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	479,02	31,14	23,40	2,01
2B	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	445,30	28,94	24,02	1,90
3B	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	442,60	28,77	24,05	1,89
4B*	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	463,43	30,12	36,27	2,03
5B*	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	425,50	27,66	36,64	1,84
Promedio	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	451,17	29,33	28,88	1,94
Desviación estándar	[(0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	20,57	1,34	6,92	0,08

Debido al comportamiento del material, el esfuerzo máximo coincide con el esfuerzo último a la rotura, en los anexos se puede visualizar las gráficas de Esfuerzo – Deformación de los ensayos ejecutados. En la tabla 4.4 se resume los datos estadísticos del esfuerzo máximo de tracción, donde se puede considerar una baja desviación en función a los valores determinados por las pruebas experimentales. Teniendo un coeficiente de variación de 4.08% y 4.56% para la configuración A Y B respectivamente, producto de dividir la desviación estándar para el promedio de esfuerzo, resultando bajo considerando el número de pruebas realizadas, genera confianza en las propiedades mecánicas y el material en general para el estudio de correlaciones de las variables medidas con los instrumentos de medición.

Tabla 4.4. Resumen estadístico de los esfuerzos de tracción promedio.

Configuración de apilamiento	Promedio Esfuerzo máximo (MPa)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
A	529,24	21,61	4,08	502,91	550,97
B	451,17	20,57	4,56	425,50	479,02

## 4.2 Correlación de Variables

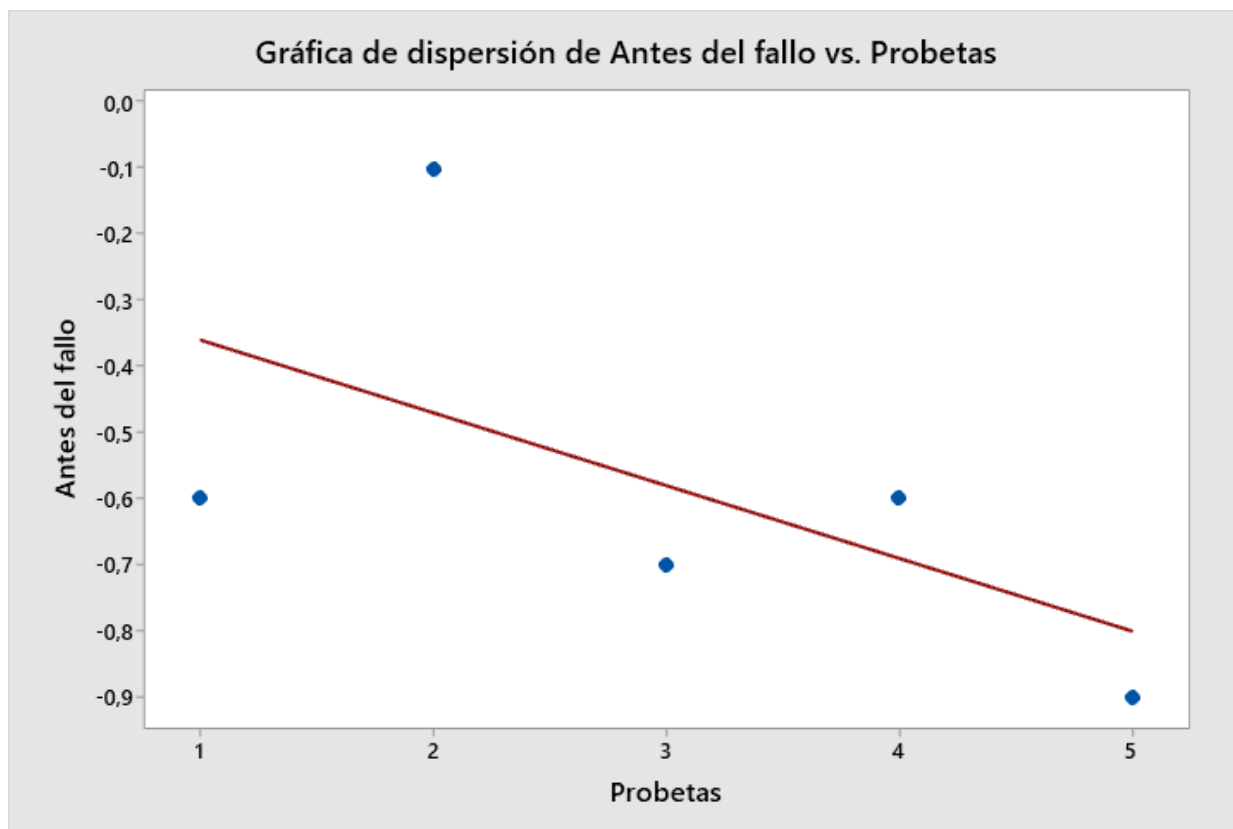
### 4.2.1 Acelerómetro

Realizando el cálculo de las correlaciones de las variables medidas en los ensayos, para las dos configuraciones se llega a los resultados mostrados en la tabla 4.5, presentando los coeficientes para el intervalo de antes del fallo y durante el fallo.

Tabla 4.4. Coeficiente de correlación para probetas de categoría A

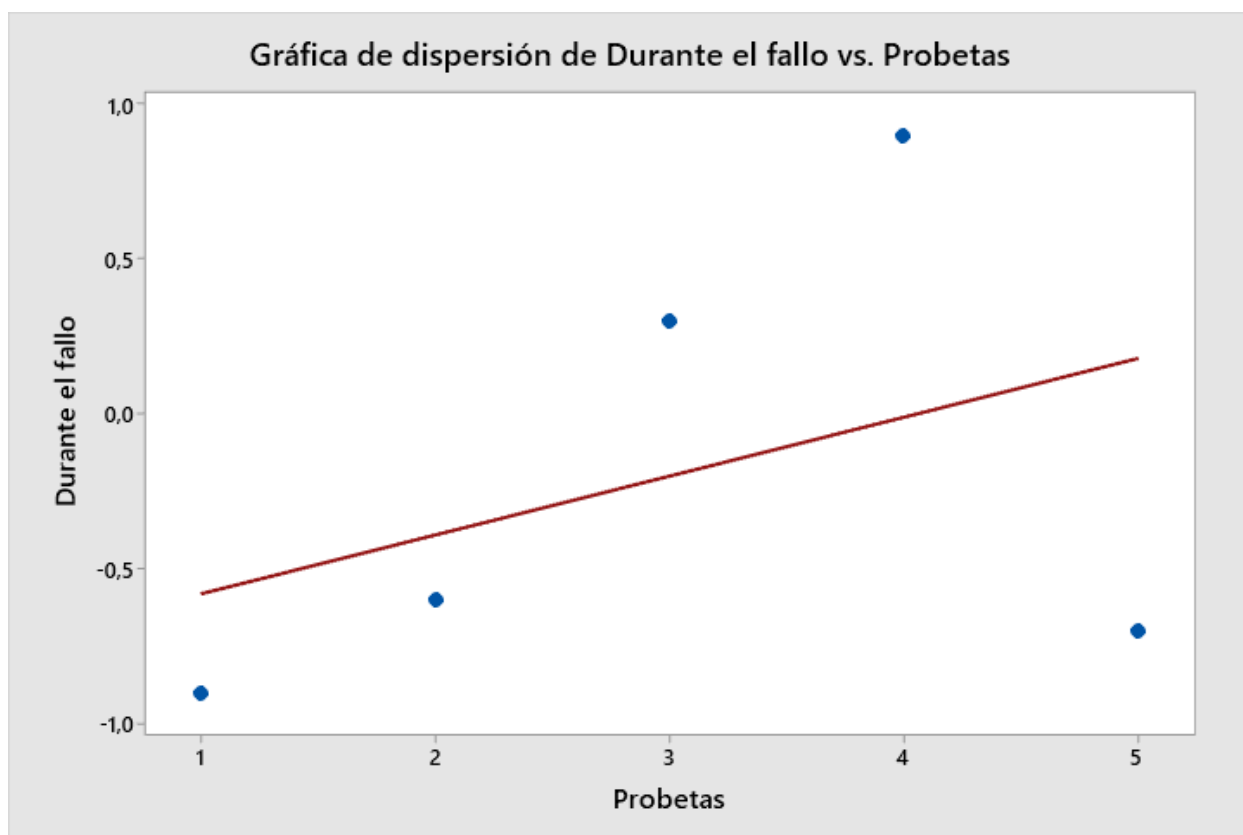
Condición / Ensayo	1A	2A	3A	4A	5A
Antes del fallo	-0,600	-0,100	-0,700	-0,600	-0,900
Durante el fallo	-0,900	-0,600	0,300	0,894	-0,700
Escala de correlación	Correlación inexistente (0 - 0,1)	Correlación débil (0,1 - 0,29)	Correlación moderada (0,3 - 0,5)	Correlación fuerte (0,5 - 1)	

Analizando los coeficientes de los ensayos antes del fallo, se establece una gráfica de dispersión para trazar una línea de tendencia como se muestra en la figura 4.3. En ella se puede determinar que se produce una tendencia negativa con valores por debajo de  $-0.5$ , lo cual indica correlaciones inversas fuertes en el 80% de los casos estudiados. Esto se permite argumentar que para la configuración A, en bajas frecuencias se podrían encontrar los valores máximos de magnitud de la aceleración antes de que se produzca algún fallo o fractura directa en el material durante un ensayo de tracción.



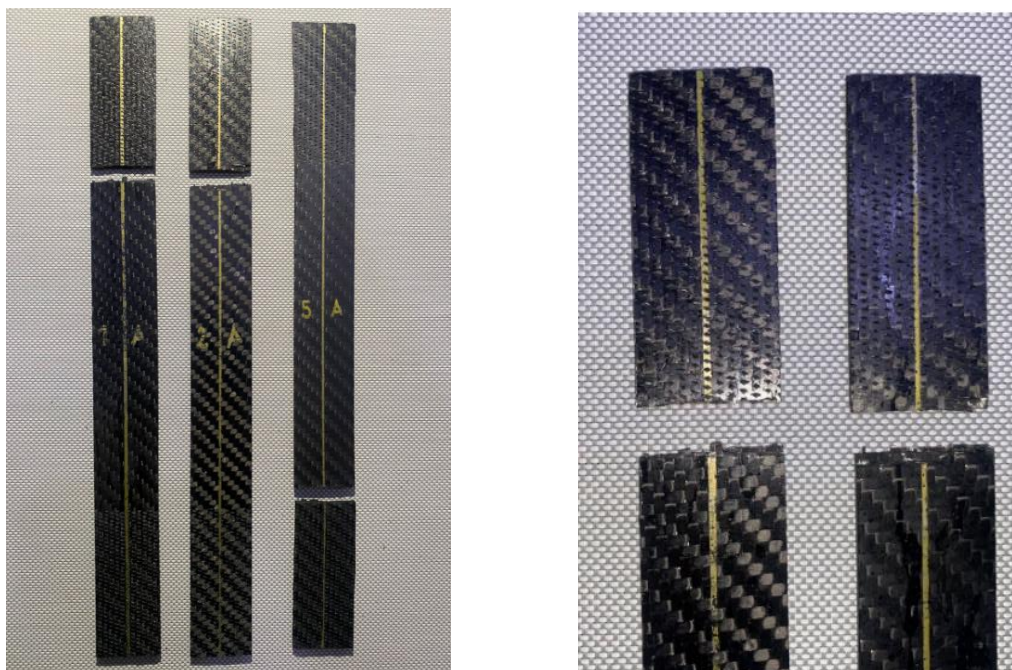
**Figura 4.3.** Gráfica de dispersión de la correlación de variables antes del fallo del material

Para los valores de correlación de variables durante el fallo del material, analizando el gráfico de dispersión de datos y generando una línea de tendencia (ver figura 4.4), se presenta una tendencia positiva, sin embargo, solo el 30% de las correlaciones se presentan como correlaciones fuertes inversas, teniendo un 20% de la muestra como una correlación moderada positiva y un 20% de correlación fuerte positiva.



**Figura 4.4.** Gráfica de dispersión de la correlación de variables durante el fallo del material

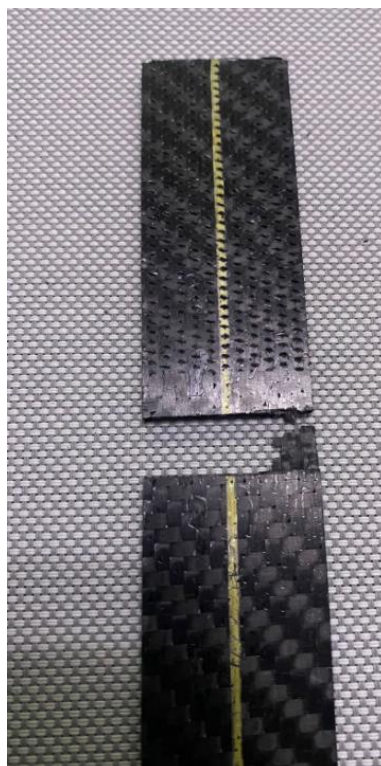
El 30% de las correlaciones que se presentan como correlaciones fuertes negativas se puede interpretar como un comportamiento similar al expuesto en la tendencia del espectro de frecuencia antes del fallo del material, teniendo los mayores valores de magnitud de aceleración en bajas frecuencias, además se caracteriza un tipo de fallo particular para estos casos. En la figura 4.5 se muestran las probetas 1A, 2A y 5A con un tipo de fallo LAT (revisar tabla 4.1) para los dos primeros casos, y un fallo tipo LAB para la última muestra. Estos fallos se caracterizan en particular por la ubicación del fallo, siendo este en específico cerca de la mordaza de sujeción. En la figura mencionada anteriormente se ve a detalle en la parte b, que el fallo se muestra muy cerca de la zona de sujeción de las mordazas, denotadas por las marcas características que esta producen al momento de ejercer presión sobre la parte plana del espécimen.



(a) Tipo de fallo en Probeta 1A, 2A, 5A    b) Detalle de tipo de fallo en probetas 1A Y 2A

**Figura 4.5.** Característica de fallo en probeta 1A, 2A y 5A

El valor de correlación de la probeta 3A durante el fallo presenta una escala moderada de correlación entre las variables, esta presenta una falla con una ubicación diferente a las expuestas anteriormente, ya que se encuentra dentro de la zona de calibración de la probeta, a una distancia de 5 mm desde la zona caracterizada como sujeción de las mordazas. El detalle se puede observar en la figura 4.6. Sin embargo, debido a ser un caso particular no se puede asegurar de que esté directamente relacionado con el coeficiente de correlación calculado. La última probeta a analizar de esta configuración de apilamiento es la 4A, la cual presenta un comportamiento similar al momento de relacionar la falla con el valor de correlación. En la parte “b” de la figura 4.2 se observa un fallo de tipo LAV, donde se producen dos fracturas individuales del material en la parte superior e inferior muy cerca de la zona de sujeción de las mordazas.



**Figura 4.6.** Detalle de tipo de fallo de probeta 3A

Para la segunda categoría de apilamiento denominada B, los resultados de los cálculos de correlación entre variables se presentan en la tabla 4.5.

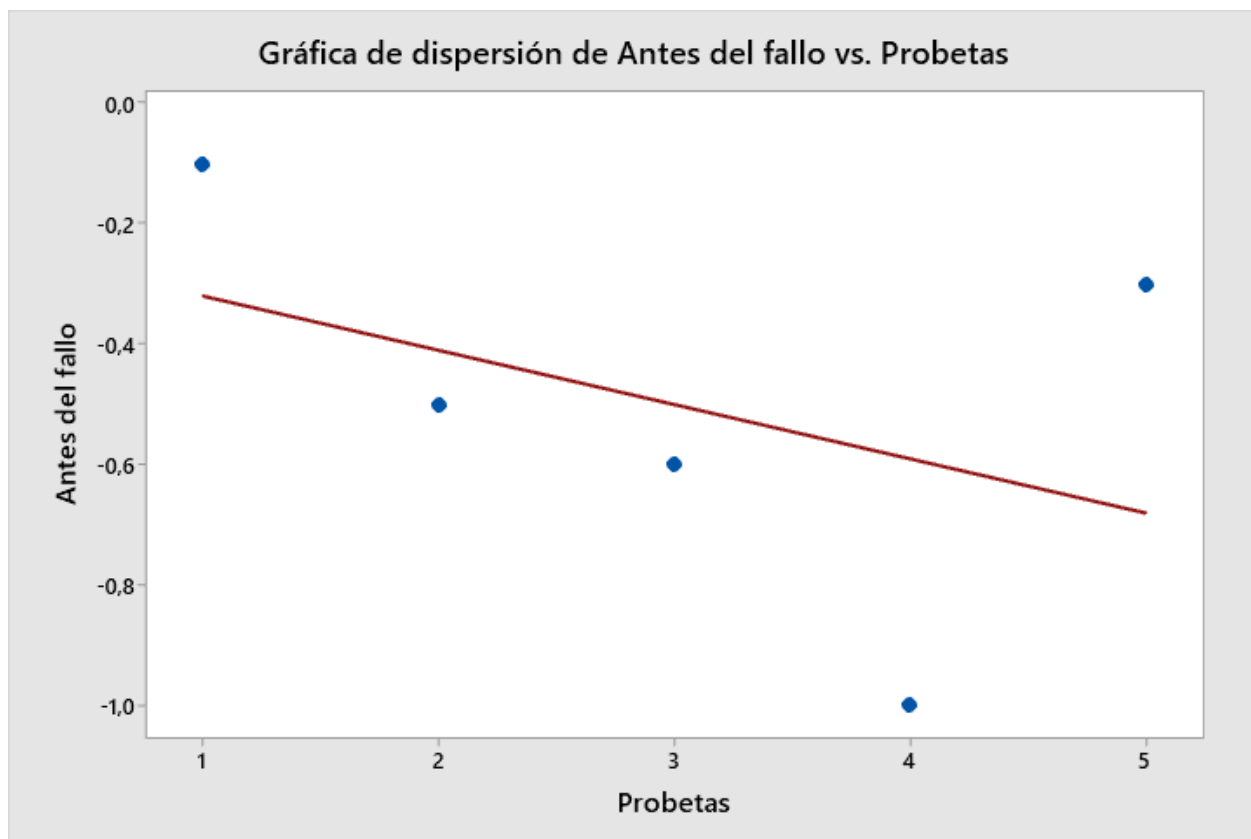
*Tabla 4.4. Coeficiente de correlación para probetas de categoría A*

<b>Condición / Ensayo</b>	<b>1B</b>	<b>2B</b>	<b>3B</b>	<b>4B</b>	<b>5B</b>
Antes del fallo	-0,100	-0,500	-0,600	-1,000	-0,300
Durante el fallo	-0,154	-1,000	-0,667	-0,900	-0,200
Escala de correlación	Correlación inexistente (0 - 0,1)	Correlación débil (0,1 - 0,29)	Correlación moderada (0,3 - 0,5)	Correlación fuerte (0,5 - 1)	

Para los valores del coeficiente de correlación en la segunda categoría, “B”, se realiza un gráfico de dispersión para determinar una línea de tendencia en los valores tomados antes de producirse el fallo del material, la cual se puede ver en el gráfico 4.7.

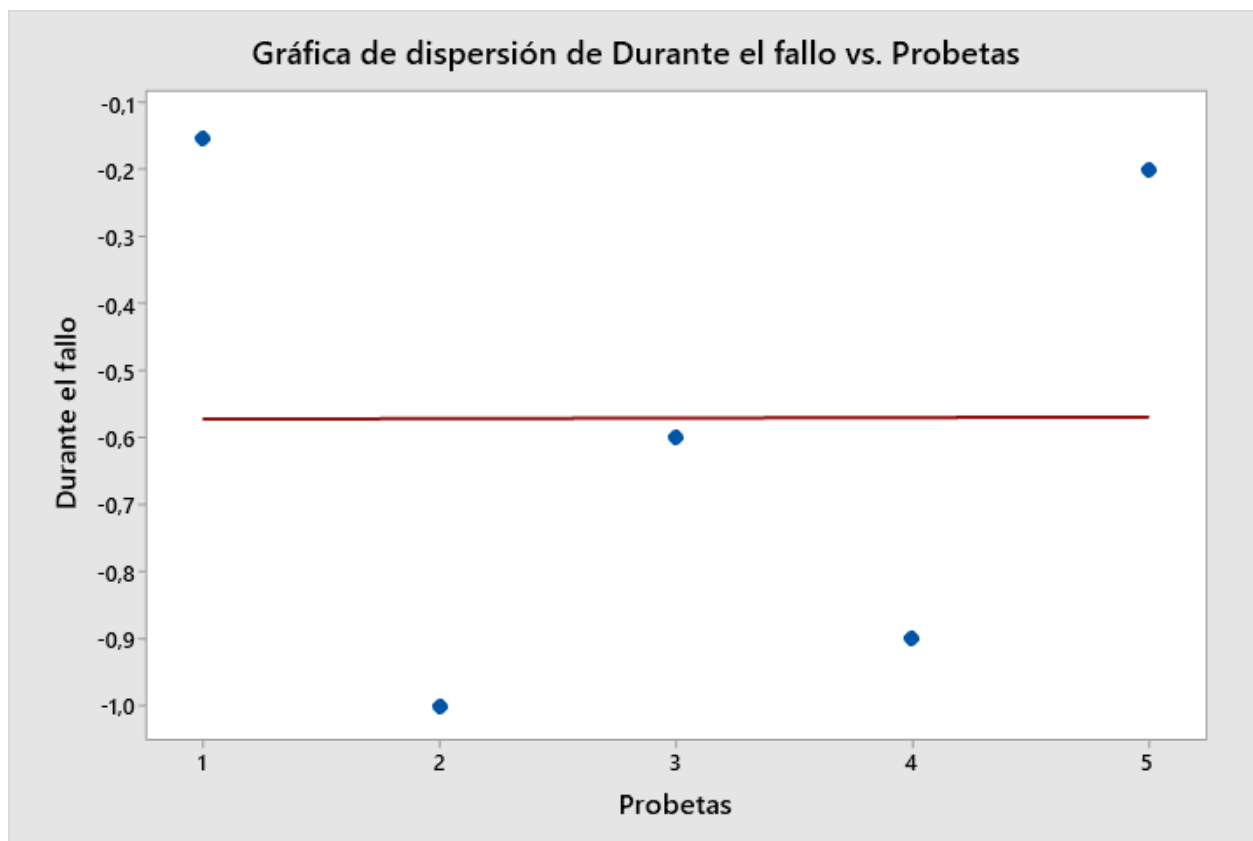


Se vuelve a determinar una tendencia negativa, teniendo un 60% de los valores de coeficiente como una correlación fuerte inversa entre los valores relacionados entre frecuencia y magnitud de aceleración, teniendo un 20 % como correlación inexistente en el primer ensayo, una correlación moderada para el último ensayo efectuado.



**Figura 4.7.** Gráfica de dispersión de la correlación de variables antes del fallo del material

Para las correlaciones de las variables durante el fallo del material se presenta un comportamiento de línea de tendencia levemente positiva (ver figuras 4.8). A pesar de dicho comportamiento se observa un 60% de las correlaciones como fuertes inversamente, para los casos 2B, 3B y 4B, mientras que las muestras 1B y 5B muestran una correlación débil de la variable, manteniendo aun así una tendencia negativa en todos los valores de correlaciones calculados.



**Figura 4.8.** Gráfica de dispersión de la correlación de variables durante el fallo del material

Para los ensayos 2B, 3B y 4B se presentan correlaciones fuertes, sin embargo se puede destacar que para los ensayos con valores de coeficientes más altos, 4B y 2B respectivamente, se presentan tipos de fallos similares, con la característica de una ubicación de la falla inversa, manteniendo la falla en el límite de la zona de sujeción de las mordazas, en la parte inferior y superior para cada uno de los dos ensayos mencionados específicamente. Para la probeta 3B, se caracteriza un tipo de fallo LGM, donde la ubicación del fallo se encuentra en la zona de calibración del espécimen. Aunque este ensayo presenta el menor valor de correlación entre los clasificados como correlaciones fuertes de la muestra, no es factible asegurar que esta característica se relaciona directamente con el valor de correlación calculado. Estas características se pueden observar en la figura 4.9.



**Figura 4.9.** Tipo de fallo en Probeta 2B, 3B y 4B

Para las muestras 1B y 5B, resultaron de valores de correlación moderada similares en coeficientes, sin embargo, presentan diferentes características de tipo de fallo, siendo LAV y LGB respectivamente, donde la fractura del material se presenta en diferentes ubicaciones. En el primer ejemplar presenta dos fracturas particulares en ubicaciones superior e inferior, mientras que el último espécimen presenta una fractura en la zona inferior de calibración a 5 mm del límite de sujeción de las mordazas (Ver figura 4.10). Al ser casos particulares no se puede argumentar que dicho comportamiento está relacionado con los valores de correlación calculados.



**Figura 4.10.** Tipo de fallo en Probeta 1B y 5B

#### 4.2.2 Sonómetro

Teniendo tabulado los valores recopilados por el instrumento de medición de sonido, se llegan a los resultados de coeficientes de correlación expuestos en la tabla 4.5, donde se muestran los valores

*Tabla 4.5. Coeficiente de correlación para probetas de categoría A y B*

Ensayo	Valor de correlación	Escala de correlación
1A	-0,069	Correlación Inexistente
2A	0,289	Correlación débil
3A	-0,285	Correlación débil
4A	0,232	Correlación débil
5A	-0,384	Correlación moderada
1B	0,187	Correlación débil
2B	-0,388	Correlación moderada
3B	0,045	Correlación Inexistente
4B	-0,253	Correlación débil
5B	-0,430	Correlación moderada

De los resultados tabulados solo un 30% presentan coeficientes de correlación moderada, mientras que el 50% de la muestra presenta una correlación débil, teniendo al restante de la muestra como correlación inexistente. Dentro de las probetas que presentan una correlación moderada de las variables, no se denotan comportamientos característicos a relacionar dichos valores con los tipos de falla. No obstante, se puede plantear unos factores que pueden estar interviniendo en el estudio de correlaciones entre variables de sonido y tiempo.

1. La frecuencia de muestreo se puede considerar baja para la medición de los niveles de sonido durante los ensayos, ya que el sonómetro utilizado en la investigación toma una muestra de nivel de sonido en un intervalo de 5 segundos, limitando fuertemente el rango de análisis antes y durante la falla del material.
2. Trabajar con los niveles de sonido en función del tiempo puede limitar el estudio de correlaciones de las variables, siendo más factible obtener el espectro de frecuencia de la señal de sonido almacenada para un mejor análisis. Esta consideración no pudo ser efectuada debido al bajo número de muestras de niveles de sonido en función del tiempo.

En relación a los niveles de sonido máximo alcanzados en los ensayos, se obtiene una media de 89 DB en el instante de la fractura, lo cual se puede presentar como una caracterización de la falla del material en relación al sonido.

### **4.3 Análisis de resultados**

#### **4.3.1 Cámara termográfica**

Durante los ensayos efectuados se realizó la toma de dos muestras de temperatura, durante el ensayo y al momento del fallo respectivamente. Dichos datos se tabularon para su análisis en la tabla 4.6. Las evidencias fotográficas se pueden revisar en los anexos.

Los valores de temperatura durante la ejecución del ensayo presentan un promedio del 23.3°C, donde se aprecia un aumento de la temperatura con una tasa promedio del 10.5% al momento de la fractura del material. Al tener un valor de desviación estándar bajo se puede considerar como una característica del fallo del material. Sumando al planteamiento anterior, se argumenta que el total de los valores porcentuales son positivos, caracterizando una tasa de aumento en todos los ensayos efectuados.

Tabla 4.6. Datos de temperatura durante ensayos de probetas de categoría A

<b>Ensayo</b>	<b>Temperatura antes de la fractura (°C)</b>	<b>Temperatura al momento de la fractura (°C)</b>	<b>Tasa de aumento de temperatura (%)</b>
<b>1A</b>	22,7	24,7	8,1
<b>2A</b>	21,1	27,4	23,0
<b>3A</b>	24,7	25,5	3,1
<b>4A</b>	25,0	27,3	8,4
<b>5A</b>	23,0	25,7	10,5
<b>Promedio</b>	23,3	26,1	10,6
<b>Desviación</b>	1,4	1,1	6,6

#### 4.3.2 Simulación en Ansys Workbench

De la configuración realizada sobre el material compuesto se obtuvieron las propiedades mecánicas mostradas en las tablas 4.7 y 4.8 para cada una de las configuraciones de apilamiento respectivamente, tomando los valores de esfuerzo equivalente y deformación total promedio de cada una de las simulaciones bajo las condiciones de los ensayos realizados y valores estadísticos para post análisis de resultados.

En la categoría A, en los valores de esfuerzo máximo real, en comparación al esfuerzo equivalente simulado se determina un bajo porcentaje de error de 4.9%, factor que genera validez para la simulación de esfuerzos en esta configuración de laminado. Sin embargo el porcentaje de error de los valores de desplazamiento real en relación del simulado tiene una media del 20.68%, observando una diferencia de +1mm aproximadamente en el valor real.

Para la Categoría B, el porcentaje de error promedio en el esfuerzo real en relación al simulado se mantiene bajo con un 3.25%. No obstante, el valor promedio de error de los desplazamientos reales con los simulados, muestra que no es posible validar los valores de desplazamiento simulados, por lo tanto es conveniente realizar más ensayos para verificar los valores de desplazamiento.

Tabla 4.7. Valores esfuerzos y deformación obtenidos bajo simulación de la categoría A

<b>Designación de la probeta</b>	<b>Secuencia de ángulo de laminación</b>	<b>Esfuerzo Equivalente Simulado</b>	<b>Esfuerzo máximo Real (MPa)</b>	<b>Porcentaje de error (%)</b>	<b>Deformación total Simulada (mm)</b>	<b>Desplazamiento máximo Real (mm)</b>	<b>Porcentaje de error (%)</b>
1A	[ (0°) ] <sub>10</sub>	571,42	550,97	3,71	3,81	4,79618	20,48
2A	[ (0°) ] <sub>10</sub>	551,57	502,91	9,68	3,48	4,42205	21,28
3A	[ (0°) ] <sub>10</sub>	555,57	535,70	3,71	3,71	4,70797	21,24
4A	[ (0°) ] <sub>10</sub>	566,75	546,47	3,71	3,78	4,62631	18,24
5A	[ (0°) ] <sub>10</sub>	529,09	510,16	3,71	3,53	4,53531	22,14
Promedio		554,88	529,24	4,90	3,66	4,62	20,68
Desviación estándar		16,52	21,61	2,67	0,15	0,15	1,48

Tabla 4.8. Valores esfuerzos y deformación obtenidos bajo simulación de la categoría B

<b>Designación de la probeta</b>	<b>Secuencia de ángulo de laminación</b>	<b>Esfuerzo Equivalente Simulado</b>	<b>Esfuerzo máximo Real (MPa)</b>	<b>Porcentaje de error (%)</b>	<b>Deformación total Simulada (mm)</b>	<b>Desplazamiento máximo Real (mm)</b>
1A	[ (0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	494,58	479,02	3,25	37,55	5,04
2A	[ (0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	459,77	445,30	3,25	34,91	4,74
3A	[ (0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	456,98	442,60	3,25	34,70	4,73
4A	[ (0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	478,49	463,43	3,25	36,33	5,06
5A	[ (0°), (45°), (0°) ... ] <sub>10</sub>	439,32	425,50	3,25	33,36	4,61
Promedio		465,83	451,17	3,25	35,37	4,84
Desviación estándar		21,24	20,57	0	1,61	0,20

## Conclusiones

En la presente investigación, se ha definido el comportamiento mecánico de compuestos con fibra de carbono y matriz de resina epoxi según ensayos de tracción que han servido de base para alimentar las propiedades mecánicas en simulaciones de campos tensionales desarrollados en ANSYS. Así, de forma específica se puede concluir:

- Es factible la fabricación de placas de fibra de carbono con tela pre impregnada de resina epoxi bajo el método de curado al horno bajo condiciones específicas de ciclos de temperatura para la obtención de probetas del material compuesto bajo la geometría establecida por la normativa ASTM D3039.
- El uso de alcohol poli vinílico causa una falla superficial en las placas de fibra de carbono, siendo principalmente un defecto estético que no afectan a las propiedades mecánicas del material, dada a la comparación de los datos obtenidos bajo los ensayos de tracción con las propiedades proporcionadas por la ficha técnica del fabricante. La interrupción del tiempo de secado de la sustancia mencionada provoca manchas visibles en la superficie solidaria al molde.
- La configuración del material compuesto en el software de simulación Ansys Workbench permite la simulación de la fibra de carbono prepeg caracterizada con un error porcentual promedio del 4.9% en la variable de esfuerzos equivalentes sobre la matriz compuesta en la categoría A y un 20,68% en porcentaje de error promedio en la deformación total real con la teórica. Para la categoría B se determina un error del 3.25% para los esfuerzos simulados con relación a los reales, mientras que, en campos de deformación, es posible que se requiera una mayor cantidad de ensayos para mejorar los parámetros necesarios a definir en la simulación. Esta información será de utilidad para los futuros proyectos a desarrollares relacionados al diseño y simulación estática y dinámica de partes manufacturadas con el material compuesto de fibra de carbono con matriz de resina epoxi.
- La utilización de una fibra unidireccional con propiedades pre definidas en la base de datos del software Ansys para la creación de la tela de fibra de carbono bajo las características físicas del material afectan a los resultados de las simulaciones ejecutadas bajo las condiciones específicas establecidas bajo los ensayos experimentales.



- La gráfica del espectro de frecuencia de la magnitud de la aceleración es la que proporciona más información en función a los picos máximos de frecuencia. Por lo que fueron utilizadas para el cálculo de las correlaciones entre variables de la medición.
- Se determinó la correlación de las variables medidas mediante el instrumento de medición Acelerómetro, a través del espectro de la frecuencia de la señal de la aceleración se obtiene las correlaciones fuertes en los intervalos donde se produce la falla del material, y en los intervalos previos a la fractura del mismo. La tendencia de los coeficientes de correlación se dieron negativamente en su mayoría, lo cual determina que las mayores magnitudes de aceleración se presentan en bajas unidades de frecuencia, este comportamiento se da en la condición de 3 segundos antes de la falla del material.
- Los valores de correlación fuerte muestran una caracterización específica de tipo de falla en las probetas durante los ensayos de tracción. Particularmente en los especímenes 1A, 2A Y 5A, presentan ubicaciones de la falla del material que se puede relacionar directamente con la correlación calculada. Se concluye el mismo planteamiento para las probetas 2B Y 4B, con fallas en zonas similares y con fuertes coeficientes de correlación.
- Los coeficientes de correlación de las variables medidas por el sonómetro muestran una correlación débil en su mayoría, debido al comportamiento no normalizado de los datos y la baja frecuencia de muestreo que no permiten un análisis del espectro de la frecuencia de las magnitudes del sonido en función del tiempo, pero que permiten caracterizar un máximo promedio de 89 DB en toda las probetas estudiadas.
- La fractura del material produce un aumento promedio de temperatura del 10.6% de las tomas realizadas durante los ensayos experimentales de la fibra de carbono.

## **Recomendaciones**

- Buscar alternativas de instrumento de medición de niveles de sonido con una mayor frecuencia de muestreo, para el correcto análisis del comportamiento de los materiales compuesto en función de los espectros de sonido.
- Definir las características físicas y propiedades mecánicas específicas de fibras unidireccionales para la creación de una tela de material compuesto con matriz carbono-epoxi, para disminuir el error porcentual en las variables de deformación total y esfuerzos equivalentes.
- Seguir las recomendaciones específicas del fabricante para conservación de materiales con resina epoxi pre impregnada, teniendo en cuenta las temperaturas máximas de exposición en los intervalos de tiempo especificados.

### **Referencias Bibliográficas**

Achen, C. H. (1982). *Interpreting and using regression*. London.


- Amon, J. (1990). *Estadística para psicólogos (2). Probabilidad. Estadística Inferencial*. Madrid: Pirámide.
- ANSYS. (1 de Febrero de 2021). *ANSYS plataforma de solución CAE*. Obtenido de <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>
- Ayers, C. (2013). *Traction Drive and Gearing Design Comparisons for Multiple Manufacturers and Models*. UT BATELLE.
- Berrocal, L. (2007). *Resistencia de Materiales*. Madrid: McGraw-Hill.
- Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Quality Impres.
- Castillo, E. (2017). *Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos*.
- Gitman, L. J. (2003). *Principios de administración financiera*. Pearson education.
- H. Rahmani, S. H. (2014). *Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites.
- H. Rahmani, S. H.-M. (2013). *Mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites: Effects of number of plies, fiber contents, and angle-ply*. Polymer Engineering & Scienc.
- Hashin, Z. (1979). *Analysis of Properties of Fiber Composites With Anisotropic Constituents*. Journal of Applied Mechanics.
- Hull, D. (1987). *Materiales Compuestos*. Reverté.
- J. Obradovic, S. B. (2012). *Lightweight design and crash analysis of composite*.
- J. Obradovic, S. B. (2012). *Lightweight design and crash analysis of composite*.
- K. Majerski, B. S. (2012). *Tensile properties of carbon fiber/epoxy laminates at low and room temperatures*. Composites Theory and Practice.
- Marsh, H., Edward, A. H., & Rodriguez, F. R. (1997). *INTRODUCTION TO CARBON TECHNOLOGIES*. Alicante: Alicante, Universidad,.
- Ortega, P. S. (2018). *Análisis de autopartes de fibra de carbono de geometría* .
- Pérez, M. A. (2014). *La fibra de carbono como revolución en la aviación*.
- R. Murugan, R. R. (2014). *Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates*. Procedia Engineering.
- Rodríguez Montes, J., Castro Martínez, L., & Del Real Romero, J. (2006). *Procesos industriales para materiales no metálicos*. Madrid: Vision net.

Shigley, J. E. (s.f.). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. 8va edición .

Villa, M. N. (2018). *Caracterización de las propiedades tensiles de un material*. Cuenca:  
Universidad Politecnica Salesiana Cuenca.

**ANEXO**

## A. Ficha Técnica


XC110 | OUT-OF-AUTOCCLAVE COMPONENT PREPREG

### SUITABLE MOULDS/TOOLING

Moulds/tools should be epoxy-based composite moulds, epoxy tooling board or metal. In all cases, moulds must be temperature stable to a minimum of 85°C but ideally to 120°C.

Although it is possible to use Vinylester tools (such as Uni-Mould™) they are not recommended due to the increased possibility of surface imperfections (pin holes) which can occur when XPREG® XC110 is cured in the presence of vinylester.

Polyurethane tooling board should never be used with any XPREG® prepreg due to the cure inhibition of polyurethane on epoxy on elevated temperature.

**Fully Compatible**

- Carbon or glass fibre prepreg moulds (e.g. XPREG® XT135)
- Epoxy tooling board (e.g. EP700 with S120 Board Sealer)
- High temp epoxy hand-layup moulds (e.g. EG160 / EMP160)
- Aluminium / stainless steel moulds
- Toughened glass (for flat sheet/panels)

**NOT Recommended**

- Vinylester composite moulds (e.g. Uni-Mould™)

**NOT Compatible**

- Polyester composite moulds
- Polyurethane model/tooling board

For detailed information on mould suitability and preparation, see the *XC110 Processing Handbook*.

### STANDARD REINFORCEMENTS

XPREG® XC110 is available off-the-shelf using standard reinforcements of 210g 3k and 416g 6k carbon fibre.

SKU	Fibre	Weight (gsm)	Weave	Width (mm)
XC110-Ca31T2-210(1250)	Pyrofil TR30S High Strength Carbon 3k	210	2x2	1250
XC110-1232T2-416(1250)	Pyrofil TR30S High Strength Carbon 6k	416	2x2	1250

A range of alternative reinforcements including multiaxial and unidirectional can be produced on request, subject to MOQ.

### TECHNICAL SPECIFICATION

#### GENERAL PROPERTIES

Cure temperature range	85°C to 120°C
Maximum service temperature	115°C (after post cure)
Out-life (at 20°C)	30 days
Freezer-life (at -18 °C)	12 months
VOC content	Very low (solvent free)

#### CURED MECHANICAL PROPERTIES

Tests performed on XC110-Ca31T2-210(1250) laminate cured out-of-autoclave

Property	Test Standard	Units	Result
Compressive strength	B5 EN ISO 14126 : 1999	MPa	483
Tensile strength	B5 EN ISO 527-4 : 1997	MPa	521
Tensile modulus	B5 EN ISO 527-4 : 1997	GPa	55.1
Flexural strength	B5 EN ISO 14125 : 1998	MPa	777
Flexural modulus	B5 EN ISO 14125 : 1998	GPa	46.7
Interlaminar shear strength	B5 EN 2563 : 1997	MPa	64.7
Tg Onset (DMA)	ASTM 1-0003 Issue 3	°C	121
Tg Peak (DMA)	ASTM 1-0003 Issue 3	°C	135

#### STORAGE & HANDLING

When not in use, XPREG® prepregs should be kept frozen at -18°C (0°F) in sealed plastic packaging. When ready to use, the material should be removed from the freezer and allowed to thaw fully to room temperature before being removed from the packaging.

Remaining material should be re-sealed before returning to the freezer to avoid the risk of moisture uptake.

#### PROCESSING GUIDE

XPREG® XC110 is supported by a highly detailed processing guide to help users achieve the best results from this advanced material.

The guide includes information on recommended laminating and vacuum bagging procedures, tooling and mould preparation, process specific cure cycles, working with core materials and adhesive films, and troubleshooting tips.

#### SAFETY INFORMATION

This material contains uncured epoxy resin which can cause allergic reactions with skin contact. Repeated and prolonged skin contact must be avoided.

Please refer to the product safety data sheet before working with this material.

Figura A.1. Ficha técnica del fabricante

## B. Diagramas Esfuerzo – Deformación

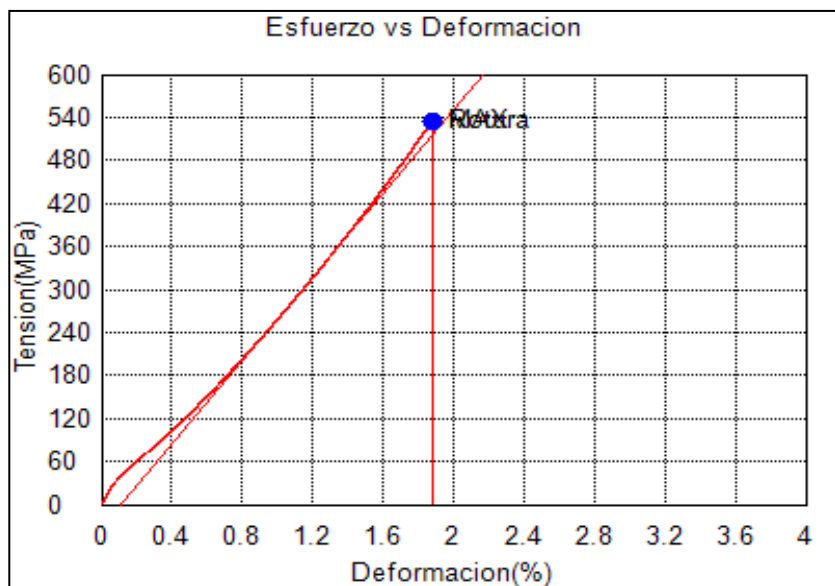


Figura A.2. Diagrama Esfuerzo vs Deformación Ensayo 3A

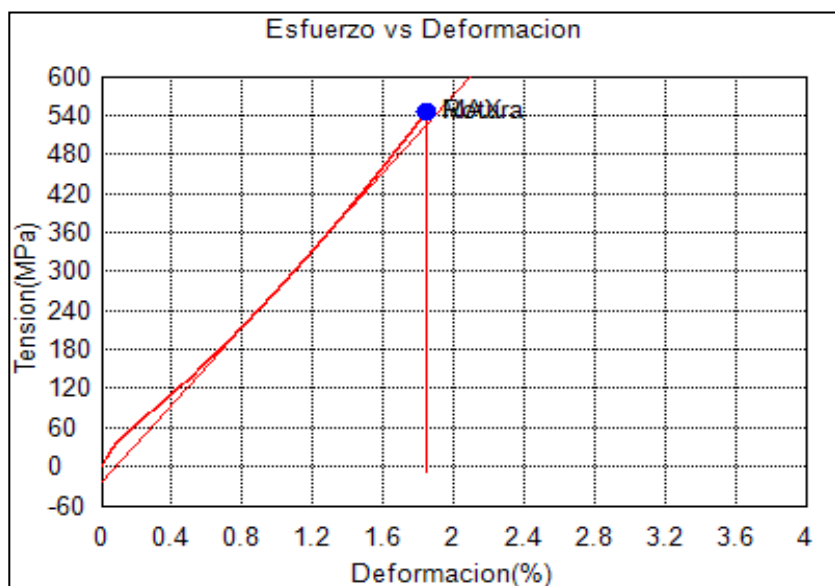
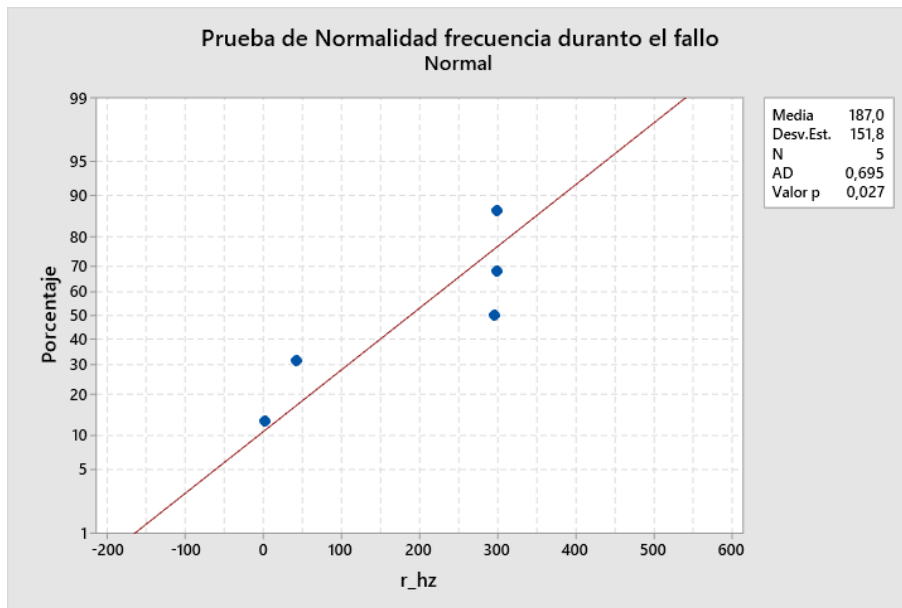
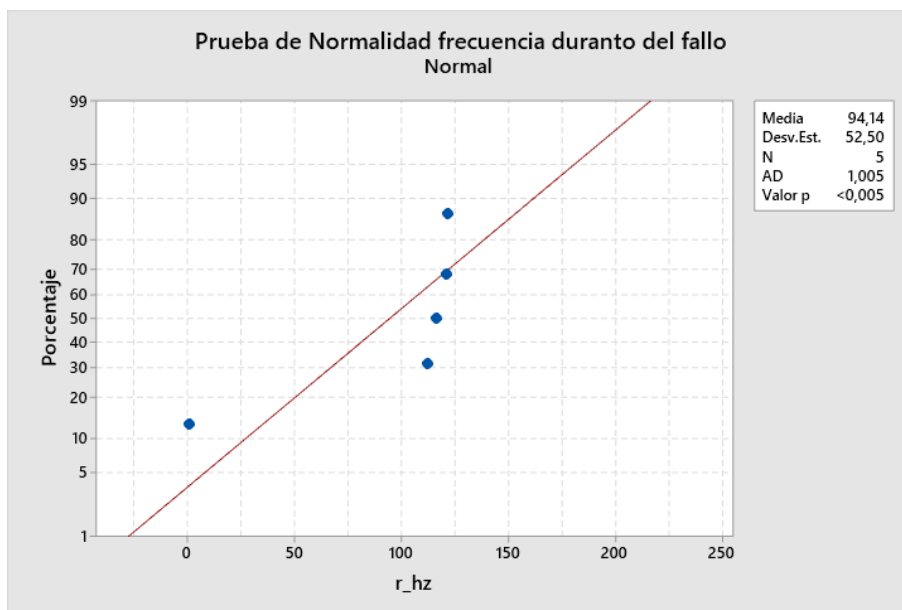


Figura A.3. Diagrama Esfuerzo vs Deformación Ensayo 4A

## C. Gráficas Estadísticas

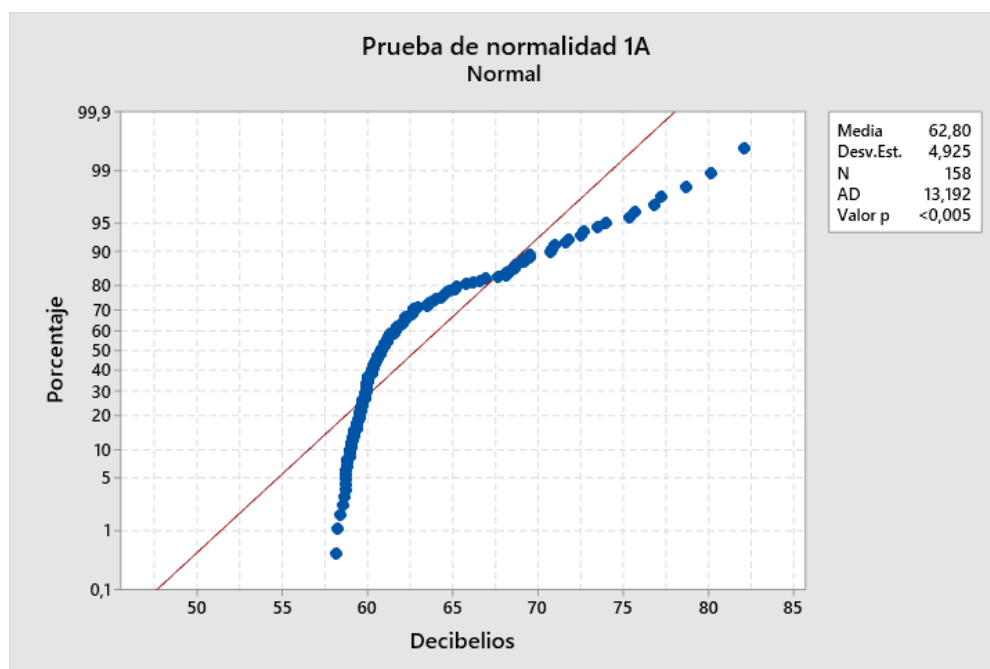


**Figura A.4.** Prueba de Normalidad Ensayo 1A



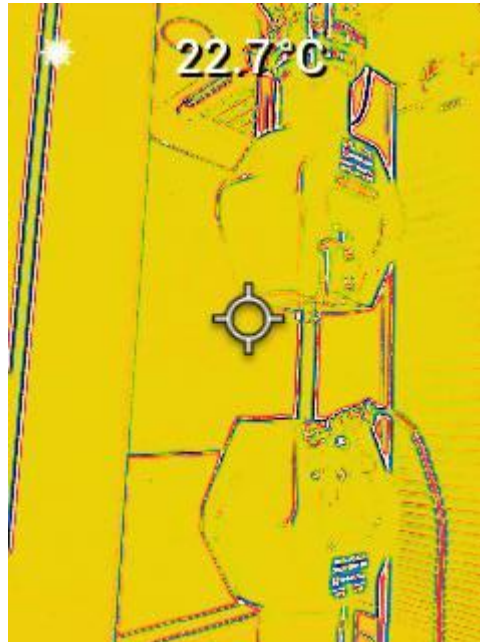
**Figura A.5.** Prueba de Normalidad Ensayo 2A





**Figura A.6.** Prueba de Normalidad Sonometro Ensayo 1A

## D. Gráficas de Temperatura



**Figura A.7.** Toma de temperatura antes de la falla del material en ensayo 1A



**Figura A.8.** Toma de temperatura después de la falla del material en ensayo 1A