ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

"CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADA CON FIBRA DE YUTE PRE-CARGADA MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN."

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

CUNALATA SÁNCHEZ EDWIN FABRICIO
edwin.cunalata@epn.edu.ec

JIMÉNEZ ABARCA CELSO ALEJANDRO
celso.jimenez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. VALENCIA TORRES ESTEBAN ALEJANDRO, Ph.D.
esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **EDWIN FABRICIO CUNALATA SÁNCHEZ** y **CELSO ALEJANDRO JIMÉNEZ ABARCA**, bajo mi supervisión.

_____	_____
Ing. Díaz Campoverde Carlos Wime, M.Sc.	Ing. Valencia Torres Esteban Alejandro, Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO	**CODIRECTOR DE PROYECTO**

DECLARACIÓN

Yo, **Edwin Fabricio Cunalata Sánchez** y **Celso Alejandro Jiménez Abarca,** declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

_____

Cunalata Sánchez Edwin Fabricio

_____

Jiménez Abarca Celso Alejandro

DEDICATORIA

A mi hermosa madre Blanca Sánchez, por siempre confiar y creer en mí, por nunca abandonarme y apoyarme cuando más lo necesité. Sus palabras y consejos me ayudaron a concluir esta etapa, no creo poder agradecer todo lo que me ha brindado, la amo tanto que este logro es para usted.

A mi padre Guillermo Cunalata, que con su sabiduría siempre estuvo dispuesto a ayudarme en todos mis proyectos; sin importar cuan cansado esté, estuvo presto a darme una mano. Sin su experiencia no lo hubiese podido lograr, supo inculcarme valores y luchar por toda su familia, gracias por todo papi.

Fabricio Cunalata

Dedico este trabajo a la memoria de mi abuelita María Consuelo Enríquez y mi padre Celso Humberto Jiménez.

"Yo solo le pido a Dios, que siempre sean la luz que guía mi camino "

Celso Jiménez.

AGRADECIMIENTOS

A mi tía Martha por todo el apoyo y cariño que me ha brindado, ha estado conmigo desde que tengo memoria, gracias por ser como es, nunca cambie, la quiero como una hermana y siempre va a formar parte de mi familia.

A mis hermanos Cristian y Ariel; en especial a Cristian el cual siempre ha sido mi confidente en todo, me ha enseñado a nunca rendirme y a luchar por mis sueños.

A mi Carito por estar junto a mí a lo largo de esta etapa, por su amor, paciencia, confianza y apoyo el cual siempre lo tendré presente, te amo mucho mi vida.

Al Ing. Carlos Díaz y PhD. Esteban Valencia por el gran apoyo brindado durante la ejecución de este trabajo.

Finalmente, a todos mis amigos: Celso, Edison, Jorge, Ricardo, Jhon, Presi, Felipe ya que hicieron de mi vida en la EPN una etapa llena de momentos únicos e inolvidables.

Fabricio Cunalata

A mi madre María del Carmen, la persona más importante en mi vida, gracias a su esfuerzo y ejemplo he logrado completar esta etapa de mi desarrollo personal. Agradezco a mi hermano César, por su ejemplo y sus sabios consejos que siempre han sido oportunos.

En este mundo hay momentos y personas que cambian nuestras vidas para siempre. María te agradezco por haberme de vuelto la felicidad a mi corazón, el cual te pertenece.

Mis amigos del alma Diana y Gabriel por siempre estar a mi lado cuando más los necesitaba, siempre cuenten conmigo.

Al Ing. Carlos Díaz y al PhD. Esteban Valencia, por su oportuna guía este proyecto se ha completado satisfactoriamente.

Mis amigos de la universidad Fabricio, Nicolás, Felipe, Edison, Presi, Jorgito, David, Carlitos, mil gracias por tan gratos años de mi juventud que pasamos juntos durante esta vida universitaria.

Celso Jiménez.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN i
DECLARACIÓN ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTOS iv
ÍNDICE DE FIGURAS viii
ÍNDICE DE TABLAS xi
RESUMEN xiii
ABSTRACT xiv
INTRODUCCIÓN 1
Pregunta de investigación 2
Objetivo general 2
Objetivos específicos 2
1. MARCO TEÓRICO 3
1.1. Fibras naturales 3
1.2. Propiedades físicas de fibras vegetales 5
1.2.1. Características geométricas 5
1.2.2. Ángulo micro-fibrilar 6
1.2.3. Densidad 7
1.2.4. Absorción de humedad 8
1.3. Propiedades mecánicas 8
1.3.1. Resistencia a la tracción y módulo de Young 9
1.3.2. Resistencia a la tracción 9
1.3.3. Resistencia al impacto 10
1.3.4. Resistencia a la flexión 10
1.4. Fibra de yute 11
1.4.1. Propiedades físicas 11
1.4.2. Propiedades térmicas 11
1.4.3. Propiedades eléctricas 12

1.4.4. Propiedades ópticas 12
1.4.5. Propiedades químicas 12
1.5. Zonas de cultivo de yute 13
1.5.1. Importancia del yute dentro de la economía mundial 13
1.5.2. Aplicaciones 14
1.6. Textiles 14
1.6.1. Clasificación de textiles por tipo de tejido 15
1.7. Materiales compuestos de función matriz/refuerzo 18
1.7.1. Matriz polimérica 19
1.7.2. Resina poliéster 20
1.8. Técnicas de fabricación de materiales compuestos 21
1.9. Precarga en materiales compuestos 24
1.10. Precarga en fibras 25
2. METODOLOGÍA 29
2.1. Materiales y equipos 29
2.1.1. Materiales 29
2.1.2. Equipos 32
2.2. Moldeo por compresión 34
2.3. Diseño de la precarga 34
2.4. Estrategia metodológica 35
2.4.1. Diseño del molde de precarga 35
2.5. Procedimiento experimental 37
2.5.1. Elaboración de probetas para ensayos mecánicos 37
2.5.2. Preparación de la resina 39
2.5.3. Preparación de la fibra 41
2.5.4. Preparación del material compuesto 42
2.6. Cálculo de la fracción volumétrica del material compuesto 44
2.7. Caracterización mecánica del material compuesto 45
2.7.1. Ensayo de tracción 45

2.7.2. Ensayo de flexión 47
2.7.3. Ensayo de impacto 48
2.8. Análisis de falla del material compuesto 49
2.8.1. Microscopía 50
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 51
3.1. Ensayo de espectrometría 51
3.2. Ensayo de resistencia máxima del tejido de yute 53
3.3. Ensayo de tracción 54
3.3.1. Resultados de los ensayos de tracción 55
3.4. Ensayo de flexión 63
3.4.1. Resultados de los ensayos de flexión 64
3.5. Ensayo de impacto 72
3.6. Análisis fractográfico de los ensayos de tracción 77
3.6.1. Grupo de probetas 13V a tracción 77
3.6.2. Grupo de probetas 9V a tracción 78
3.6.3. Grupo de probetas sin carga (SC) a tracción 79
3.7. Análisis fractográfico de los ensayos de flexión 81
3.7.1. Grupo de probetas 13V a flexión 81
3.7.2. Grupo de probetas 9V a flexión 82
3.8. Cuadro resumen comparación de resultados frente a otros estudios 85
3.9. Aplicaciones del material compuesto 88
3.9.1. Aplicaciones en la industria civil 90
3.9.2. Aplicaciones en la industria automotriz 92
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 95
4.1. Conclusiones 95
4.2. Recomendaciones 98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99
ANEXOS. 104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fortalezas Chinas. 3
Figura 1.2. Clasificación de fibras naturales. 4
Figura 1.3. Ángulo micro-fibrilar. 6
Figura 1.4. Producción mundial de fibras naturales. 11
Figura 1.5. Plantación de yute. 13
Figura 1.6. Tejido plano. 16
Figura 1.7. Tejido Sarga. 17
Figura 1.8. (a) Tejido satín urdimbre (b) Tejido trama satín. 18
Figura 1.9. Matriz termoplástica. 19
Figura 1.10. Matriz termoestable. 20
Figura 1.11. Estructura básica de un poliéster. 20
Figura1.12. Proceso de pultrusión. 21
Figura 1.13. Proceso Handy Lay Up. 22
Figura 1.14. Moldeo por compresión. 22
Figura 1.15. Moldeo por inyección. 23
Figura 1.16. Inyección de reacción estructural. 23
Figura 1.17. Vigas precargadas. 25
Figura 1.18. Fuerzas externas sobre un material compuesto. 25
Figura 2.1. Ejemplo de espectrometría. 30
Figura 2.2. Distribución de hilos de yute en el tejido. 32
Figura 2.3. Distribución del tejido comercial. 32
Figura 2.4. Molde de precarga para el tejido de yute. 36
Figura 2.5. Máquina de corte a laser. 36
Figura 2.6. Metodología experimental de fabricación del material compuesto. 38
Figura 2.7. Diagrama de flujo para el procedimiento experimental. 39
Figura 2.8. Resina poliéster diluida. 39
Figura 2.9. Resina poliéster con octotato de cobalto. 40
Figura 2.10. Resina poliéster diluida con MEKT. 40
Figura 2.11. Materia prima para la curación del poliéster. 41
Figura 2.12. Tejido plano de yute. 41
Figura 2.13. Tejido plano de yute precargado. 42
Figura 2.14. Tejido de yute recubierto de resina poliéster. 42
Figura 2.15. Molde con tejido de yute precargado y resina poliéster. 43
Figura 2.16. Placa del material compuesto. 43
Figura 2.17. Probetas de tracción, flexión e impacto. 44

Figura 2.18. Masa del tejido natural. 44
Figura 2.19. Masa del material compuesto. 44
Figura 2.20. Probeta de tracción. 45
Figura 2.21. Ensayo de flexión. 48
Figura 2.22. Comparador de impacto variable. 49
Figura 3.1. Bandas espectrométricas. 51
Figura 3.2. Espectrometría de la resina poliéster. 52
Figura 3.3. Espectrometría comparativa. 52
Figura 3.4. Carga vs deformación del tejido de yute. 53
Figura 3.5. Valores máximos de cada probeta de resina ensayada a tracción y su promedio. 55
Figura 3.6. Valores máximos de cada probeta sin carga ensayada a tracción y su promedio. 56
Figura 3.7. Valores máximos de cada probeta 3V ensayada a tracción y su promedio. 56
Figura 3.8. Valores máximos de cada probeta 6V ensayada a tracción y su promedio. 57
Figura 3.9. Valores máximos de cada probeta 9V ensayada a tracción y su promedio. 58
Figura 3.10. Valores máximos de cada probeta 11V ensayada a tracción y su promedio. 58
Figura 3.11. Valores máximos de cada probeta 13V ensayada a tracción y su promedio. 59
Figura 3.12. Curvas de esfuerzo vs deformación a tracción de la resina poliéster y las seis diferentes precargas. 60
Figura 3.13. Módulo elástico a tracción de la resina poliéster y las seis diferentes precargas. 60
Figura 3.14. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la resina poliéster del ensayo a tracción. 61
Figura 3.15. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la probeta sin carga del ensayo a tracción. 62
Figura 3.16. Valores máximos de cada probeta de resina ensayada a flexión y su promedio. 64
Figura 3.17. Valores máximos de cada probeta sin carga ensayada a flexión y su promedio. 65
Figura 3.18. Valores máximos de cada probeta 3V ensayada a flexión y su promedio. 65

Figura 3.19. Valores máximos de cada probeta 6V ensayada a flexión y su promedio. 66
Figura 3.20. Valores máximos de cada probeta 9V ensayada a flexión y su promedio. 67
Figura 3.21. Valores máximos de cada probeta 11V ensayada a flexión y su promedio. 67
Figura 3.22. Valores máximos de cada probeta 13V ensayada a flexión y su promedio. 68
Figura 3.23. Curva de esfuerzo vs deformación a flexión de la resina poliéster y las seis diferentes precargas. 69
Figura 3.24. Módulo elástico a flexión de la resina poliéster y las seis diferentes precargas. 69
Figura 3.25. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la resina poliéster del ensayo a flexión. 70
Figura 3.26. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la probeta sin carga del ensayo a flexión. 71
Figura 3.27. Probeta del ensayo de impacto. 72
Figura 3.28. Área vs altura de los ensayos de impacto. 75
Figura 3.29. Área vs energía de los ensayos de impacto. 76
Figura 3.30. Probeta 13V a tracción, ampliación 10X. 77
Figura 3.31. Probeta 13V a tracción, ampliación 30X. 78
Figura 3.32. Probeta 13V a tracción, ampliación 50X. 78
Figura 3.33. Probeta 9V a tracción, ampliación 10X. 78
Figura 3.34. Probeta 9V a tracción, ampliación 30X. 79
Figura 3.35. Probeta 9V a tracción, ampliación 50X. 79
Figura 3.36. Probeta sin carga (SC) a tracción, ampliación 10X. 79
Figura 3.37. Probeta sin carga (SC) a tracción, ampliación 30X. 80
Figura 3.38. Probeta sin carga (SC) a tracción, ampliación 50X. 80
Figura 3.39. Probeta 13V a flexión, ampliación 10X. 81
Figura 3.40. Probeta 13V a flexión, ampliación 30X. 81
Figura 3.41. Probeta 13V a flexión, ampliación 50X. 82
Figura 3.42. Probeta 9V a flexión, ampliación 10X. 82
Figura 3.43. Probeta 9V a flexión, ampliación 30X. 83
Figura 3.44. Probeta 9V a flexión, ampliación 50X. 83
Figura 3.45. Probeta sin carga (SC) a flexión, ampliación 10X. 84
Figura 3.46. Probeta sin carga (SC) a flexión, ampliación 30X. 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características geométricas de fibras naturales. 5
Tabla 1.2. Grados AMF y contenido de celulosa. 7
Tabla 1.3. Densidad de diferentes fibras naturales. 8
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de las fibras naturales. 9
Tabla 1.5. Dureza y tensión de las fibras naturales. 10
Tabla 1.6. Humedad y constante dieléctrica de fibras de yute 12
Tabla 1.7. Análisis cualitativo de las propiedades de los tejidos. 16
Tabla 1.8. Clasificación de los tejidos sarga. 17
Tabla 1.9. Requerimientos necesarios para la fabricación de materiales compuestos. 24
Tabla 2.1. Equipos utilizados durante la prueba de espectrometría. 31
Tabla 2.2. Equipos. 33
Tabla 2.3. Número de cargas en función del número de vueltas del tornillo sinfín. 35
Tabla 2.4. Costo final del molde 37
Tabla 2.5. Resumen datos fracción volumétrica. 44
Tabla 2.6. Dimensiones de las probetas de tracción tipo I, ASTM D638-14 46
Tabla 2.7. Dimensiones de las probetas a flexión, ASTM D 790-10 47
Tabla 2.8. Dimensiones de las probetas de impacto, ASTM D 5420-14. 48
Tabla 3.1. Datos de banda de espectrometría de la resina poliéster utilizada. 52
Tabla 3.2. Prueba estándar para fuerza de rotura y elongación del tejido de yute. 53
Tabla 3.3. Resultados de los ensayos de tracción. 54
Tabla 3.4. Resultados del ensayo a tracción de la resina y su promedio. 55
Tabla 3.5. Resultados del ensayo a tracción de la probeta sin carga y su promedio. 55
Tabla 3.6. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 3V y su promedio. 56
Tabla 3.7. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 6V y su promedio. 57
Tabla 3.8 Resultados del ensayo a tracción de la probeta 9V y su promedio. 57
Tabla 3.9. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 11V y su promedio. 58
Tabla 3.10. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 13V y su promedio. 59
Tabla 3.11. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de diferentes precargas con respecto a la resina poliéster. 61
Tabla 3.12. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de diferentes precargas con respecto a la probeta sin carga. 62
Tabla 3.13. Resultados de los ensayos de flexión. 63
Tabla 3.14. Resultados del ensayo a flexión de la resina y su promedio. 64
Tabla 3.15. Resultados del ensayo de flexión de la probeta sin carga y su promedio. 64

Tabla 3.16. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 3V y su promedio. 65
Tabla 3.17. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 6V y su promedio. 66
Tabla 3.18. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 9V y su promedio. 66
Tabla 3.19. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 11V y su promedio. 67
Tabla 3.20. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 13V y su promedio. 68
Tabla 3.21. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de diferentes precargas con respecto a la resina poliéster. 70
Tabla 3.22. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de diferentes precargas con respecto a la probeta sin carga (SC). 71
Tabla 3.23. Grupos de probetas 13V, 9V y SC vs altura. 73
Tabla 3.24. Grupos de probetas 13V, 9V Y SC área de fractura. 74
Tabla 3.25. Grupos de probetas 13V, 9V Y SC vs energía. 75
Tabla 3.26. Comparación de resultados frente a otras investigaciones. 86
Tabla 3.27. Resistencia máxima de materiales aprobados por “European union aviation safetey agency”. 89
Tabla 3.28. Tabla comparativa de diferentes materiales aplicados en la industria aeroespacial. 90
Tabla 3.29. Propiedades mecánicas de los materiales no metalicos utilizados en la construcción de techos. 91
Tabla 3.30. Propiedades mecánicas del compuesto de tallos de girasol/madera de álamo. 91
Tabla 3.31. Comparaciones materiales para la construcción y material compuesto. 92
Tabla 3.32. Propiedades mecánicas del compuesto algodón y poliéster. 92
Tabla 3.33. Propiedades mecánicas del compuesto de cáñamo. 93
Tabla 3.34. Comparación de materiales en la industria automotriz y el material precargado. 93

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene por objetivo determinar y evaluar la influencia de la precarga en las propiedades de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con un tejido natural plano. Para realizar este análisis experimental se diseñó un molde adecuado para precargar al refuerzo mientras es comprimido con la matriz durante el proceso de fabricación del material compuesto. Una vez obtenido el molde de la precarga se procedió a realizar ensayos preliminares para evaluar la resistencia a la rotura del tejido de refuerzo y las propiedades de la matriz polimérica. A partir del 20% de la resistencia máxima a la ruptura del tejido natural se determinó los cinco diferentes grupos de precarga que se utilizaron durante la fabricación del material. Seguidamente en base a las normas ASTM D638-14, ASTM D 790-10 y ASTM D 5420-14 se realizaron las probetas y los procedimientos para los ensayos de tracción, flexión e impacto. El análisis de fractura se realizó a los grupos de probetas que obtuvieron un mejor comportamiento durante los ensayos mecánicos. Finalmente se analizó los resultados de los ensayos mecánicos en comparación con las probetas objetivo cero y sin carga (SC) donde se incrementó la resistencia a tracción y flexión del material precargado.

Palabras clave: Materiales compuestos, precarga, tejido natural, matriz polimérica, moldeo por compresión.

ABSTRACT

The purpose of this project is to determine and evaluate the influence in the mechanical properties of a polymer matrix composite material preloaded on its natural fabric reinforcement. To perform this experimental analysis, it was necessary a suitable design of a compression mold to preload the reinforcement while its compressed with the matrix during the manufacturing process of the composite material. Once the preload mold was obtained, preliminary tests were carried out in order to evaluate rupture resistance of the reinforcement fabric and the properties of the polymer matrix. The five loads, that were applied in the material came from this analysis, taking as a reference the 20% of the maximum resistance of the fabric. Next, based on the ASTM D638-14, ASTM D 790-10 and ASTM D 5420-14 standards, the specimens and the procedures for tensile, bending and impact tests were carried out. From these results the specimen that obtained the best performance during the mechanical test were studied using the fracture analysis procedure. Finally, the result analyses is a comparison between the data that came from the mechanical test with de properties of the objective specimen (no load material).

Keywords: Composite materials, preload, natural fabric, polymer matrix, compression molding.

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADA CON FIBRA DE YUTE PRE-CARGADA MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN.

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos de matriz polimérica y fibra natural son una apuesta al reemplazo de diversas materias primas que presentan como principal desventaja el peso. Aprovechando la baja densidad y la capacidad de las fibras vegetales a elongarse bajo cargas aplicadas y recuperar su tamaño una vez que se retira el esfuerzo, se trata de aprovechar esta condición y estudiar el incremento de la resistencia a la tracción de un material compuesto de matriz de resina poliéster y fibra tejida de yute precargado.

Actualmente la mayoría de las industrias buscan reducir el impacto en el medio ambiente durante el desarrollo de sus actividades manufactureras. Se han realizado grandes avances en la investigación de materia prima que tenga menor impacto a mediano o largo plazo. Alrededor del mundo existe una gran cantidad de sembríos de fibras naturales cuyo objetivo principal es proveer de recursos para la fabricación de papeles, cartones, textiles, hilos, geotextiles entre otros. La producción mundial de fibras bordea los 60 millones de toneladas anuales, estos niveles de producción han desarrollado un interés en la investigación enfocada en la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales. (Agricultura, 2017)

Sin embargo, aunque las fibras naturales poseen características comparables con ciertos materiales sintéticos utilizados actualmente. La mayoría de sus propiedades mecánicas siguen manteniéndose por debajo. Es por esto que, con el fin de mejorar las propiedades en compuestos reforzados con fibras naturales, se ve la necesidad de investigar nuevos procedimientos técnicos de manufactura.

En la industria de la construcción existe una técnica en particular para la fabricación de columnas de concreto. Durante el proceso de fabricación al concreto curado se adhieren barras de acero pretensado. La pretensión que está presente en las varillas de acero es liberada y transferida hacia el hormigón. El objetivo de esta técnica es reducir los esfuerzos de compresión que deberá de soportar la viga una vez que se encuentre instalada ya en obra. Durante el presente proyecto se realiza una investigación de las ventajas en las propiedades mecánicas que se generan al incluir precargas en el refuerzo natural durante el proceso de fabricación de un material compuesto de matriz polimérica.

Pregunta de investigación

¿Cómo afecta la precarga del refuerzo de un material compuesto en las propiedades mecánicas del material?

Objetivo general

Caracterizar un material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra de yute precargada mediante moldeo por compresión.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir un mecanismo para precargar las fibras.
- Determinar las variables más importantes que rigen en la constitución de los materiales compuestos.
- Obtener un material compuesto de fibra tejida y precargada.
- Evaluar las propiedades mecánicas del nuevo material.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fibras naturales

Las fibras naturales son abundantes, fáciles de cultivar manejar y procesar. Por lo que históricamente se volvieron una solución para las diversas actividades diarias del hombre entre ellas la industria textil, agrícola, transporte de alimentos, etc.

El uso de las fibras naturales data 8000 A.C., en esa época existen registro de textiles fabricados de lino y cáñamo. Aproximadamente en 6500 A.C. se tienen vestigios de los primeros usos de cerámicos reforzados con fibras textiles. En Egipto hace 3000 años las momificaciones eran realizadas con fibras naturales vegetales. En nuestro continente el registro más antiguo data de hace 7000 años donde se encontraron restos de algodón en antiguas cavernas en México. (K.L. Pickering, 2008)

Ejemplos de aplicaciones en el área de la construcción podemos ver en la antigua China donde varias edificaciones militares y monasterios eran construidos con una combinación de barro, madera y bambú aprovechando sus propiedades estructurales y elásticas, Figura 1.1.

Figura 1.1. Fortalezas Chinas.

(Fuente: K.L Pickering, 2008)

Ya en épocas más contemporáneas en la década de 1940 se realizaron grandes avances en la investigación de materiales compuestos aplicando fibras naturales aprovechando ciertas ventajas como:

- Bajo costo
- Mejor desempeño ante la deformación frente a otros materiales de la época

Unos años después en 1990 las investigaciones sobre las consecuencias en el medio ambiente por el uso excesivo de materia prima no renovable llevaron a que se profundizara la investigación sobre las ventajas que tiene el uso de estos materiales renovables, entre ellos se hizo énfasis en las fibras naturales en general.

Existe una gran variedad de fibras naturales alrededor del mundo estas pueden provenir de tres tipos de fuentes: leñosas /celulósicas (plantas), animales y minerales. Las fibras vegetales son abundantes ya que pueden ser cultivadas a diferentes altitudes y zonas climáticas. Las fibras naturales pueden ser clasificadas en: fibras de tallos, fibras de hojas, fibras de semillas, fibras frutales, fibras leñosas y fibras de pastos. (K.L. Pickering, 2008). En la Figura 1.2, se muestra una clasificación de las fibras naturales.

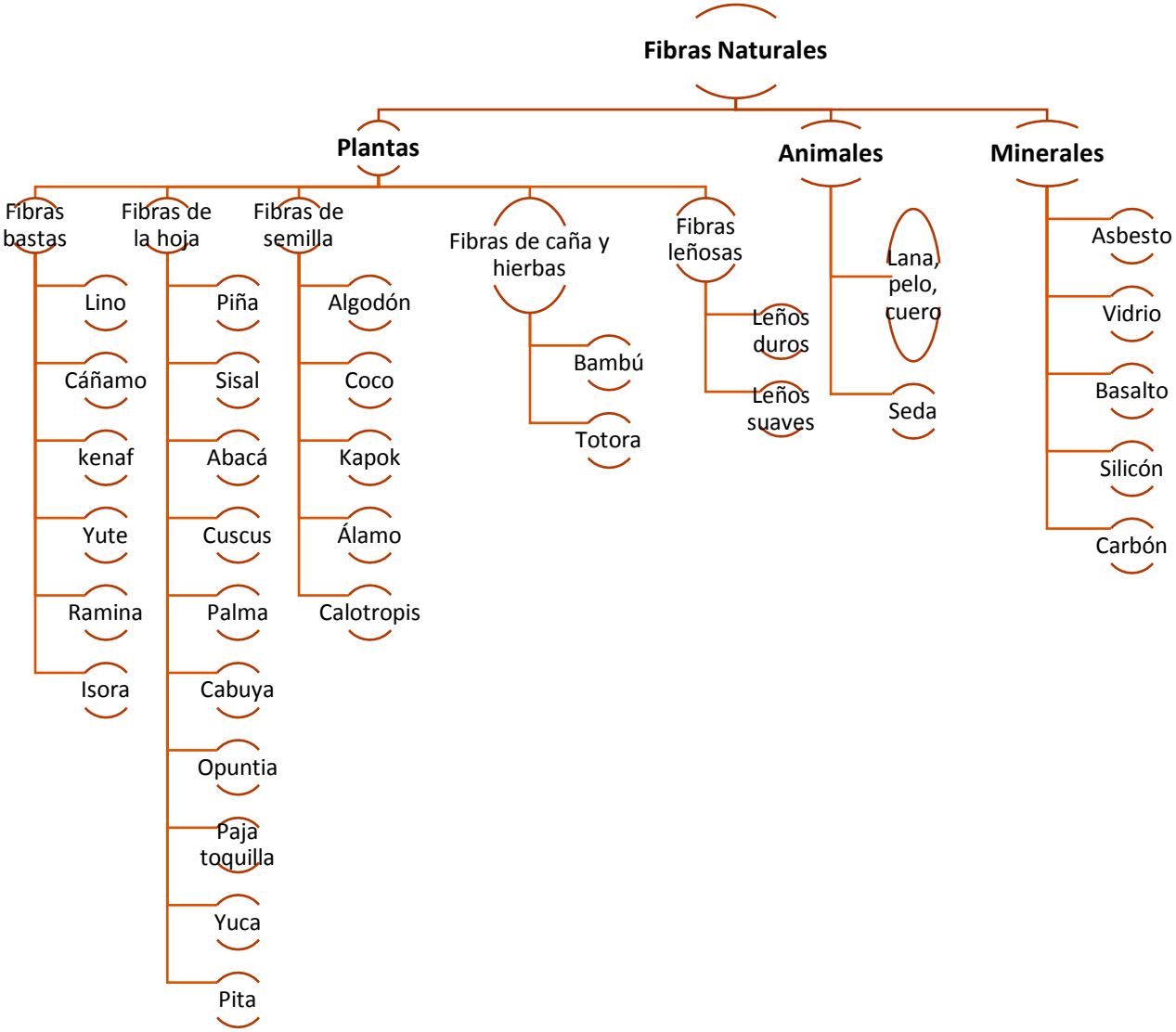


Figura 1.2. Clasificación de fibras naturales.

(Fuente: K.L. Pickering, 2008)

1.2. Propiedades físicas de fibras vegetales

1.2.1. Características geométricas

Las propiedades mecánicas de las fibras naturales son muy pequeñas en comparación con los materiales sintéticos utilizados en la industria, pero debido a su baja densidad, las propiedades específicas como la dureza y la resistencia pueden ser comparables con otros materiales (ej. Fibra de vidrio) en la Tabla 1.1, se presentan diferentes valores de longitud, ancho y relación de proporción (longitud/diámetro) de diferentes fibras naturales. (Hodzic, 2014)

Tabla 1.1. Características geométricas de fibras naturales.

Fibras	Longitud [mm]	Ancho [µm]	Relación de proporción
Maderas suaves	2-6	20-40	50-200
Maderas duras	1-2	10-50	28-86
Paja de trigo	1.5	15	100
Paja de arroz	0.65-3.48	5-14	170
Lino	33	19	1737
Cáñamo	25	25	1000
Kenaf	5	21	238
Sisal	3	20	150
Yute	2	20	100
Algodón	25	20	1250
Ramie	12-15	20-75	2000-6000
Abacá	6	24	250
Bambú	27	14	193
Esparto	1.9	13	146
Bagazo	0.68-1.7	22.8-20	29.8-851
Tallo de girasol	1.18	22	55
Fibra de palma de aceite	6	15-50	12-40
Paja de cereal	1.5	23	65

(Fuente: Hodzic, 2014)

La relación de proporción es un parámetro geométrico que relaciona dos características físicas de las fibras (longitud y diámetro de la fibra). A partir de este parámetro adimensional se puede entender como varían ciertas propiedades mecánicas de las

fibras naturales. Por ejemplo, una baja relación de proporción de la fibra limita la capacidad de refuerzo del material compuesto, para un refuerzo máximo, la relación de proporción de fibra de cualquier sistema compuesto debe estar por encima de su valor crítico para asegurar la máxima transferencia de tensión a la fibra antes de la falla del material compuesto. (Saravanakumar, 2018)

1.2.2. Ángulo micro-fibrilar

El ángulo micro-fibrilar (MFA) se define como el ángulo que las microfibras de la estructura hacen con respecto al eje axial de la fibra, Figura 1.3. El ángulo micro-fibrilar junto a otros parámetros geométricos de las fibras naturales, permiten entender cómo pueden variar las características de resistencia mecánica dentro de la estructura. Al existir valores altos en la cantidad de celulosa en la fibra y valores bajos del ángulo micro-fibrilar los valores de resistencia en la fibra se incrementan, en cambio cuando el ángulo micro-fibrilar es alto y la cantidad de celulosa es baja entonces la fibra posee valores altos de ductilidad. (Bunsell, 2018)

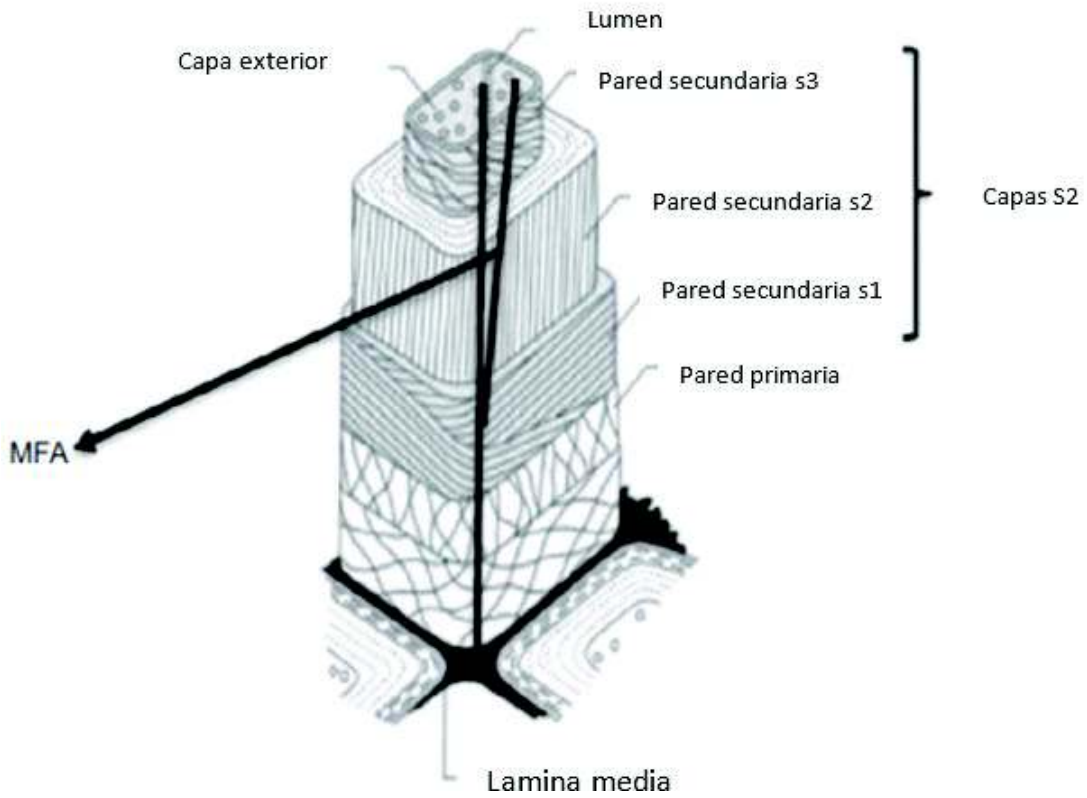


Figura 1.3. Ángulo micro-fibrilar.

(Fuente: Bunsell, 2018)

Tabla 1.2. Grados AMF y contenido de celulosa.

Fibra	AMF (Grados)	Cristalinidad celulósica [%]	Contenido de celulosa [%]
Cáñamo	6	50-90	70-74
Lino	6-10	50-90	64-71
Yute	8	50-80	61-72
Sisal	10-25	50-70	66-78
Platano	11	45-55	44-64
Coco	30-49	27-33	32-43
Ramie	8	64	76
Abacá	22.5	52	62
Tallo de maíz	10.9	52-59	-
Tallo de soya	12	47	85
Fibra de palma de aceite	46	20-30	40-50
Bagazo	14-15	51.1	52
Hoja de piña	12-14	44-60	70-82
Bambú	2-10	40-60	26-60
Fibra de madera suave	3-45	52-62	40-45
Eucalipto	3-44	68	40-50

(Fuente: Hodzic, 2014)

1.2.3. Densidad

En general la estructura tubular hueca de las fibras naturales vegetales reduce la cantidad de masa y las hace más ligeras en peso, además, esta estructura les brinda buenas características como aislantes térmicos y acústicos. Las fibras naturales vegetales poseen valores variables de densidad dependiendo de cada especie. La densidad y la resistencia a la tracción se presentan en la Tabla 1.3. (Fan, 2016)

Tabla 1.3. Densidad de diferentes fibras naturales.

Fibra	Tipo de fibra	Densidad [Kg/m^3]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación [%]	Módulo de Young [GPa]
Lino	Tallo	1380	343-1035	1.2-3	279
Yute		1230	187-773	1.5-3.1	13-26.5
Cáñamo		1350	580-1110	1.6-4.5	70
Kenaf		1200	295-930	2.7-6.9	53
Ramie		1440	400-938	2-4	61.4-128
Sisal	Hoja	1200	507-885	1.9-3	9.4-22
Piña		1500	170-1627	1-3	34.5-82.5
Plátano		1350	529-914	3-10	8-32
Algodón		1500-1600	287-587	7-8	5-13
Coco	Semilla	1200	175	30	4-6
Palma de aceite		700-1550	248	14	32

(Fuente: Hodzic, 2014)

Como la densidad juega un papel importante al momento de producir materiales compuestos, en varios estudios alrededor del mundo se ha demostrado que debido al bajo nivel de densidad de las fibras lignocelulósicas (vegetales) las propiedades mecánicas de los materiales compuestos realizados con ellas son competitivas frente a otros materiales realizados con fibras inorgánicas. (Fan, 2016)

1.2.4. Absorción de humedad

Las fibras naturales en condiciones normales poseen la habilidad de absorber la humedad o el agua que se encuentra en el ambiente, esto se convierte en un gran inconveniente al diseñar aplicaciones. Esta es una propiedad intrínseca debido a los grupos hidróxilos y otros grupos polares existentes, por lo tanto, esto deriva en el deterioro de las propiedades mecánicas y la estabilidad del futuro material compuesto. (K.L. Pickering, 2008)

1.3. Propiedades mecánicas

A continuación, se describe diferentes propiedades mecánicas y físicas de las fibras naturales vegetales como: estructura, ángulo micro-fibrilar y dimensión de las células. Estas propiedades influencian en el futuro desempeño de los diferentes materiales compuestos que se producen a partir de estas.

1.3.1. Resistencia a la tracción y módulo de Young

La resistencia a la tracción y el módulo de Young de las fibras vegetales, Tabla 1.4, aumentan al incrementar el contenido de celulosa en la fibra. Además, la resistencia a tracción depende de la orientación de las micro-fibrillas celulósicas hacia el eje axial, ver Figura 1.3. La ductilidad aumenta si las fibrillas tienen una orientación más espiralada con respecto al eje axial. La fibra es más rígida y tiene mayor resistencia a la tracción si las micro-fibrillas poseen una orientación más paralela hacia el eje axial. (Hodzic, 2014)

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de las fibras naturales.

Fibras	Densidad [gr/cm^3]	Elongación [%]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Young [GPa]
Lino	1.5	1.2-3.2	345-2000	15-80
Cáñamo	1.48	1.6	550-900	26-80
Sisal	1.5	3.0-7.0	468-700	9.4-22
Coco	1.2	17-47	175	4-6
Maderas suaves	1.5	-	600-1020	18-40
Maderas duras	1.2	-	-	37.9
E-vidrio	2.5	2.5	2000-3500	70
S-vidrio	2.5	2.8	4570	86
Aramida	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63-67

(Fuente: Hodzic, 2014)

1.3.2. Resistencia a la tracción

Es la capacidad de la fibra, o de los materiales en general, de resistir la deformación generada por esfuerzos externos antes de la fractura. Aunque en la mayoría de los casos los materiales sintéticos poseen mejores propiedades mecánicas y físicas que las fibras naturales, estas poseen mejores características en capacidad de deformación y elongación, Tabla 1.4.

Por ejemplo, las fibras vegetales de tallos y hojas poseen una mayor capacidad de deformación previo a la fractura ver Tabla 1.4, que otras fibras creadas por el hombre, sin embargo, la inclusión de fibras vegetales en materiales compuestos tiene como resultado la reducción del porcentaje de elongación, pero aumentan el módulo de

Young. Para incrementar estos valores, una alternativa es realizar tratamientos químicos superficiales como NaOH. (Adams, Advani,. Alman, & Andressen, 2001)

1.3.3. Resistencia al impacto

Es la propiedad de un material de oponerse a la fractura frente a cargas de impacto a altas velocidades. Como en otras propiedades mecánicas esta resistencia en materiales compuestos reforzados depende demasiado de la cantidad de fibra, es decir, al aumentar el porcentaje volumétrico del refuerzo la resistencia al impacto del compuesto aumentará. Las fibras naturales vegetales obtenidas de tallos, por ejemplo: cáñamo o yute otorgan mayor resistencia a cargas de impacto debido a su configuración geométrica en la fibra. Existen técnicas como el "Handy lay up" que aumentan la resistencia al impacto del material compuesto al incrementar el número de capas de refuerzo plano o tejido. (Hodzic, 2014)

1.3.4. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es la propiedad de los materiales de soportar cargas perpendiculares a su eje. El esfuerzo resultante es la combinación de esfuerzos de compresión y tensión. En materiales compuestos, esta resistencia aumenta al incrementar el porcentaje volumétrico de fibras del material, también es importante considerar que esta propiedad mecánica es sensible a la correcta cohesión entre la fase fibrilar y la matriz. Esta interfaz permite transmitir esfuerzos desde la matriz hacia la fase fibrilar. El largo de la fibra es una propiedad geométrica que aumenta la resistencia a la flexión. (Hodzic, 2014) En la Tabla 1.5, se muestra la dureza y el esfuerzo último de diferentes fibras naturales.

Tabla 1.5. Dureza y tensión de las fibras naturales.

Fibra vegetal	Tipo de fibra	Rigidez [GPa]	Esfuerzo último [MPa]
Cáñamo	Tallo	30-60	300-800
Lino	Tallo	50-70	500-900
Yute	Tallo	20-55	200-500
Sisal	Hoja	9-22	100-800
Maderas suaves	Tronco	10-50	100-170

(Fuente: Hodzic, 2014)

1.4. Fibra de yute

El yute y el algodón han sido históricamente las fibras naturales mayormente producidas alrededor del mundo. Para el año 2017 la producción de fibras naturales llegó a los 60 millones de toneladas, de estos, 45 millones corresponden a la producción del algodón seguido por el yute en 6 millones de toneladas, Figura 1.4. La producción de yute tradicionalmente se ha localizado en el sur y sureste asiático, el cultivo es anual y tarda en desarrollar cerca de 120 días. Esta fibra es reciclable y 100 % biodegradable, un dato a destacar es que una hectárea de yute es capaz de consumir 15 toneladas de dióxido de carbono y a su vez liberar 11 toneladas de oxígeno. (Agricultura., 2017)

Figura 1.4. Producción mundial de fibras naturales.

(Fuente: Agricultura, 2017)

1.4.1. Propiedades físicas

Las fibras bastas (tallo) poseen alta resistencia y baja deformación elástica debido a su microestructura compuesta de largas cadenas de moléculas orientadas. La deformación elástica del yute previo a la rotura varía entre 1 y 1.8% de su longitud inicial, además, la tenacidad de la fibra de yute es comparable con la del acero. Otras características mecánicas como la flexión y la torsión son bastantes elevadas en comparación con otras fibras naturales debido a su naturaleza de tallo y sus propiedades inelásticas. (Hodzic, 2014)

1.4.2. Propiedades térmicas

Al incrementar la temperatura, las cadenas moleculares empiezan a vibrar a mayor frecuencia continuando hasta llegar al deterioro y combustión fibrilar. Cabe recalcar que

la fibra de yute se desintegra y se destruye al trabajar a temperaturas superiores a su temperatura de combustión, mas no se funde. Por lo que la generación de residuos es mínima.

El calor específico del yute es alto $1.36x10^3$ J/kgr*K en comparación con otras fibras naturales, además este brinda a la fibra una elevada capacidad de aislamiento térmico. La temperatura de combustión del yute es de 193°C, la cual no es muy elevada, por esta razón esta fibra natural es susceptible al fuego. Como todas las fibras naturales celulósicas el yute pierde gradualmente sus propiedades mecánicas de resistencia al estar expuesta a la luz solar. (Hodzic, 2014)

1.4.3. Propiedades eléctricas

El yute seco presenta una alta resistencia eléctrica, pero cuando este se humedece, el sistema disminuye y su resistencia eléctrica cae aproximadamente 10 000 veces. A continuación, se presentan diferentes valores de constantes dieléctricas del yute a diferentes porcentajes de humedad, Tabla 1.6. (Hodzic, 2014)

Tabla 1.6. Humedad y constante dieléctrica de fibras de yute.

Frecuencia [KHz]	Humedad [%]	Constante dieléctrica
2	Seco (0)	1.8
2	65	2.4
2	100	3.6

(Fuente: Agricultura, 2017)

1.4.4. Propiedades ópticas

Las tonalidades de la fibra de yute varían dependiendo de cada especie, cambian desde tonos cremas pálidos hasta amarillos y marrones oscuros. Por ejemplo, unas de las variedades de yute el “Tossa” tiende a tener un tono más rojizo, mientras que las fibras de yute de la especie blanca varían entre amarillo pálido y amarillo. El yute que se encuentra en excelentes condiciones presenta excelente brillo. Las fibras que poseen una orientación molecular simétrica presentan una buena cantidad de birrefringencia, aproximadamente de +0.0441, este es el índice de diferencia entre la refracción a lo largo de la fibra y el eje perpendicular. (Hodzic, 2014)

1.4.5. Propiedades químicas

Las fibras naturales poseen tres grupos principales que constituyen más del 97% del total de su estructura, las propiedades químicas de la fibra dependen directamente de estos grupos, estos son: alfa celulosa, hemicelulosa y lignina.

El yute tiene una elevada cantidad de hemicelulosa, sus valores oscilan entre el 21-25% y de este porcentaje tiene composiciones del grupo ácido lignina que varían entre el 12-14%, lo que le convierte en una fibra ácida y susceptible al álcali. La acidez de la fibra se debe al grupo carboxílico e hidróxilo fenólico. (Hodzic, 2014)

1.5. Zonas de cultivo de yute

La producción de yute, Figura 1.5, se da en zonas tropicales y subtropicales alrededor del mundo. Esto se debe principalmente a la facilidad de abastecimiento de agua a través de fuentes naturales de riego. En estas regiones el riego proviene de afluentes como ríos, lagos y acuíferos. Además, la alta humedad en el aire y probabilidad de lluvia constante durante todo el año ayudan más al abastecimiento de agua para los cultivos. Históricamente la producción de esta fibra se ha realizado a las orillas de los ríos Ganges, Irawadi, Yangtzé, Amazonas y en el territorio aledaño a Bangladesh. De estos lugares se obtiene aproximadamente el 80% de la producción mundial de yute. Otros países como Myanmar, Nepal, China, Vietnam, Tailandia y Brasil han incrementado su producción de yute en los últimos años. (Bunsell, 2018)

Figura 1.5. Plantación de yute.

(Fuente: Bunsell, 2018)

1.5.1. Importancia del yute dentro de la economía mundial

La producción de yute juega un papel importante dentro de la economía de los países productores, miles de familias agricultoras de escasos recursos conforman la base para el cultivo y la producción de esta fibra. Según datos de organizaciones internacionales, aproximadamente 12 millones de familias dependen directamente del cultivo de yute. Dentro del producto interno bruto de Bangladesh (uno de los principales países productores) la producción de yute en la economía representa un 4% y de las exportaciones un 4.05%. Lo que nos demuestra la importancia del cultivo de esta fibra

natural en este país. Además de obtener la fibra de yute los desperdicios de su cultivo (hojas, ramas, etc..) pueden ser utilizados para la producción de combustibles orgánicos, construcción de elementos estructurales básicos o artesanías. (Hodzic, 2014)

La producción agrícola del yute presenta varias ventajas, una de ellas es la posibilidad de ocuparlo para multicultivos con especies vegetales de similares características para la producción, además, al ser una especie de tallo, el yute brinda protección en contra de plagas y permite que los nutrientes se mantengan activos en las zonas de cultivo.

1.5.2. Aplicaciones

El yute y su fibra han sido utilizados para la fabricación de productos y herramientas que servían para la protección del hombre como las telas para el resguardo de los hogares, cortinas y tapices. Apropiadamente desde los siglos XIX y XX sus aplicaciones incluían la fabricación de embalaje para otros productos a partir de bolsas o sacos, fabricación de cuerdas y arpillera. Todo debido a sus elevadas propiedades de resistencia y durabilidad. Aunque el costo de producción es bajo, con el tiempo las fibras sintéticas comenzaron a reemplazar al yute. (K.L. Pickering, 2008)

Actualmente en la industria mundial se busca utilizar materiales que sean reutilizables o que cuya descomposición no afecte al medio ambiente. La investigación de sus propiedades ha generado interés en las ventajas de las fibras naturales. En el caso del yute se han obtenido resultados satisfactorios en las siguientes industrias:

(i) Textil. - Telas (hogares, vestimenta), moda (bolsos y accesorios).
(ii) Construcción. - Revestimiento de paredes (aislamiento térmico y acústico), revestimiento de pisos.
(iii) Automotriz. - Material de refuerzo estructural, textiles técnicos.
(iv) Nuevos materiales. - Geotextiles, reemplazo de asbestos, tableros particulados.

(K.L. Pickering, 2008)

1.6. Textiles

La palabra textil proviene del latín texere que significa tejer y originalmente se usaba solo para tejidos; sin embargo, el término textil en la actualidad abarca a cualquier producto que es fabricado a partir de fibras, filamentos e hilos. Las telas textiles son estructuras que están hechas de hilos o fibras en forma de un plano (esencialmente una

superficie nivelada) que es una estructura que tiene un área mucho mayor en relación con su grosor. (Bunsell, 2018)

Los hilos y las fibras son estructuras cilíndricas y muy largas en relación con su diámetro. Las fibras son la unidad fundamental de los hilos y por lo tanto son el componente fundamental de los tejidos. Las propiedades de cualquier hilo dependen de las propiedades de las fibras, componentes y estructuras que lo conforman. Las propiedades de cualquier fibra dependen de su estructura química y física.

Los hilos pueden hacerse a partir de una fibra o de mezclas de fibras dependiendo de los requerimientos del tejido definitivo en términos de rendimiento, manejo y apariencia. Existe una variedad de técnicas para hacer hilos con perfiles regulares e irregulares. Los hilos con perfiles regulares se denominan hilos regulares, mientras que los que tienen perfiles irregulares se denominan hilos de fantasía. (Townsend, 2011)

Los textiles pueden ser fabricados a partir de una gran variedad de técnicas. Las telas se clasifican en:

(i) Tejidos
(ii) Tejidos de punto
(iii) Tejidos retorcidos y anudados
(iv) No tejidos
(v) Tejidos compuestos

(Townsend, 2011)

1.6.1. Clasificación de textiles por tipo de tejido

Las telas tejidas se producen entrelazando dos conjuntos de hilos, conocidos como urdimbre y trama, en ángulos rectos entre sí. Los hilos de urdimbre corren paralelos al orillo (borde de la tela reforzada) y a lo largo de la tela, cada hilo de urdimbre se conoce como extremo. Los hilos de la trama recorren la tela desde el orillo hasta el otro orillo y se llaman picos. (Kozłowski, 2012)

Los tipos de tela más comunes en la industria son:

(i) Plano
(ii) Sarga
(iii) Satín
(iv) Leno

A continuación, en la Tabla 1.7, se comparan cualitativamente algunas propiedades de los tipos de tejido.

Tabla 1.7. Análisis cualitativo de las propiedades de los tejidos.

Propiedades	Plano	Sarga	Satín	Leno
Estabilidad	Buena	Aceptable	Pobre	Excelente
Área cubierta	Pobre	Buena	Excelente	Pobre
Porosidad	Aceptable	Buena	Excelente	Aceptable
Suavidad	Pobre	Aceptable	Excelente	Pobre
Balance	Buena	Buena	Pobre	Buena
Simetría	Excelente	Aceptable	Muy pobre	Buena
Rizado	Pobre	Aceptable	Pobre	Pobre

(Fuente: Townsend, 2011)

1.6.1.1. Tejido plano

En el plano liso, los hilos de la urdimbre se levantan alternativamente permitiendo que el hilo de la trama se entrelace con cada extremo y forme una tela apretada. El tejido plano es el tejido más simple y utilizado de todos debido a que tiene el número máximo de puntos entrelazados o de unión posibles. Es más firme y fuerte que la mayoría de las otras estructuras de tejido.

Las telas tejidas ligeras se hacen generalmente en tejido plano para asegurar que los extremos y los picos no se deslicen unos sobre otros y causen que la tela se distorsione. Un ejemplo se muestra en la Figura 1.6. (Townsend, 2011).

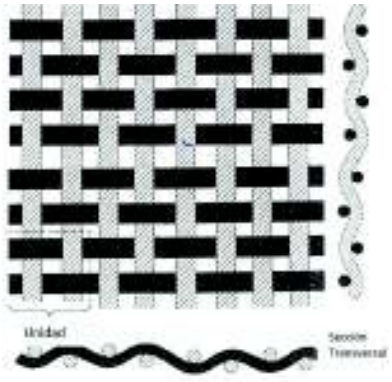


Figura 1.6. Tejido plano.

(Fuente: Horrocks & Anand, 2000)

1.6.1.2. Tejido sarga

Estos tejidos se caracterizan por generar líneas diagonales en la cara de la tela, Figura 1.7. Para su fabricación los hilos de la trama de la tela cruzan y flotan sobre al menos dos hilos de la urdimbre antes de volver a hundirse.

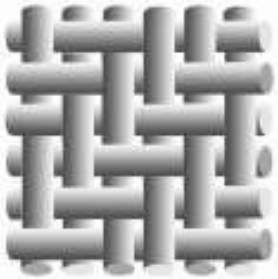


Figura 1.7. Tejido Sarga.

(Fuente: Townsend, 2011)

El tejido sarga se encuentra entre las construcciones de tejido más duraderas. Son tejidos compactos que poseen una permeabilidad baja y una gran resistencia al viento. Estos tejidos son más plegables que los tejidos planos debido a su estructura entrelazada y tienden a no generar arrugas. Los tejidos sarga tienden a ensuciarse menos y son más duraderos. La mayor aplicación de los tejidos sarga es la confección de telas de recubrimiento. A continuación, en la Tabla 1.8, se presenta la clasificación de los tejidos sarga. (Townsend, 2011)

Tabla 1.8. Clasificación de los tejidos sarga.

2/2 Sarga	Un tejido ondulatorio que tiende a generar un efecto diagonal en la tela. El ángulo de la diagonal en la tela depende del sentido de fabricación. Los tejidos sarga tienen más puntas que picos por cm y estas tienen líneas diagonales a más de 45°.	
3/1 Sarga	La estructura utilizada para la mayoría de las telas denims.	

(Fuente: Townsend, 2011)

1.6.1.3. Tejido satén

El tejido satén en realidad es una distribución de tejido sarga modificado, Figura 1.8. Los tejidos de satén poseen buena humectación y bajo contenido de grasa. Estas características permiten que las propiedades mecánicas del tejido en general sean buenas. Una gran desventaja de este tejido es la asimétrica final en la disposición de sus fibras, esto genera concentradores de tensión al momento de su fabricación. (Townsend, 2011)

(a) (b)

Figura 1.8. (a) Tejido satín urdimbre (b) Tejido trama satín.

(Fuente: Townsend, 2011)

1.7. Materiales compuestos de función matriz/refuerzo

Un material compuesto puede ser definido como un material multifase, que busca conseguir la combinación de las propiedades de sus constituyentes y obtener características que no son posibles de conseguir de los materiales originales. Los materiales constituyentes no deben ser químicamente similares y deben estar separados por una interfase que se distinga. Las propiedades de los compuestos dependen de las propiedades de los materiales que los conforman como: proporciones de material, geometría de fibra o grado de dispersión la cual afecta directamente las características del nuevo material. Un material compuesto está conformado por: matriz, refuerzo e interfase. (Callister, 2010)

La principal propiedad de un refuerzo es mejorar la característica de la matriz. El refuerzo puede proporcionar características de conductividad eléctrica, aislamiento, estabilidad térmica, soporte estructural. En el caso del presente estudio el tejido de yute actúa como refuerzo de la matriz poliéster. El objetivo de la interfase entre la matriz y el refuerzo es asegurar que exista una adecuada unión entre los dos materiales, si existe un buen diseño de interfase del material compuesto, se asegura que las cargas aplicadas al material sean transmitidas adecuadamente desde la matriz hacia el refuerzo. (Callister, 2010)

1.7.1. Matriz polimérica

En un material compuesto la matriz posee la función de mantener unidas, uniformes y protegidas a las fibras del medio que las rodea. Entre las propiedades que la matriz brinda al material compuesto se tiene: la rigidez, tolerancia al daño, resistencia al impacto y a la abrasión. Las propiedades de la matriz determinan la temperatura máxima de uso, resistencia a los fluidos, estabilidad térmica y oxidativa. (Adams, 2001)

La matriz polimérica se clasifica en:

(i) Matriz termoplástica

Polímeros que se derritan y se vuelvan más blandos ante el calor son un claro ejemplo de polímeros termoplásticos, Figura 1.9, estos están constituidos de cadenas lineales de moléculas que poseen fuertes lasos intermoleculares pero débiles lasos intramoleculares. La solidificación y el derretimiento de estos polímeros son reversibles y pueden ser remodelados al existir cambios en la temperatura o en la presión. Este tipo de polímeros son semicristalinos o amorfos en estructura. Entre polímeros termoplásticos tenemos: polietileno (PE), poliestireno (PS), nylon, policarbonato (PC), poliacetales, poliamida-imida, poliéster-éter cetona (PEEK). (Campbell, 2014)

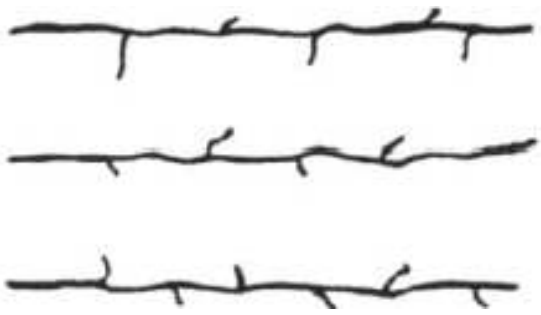


Figura 1.9. Matriz termoplástica.

(Fuente: Adams, Advani, Alman, & Andressen, 2001)

(ii) Matriz termoestable

Los plásticos termoestables poseen estructuras en red o entrecruzadas con enlaces covalentes entre las moléculas, Figura 1.10. Este tipo de estructuras no se vuelven más blandas frente al calor, estas se descomponen. Una vez que se ha logrado la solidificación a través de entrecruzamiento, este tipo de plásticos no pueden ser reformados. (Campbell, 2014)

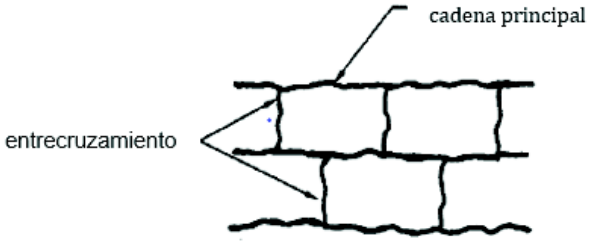


Figura 1.10. Matriz termoestable.

(Fuente: Adams, Advani, David E. Alman, & Finn Roger Andressen, 2001)

1.7.2. Resina poliéster

En la industria el poliéster es utilizado ampliamente en aplicaciones comerciales, pero en ciertos casos su uso es limitado para la investigación de materiales compuestos de alto rendimiento. Poseen buenas propiedades mecánicas, resistencia a la temperatura y resistencia a la intemperie en comparación a otras resinas de mayor precio. Un poliéster típicamente consta de tres ingredientes: poliéster, un agente de reticulación (estireno), un iniciador (peróxido) y como catalizador el metiletilcetona (MEKP) o el peróxido de benzolio (BPO). (MORTENSEN & Ecole, 2007)

El agente de reticulación disminuye la viscosidad lo que permite una mejor procesabilidad del poliéster. También existen otros agentes de curado como: vinilo tolueno, cloroestireno que genera retardo en la llama o el metacrilato de metilo que mejora la resistencia a la intemperie. Las propiedades de resistencia del poliéster dependen del curado, por lo que la selección de un apropiado agente beneficia al correcto desempeño del poliéster. Una de las ventajas más importantes del poliéster es que se curan a temperatura ambiente o a elevadas temperaturas, permitiendo una gran versatilidad para su procesamiento. La estructura básica de un poliéster podemos observar en la Figura 1.11, esta contiene un grupo éster y grupos insaturados o grupos de unión doble C = C. (MORTENSEN & Ecole, 2007)

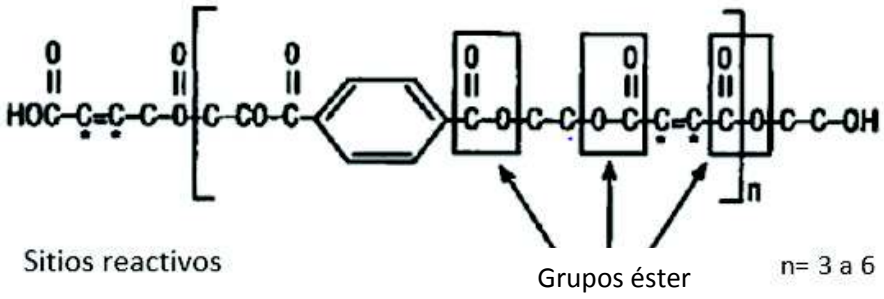


Figura 1.11. Estructura básica de un poliéster.

(Fuente: Adams, Advani, Alman, & Andressen, 2001)

1.8. Técnicas de fabricación de materiales compuestos

En la industria tradicional la fabricación de elementos mecánicos, tuberías, paneles entre otros se basa en el moldeado, maquinado y unión de materia prima sólida que puede venir en diversas formas como son: bloque, varilla o planchas. Para la fabricación de productos a partir de materiales compuestos se debe considerar que varias de las propiedades del nuevo material pueden variar dependiendo de las técnicas de manufactura que se aplique durante la post fabricación. Es por eso que previo a su fabricación y aplicación se debe considerar la técnica más apropiada de fabricación del nuevo material y de esta manera reducir la cantidad de procedimientos post manufactura para obtener el producto deseado a partir del nuevo material. (Campbell, 2014)

Cuando la fabricación y la manufactura del nuevo material son realizados paralelamente, el diseñador debe considerar como estas condiciones de fabricación influenciará las propiedades del producto final. Además, en materiales compuestos anisotrópicos se debe tener consideraciones especiales de manufactura para la matriz/refuerzo y de esta manera establecer una técnica apropiada de manufactura. (Adams et al., 2001)
A continuación, se resumen las técnicas más aplicadas para la fabricación de materiales compuestos.

(i) Pultrusión. - En el proceso de pultrusión el refuerzo fibroso continuo se impregna con la matriz y luego continúa para consolidarse en un compuesto sólido, un ejemplo de esto se observa en la Figura 1.12. (Campbell, 2014).

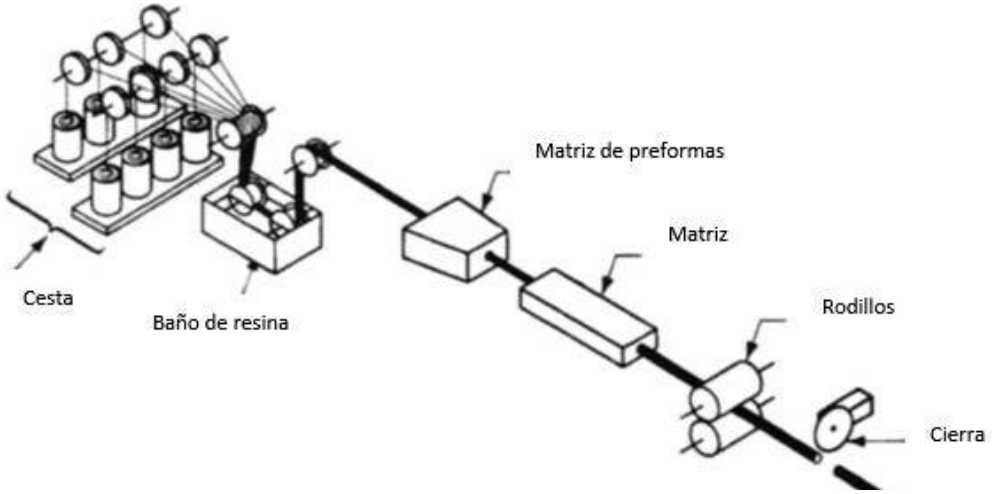


Figura 1.12. Proceso de pultrusión.

(Fuente: Campbell, 2014)

(ii) Técnica “HAND LAY UP”. - Esta técnica consiste en colocar un refuerzo seco, generalmente un tejido o una tela que es manualmente colocado en la posición del molde. Luego se procede a colocar la resina liquida de baja viscosidad al refuerzo por vertido, cepillado o pulverización. A partir de aquí se comienza a densificar al compuesto a través de rodillos que se utilizan en la superficie del material. Además, este proceso permite la humidificación del tejido y se elimina los excesos de resina y aire atrapado, Figura 1.13. (Campbell, 2014)

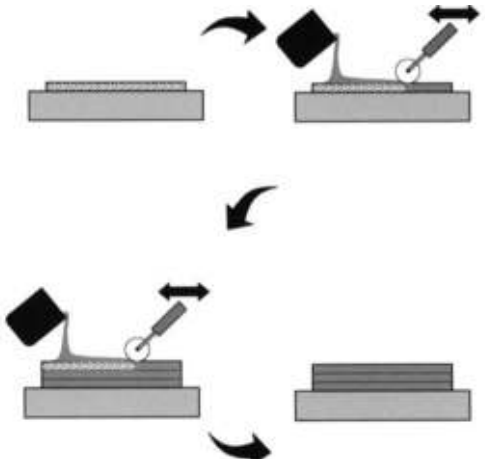


Figura 1.13. Proceso Handy Lay Up.

(Fuente: Campbell, 2014)

(iii) Moldeo por compresión. - Es un proceso de alto volumen y alta presión adecuado para el moldeo de piezas complejas reforzadas con fibra de alta resistencia que utilizan resinas termoestables o termoplásticas, Figura 1.14. (Campbell, 2014)`

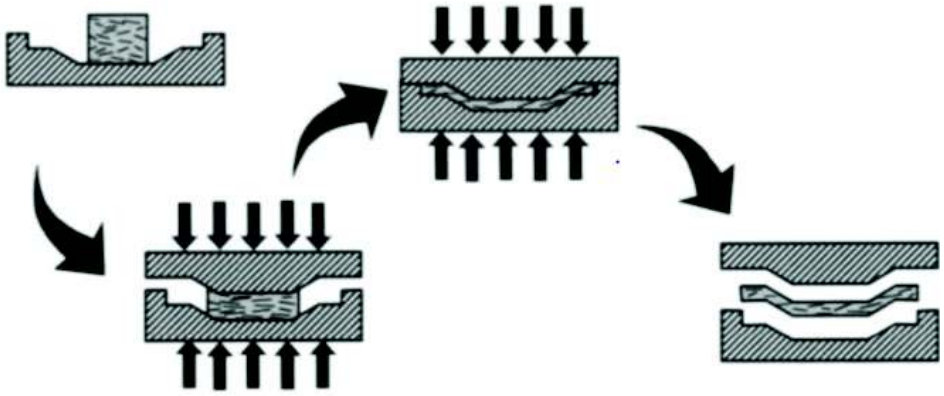


Figura 1.14. Moldeo por compresión.

(Fuente: Campbell, 2014)

(iv) Moldeo por inyección. - El material se funde a medida que avanza por el tornillo mediante una combinación de calor del cilindro y la acción de cizallamiento del tornillo. El material se acumula en el barril y luego se inyecta a alta presión en forma de fluido caliente en un troquel cerrado relativamente frío, Figura 1.15. (Campbell, 2014)

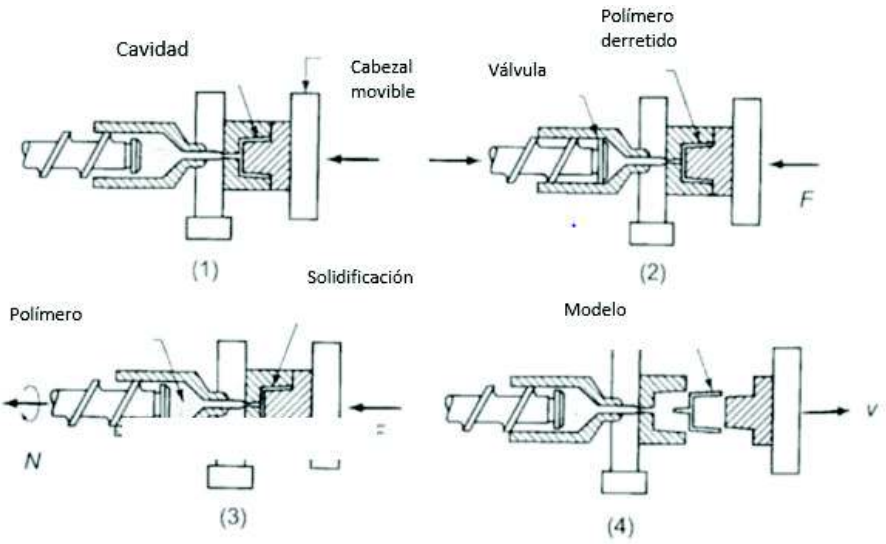


Figura 1.15. Moldeo por inyección.

(Fuente: Campbell, 2014)

(v) Moldeo por inyección de reacción estructural. – Es un proceso de fabricación rápida de materiales compuestos ya que utiliza resina de reacción y curado rápido que es inyectada a presión en los moldes de fabricación, Figura 1.16. (Campbell, 2014)

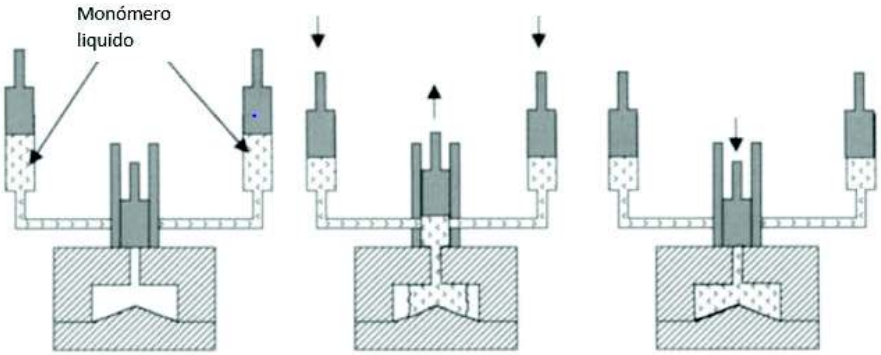


Figura 1.16. Inyección de reacción estructural.

(Fuente: Campbell, 2014)

A continuación, en la Tabla 1.9, se resumen las consideraciones que se toman en cuenta al fabricar un material compuesto.

Tabla 1.9. Requerimientos necesarios para la fabricación de materiales compuestos.

Requerimientos necesarios para la fabricación de un material compuesto
Refuerzo
Tipo
Continuo o discontinuo
Aleatorio u ordenado
Tamaño, agente aglomerante y tratamiento superficial
Fracción volumétrica
Características del tejido
Matriz
Termoplástica o termoestable
Temperatura de tolerancia
Tolerancia a condiciones ambientales
Compatibilidad con el refuerzo

(Fuente: Adams, 2001)

1.9. Precarga en materiales compuestos

El precargar a un elemento es introducir o inducir esfuerzos permanentes internos que contrarresten la acción de fuerzas externas como consecuencia de la función del elemento. La precarga permite extender el rango de esfuerzos que el elemento puede soportar previo a la fractura o deformación. Esta fuerza debe encontrarse dentro de los límites de esfuerzos que puede soportar indefinidamente el material sin tener consecuencias en sus propiedades. (Group, Engineers, Society, & Group, 2006)

Una de las aplicaciones de la precarga en elementos estructurales es el diseño de columnas de concreto, al diseñar una precarga, esfuerzos iniciales de compresión son inducidos a la columna para contrarrestar cargas de tracción resultantes, Figura 1.17. Si los esfuerzos de compresión inducidos resultantes son iguales a los esfuerzos de tensión, los dos se cancelan. (Engineers, Society, & Group, 2006)

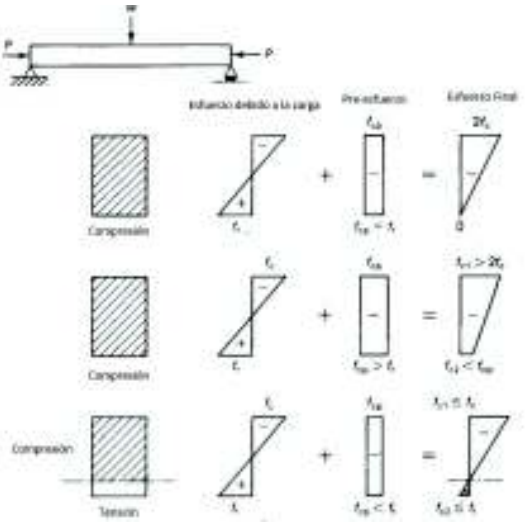


Figura 1.17. Vigas precargadas.

(Fuente: Engineers, Society, & Group, 2006)

1.10. Precarga en fibras

La precarga es transmitida como un esfuerzo de tensión generado por el banco de pruebas, esta carga axial es perpendicular a la sección transversal del tejido de fibra, Figura 1.18. Este esfuerzo puede ser considerado como una carga normal uniaxial σ_1.

El material compuesto matriz/refuerzo, puede ser considerado como un material ortotrópico, pero al ser precargado a través de su eje principal, las deformaciones generadas en él son similares a las que generan en materiales isotrópicos. A partir de esto se tiene la Ecuación 1.1, 1.2 y 1.3. (F. Hassan & Abdullah, 2016)

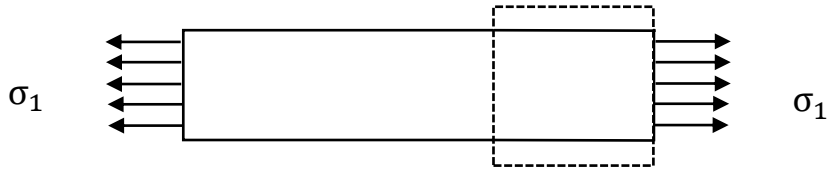


Figura 1.18. Fuerzas externas sobre un material compuesto.

(Fuente: Propia)

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1}$$

Ecuación 1.1. Tensión axial.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

$$\varepsilon_2 = \frac{\nu_{12}\sigma_1}{E_1}$$

Ecuación 1.2. Tensión axial.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

$$\gamma_{12} = 0$$

Ecuación 1.3. Tensión Transversal.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

Las posiciones σ1 denotan las direcciones longitudinales y transversales respectivamente. Antes del curado del material, los esfuerzos de la matriz (σ_m) y de la fibra (σ_f) están representados por la Ecuación 1.4.

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_f$$

Ecuación 1.4. Carga normal axial.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

Donde $\sigma_m = 0$ debido a que la matriz no curada posee dureza despreciable.

Entonces $\sigma_f = \sigma_1$, a partir de aquí se obtiene la Ecuación 1.5.

$$\sigma_1 = \frac{F_e}{A_f}$$

Ecuación 1.5. Carga normal axial.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

Donde:

F_e : Es la fuerza inicial o precarga aplicada a la fibra

A_f : Área transversal de la fibra

Durante el curado de la resina se generan esfuerzos residuales debido al encogimiento y la expansión térmica lo que genera cambios en el volumen del material. Los esfuerzos generados en la fibra y la matriz después del proceso de curado pueden ser expresados como la Ecuación 1.6.

$$\sigma_f^{ac} = \sigma_f + \sigma_f^c + \sigma_T$$

$$\sigma_m^{ac} = \sigma_m^c + \sigma_T$$

$$\sigma_T = E^S \alpha \Delta T$$

Ecuación 1.6. Matriz de esfuerzos generados.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

Donde:

σ_f^{ac} : Esfuerzos generados en la fibra después del proceso de curado

σ_m^{ac} : Esfuerzos generados en la matriz después del proceso de curado

σ_f^{c} : Esfuerzos residuales generados en la fibra

σ_m^{c} : Esfuerzos residuales generados en la matriz

σ_T : Esfuerzos generados por la variación térmica

Después del proceso de curado en el material, existen dos fuerzas que deben ser balanceadas, la precarga de tracción y las diferentes cargas adhesivas entre la matriz y la fibra. Como resultado en el material compuesto se generarán esfuerzos compresivos en la matriz. Por lo tanto, los esfuerzos de precarga generados en material son expresados por la Ecuación 1.7.

$$\sigma_f^{arp} = \sigma_f^{c} + \sigma_f^{t}$$

$$\sigma_m^{arp} = \sigma_m^{c} + \sigma^{r}$$

$$\sigma_f = \sigma_f^{t} + \sigma^{r}$$

Ecuación 1.7. Matriz esfuerzos liberados.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

Donde:

σ_f^{arp} : Esfuerzo σ_f después de liberar la precarga al material

σ_m^{arp}: Esfuerzo σ_m después de liberar la precarga al material

σ_f^{t} : Esfuerzo de tensión residual en el material

σ^{r}: Esfuerzo liberado a la matriz

Una vez considerados los efectos de curado en el material precargado y una vez liberada la precarga, las deformaciones principales ε_1 varían de acuerdo a la Ecuación 1.8.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_f + \varepsilon_T = \Delta\varepsilon = \varepsilon_m$$

Ecuación 1.8. Deformación de la matriz después de liberar la precarga del material.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

Donde:

ε_f : Deformación de la fibra después de que la carga fuera liberada

ε_T : Deformación debido a la temperatura ΔT con respecto al coeficiente de expansión térmica α del molde de acero

Como el material compuesto es considerado como un material ortotrópico, entonces las relaciones esfuerzo deformación pueden ser consideradas en la ecuación 1.9.

Donde se obtiene el esfuerzo transversal faltante σ_2 para completar el modelo de comportamiento del material precargado.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E1} & \frac{-v_{21}}{E2} & 0 \\ \frac{-v_{12}}{E1} & \frac{1}{E2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G12} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \sigma 1 \\ \sigma 2 \\ \tau 12 \end{pmatrix}$$

Ecuación 1.9. Esfuerzo transversal.

(Fuente: F. Hassan & Abdullah)

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe cada uno de los elementos necesarios para el desarrollo experimental, fabricación y caracterización mecánica del nuevo material. A continuación, se muestra de manera abreviada cada uno de los temas principales del presente capítulo.

(i) Materiales. - Propiedades físicas y características técnicas de cada uno de los materiales empleados para la fabricación del compuesto.

(ii) Equipos. - Características técnicas principales de cada equipo que fue empleado durante el proceso de elaboración, caracterización y análisis microscópico de las probetas.

(iii) Elaboración de probetas. - Dimensionamiento geométrico en base a las normas correspondientes de cada uno de los ensayos mecánicos que van a ser realizados para la caracterización del nuevo material.

(iv) Diseño del prototipo de precarga.

(v) Procedimiento experimental. - Proceso estandarizado para la fabricación del nuevo material especificando cada una de las condiciones necesarias para la fabricación del compuesto.

2.1. Materiales y equipos

2.1.1. Materiales

Para la fabricación de un material es necesario definir las características físicas de cada una de las materias primas necesarias para su fabricación. A continuación, se describen las características de resistencia máxima a la rotura, características geométricas del tejido plano de yute y la caracterización de la resina poliéster empleada para la fabricación del nuevo material.

2.1.1.1. Resina poliéster

2.1.1.1.1. Caracterización de la resina poliéster

En la ficha técnica del SINTAPOL 437 se menciona que es una resina poliéster insaturado tipo orto-ftálico transparente para uso general, el resto de información de este material se encuentra en el Anexo II. El proveedor proporciona propiedades generales de la resina líquida, además, de información acerca del suministro del material como también de la forma en la que se almacenó.

Para confirmar la correcta procedencia del material que se va a utilizar en el proyecto de titulación, se realizaron ensayos de espectrometría de una muestra del material.

2.1.1.1.2. Espectrometría infrarroja

La espectrometría infrarroja es una técnica comúnmente utilizada debido a que presenta ventajas como:

(i) La rapidez que otorga resultados de sensibilidad.
(ii) Facilidad de manejo.
(iii) La gran variedad de técnicas para muestras gaseosas, liquidas y sólidas.

Esta técnica se basa en la interacción de la radiación infrarroja emitida por el banco de pruebas con la materia por lo tanto permite identificar varios materiales como los polímeros. El resultado de este estudio proporciona un espectro infrarrojo que es la capacidad de absorber o transmitir rayos infrarrojos de un material. Todo esto en función de las frecuencias y longitudes de ondas. En la Figura 2.1, se tiene un ejemplo del resultado de una espectrometría. (Eaborn, 2002)

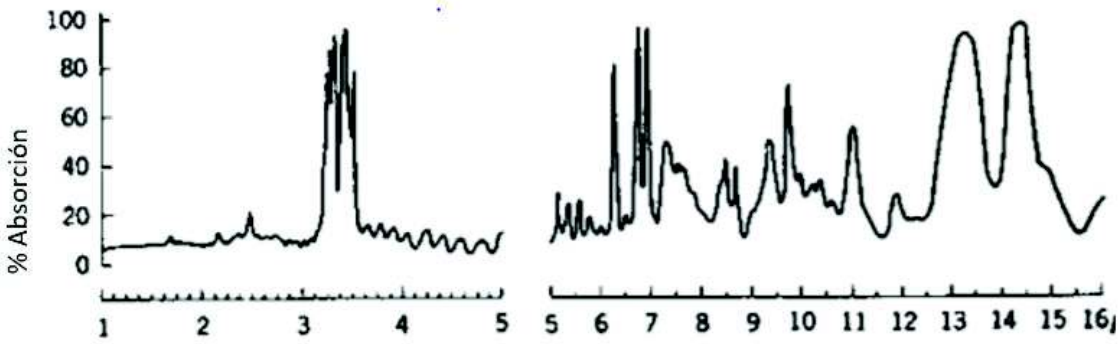


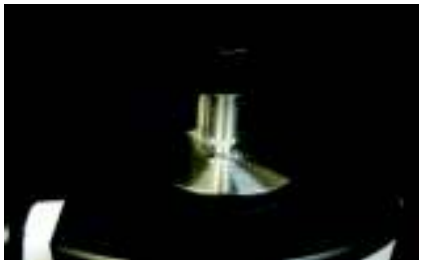
Figura 2.1. Ejemplo de espectrometría.

(Fuente: Eaborn, 2002)

2.1.1.1.3. Equipos de espectrometría infrarroja

A continuación, en la Tabla 2.1, se presenta cada uno de los equipos utilizados durante los ensayos de espectrometría infrarroja.

Tabla 2.1. Equipos utilizados durante la prueba de espectrometría.

Equipo	Fotografía	Modelo
Mortero		N/A
Accesorio de reflectancia de punta de diamante		ATR PRO ONE Single-reflection
Espectrómetro		FT/IR-6800 FT-IR Spectrometer

(Fuente: Propia)

2.1.1.2. Tejido de yute

2.1.1.2.1. Caracterización mecánica del tejido de yute

El ensayo de rotura del tejido de yute representa una etapa importante para el desarrollo de este estudio ya que brinda información acerca del valor máximo de resistencia del tejido, a partir de estos datos se determina la precarga del nuevo material. La caracterización se realizó a un tejido plano de yute bajo la norma ASTM 5035 que corresponde al método de prueba estándar para fuerza de rotura y elongación de tejidos textiles. Las probetas fueron de tipo 2C de dimensión 50 mm (2in).

2.1.1.2.2. Caracterización dimensional del tejido de yute

En la Figura 2.3, se muestra la distribución de fibras del tejido de yute, como se observa este tejido corresponde a un tejido plano, Figura 1.6, además, posee una distribución más uniforme que otros tipos de tejidos naturales que se encuentran en el mercado.

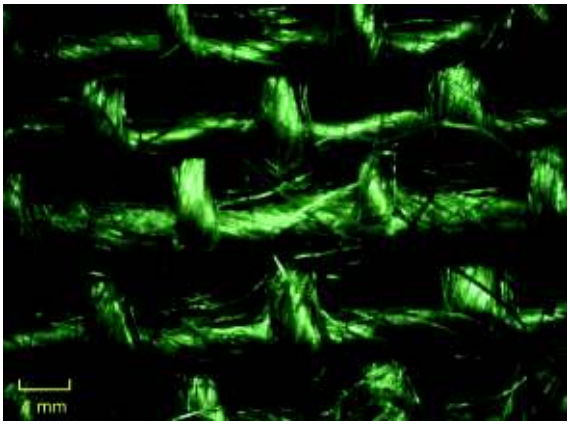


Figura 2.2. Distribución de hilos de yute en el tejido.

(Fuente: Propia)

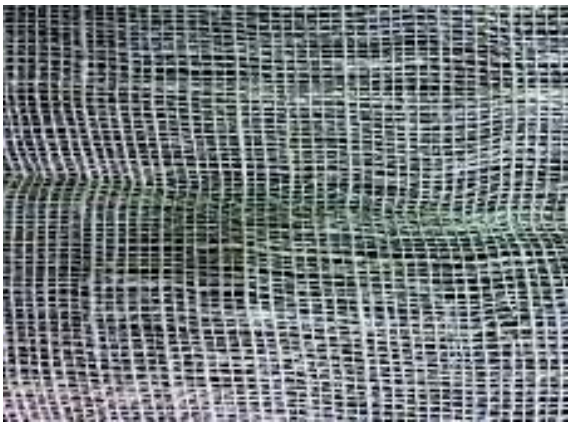


Figura 2.3. Distribución del tejido comercial.

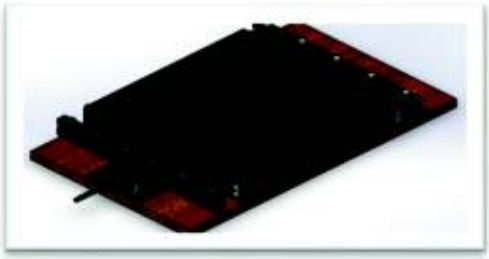
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.2, se muestra una ampliación del tejido natural el cual posee una distribución entre hilos de yute de 1.23 mm aproximadamente.

2.1.2. Equipos

A continuación, en la Tabla 2.2, se detallan los equipos que fueron empleados para la elaboración del material compuesto de matriz poliéster reforzado con tejido plano de yute precargado, pruebas de caracterización de la resina poliéster, procedimientos de ensayos mecánicos de tensión, flexión e impacto y el análisis de microscopia óptica.

Tabla 2.2. Equipos.

Equipo	Descripción
 **Molde de precarga**	El molde está construido de acero negro ASTM A36 a partir de planchas de 10, 12 y 15 mm de espesor en el cual se tiene placas de resina poliéster con fibra de yute, cuyas dimensiones son de 260 x 260 x 4 mm. En la sección 2.4 desarrollaremos más el diseño del molde de pretensión.
Máquina universal de ensayos Instron	El sistema universal de ensayos instron de doble columna tiene aplicaciones para ensayos de tracción y compresión. Los ensayos están diseñados para valores inferiores a los 50 KN. En el mercado existen modelos de capacidad de fuerza de: 5, 10, 30 y 50 KN.
OHAUS modelo adventurer	Este modelo posee una capacidad máxima de 520 gr, además, de tener una apreciación de 0.1 mgr.
Electroscopio Meiji EMZ-13TR	Posee una visualización de imágenes de alta calidad, el cambio de muestras y la foto microscopía se realizan teniendo en cuenta la ergonomía, permite la corrección de objetivos a una ampliación de 4X, 10X, 40X y 100X

(Fuente: Propia)

2.2. Moldeo por compresión

El proceso de moldeo por compresión manual es una técnica convencional de manufactura de materiales compuestos de matriz polimérica, todo bajo condiciones específicas de temperatura y presión. Esta técnica reduce la probabilidad de variación de propiedades físicas en el material y además ayuda a mantener las propiedades isotrópicas. (Adams et al., 2001) Esto se debe a que no permite el cambio en la orientación de las fibras o el tejido. El proceso de manufactura de un material puede beneficiar o disminuir las propiedades mecánicas o térmicas del material, el moldeo por compresión permite obtener materiales con elevada resistencia a la tracción y al impacto. El moldeo por compresión es normalmente utilizado para producir un gran número de elementos o piezas como por ejemplo en la industria automotriz. (Daniel & Ori Ishai, 2006)

Existen dos técnicas de moldeo por compresión para materiales compuestos:

(i) Moldeo por compresión en frío. - Este proceso se caracteriza por utilizar la presión generada en las placas durante la fabricación del nuevo material, esto significa que el curado es realizado a la temperatura que se encuentre la habitación.

(ii) Moldeo por compresión en caliente. - Este proceso se caracteriza porque además de la presión, se utiliza calor, que es transmitido a las placas durante el proceso de fabricación del material.

La selección de cualquiera de las técnicas depende de la temperatura de curado necesaria aplicar al polímero, ya que existen polímeros que necesitan elevadas temperaturas y pueden afectar a las propiedades de la fibra natural. En este proyecto se optó por utilizar un moldeo por compresión en frio ya que nos permite garantizar las propiedades del tejido natural, además de la practicidad en el curado de la resina poliéster.

2.3. Diseño de la precarga

De las pruebas realizadas en la sección 2.1.1.2 se determinó que la fuerza máxima que resiste el tejido de yute es de 84 kgf o 824 N, a partir de este valor se estimó 5 grupos con diferentes cargas axiales que tomen como referencia el 20% de la carga máxima del tejido de yute. En la Tabla 2.3, se muestran cada una de las cargas en función del número de vueltas del tornillo sinfín de la máquina de precarga.

Tabla 2.3. Número de cargas en función del número de vueltas del tornillo sinfín.

N. de carga	Carga [%]	Carga [N]	N. de vueltas
1	0	0	0
2	5	41,19	3
3	10	82,38	6
4	15	123,56	9
5	20	164,75	11
6	25	205,94	13

(Fuente: Propia)

Para precargar el material, se colocó paralelamente al tornillo sinfín con un dinamómetro y se precarga el tejido en función del recorrido que hace el tornillo sinfín en la máquina de precarga.

2.4. Estrategia metodológica

La estrategia metodológica constituye la secuencia de actividades planificadas y organizadas sistemáticamente, las cuales permiten el cumplimiento de los objetivos planteados. En principio, se realizaron diferentes moldes posibles para la obtención del material compuesto, primero para determinar la factibilidad de producción de las placas y segundo la factibilidad de aplicar la precarga al tejido. Seguidamente se elaboraron placas con diferentes precargas aplicadas al yute. Posteriormente, se procedió con la caracterización mecánica mediante ensayos de tracción y flexión para determinar que precarga aplicada al yute ofrece mayor resistencia.

Para el compuesto que mostró mayor resistencia a tracción y flexión se elaboró placas de impacto, las mismas que fueron ensayadas mecánicamente mediante la caída del dardo.

2.4.1. Diseño del molde de precarga

Se fabricó un molde de tres partes en acero al carbono ASTM A36 con espesores de 8, 10 y 12 mm. En la Figura 2.4, se aprecia el molde utilizado. Los planos de este molde se encuentran en el Anexo III.

Figura 2.4. Molde de precarga para el tejido de yute.

(Fuente: Propia)

La aplicación de presión para el moldeo de las diferentes placas se realizó mediante el ajuste de 16 pernos M6x1.0x60 ubicados alrededor del molde. Para medir la presión ejercida por cada perno se utilizó un torquímetro.

Del molde elaborado se obtuvieron placas de 260x260x4 mm para ensayos mecánicos, las mismas que fueron cortadas mediante una máquina de corte a laser, Figura 2.5.

Figura 2.5. Máquina de corte a laser.

(Fuente: Propia)

2.4.1.2. Estimación de costos de fabricación del molde

Para este apartado se toma en cuenta factores como: el material del molde, madera, tornillos, tornillo sinfín y la mano de obra. De esta estimación se obtienen los costos finales como se observa en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Costo final del molde.

	Dimensiones [mm]	Cantidad	Precio c/u [USD]	Total [USD]
Placa	300x300x10	1	22	22
Placa	260x260x10	2	16,5	33
Placa	300x300x8	1	18	18
Placa	280x20x12	8	3	24
Placa	300x20x15	1	8,5	8,5
Placa	300x10x15	2	9	18
Placa	300x15x15	1	9,5	9,5
Placa	50x20x10	2	5	10
Madera	500x300x15	1	10	10
Tornillos	M6x1.0x60	40	0,25	10
Tornillo sinfín	1 [m]	1	12,5	12,5
Mano de obra		1	150	150
				326

(Fuente: Propia)

El costo final de fabricación es debido a que se utilizó acero al carbono de espesores 8, 10 y 12 mm. Estos espesores fueron utilizados para evitar que se pandee el molde al momento de realizar la compresión. Además, se busca conseguir un buen acabado superficial del material compuesto, esto no se hubiese logrado obtener con la utilización de planchas de madera.

2.5. Procedimiento experimental

2.5.1. Elaboración de probetas para ensayos mecánicos

Para la obtención del material compuesto se deben seguir ciertos requerimientos y de esta manera fabricar probetas adecuadas. Para esto se ha desarrollado un procedimiento detallado y un esquema de elaboración de probetas que se muestra en la Figura 2.6.

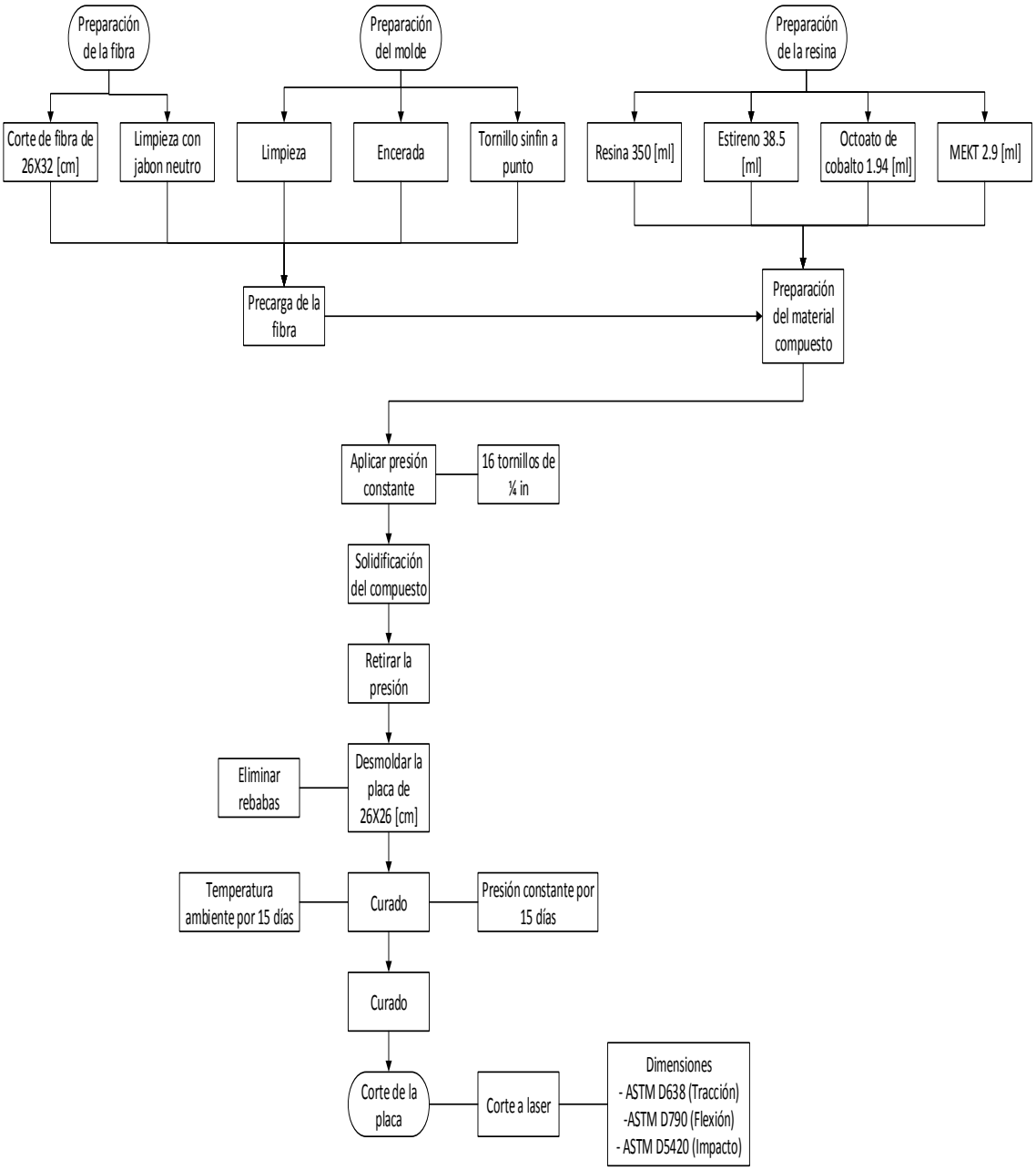


Figura 2.6. Metodología experimental de fabricación del material compuesto.

(Fuente: Propia)

A continuación, en la Figura 2.7, se muestra un diagrama de flujo con los tiempos necesarios para la fabricación del material compuesto.

# Tarea	Tarea	Operación	Transporte	Inspección	Almacenamiento	Tiempo	Notas
1	Almacenamiento de resina y fibras					-	Mantener a temperatura ambiente
2	Preparación del molde					28 min	Limpieza y encerada
3	Preparación de la fibra					23 min	Previamente lavar con jabon neutro
4	Precarga del refuerzo en el molde					2 min	Realizar la precarga correcta
5	Preparación de la resina					15 min	Mezclar homogeneamente los diferentes elementos
6	Colocación de la matriz en el molde					5 min	Verificar que la fibra este bien mojada
7	Esperar y nivelar la resina					19 min	Verificar que no tenga ninguna borbuja la resina
8	Colocar la tapa del molde					15 min	Ajustar de manera correcta los pernos
9	Solidificación					120 min	Mantener la presión ejercida por los pernos
10	Retirar la tapa del molde					30 min	Retirar con cuidado la tapa del molde
11	Inspección del acabado					3 min	Inspección visual
12	Eliminar las rebabas					5 min	Cortar con un estilete las rebabas
13	Curado					2 semanas	Mantener a temperatura ambiente
14	Corte de probetas					15 min	Verificar que sean las medidas acorde a la norma

Figura 2.7. Diagrama de flujo para el procedimiento experimental.

(Fuente: Propia)

2.5.2. Preparación de la resina

Las placas del material compuesto se obtuvieron mediante el proceso de compresión manual. La resina poliéster fue diluida con estireno monómero como se indica en la Figura 2.8, para obtener una solución con el 11% de concentración volumétrica de este solvente. Todo esto con la finalidad de reducir la viscosidad de la resina y así mejorar la mojabilidad de las fibras con la matriz.

Figura 2.8. Resina poliéster diluida.

(Fuente: Propia)

A continuación, se agregó octoato de cobalto a la resina diluida en una concentración volumétrica del 0.5%, con lo cual la resina diluida cambió de una tonalidad transparente a una rosada como se indica en la Figura 2.9.

Figura 2.9. Resina poliéster con octotato de cobalto.

(Fuente: Propia)

Posteriormente se agregó MEKT en una concentración volumétrica del 0.75% de la resina diluida y se obtuvo la mezcla final del material. En este punto la tonalidad de la resina diluida cambia de rosado a café como se muestra en la Figura 2.10.

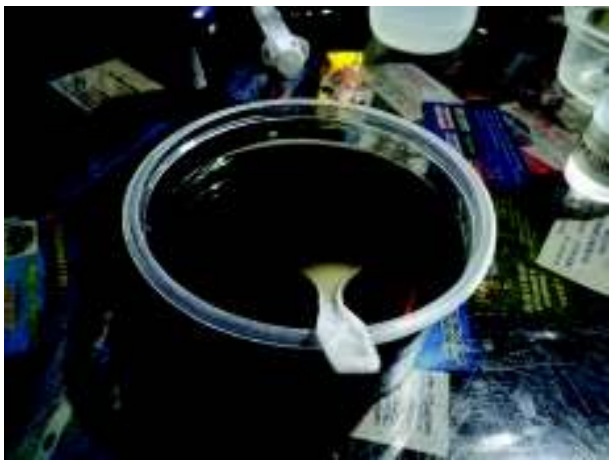


Figura 2.10. Resina poliéster diluida con MEKT.

(Fuente: Propia)

Finalmente, la matriz diluida fue depositada en el molde previamente recubierto con cera desmoldante.

Para la elaboración de probetas, previamente se definió la cantidad de resina que se debe utilizar para el llenado del molde.

Para la elaboración de cada placa se preparó 350 ml de resina poliéster, a la que se le agregó 38.5 ml de estireno, 1.94 ml de octoato de cobalto y 2.9 ml de MEKT. Los elementos utilizados de la resina se pueden apreciar en la Figura 2.11.

Figura 2.11. Materia prima para la curación del poliéster.

(Fuente: Propia)

2.5.3. Preparación de la fibra

Dentro del proceso de fabricación de probetas el siguiente paso es la preparación de la fibra, la cual consiste en escoger el mejor tejido en apariencia y homogeneidad. El tejido se debe cortar en las dimensiones adecuadas para el molde utilizado. El tejido de fibra de yute se cortó en segmentos de 27x35 cm como se indica en la Figura 2.12. Previamente el tejido se debe lavar con jabón neutro y secar a temperatura ambiente.

Figura 2.12. Tejido plano de yute.

(Fuente: Propia)

Una vez preparado el tejido se procedió a situar a punto el tornillo sinfín, el cual tiene la función de realizar la precarga, al mismo tiempo se realizó una limpieza del molde. Este debe estar libre de impurezas para así evitar residuos ajenos al material compuesto que actúen como concentradores de esfuerzo dentro del material. Una vez encerado el

molde se facilita la extracción de la placa al momento de realizar el retraimiento de esta. A continuación, se procedió a ubicar la fibra encima del molde para realizar consecutivamente la precarga. A partir de aquí se sujetó el tejido con un marco de acero A36 mediante 4 tornillos M6x1.0x60 con el fin de mantener la posición y la precarga del tejido, como se indica en la Figura 2.13.

Figura 2.13. Tejido plano de yute precargado.

(Fuente: Propia)

2.5.4. Preparación del material compuesto

Una vez obtenida la preparación de la fibra y la resina se procede a depositar toda la solución en el molde. A continuación, con una espátula se esparce toda la solución y se moja el tejido de yute para que este se adhiera bien con la resina como se indica en la Figura 2.14.

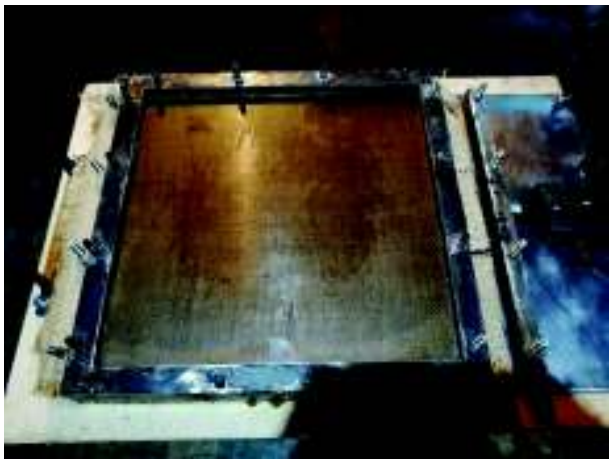


Figura 2.14. Tejido de yute recubierto de resina poliéster.

(Fuente: Propia)

Una vez obtenido esto se procede a sellar el molde con la tapa de acero A36 y se ajusta los 16 pernos M6x1.0x60 a 15 N m con el torquímetro como se indica en la Figura 2.15.

Figura 2.15. Molde con tejido de yute precargado y resina poliéster.

(Fuente: Propia)

Una vez culminado el proceso de fabricación, las placas fueron desmoldadas luego de 2 horas, tiempo necesario para desmoldar fácilmente la placa de material compuesto sin que esta sufriera deformaciones, Figura 2.16.

Figura 2.16. Placa del material compuesto.

(Fuente: Propia)

Las probetas del material fueron caracterizadas mecánicamente después de 2 semanas a partir de su fabricación, Figura 2.17

Figura 2.17. Probetas de tracción, flexión e impacto.

Fuente (Propia)

Cabe mencionar que para cada configuración se ensayaron seis probetas con el fin de descartar el valor menos acorde a los resultados, de esta manera se cumple con los requerimientos de cinco probetas establecidos por las normas que se enuncian más adelante para cada ensayo.

2.6. Cálculo de la fracción volumétrica del material compuesto

Para determinar la fracción volumétrica del material compuesto, se tomaron datos de peso y dimensión de una muestra de tejido de yute y una placa del material compuesto Figura 2.18 y Figura 2.19 ocupando la balanza OHAUS modelo adventurer. De donde se obtuvieron los datos resumidos en la Tabla 2.5.

Figura 2.18. Masa del tejido natural.

(Fuente: Propia)

Figura 2.19. Masa del material compuesto.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Resumen datos fracción volumétrica.

Muestra	Largo [cm]	Ancho [cm]	Espesor [mm]	Volumen [cm^3]	Masa [gr]
Tejido de yute	26	26	0.5	33.8	20.3
Material Compuesto	26	26	5	338	403.7

(Fuente: propia)

A partir de los datos obtenidos se tiene que la densidad del poliéster es $\rho_m = 1.1\ \frac{gr}{cm^3}$ y la densidad del tejido de yute es de $\rho_y = 1.2 \frac{gr}{cm^3}$, aplicando la Ecuación 2.1, se tiene una fracción volumétrica de 4.78%.

$$V_f = \frac{\rho_m W_y}{\rho_m W_y + \rho_y W_m}$$

Ecuación 2.1. Fracción volumétrica.

(Fuente: Deb, Das, Mache, & Laishram, 2017)

Donde:

W_y : Masa del tejido de yute

ρ_m : Densidad de la matriz (poliéster)

W_y : Masa del tejido de yute

W_m: Masa de la matriz (poliéster)

2.7. Caracterización mecánica del material compuesto

2.7.1. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados bajo la norma ASMT D 638-14 “Standard test method of tensile properties of plastics” este método cubre materiales plásticos que pueden estar o no reforzados (materiales compuestos). El procedimiento de la norma sugiere al menos 5 especímenes por cada grupo de probetas, además, la velocidad que especifica la norma es de 5 mm/min. Los ensayos fueron realizados en la máquina universal de ensayos INSTRON 3365 en las instalaciones del CIAP. Las dimensiones de las probetas a tracción fueron determinadas a través de la Figura 2.20 y Tabla 2.6.

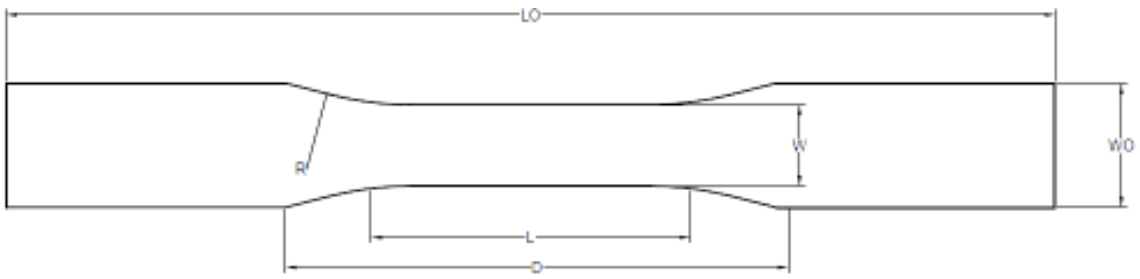


Figura 2.20. Probeta de tracción.

(Fuente: ASTM D638-14)

Tabla 2.6. Dimensiones de las probetas de tracción tipo I, ASTM D638-14

Dimensiones	7 (0.28) o menor mm (in).		7 a 14 (0.25 a 0.55) mm (in).	4 (0.16) mm (in).		TOLERANCIA
	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V	
W: Ancho.	15 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.19 (0.125)	± 0.5 (±0.02)
L: Longitud	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (±0.02)
WO: Ancho T	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	-	+ 6.4 (+0.25)
WO: Ancho T	-	-	-	-	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+0.125)
LO: Longitud T.	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	NoMax (noMax)
G: Longitud centro	50 (2.0)	50 (2.0)	50 (2.0)	-	7.62 (0.30)	± 0.25 (±0.010)
G: Longitud centro	-	-	-	25 (1.00)	-	±0.13 (±0.005)
D: Distancia agarraderas	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)	25.4 (1.0)	± 5 (±0.2)
R: Radio de filete	78 (3.0)	78 (3.0)	76 (3.0)	14 (0.58)	12.7 (0.5)	± 1 (0.04)
RO: Radio exterior	-	-	-	25 (1.00)	-	±1 (0.04)

(Fuente: ASTM D638-14)

Los resultados que se obtienen de los ensayos bajo la norma son: resistencia a la tracción (MPa), porcentaje de deformación a la rotura y módulo elástico (%).

Los resultados obtenidos del procedimiento son la relación entre la resistencia y la deformación por tracción.

La Ecuación 2.2 y 2.3 explican el comportamiento teórico de las probetas, a través del esfuerzo de tracción al que las probetas fueron sometidas por la carga W, por otro lado, también se tiene el porcentaje de elongación antes de la rotura.

$$\sigma = \frac{W}{A_0}$$

Ecuación 2.2. Esfuerzo de tracción.

(Fuente: ASTM D638-14)

$$\%El = \left[\frac{(L - Lo)}{Lo}\right] x\ 100$$

Ecuación 2.3. Porcentaje de elongación.

(Fuente: ASTM D638-14)

Donde:

W: Carga

A_o: Área transversal real

L : Distancia entre agarraderas

lo : Distancia real entre las agarraderas

2.7.2. Ensayo de flexión

Los ensayos de flexión se realizaron bajo la norma ASMT D 790-10 “Standard test methods for flexural properties of reinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials”, este método cubre materiales plásticos que pueden estar o no reforzados (materiales compuestos). El procedimiento de la norma sugiere al menos 5 especímenes por cada grupo de probetas, además la velocidad que especifica la norma es de 1 mm/min. Los ensayos fueron realizados en la máquina universal de ensayos INSTRON 3365 en las instalaciones del CIAP. Los valores indicados por la norma para las dimensiones de las probetas se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Dimensiones de las probetas a flexión, ASTM D 790-10.

Nomenclatura	Dimensiones [mm]
W: Ancho	10
L: Longitud	140
T: Espesor	4

(Fuente: ASTM D 790-10)

En general, el procedimiento para determinar el esfuerzo máximo a la flexión es a través del ensayo a tres puntos, como se muestra en la Figura 2.21.

Figura 2.21. Ensayo de flexión.

(Fuente: Propia)

2.7.3. Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto fueron realizados bajo la norma ASTM D 5420-14 “Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact)”. En este ensayo una masa determinada cae a través de una guía e impacta al espécimen, la masa fue liberada desde 5 alturas diferentes. El objetivo del ensayo es determinar la energía necesaria para que el espécimen llegue a la fractura.

Los ensayos fueron realizados en un comparador de impacto variable Elcometer 1615, Figura 2.22, en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Las dimensiones de las probetas se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Dimensiones de las probetas de impacto, ASTM D 5420-14.

Nomenclatura	Dimensiones [mm]
W: Ancho	50
L: Longitud	50
T: Espesor	4

(Fuente: ASTM D 5420-14)

Figura 2.22. Comparador de impacto variable.

(Fuente: propia)

Para realizar el análisis de energía se utilizó la ecuación de energía potencial de la mecánica clásica, Ecuación 2.4.

$$Ep = m * g * h$$

Ecuación 2.4. Energía potencial.

(Fuente: ASTM D 5420-14)

Donde:

m: Masa

h: Altura

g: Gravedad

2.8. Análisis de falla del material compuesto

En general, los nuevos materiales son utilizados como soporte estructural en la industria automotriz, aeroespacial etc. Al existir un incremento en la demanda de su uso, es inevitable que existan fallas prematuras debido a defectos de manufactura, cargas inesperadas en el material, exposición al medio ambiente y daños por servicio.

A pesar de que los procedimientos del análisis de falla de materiales metálicos son similares al de materiales compuestos, las características de estos como la anisotropía, técnicas de unión entre materiales, diferentes posibilidades de fractura en los componentes del compuesto y múltiples modos de falla incrementan la complejidad del análisis de falla de estos materiales. (Adams et al., 2001)

2.8.1. Microscopía

Esta técnica es una herramienta válida en la investigación relacionada a resolver problemas de falla, desarrollo, investigación y control de calidad de nuevos materiales. La microscopia es utilizada en materiales compuestos para:

(i) Determinar dimensiones, distribución, orientación de las fibras y las partículas.
(ii) Identificar y caracterizar defectos (vacíos, hendiduras, mala distribución de fibras).
(iii) Fractografía que sirve para determinar modos de falla en el material compuesto, matriz y en el refuerzo.
(iv) Obtener información del grado de unión entre la matriz y el refuerzo o entre cada una de las capas.
(v) Análisis químico y distribución.

Para el análisis de materiales compuestos, el método principal es a través de la reflexión de un haz de luz. La microscopía óptica posee una resolución limitada por el ancho de banda de la luz, también las zonas profundas en el material pueden ser afectadas a medida que se aumenta la ampliación.

La matriz y el refuerzo poseen diferentes reflectividades, estas características deben ser consideradas al momento de analizar y contrastar los resultados de las muestras, además, que pueden existir dispersiones en los límites de la muestra.

En el presente estudio se realizó el análisis de falla de las probetas que obtuvieron mejor desempeño durante los ensayos de tracción y flexión, además de la probeta objetivo o probeta cero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de obtener un material compuesto precargado con las mejores propiedades, en el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos de los ensayos experimentales descritos en el capítulo 2. La caracterización mecánica del material compuesto realizada mediante ensayos de tracción y flexión e impacto permitió determinar la mejor precarga en la fibra. Con base en estos resultados se escogió la formulación con la mejor combinación de propiedades, con las que se elaboró probetas para ensayos de impacto mediante caída de dardo. Para todo lo expuesto se discuten los resultados centrándose en el comportamiento mecánico de diferentes configuraciones del material. Posteriormente, se ofrece la discusión de todos los resultados encontrados para la determinación del mejor material y se compara frente a otros materiales compuestos.

Antes de realizar los ensayos descritos se ejecutaron ensayos de espectrometría para verificar que la resina utilizada es poliéster y ensayos de fibras para verificar que la fibra utilizada es realmente yute.

Una vez realizados todos los ensayos de espectrometría, tejido, tracción, flexión e impacto, los resultados son expuestos para ser discutidos. A continuación, se muestran todos los resultados obtenidos y analizados por separado dependiendo de cada ensayo

3.1. Ensayo de espectrometría

El ensayo fue realizado en el Centro de Investigación Aplicada a Polímeros de la Escuela Politécnica Nacional. Los resultados del procedimiento de la espectrometría se presentan en la Tabla 3.1 y el espectro infrarrojo de la resina poliéster utilizada en la Figura 3.2.

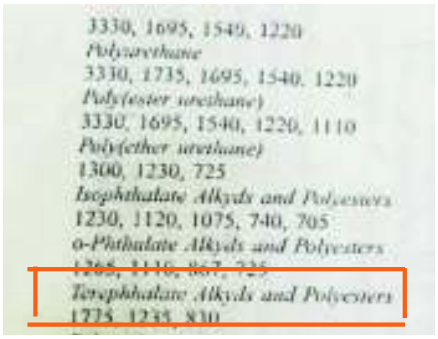


Figura 3.1. Bandas espectrométricas de un poliéster terephalate.

(Fuente: Schiers,2000)

Tabla 3.1. Datos de banda de espectrometría de la resina poliéster utilizada.

Wavenumber [cm^{-1}]	%T	Wavenumber [cm^{-1}]	%T
3061.44	91.2939	1377.89	74.1807
3026.73	85.865	1255.43	23.9312
2938.02	69.3299	1117.55	30.7319
2637.18	95.3666	1064.51	28.1871
1720.19	10	847.561	87.9502
1599.66	70.3708	741.496	57.5211
1580.38	73.1388	699.069	49.9418
1491.67	79.0216	467.653	75.3676
1450.21	62.8079	407.871	89.285

(Fuente: Propia)

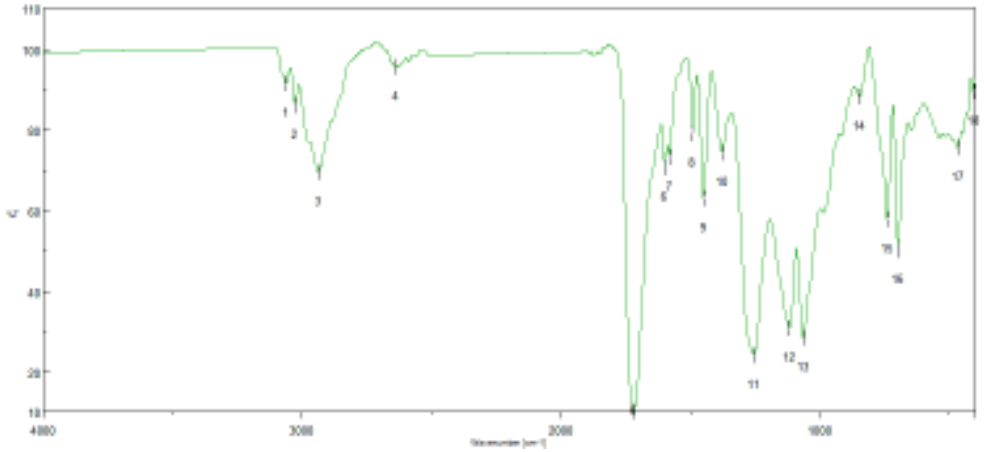


Figura 3.2. Espectrometría de la resina poliéster utilizada.

(Fuente: Propia)

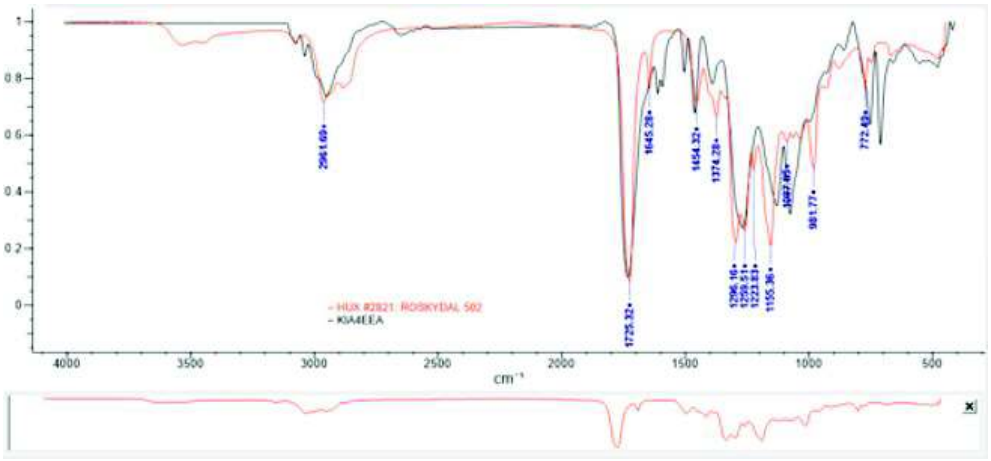


Figura 3.3. Espectrometría comparativa.

(Fuente: Propia)

A partir de la Figura 3.1, se observa que las bandas referentes a un poliéster terephalate son: 1775, 1235, 830 y las bandas obtenidas que más se acercan a estos valores durante el ensayo están subrayadas de color amarillo en la Tabla 3.1, de igual manera se realiza una gráfica comparativa, Figura 3.3, y de este modo se determina que la resina utilizada para la fabricación del material compuesto corresponde a un poliéster.

3.2. Ensayo de resistencia máxima del tejido de yute

El ensayo fue realizado en el Centro Textil de la Escuela Politécnica Nacional, los resultados de este informe se encuentran como Anexo I. En la Figura 3.4 y Tabla 3.2, se muestra un resumen de los resultados de estos ensayos. De donde se concluye que para la muestra del tejido plano de yute la resistencia máxima a la rotura es 84.27 kgf.

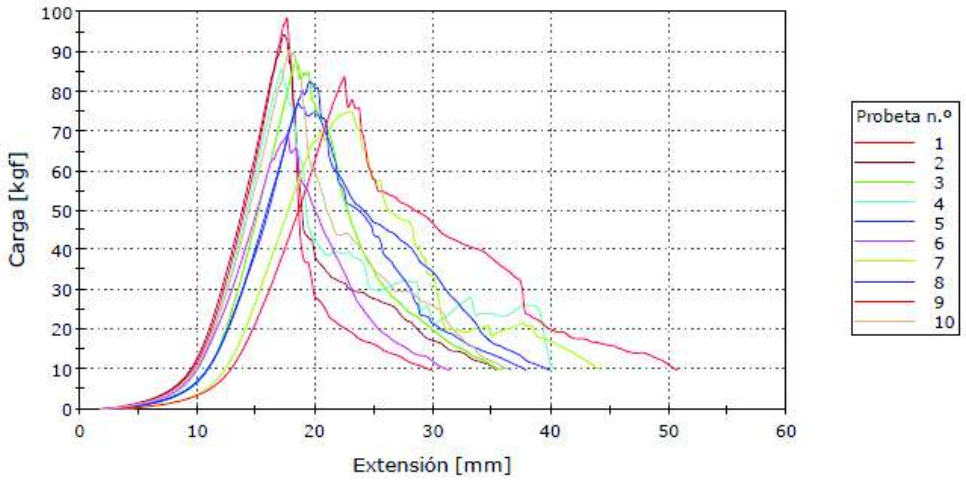


Figura 3.4. Carga vs deformación del tejido de yute.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Prueba estándar para fuerza de rotura y elongación del tejido de yute.

	Carga fractura [Kgf]	Carga fractura [N]	Elongación en la fractura [mm]	Tiempo [s]
1	95,26	934,18	0,20	3
2	94,14	923,22	0,20	3
3	87,61	859,16	0,20	3
4	85,52	838,64	0,19	3
5	76,87	753,86	0,21	3
6	69,09	677,51	0,20	3
7	74,83	733,79	0,25	3
8	82,46	808,66	0,22	3
9	83,61	819,94	0,25	3
10	90,32	885,75	0,21	3
Media	84,27	826,41	0,21	3
Desviación estándar	8,94	8,95	0,022	3

(Fuente. propia)

3.3. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizan para todas las configuraciones descritas en la Tabla 2.3, los ensayos se realizaron en la máquina universal de ensayos. Los resultados obtenidos fueron de gran interés y estos se resumen en la Tabla 3.3, donde se muestran detalladamente las propiedades más importantes.

Tabla 3.3. Resultados de los ensayos de tracción.

Designación	Fracción volumétrica	σ max [Mpa]	Sσ [Mpa]	CVσ [%]	E [Mpa]	SE [Mpa]	CVE [%]	Observaciones Rotura
Resina	0	19,76	6,866	0,980638	1171,2	19,68	2,896	Si
SC	4,78	20,88	1,258	0,169964	1666	20,88	1,546	Si
3V	4,78	24,58	1,364	0,163242	1768	24,3	1,778	Si
6V	4,78	29,16	1,368	0,143708	1936	29,16	2,02	Si
9V	4,78	34,68	1,344	0,13908	1930	34,68	2,272	Si
11V	4,78	28,6	28,6	2,17	1888	28,6	2,176	Si
13V	4,78	25,12	25,12	2,12	1732	25,12	2,12	Si

(Fuente: Propia)

Donde:

σ max: Resistencia a tracción máxima

Sσ: Resistencia a tracción límite elástico

CVσ: Deformación límite elástico

E: Módulo de elasticidad

SE: Resistencia a tracción a la rotura

CVE: Deformación a la rotura

Se observan las propiedades más relevantes como el esfuerzo máximo, módulo elástico y deformación desarrollada durante los ensayos de tracción. Cabe mencionar que la designación de las probetas se establece en el apartado 2.3 y Tabla 2.3.

A continuación, desde la Tabla 3.4 a la Tabla 3.10 se presentan los datos obtenidos de los ensayos de tracción para las probetas de resina, sin carga (SC) y con pre-carga aplicados al tejido de yute, así como también sus respectivas gráficas, las cuales se presentan desde la Figura 3.5 a la Figura 3.11.

3.3.1. Resultados de los ensayos de tracción

Tabla 3.4. Resultados del ensayo a tracción de la resina y su promedio.

Probeta resina			
	Desviación estándar 5,35		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	19,6	1,7	2,73
2	25,6	1,37	3,59
3	24,6	24,6	3,5
4	13,6	1,35	1,81
5	15,4	5,31	2,85
Promedio	19,76	6,866	2,896

(Fuente: Propia)

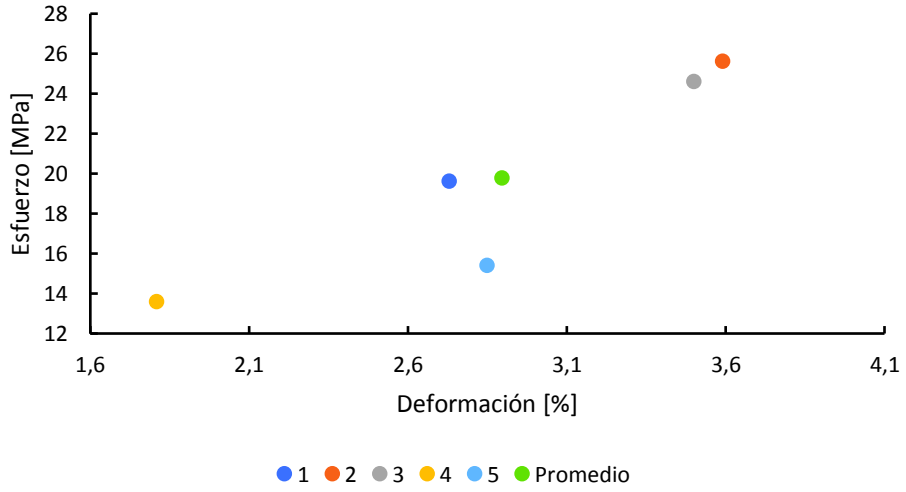


Figura 3.5. Valores máximos de cada probeta de resina ensayada a tracción y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.5. Resultados del ensayo a tracción de la probeta sin carga y su promedio.

Probeta sin carga			
	Desviación estándar 3,74		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	20,3	1,22	1,42
2	22,1	1,34	1,56
3	23,1	1,13	1,61
4	24,2	1,31	1,74
5	14,7	1,29	1,4
Promedio	20.88	1,258	1,546

(Fuente: propia)

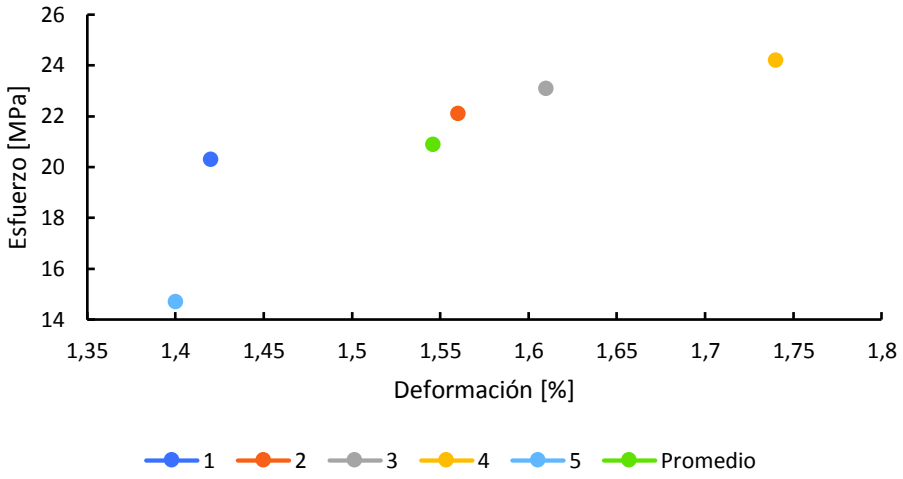


Figura 3.6. Valores máximos de cada probeta sin carga ensayada a tracción y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 3V y su promedio.

Probeta 3V			
	Desviación estándar 2,34		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	21,4	1,43	1,57
2	25,4	1,31	1,93
3	27,6	1,23	2,02
4	23,3	1,4	1,65
5	25,2	1,45	1,72
Promedio	24,58	1,364	1,778

(Fuente: Propia)

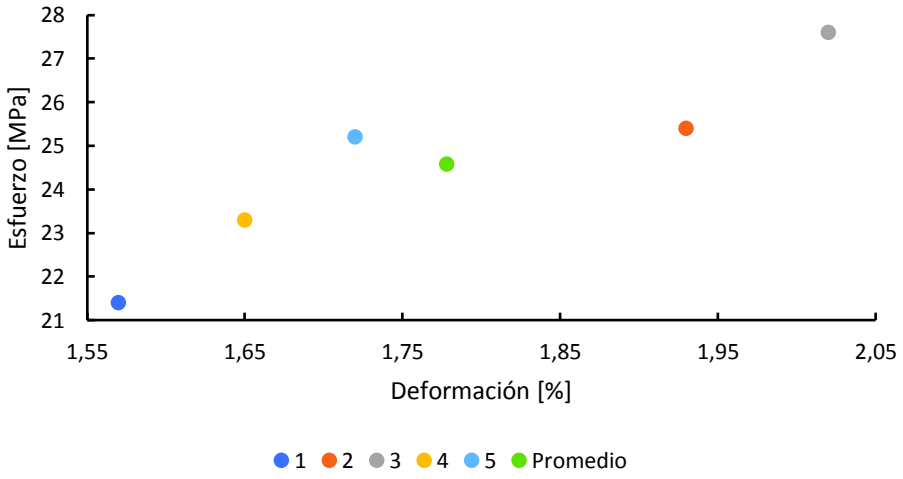


Figura 3.7. Valores máximos de cada probeta 3V ensayada a tracción y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 6V y su promedio.

Probeta 6V			
	Desviación estándar 3,04		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	29	1,39	1,96
2	33,5	1,37	2,16
3	25	1,35	1,81
4	29,8	1,34	2,16
5	28,5	1,39	2,01
Promedio	29,16	1,368	2,02

(Fuente: Propia)

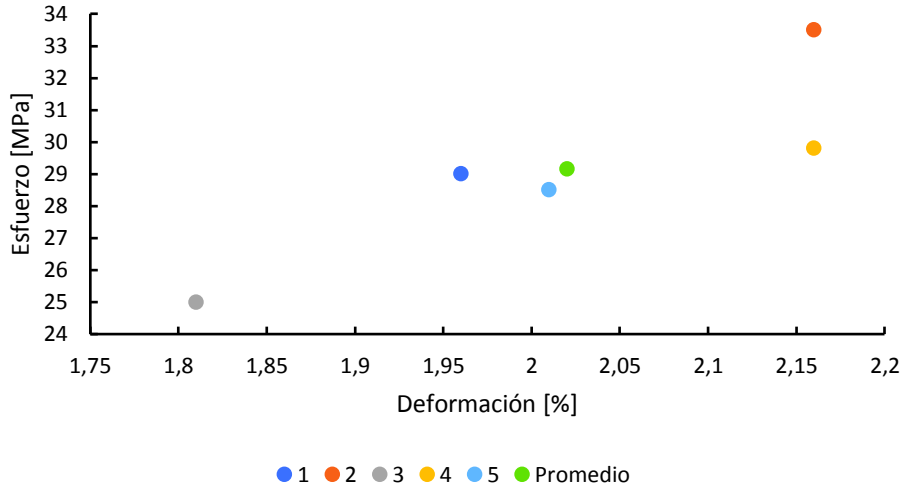


Figura 3.8. Valores máximos de cada probeta 6V ensayada a tracción y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.8 Resultados del ensayo a tracción de la probeta 9V y su promedio.

Probeta 9V			
	Desviación estándar 4,5		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	29,9	1,28	2,12
2	30,5	1,24	2,16
3	40	1,37	2,43
4	34,8	1,43	2,13
5	38,2	1,4	2,52
Promedio	34.368	1,344	2,272

(Fuente: Propia)

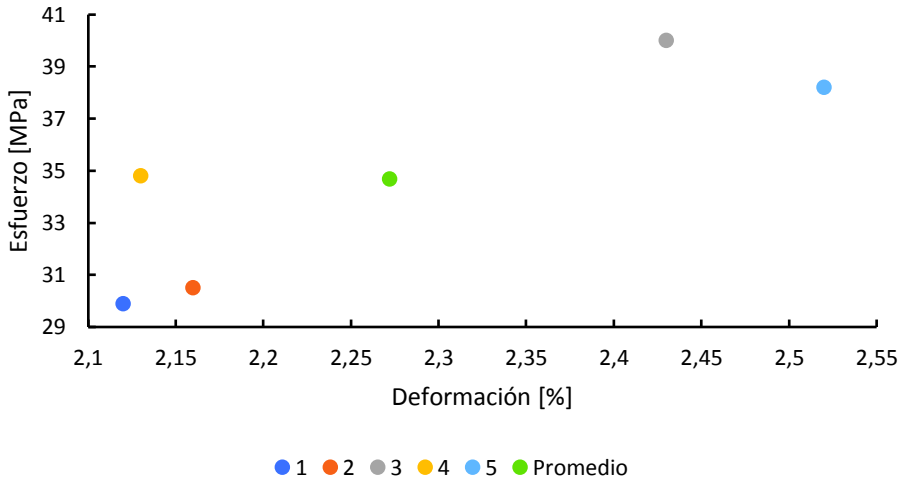


Figura 3.9. Valores máximos de cada probeta 9V ensayada a tracción y su promedio.

(Fuete: Propia)

Tabla 3.9. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 11V y su promedio.

Probeta 11V			
	Desviación estándar 2,25		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	26,1	N/A	2,1
2	26,2	26,2	2,08
3	29,8	29,8	2,23
4	30,6	30,6	2,21
5	30,3	30,3	2,26
Promedio	28,6	28,6	2,176

(Fuente: Propia)

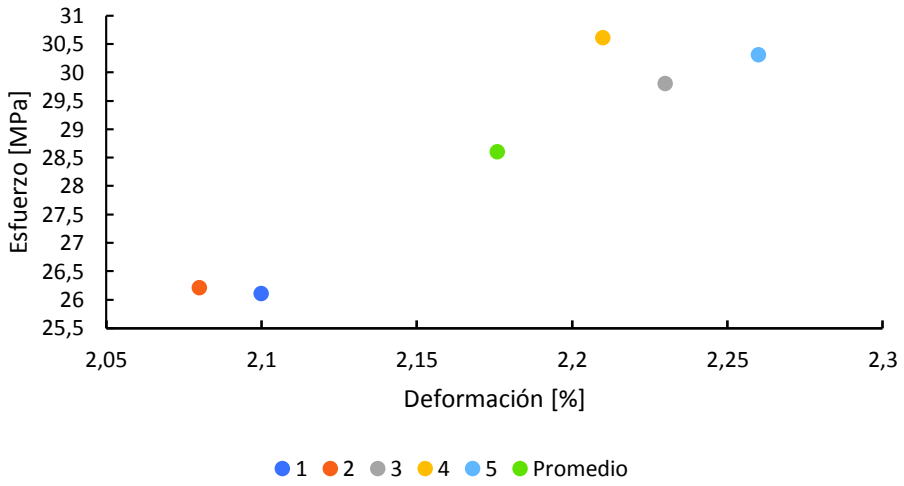


Figura 3.10. Valores máximos de cada probeta 11V ensayada a tracción y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Resultados del ensayo a tracción de la probeta 13V y su promedio.

Probeta 13V			
	Desviación estándar 3,07		
Probetas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción limite elástico [MPa]	% Deformación a la rotura.
1	25,4	25,4	2,02
2	22,6	22,6	2,36
3	29,8	29,8	2,27
4	22,1	22,1	1,84
5	25,7	25,7	2,1
Promedio	25,12	25,12	2,12

(Fuente: Propia)

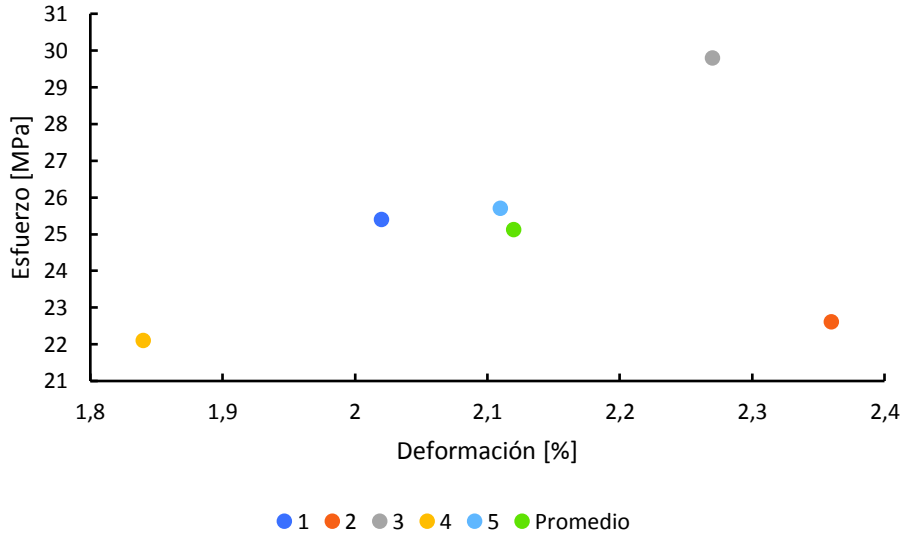


Figura 3.11. Valores máximos de cada probeta 13V ensayada a tracción y su promedio.
(Fuente: Propia)

Una vez realizado los ensayos de tracción de cada grupo de probetas se compara el promedio final y se observa que el esfuerzo máximo alcanzado se da en el grupo de probetas 9V como se aprecia en la Figura 3.12.

En principio se realizó un ensayo para verificar la máxima tensión aplicable a la fibra de yute y en base a esto, se aplica las diferentes precargas al material. En la Figura 3.12, se indican las curvas esfuerzo-deformación para la probeta de resina poliéster, probeta sin carga (SC) y las cinco configuraciones de precarga del tejido. Además, se aprecia el comportamiento mecánico de estos materiales al variar la configuración de la precarga en el tejido.

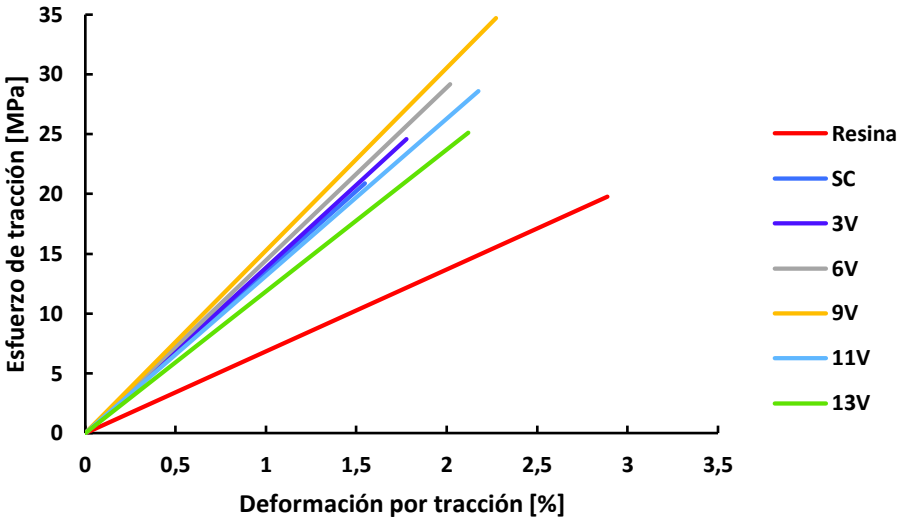


Figura 3.12. Curvas de esfuerzo vs deformación a tracción de la resina poliéster y las seis diferentes precargas.

(Fuente: Propia)

En cuanto al módulo elástico existe un incremento considerable respecto al módulo de la matriz de resina poliéster, siendo las precargas de 6V, 9V y 11V los que muestran un aumento como se aprecia en la Figura 3.13. Es importante indicar que todas las configuraciones se trabajaron con el mismo porcentaje volumétrico de tejido, esto con el fin de recalcar el uso de la precarga en las fibras y sus beneficios en el aumento del esfuerzo de tracción y el módulo elástico como se indica en la Figura 3.12 y Figura 3.13.

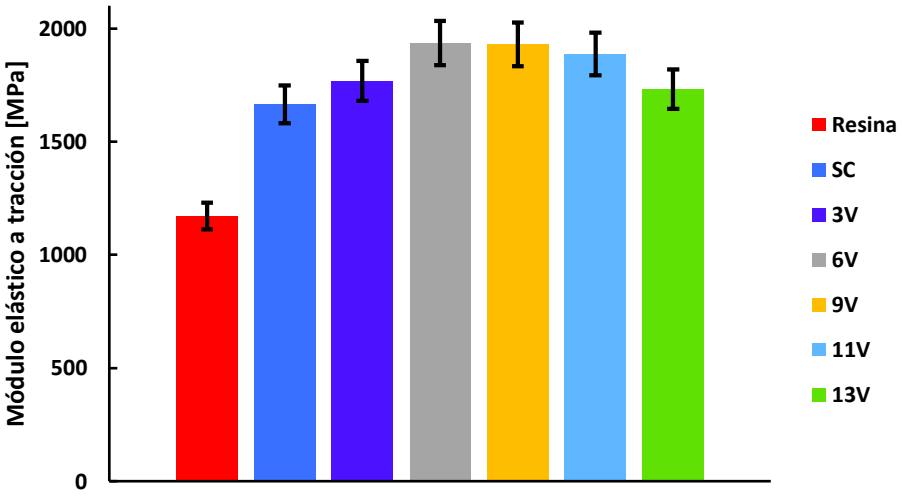


Figura 3.13. Módulo elástico a tracción de la resina poliéster y las seis diferentes precargas.

(Fuente: Propia)

Para analizar de mejor manera el incremento del esfuerzo máximo a tracción y módulo elástico se elaboró la Tabla 3.11 y Figura 3.14, donde se observan los respectivos incrementos con respecto a la resina poliéster.

Tabla 3.11. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de diferentes precargas con respecto a la resina poliéster.

Número de probeta	Tipo de probeta	σ max [Mpa]	Incremento [%]	E [Mpa]	Incremento [%]
1	Resina	19,76	0,00	1171,2	0,00
2	SC	20,88	5,67	1666	42,25
3	3V	24,58	24,39	1768	50,96
4	6V	29,16	47,57	1936	65,30
5	9V	34,68	75,51	1930	64,79
6	11V	28,6	44,74	1888	61,20
7	13V	25,12	27,13	1732	47,88

(Fuente: Propia)

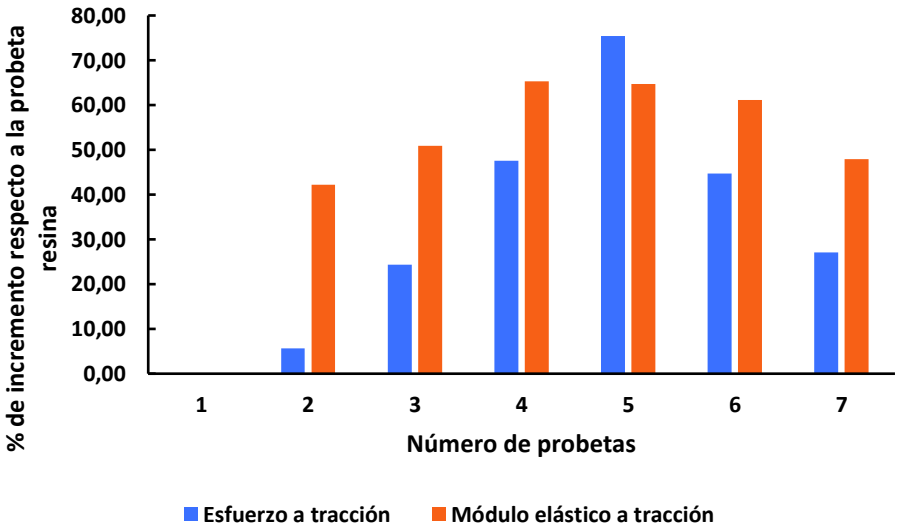


Figura 3.14. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la resina poliéster del ensayo a tracción.

(Fuente: Propia)

En todas las probetas se aumentó el esfuerzo máximo a tracción y módulo elástico al combinar el tejido de yute precargado que actúa de elemento de refuerzo. Como resultado el grupo de probetas 9V presenta mayor resistencia a la tracción con un valor de 35 MPa, lo que representa un incremento del 76%. En cuanto al módulo elástico, el grupo de probetas 6V presenta un mayor incremento con un valor de 1936 MPa, lo que representa un incremento del 65%, todo esto con respecto a la resina poliéster como se observa en la Figura 3.14.

Para analizar de mejor manera el incremento de esfuerzo máximo a tracción y módulo elástico se elaboró la Tabla 3.12 y Figura 3.15, donde se observan los respectivos incrementos con respecto a la probeta sin carga (SC).

Tabla 3.12. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de diferentes precargas con respecto a la probeta sin carga.

Número de probeta	Tipo de probeta	σ max [Mpa]	Incremento [%]	E [Mpa]	Incremento [%]
1	SC	20,88	0,00	1666	0,00
2	3V	24,58	17,72	1768	6,12
3	6V	29,16	39,66	1936	16,21
4	9V	34,68	66,09	1930	15,85
5	11V	28,6	36,97	1888	13,33
6	13V	25,12	20,31	1732	3,96

(Fuente: Propia)

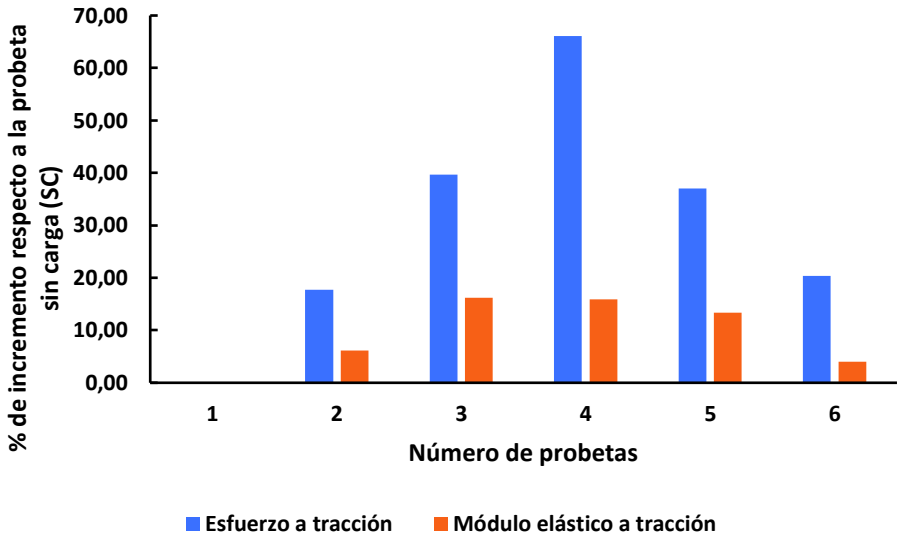


Figura 3.15. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la probeta sin carga del ensayo a tracción.

(Fuente: Propia)

Como se observa en Figura 3.15, se aumentó el esfuerzo máximo a tracción y módulo elástico al precargar el tejido de yute que actúa como elemento de refuerzo. Como resultado el grupo de probetas 9V presenta mayor resistencia a la tracción con un valor de 35 MPa, lo que representa un incremento del 66%. En cuanto al módulo elástico, el grupo de probetas 6V presenta un mayor incremento con un valor de 1936 MPa, lo que representa un incremento del 16%, todo esto con respecto a la probeta sin carga (SC). El incremento en la resistencia se debe a una buena adhesión entre la matriz-refuerzo, por lo tanto, una mejor transferencia de cargas a la fibra precargada.

Estos resultados sugieren que cargas cercanas al 15% de la resistencia a la rotura del yute es ideal para aplicar la precarga, punto en el cual se tienen los mejores resultados para el ensayo a tracción.

3.4. Ensayo de flexión

Los ensayos de flexión se realizaron en todas las configuraciones descritas en la Tabla 2.3, en la máquina universal de ensayos. Los resultados fueron muy interesantes y se resumen en la Tabla 3.13, donde se muestran detalladamente las propiedades más importantes.

Tabla 3.13. Resultados de los ensayos de flexión.

	Flexión					
Designación	**Fracción volumétrica**	**σFmax [Mpa]**	**SσF [Mpa]**	**CVσF [%]**	**EF [Mpa]**	**Observaciones Rotura**
Resina	0	27,86	27,86	4,688	1530	Si
SC	4,78	51,78	50,8	2,496	2663,4	Si
3V	4,78	80,54	80,54	2,87	2941,16	Si
6V	4,78	53,18	53,18	2,67	1744,8	Si
9V	4,78	61,86	61,86	2,888	2337,8	Si
11V	4,78	68,76	68,76	3,242	3218,84	Si
13V	4,78	64,42	64,42	2,982	2582	Si

(Fuente: Propia)

Donde:

σ_F max: Resistencia a flexión máxima

$S\sigma_F$: Resistencia a flexión límite elástico

$CV\sigma_F$: Deformación a flexión a la rotura

E_F: Módulo de elasticidad a flexión

Se observan las propiedades más relevantes como: esfuerzo máximo, módulo elástico y deformación de todas las configuraciones desarrolladas durante el ensayo de flexión. Cabe mencionar que la designación de las probetas se establece en la Tabla 2.3.

A continuación, desde la Tabla 3.14 a la Tabla 3.20 se presentan los datos obtenidos de los ensayos de flexión para las probetas de resina, sin carga (SC) y con pre-carga aplicados al tejido de yute, así como también sus respectivas gráficas, las cuales se presentan desde la Figura 3.16 a la Figura 3.22.

3.4.1. Resultados de los ensayos de flexión

Tabla 3.14. Resultados del ensayo a flexión de la resina y su promedio.

Probeta Resina			
	Desviación estándar 3,31		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	25,5	25,5	4,98
2	23,3	23,3	3,47
3	30,8	30,8	4,99
4	30,5	30,5	5
5	29,2	29,2	5
Promedio	27,86	27,86	4,688

(Fuente: Propia)

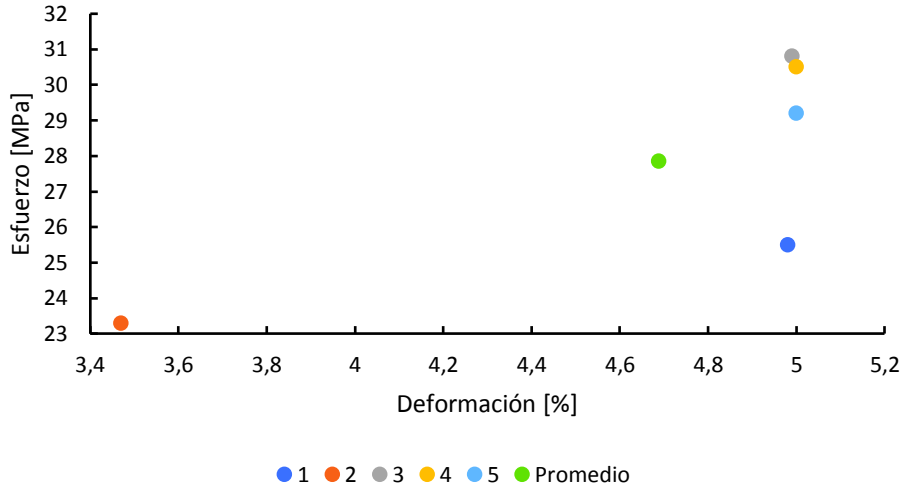


Figura 3.16. Valores máximos de cada probeta de resina ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de flexión de la probeta sin carga y su promedio.

Probeta sin carga			
	Desviación estándar 10,48		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	35,2	31,0	1,8
2	37,4	37,4	2,34
3	66,3	66,3	2,98
4	57,7	57,7	2,47
5	62,3	61,6	2,89
Promedio	51,78	50,8	2,496

(Fuente: Propia).

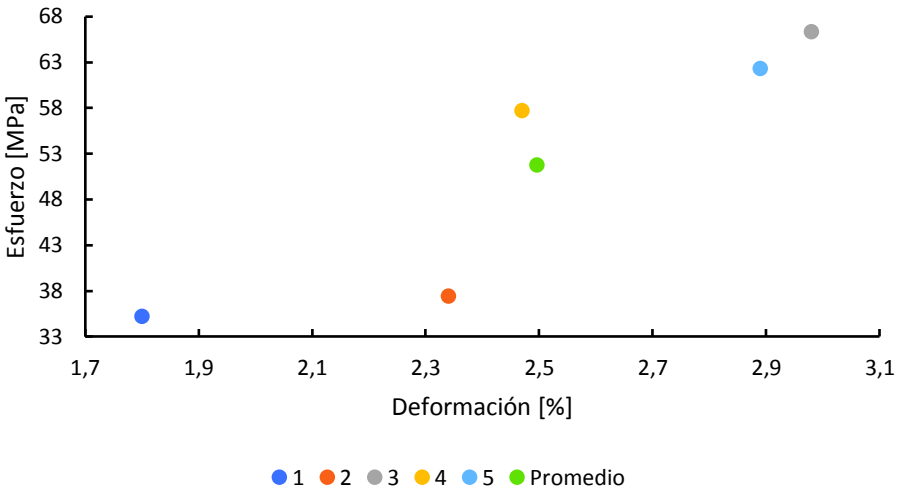


Figura 3.17. Valores máximos de cada probeta sin carga ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 3V y su promedio.

Probeta 3V			
	Desviación estándar 9,04		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	94	94	2,42
2	77,8	77,8	3,44
3	84,5	84,5	4
4	70,5	70,5	3,07
5	75,9	75,9	3,44
Promedio	80,54	80,54	2,87

(Fuente: Propia).

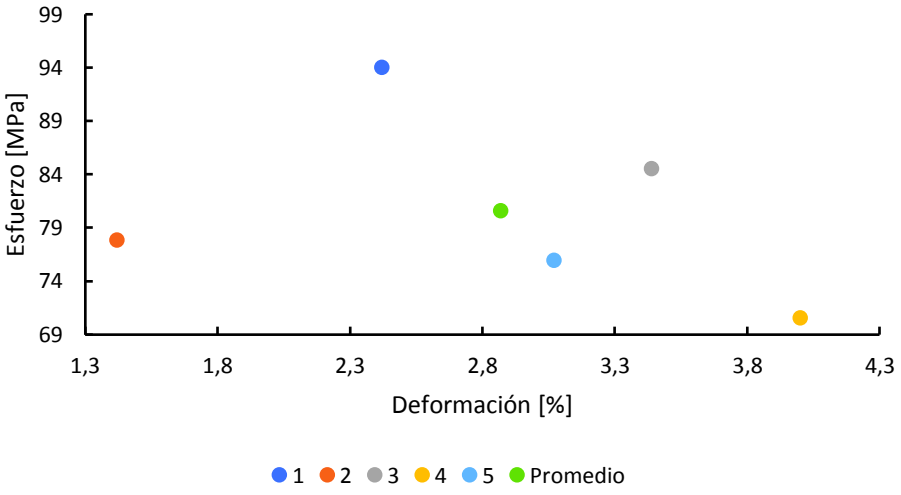


Figura 3.18. Valores máximos de cada probeta 3V ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 6V y su promedio.

Probeta 6V			
	Desviación estándar 5,52		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	48,2	48,2	2,62
2	61,8	61,8	2,95
3	49,5	49,5	2,51
4	55,6	55,6	2,77
5	50,3	50,3	2,5
Promedio	53,18	53,18	2,67

(Fuente: Propia)

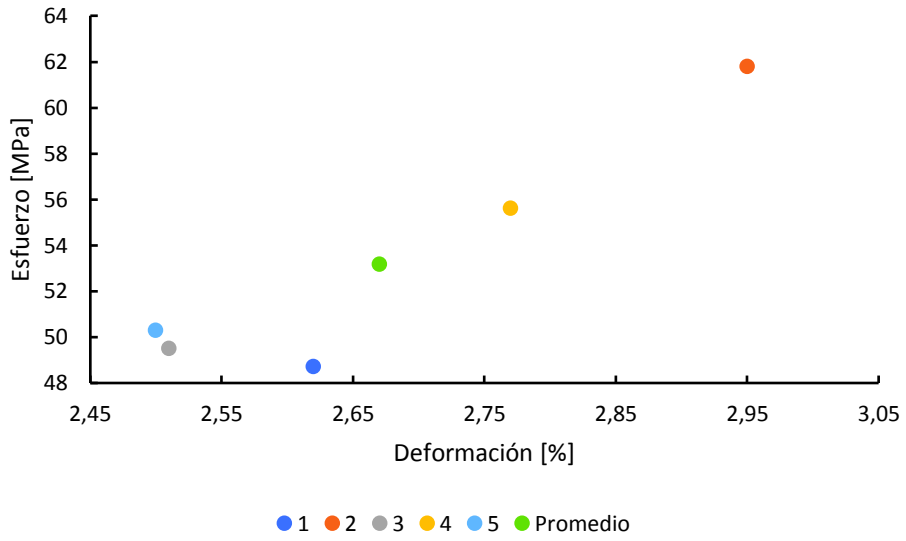


Figura 3.19. Valores máximos de cada probeta 6V ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.18. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 9V y su promedio.

Probeta 9V			
	Desviación estándar 9,62		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	56,9	56,9	2,93
2	70,3	70,3	2,9
3	49,6	49,6	2,4
4	59,7	59,7	2,95
5	72,8	72,8	3,26
Promedio	61,86	61,86	2,888

(Figura: Propia)

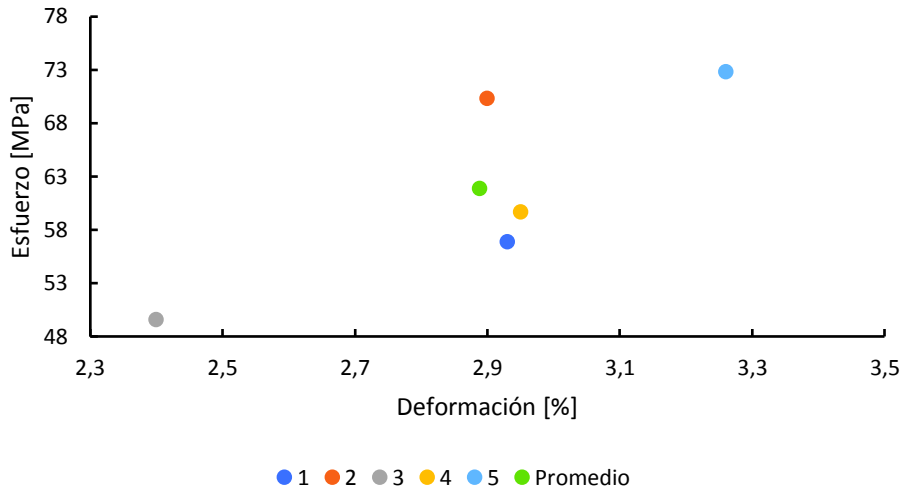


Figura 3.20. Valores máximos de cada probeta 9V ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.19. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 11V y su promedio.

Probeta 11V			
	Desviación estándar 10,70		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	43,9	43,9	1,61
2	81	81	3,76
3	68	68	3,45
4	73,7	73,7	3,58
	77,2	77,2	3,81
Promedio	68,76	68,76	3,242

(Fuente: Propia)

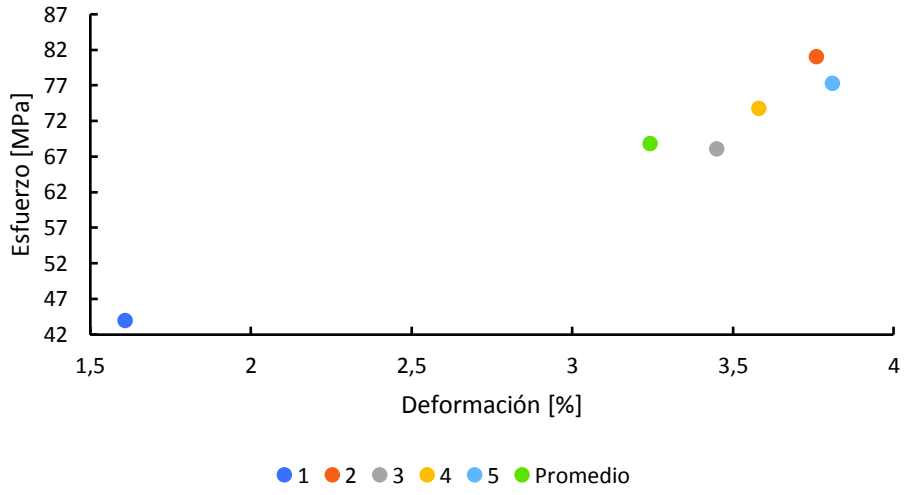


Figura 3.21. Valores máximos de cada probeta 11V ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.20. Resultados del ensayo a flexión de la probeta 13V y su promedio.

Probeta 13V			
	Desviación estándar 6,50		
Probetas	Resistencia a la flexión [MPa]	Esfuerzo a flexión [MPa]	% Deformación a la rotura
1	72,7	72,7	3,43
2	61,7	61,7	3,08
3	55,4	55,4	2,25
4	64,5	64,5	3,05
5	67,8	67,8	3,1
Promedio	64,42	64,42	2,982

(Fuente: Propia)

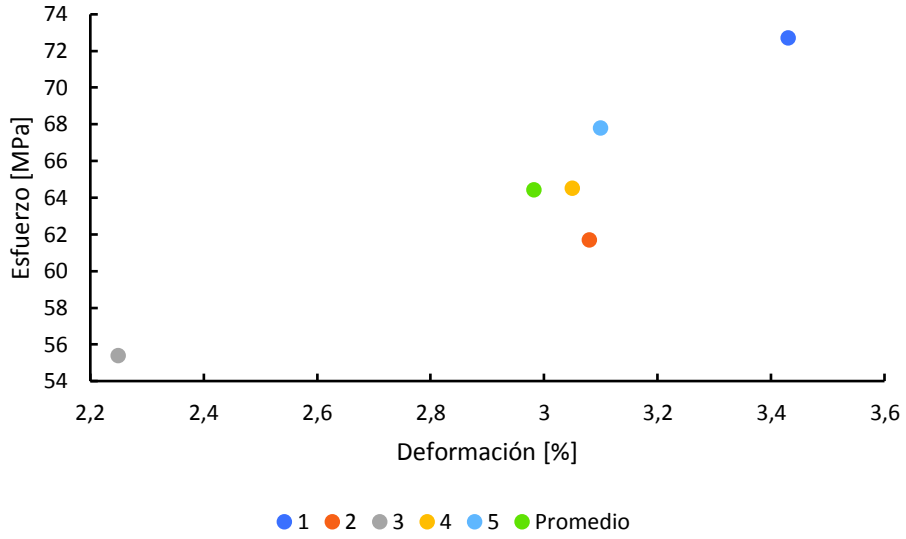


Figura 3.22. Valores máximos de cada probeta 13V ensayada a flexión y su promedio.

(Fuente: Propia)

Una vez realizado los ensayos de flexión a cada grupo de probetas se compara el promedio final. Se aprecia un incremento en el esfuerzo máximo a flexión en todas las configuraciones descritas, pero sobresale el compuesto con una precarga en el tejido de 3V como se observa en la Figura 3.23.

La Figura 3.23, permite apreciar el comportamiento mecánico de estos materiales al variar la precarga del refuerzo. Además, se indica las curvas esfuerzo vs deformación a flexión para la probeta de resina poliéster, probeta sin carga (SC) y las cinco configuraciones de precarga en el tejido.

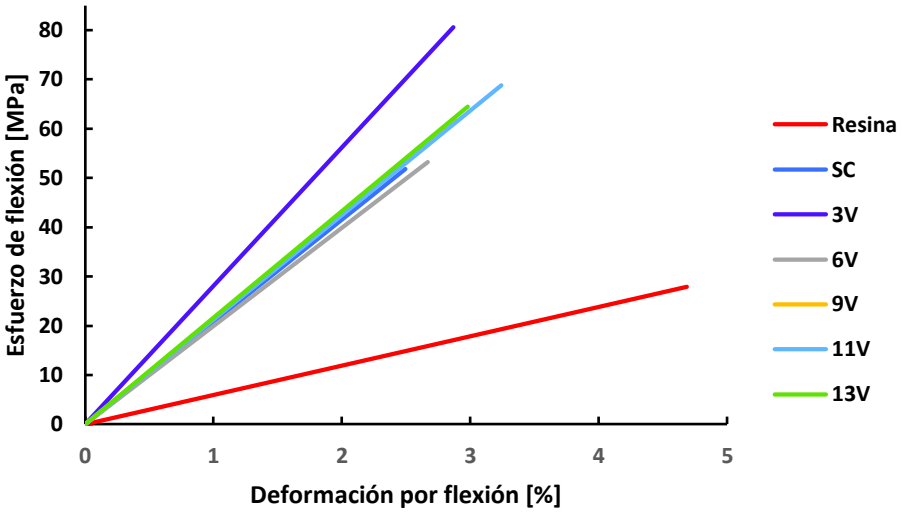


Figura 3.23. Curva de esfuerzo vs deformación a flexión de la resina poliéster y las seis diferentes precargas.

(Fuente: Propia)

En cuanto al módulo elástico existe un incremento considerable respecto al módulo de la matriz de resina poliéster, siendo la 11V la que muestra un mayor incremento, como se aprecia en la Figura 3.24. Es importante indicar que todas las configuraciones se trabajaron con el mismo porcentaje volumétrico de tejido.

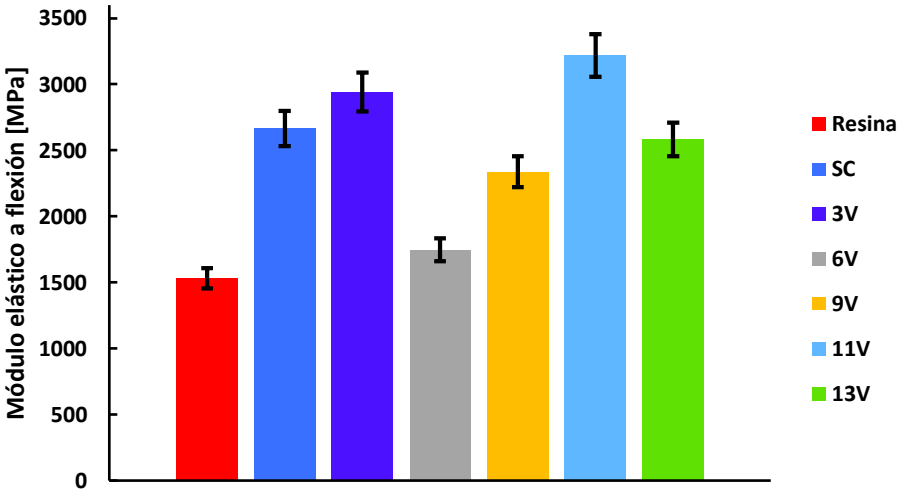


Figura 3.24. Módulo elástico a flexión de la resina poliéster y las seis diferentes precargas.

(Fuente: Propia)

Para analizar de mejor manera el incremento del esfuerzo máximo a flexión y módulo elástico se elaboró la Tabla 3.21 y Figura 3.25, donde se observan los respectivos incrementos con respecto a la resina poliéster.

Tabla 3.21. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de diferentes precargas con respecto a la resina poliéster.

Número de probeta	Tipo de probeta	σ max [Mpa]	Incremento [%]	E [Mpa]	Incremento [%]
1	Resina	27,86	0,00	1530	0,00
2	SC	51,78	85,86	2663,4	74,08
3	3V	80,54	189,09	2941,16	92,23
4	6V	53,18	90,88	1744,8	14,04
5	9V	61,86	122,04	2337,8	52,80
6	11V	68,76	146,81	3218,84	110,38
7	13V	64,42	131,23	2582	68,76

(Fuente: Propia)

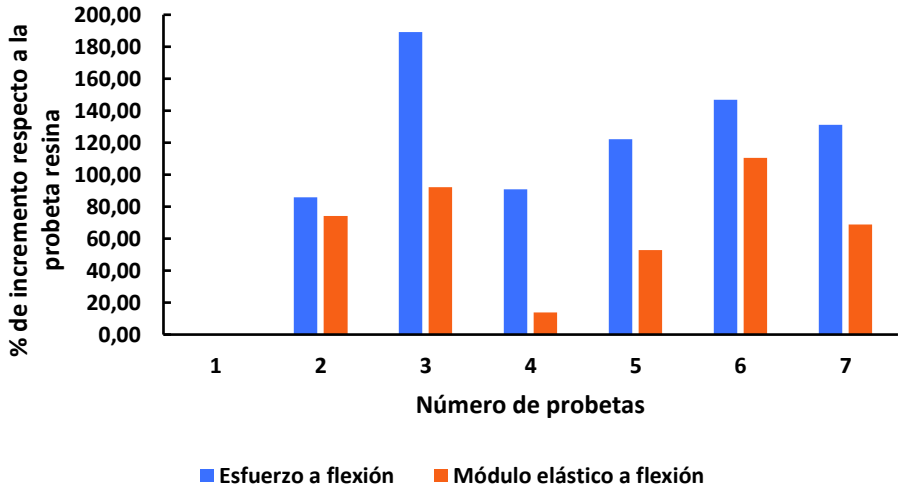


Figura 3.25. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la resina poliéster del ensayo a flexión.

(Fuente: Propia)

En todas las probetas se aumentó el esfuerzo máximo a flexión y módulo elástico al combinar el tejido de yute precargado que actúa de elemento de refuerzo. Como resultado el grupo de probetas 3V presenta mayor resistencia a flexión con un valor de 81 MPa, lo que representa un incremento de 189%. En cuanto al módulo elástico, el grupo de probetas 11V presenta un mayor incremento con un valor de 3219 MPa, lo que representa un incremento del 110%, todo esto con respecto a la resina poliéster como se observa en la Figura 3.25.

Para analizar de mejor manera el incremento de esfuerzo máximo a flexión y módulo elástico se elaboró la Tabla 3.22 y Figura 3.26, donde se observan los respectivos incrementos con respecto a la probeta sin carga (SC).

Tabla 3.22. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de diferentes precargas con respecto a la probeta sin carga (SC).

Número de probeta	Tipo de probeta	б max [Mpa]	Incremento [%]	E [Mpa]	Incremento [%]
1	SC	51,78	0,00	2663,4	0,00
2	3V	80,54	55,54	2941,16	10,43
3	6V	53,18	2,70	1744,8	-34,49
4	9V	61,86	19,47	2337,8	-12,22
5	11V	68,76	32,79	3218,84	20,85
6	13V	64,42	24,41	2582	-3,06

(Fuente: Propia).

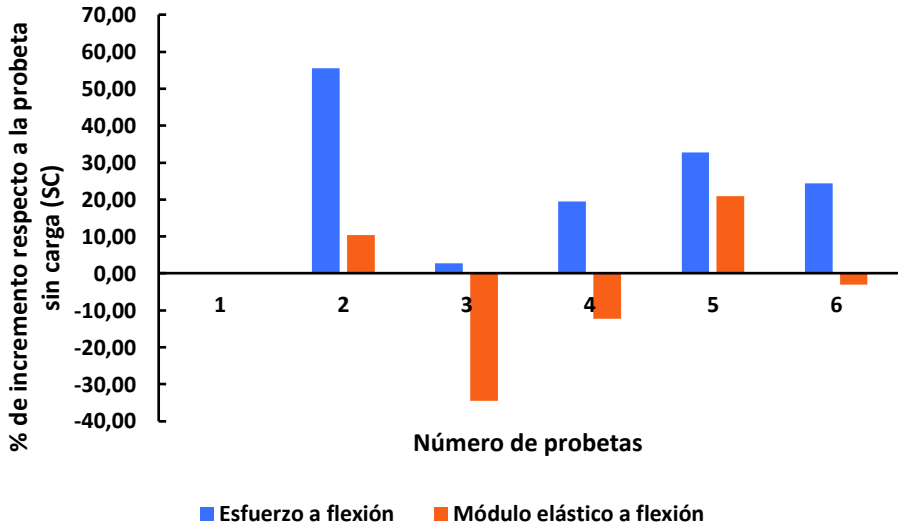


Figura 3.26. Porcentaje de incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico con respecto a la probeta sin carga del ensayo a flexión.

(Fuente: Propia)

En todas las probetas se aumentó el esfuerzo máximo a flexión al combinar el tejido de yute precargado. Como resultado el grupo de probetas 3V presenta mayor resistencia a flexión con un valor de 81 MPa, lo que representa un incremento del 56%. Sin embargo, en cuanto al módulo elástico solo se consiguió aumentar en las probetas 3V y 11V, en las probetas restantes 6V, 9V y 13V no se consiguió aumentar el módulo elástico como se observa en la Figura 3.26, esto se debe a factores como pequeñas porosidades encontradas en las probetas las cuales generan concentradores de esfuerzo, así como

la dirección de la precarga la cual no está en la misma dirección del ensayo a flexión. Por lo tanto, en este ensayo no se ve reflejado el uso de la precarga, sin embargo, para mejorar en este aspecto es necesario aumentar el porcentaje volumétrico del refuerzo.

El material tiene un comportamiento anisotrópico, ya que los efectos de la precarga están influenciados a lo largo del tejido en la dirección de la precarga más no en la dirección perpendicular del tejido de yute. Por esta razón, si se busca incrementar esta propiedad se debe aumentar la concentración volumétrica del refuerzo, esto se aprecia en el estudio realizado por (Anindya Deb, Sumitesh Das) donde se investigó el efecto de la adherencia matriz/refuerzo y la variación de la fracción volumétrica en compuestos reforzados con tejidos naturales y tejidos naturales híbridos. Manteniendo el mismo espesor en los especímenes se varió la fracción volumétrica aumentando la cantidad de planos de refuerzo de yute de 4 a 7, como resultado se obtuvo un incremento en la resistencia a la flexión de hasta el 30%.

3.5. Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto se realizaron a las configuraciones de probetas: sin carga (SC), 9V y 13 V. Las probetas fueron realizadas bajo el procedimiento descrito en la sección 2.7.3, el dimensionamiento de las probetas fue realizado en función de la Tabla 2.8, como se indica en la Figura 3.27. Para este ensayo se disminuyó paulatinamente la altura de ataque para analizar como varia la resistencia del material frente al impacto. El proyectil de ataque es un elemento de 1 kg de masa y un diámetro de 20 mm.

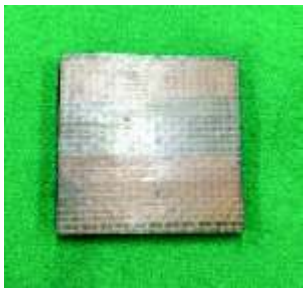
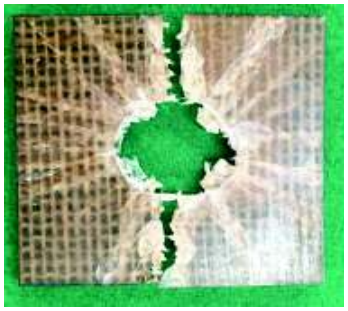
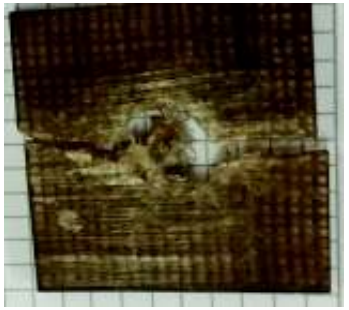
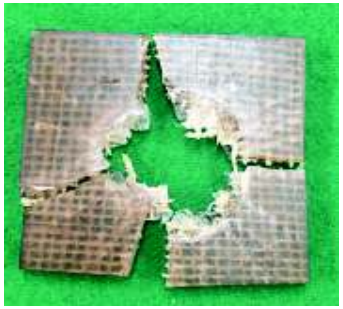
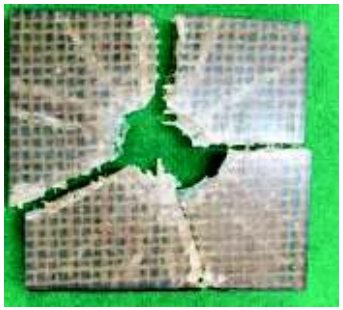


Figura 3.27. Probeta del ensayo de impacto.

(Fuente: propia)

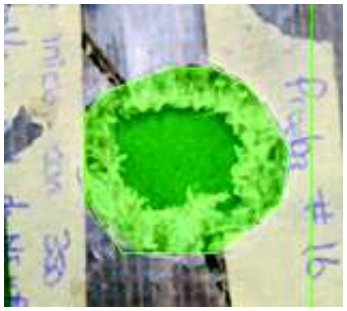
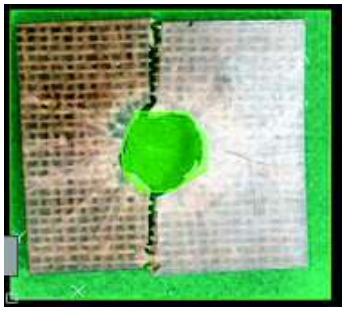
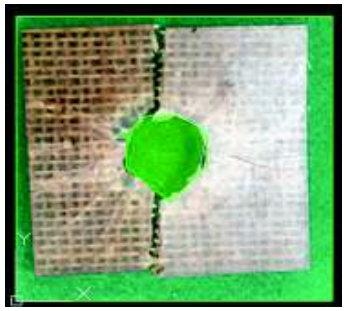
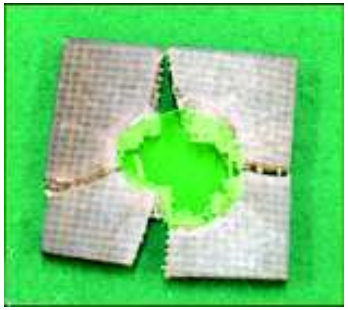
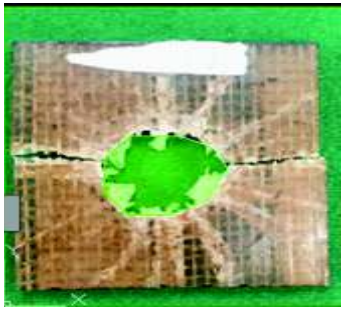
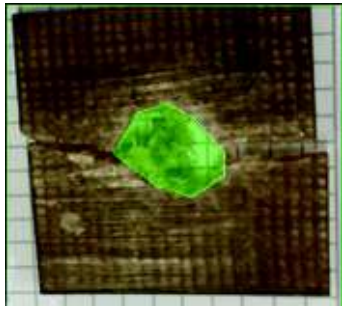
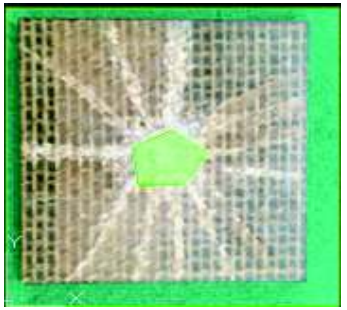
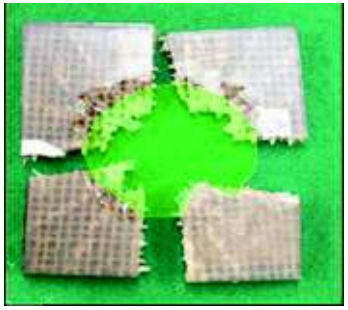
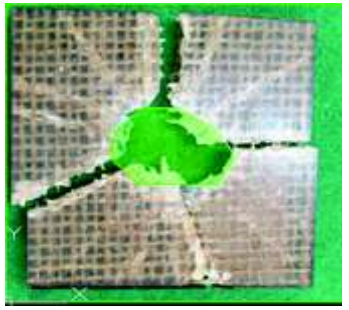
A continuación, en la Tabla 3.23, se presentan los resultados de los ensayos de impacto. De forma decreciente se puede observar cada uno de los grupos de probetas en función de la variación de la altura de impacto. En la Tabla 3.24, se señalan las áreas de análisis producidas por el proyectil.

Tabla 3.23. Grupos de probetas 13V, 9V y SC vs altura.

Grupo	Altura (cm)				
	100	80	60	40	20
13 V					
9 V					
SC					

(Fuente: Propia)

Tabla 3.24. Grupos de probetas 13V, 9V Y SC área de fractura.

Grupo	Altura (cm)				
	100	80	60	40	20
13 V					
9 V					
SC					

(Fuente: Propia)

El análisis de impacto se realizó en función de los siguientes criterios

(i) La energía producida por el proyectil para cada una de las diferentes alturas durante el ensayo.

(ii) El área de impacto asociada a esa energía.

Cabe destacar que en ciertas probetas por la forma del impacto el área es aproximada ya que no se pudieron recuperar la totalidad de ciertas partes de la zona de fractura. A continuación, en la Tabla 3.25, se tiene el área de impacto de cada una de las probetas en función de la energía potencial, estos datos se los obtuvo a partir de un análisis de áreas aproximadas.

Tabla 3.25. Grupos de probetas 13V, 9V Y SC vs energía.

Grupo	**Energía/Altura**				
	9.81 J [100 cm]	7.48 J [80 cm]	5.86 J [60 cm]	3.92 J [40 cm]	1.96 J [20 cm]
	Área [mm²]				
13V	731.49	312.42	208.93	188.21	164.85
9V	562.25	291.93	304.01	190.25	109.95
SC	608.65	645.72	519.11	246.62	286.75

(Fuente: propia)

Como se observa en la Figura 3.28, existe una tendencia en el crecimiento de las áreas de impacto de las probetas.

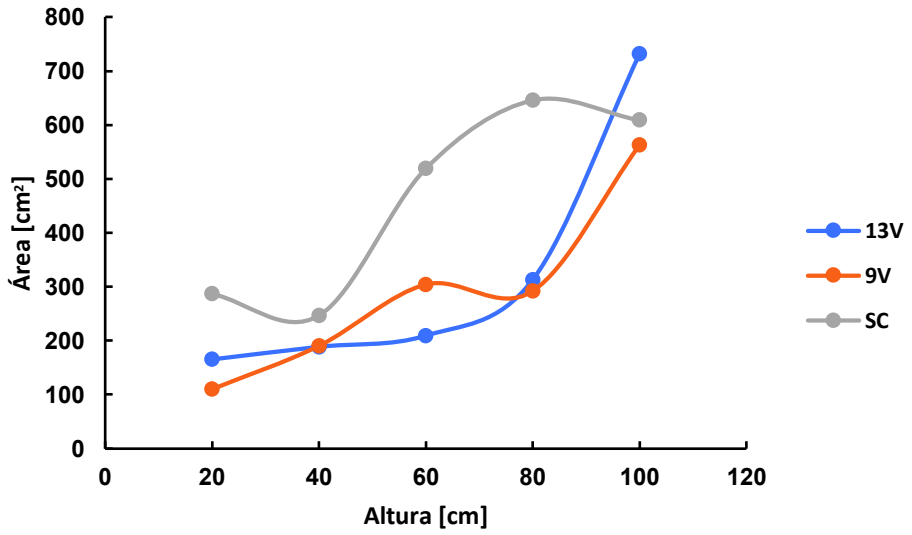


Figura 3.28. Área vs altura de los ensayos de impacto.

(Fuente: Propia)

Las áreas que son más extensas son aquellas de la probeta sin carga (SC), Figura 3.29. Además, en las fotografías de la Tabla 3.23, todas las probetas poseen una vasta intensidad de agrietamiento sobre la matriz, lo que muestra que durante el impacto la mayor cantidad de energía fue absorbida por esta. Todo esto previo la delaminación del material.

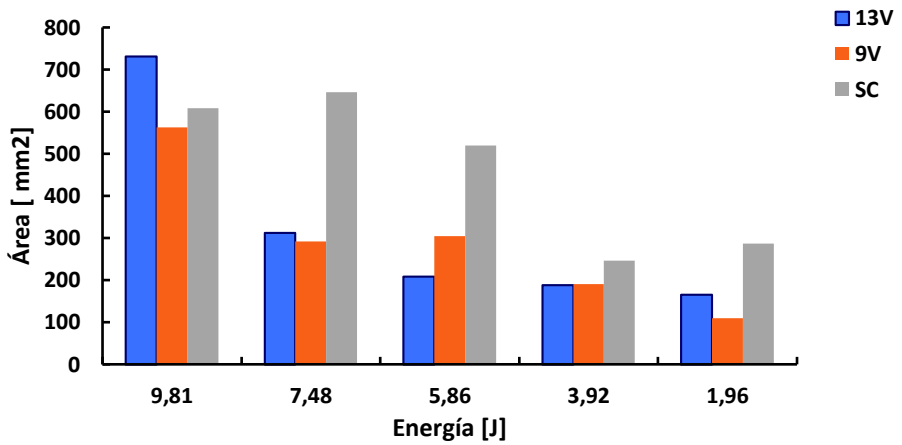


Figura 3.29. Área vs energía de los ensayos de impacto.

(Fuente: Propia)

De los resultados de estos ensayos, se observa en la Figura 3.28 y Figura 3.29, que las áreas máximas de impacto se encuentran en el grupo de probetas sin carga (SC) mientras que las áreas disminuyen en los grupos de probetas 9V y 13V. En todos los grupos la disminución de las áreas tiene un comportamiento uniforme, sin embargo, en el grupo de probetas 9V, Figura 3.28, para la altura de 60cm, el área aumentó en comparación con el área de impacto producida en la altura de 80cm. Estas variaciones se generan por la existencia de concentradores de esfuerzos como porosidades que se forman durante el curado del material y la mala adherencia entre el refuerzo y la matriz. En la sección 3.6 del análisis de microscopia se obtuvo evidencia de la existencia de este tipo de modos de falla en las probetas. Este comportamiento de disminución de área en las probetas es similar al estudio realizado por García Castillo (Garcia, 2007) donde se realizó el análisis a un laminado de tejido de fibra de vidrio/poliéster con precarga uniaxial, para los diferentes estados de precarga existió una diminución del área hasta del 8% con respecto al mismo material sin cargar, de esta investigación se concluyó que la precarga redujo los esfuerzos de flexión del material precargado durante los ensayos de impacto, y de esta manera reducir el área de impacto en el material. Por lo tanto, la precarga frente a cargas de impacto, disminuye los esfuerzos generados en la dirección que fue aplicada la precarga.

El desprendimiento de la matriz del refuerzo, Tabla 3.23, es evidente para los dos estados de precarga (9V y 13V) si los comparamos con las fotografías de las probetas sin carga (SC). El

desprendimiento prematuro en las probetas de la matriz se debe a que el refuerzo restringe el avance de la fractura del compuesto en la dirección que se realizó la precarga, por lo tanto, la matriz es la encargada de absorber la mayor cantidad de energía durante el impacto. Por lo tanto, la delaminación de la matriz con respecto al refuerzo aumenta en el material compuesto cuando este es precargado. La delaminación y problemas en la adherencia entre el refuerzo/matriz son factores generan el desprendimiento de la matriz del refuerzo durante cargas externas en materiales compuestos, este comportamiento también ha sido reportado en otros trabajos como el realizado por S. Heimbs y T. Bergmann (Heimbs, Bergmann, Schueler, & Toso-PentecÔte, 2014) el material analizado fue un material compuesto de matriz epoxica y refuerzo fibra de carbono. De este análisis se obtuvo que una mala adherencia, incrementa la delaminación y desprendimiento de la matriz en el material a consecuencia de esfuerzos externos, en este estudio se recomienda la investigación de nuevos métodos de fabricación que aumenten la adherencia refuerzo/matriz.

3.6. Análisis fractográfico de los ensayos de tracción

3.6.1. Grupo de probetas 13V a tracción

La Figura 3.30, corresponde a una probeta del grupo 13V que fue sometida al ensayo de tracción. En la zona de fractura del material donde se aprecia el punto de inicio de falla inicia la propagación radial de la fractura (recuadro superior derecho verde).

Además, en el recuadro verde inferior izquierdo de la Figura 3.30, se observa la separación entre la interfase refuerzo/matriz del material. En toda la zona de la matriz se aprecia la existencia de áreas más rugosas que indican una propagación rápida de la fractura, esta es una característica propia de un material frágil.

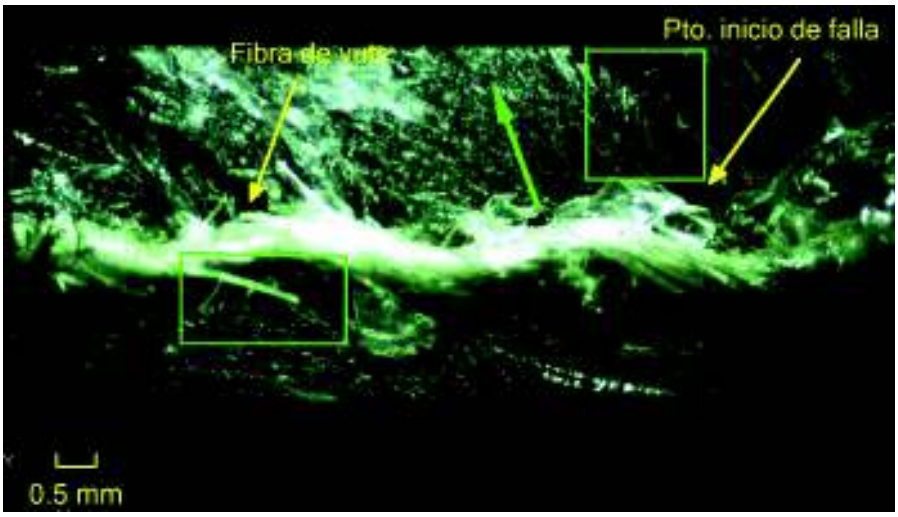


Figura 3.30. Probeta 13V a tracción, ampliación 10X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.31, se aprecia la rotura del tejido natural además del desgarramiento de la fibra y en la Figura 3.32, se observa que las fibras se encuentran cubiertas por resina, por lo tanto, existe una correcta adherencia de la matriz con el refuerzo.

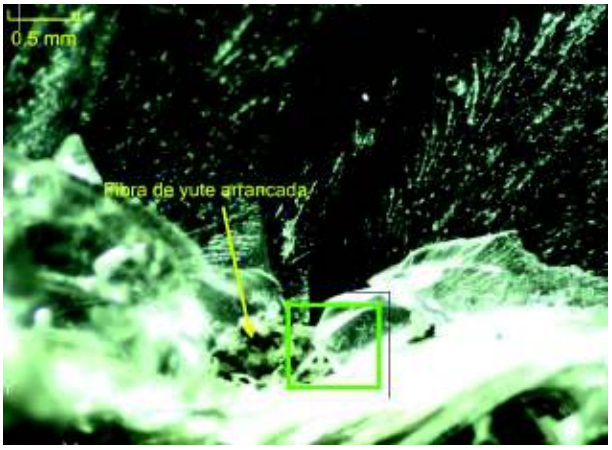


Figura 3.31. Probeta 13V a tracción, ampliación 30X.

(Fuente: Propia)

Figura 3.32. Probeta 13V a tracción, ampliación 50X.

(Fuente: Propia)

3.6.2. Grupo de probetas 9V a tracción

En la Figura 3.33, se aprecia la zona de fractura de una de las probetas del grupo 9V ensayada a tracción. La flecha amarilla indica el punto de inicio de fractura del material, a partir de este punto el frente de grieta tiene un patrón radial que avanza con una apariencia lisa. Después el frente de grieta se acelera y se forman áreas de grietas más rugosas. Todas estas características son similares al comportamiento de materiales frágiles como el vidrio. En el punto de inicio de falla se observa el desgarramiento del refuerzo, lo que permite que se inicie la falla en el material compuesto.

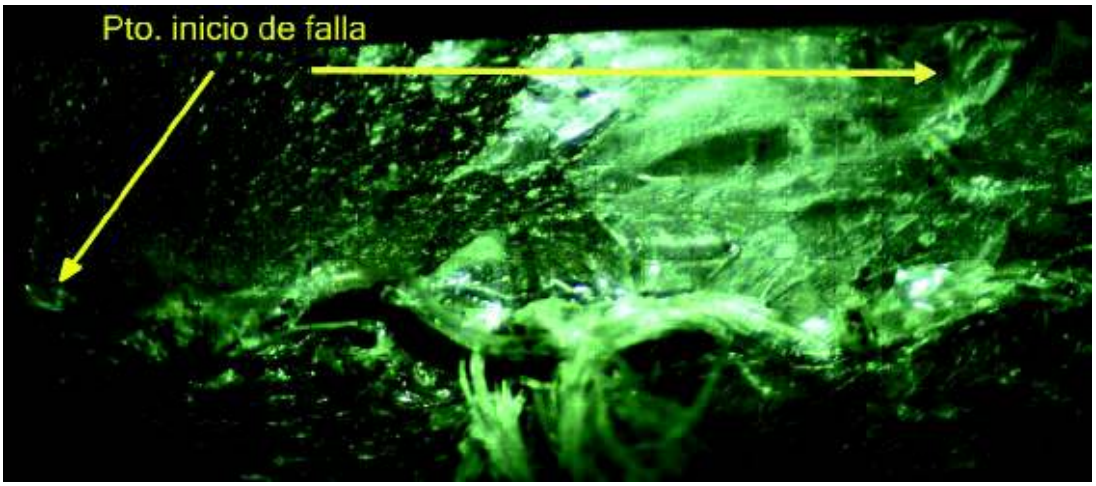


Figura 3.33. Probeta 9V a tracción, ampliación 10X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.34 y Figura 3.35, se observa con claridad como el tejido de yute que actúa como refuerzo se desgarra, además, del desprendimiento entre la matriz y el refuerzo.

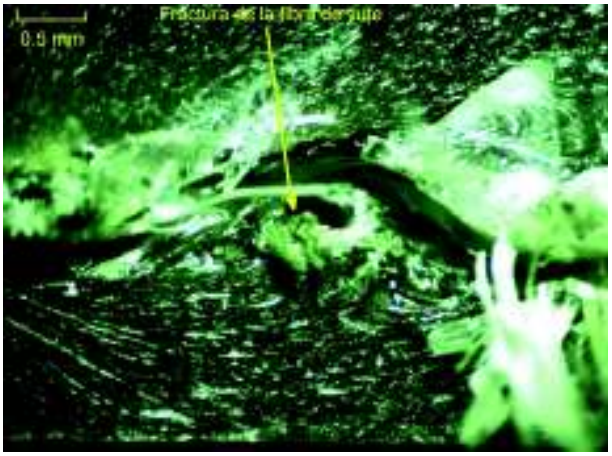


Figura 3.34. Probeta 9V a tracción, ampliación 30X.

(Fuente: Propia)

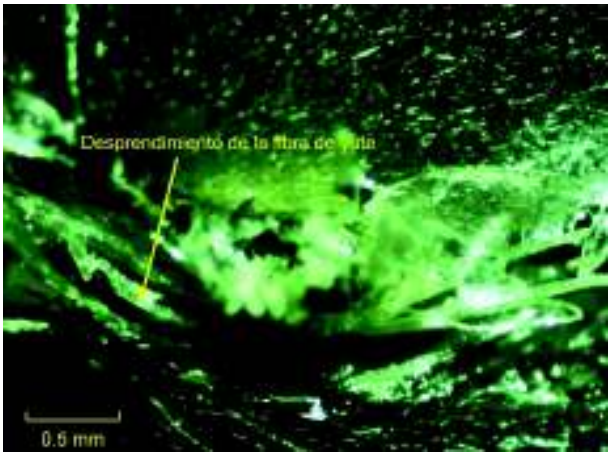


Figura 3.35. Probeta 9V a tracción, ampliación 50X.

(Fuente: Propia)

3.6.3. Grupo de probetas sin carga (SC) a tracción

En la Figura 3.36, se aprecia la zona de fractura de una de las probetas del grupo sin carga (SC) ensayada a tracción. Se repite la tendencia de falla de los otros grupos de probetas 9V y 13V. El incio de falla se genera en el refuerzo del material compuesto y a partir de aquí se inicia la propagación de falla en toda la probeta. Además, en la Figura 3.36, se encuentran dos porosidades, que fueron generadas durante la fabricación del material. Estas porosidades son concentradores de esfuerzos que ayudan a la fractura del material frente a esfuerzos externos.

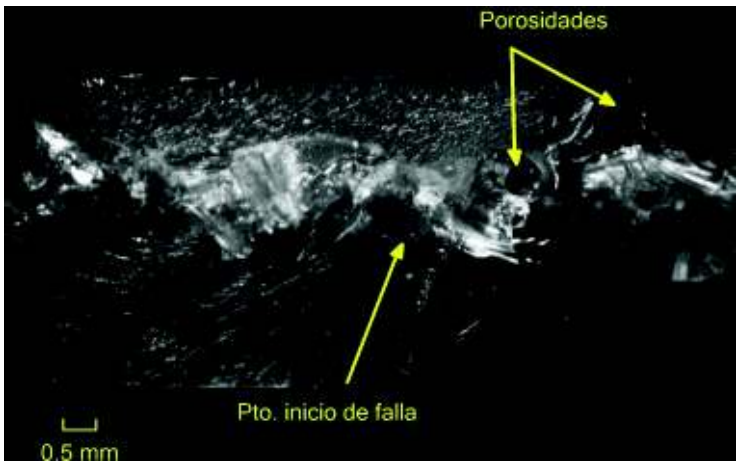


Figura 3.36. Probeta sin carga (SC) a tracción, ampliación 10X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.37, se observa la existencia de un agujero en la matriz del compuesto, este se genera por la mala adherencia de la fibra con la matriz. Cuando el material compuesto está expuesto a cargas externas se generan desprendimientos prematuros del refuerzo. En la Figura 3.38, se aprecia de mejor manera el agujero generado por la falta de refuerzo.

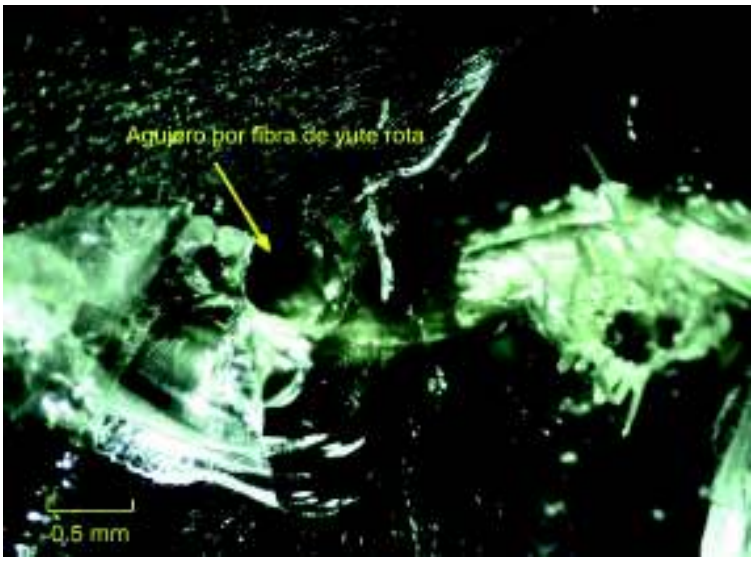


Figura 3.37. Probeta sin carga (SC) a tracción, ampliación 30X.

(Fuente: Propia)

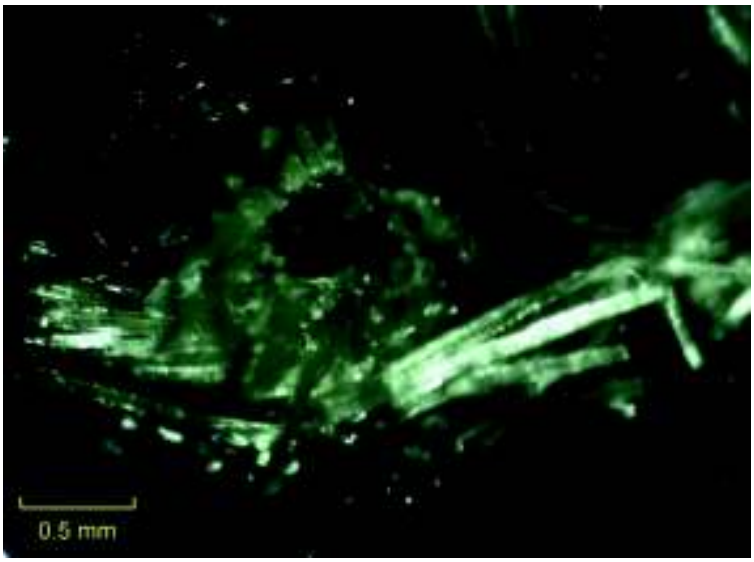


Figura 3.38. Probeta sin carga (SC) a tracción, ampliación 50X.

(Fuente: Propia)

3.7. Análisis fractográfico de los ensayos de flexión

3.7.1. Grupo de probetas 13V a flexión

En la Figura 3.39, el recuadro verde muestra la zona lisa de inicio de fractura que avanza hasta el recuadro amarillo donde se aprecia la zona gruesa de fractura donde se acelera la falla del material compuesto.

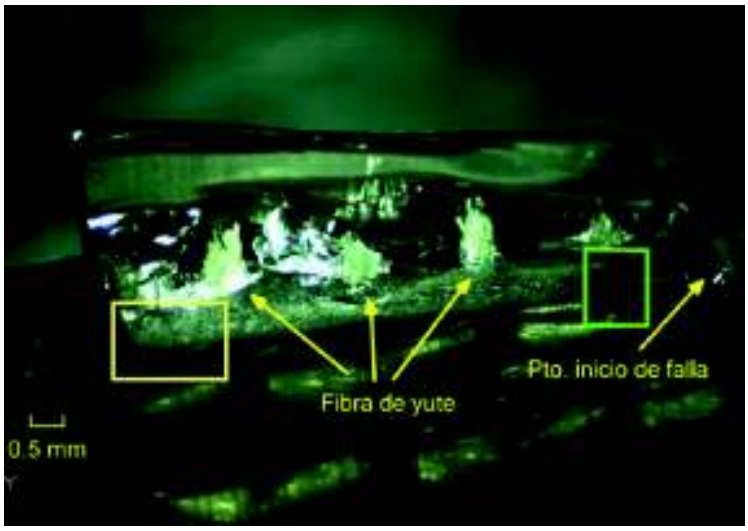


Figura 3.39. Probeta 13V a flexión, ampliación 10X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.40, se aprecia cómo se inició la falla, además, la propagación radial del frente de fractura con su zona lisa y rugosa.

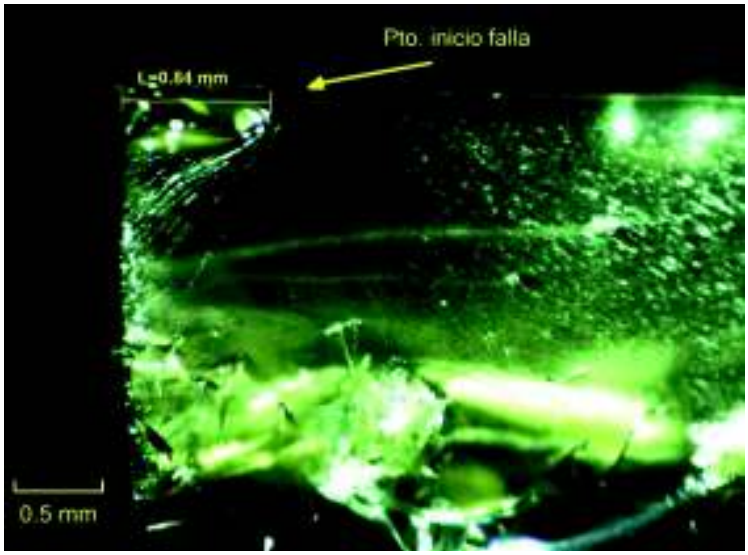


Figura 3.40. Probeta 13V a flexión, ampliación 30X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.41, se aprecia la fibra del tejido de yute desgarrada y a su alrededor grietas en la matriz.

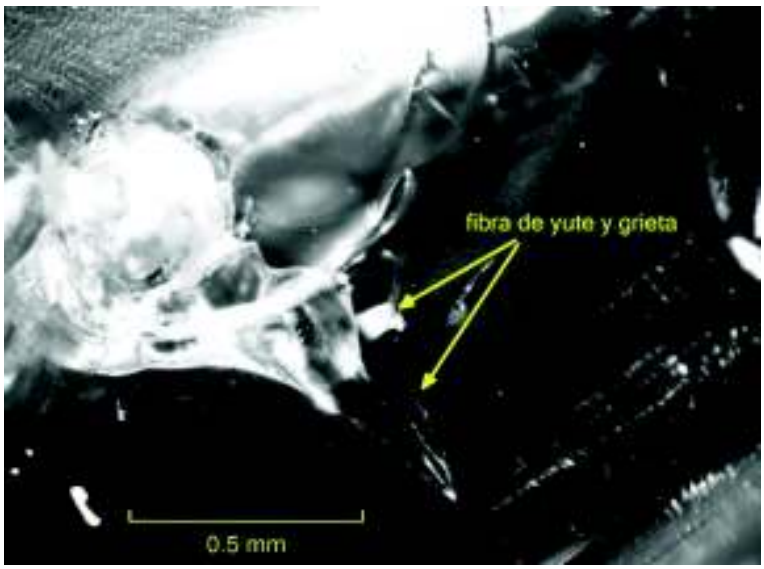


Figura 3.41. Probeta 13V a flexión, ampliación 50X.

(Fuente: Propia)

3.7.2. Grupo de probetas 9V a flexión

En la Figura 3.42, se observa que el punto de inicio de falla se generó en la parte superior del material, precisamente en la matriz. Donde la propagación de la fractura se da a través de un modo de falla conocido como “Tearing”, este tipo de falla es común en los materiales poliméricos. La energía es transmitida desde este punto hacia toda la superficie del plano de la fractura.

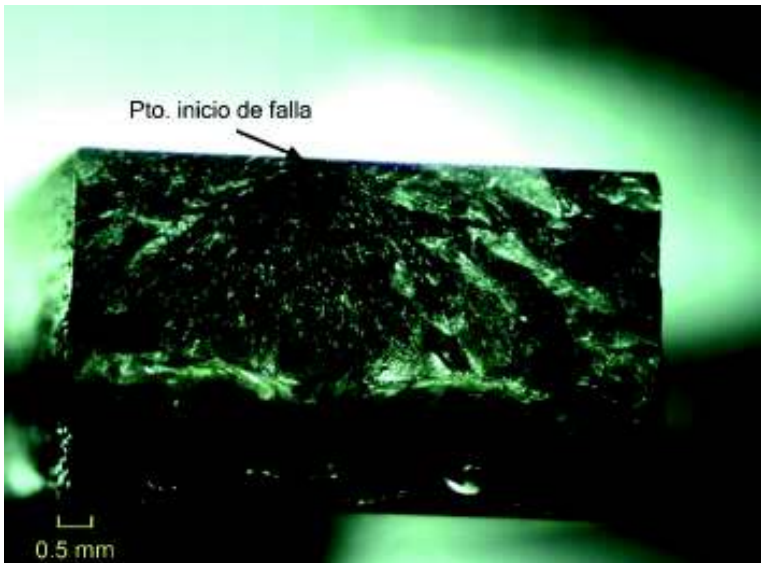


Figura 3.42. Probeta 9V a flexión, ampliación 10X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.43 y 3.44 se observa el punto de inicio de falla en el refuerzo del material compuesto y como se produce el desgarramiento de la fibra natural y la separación de la matriz con el refuerzo. También se corrobora la correcta adherencia de resina en la fibra natural.

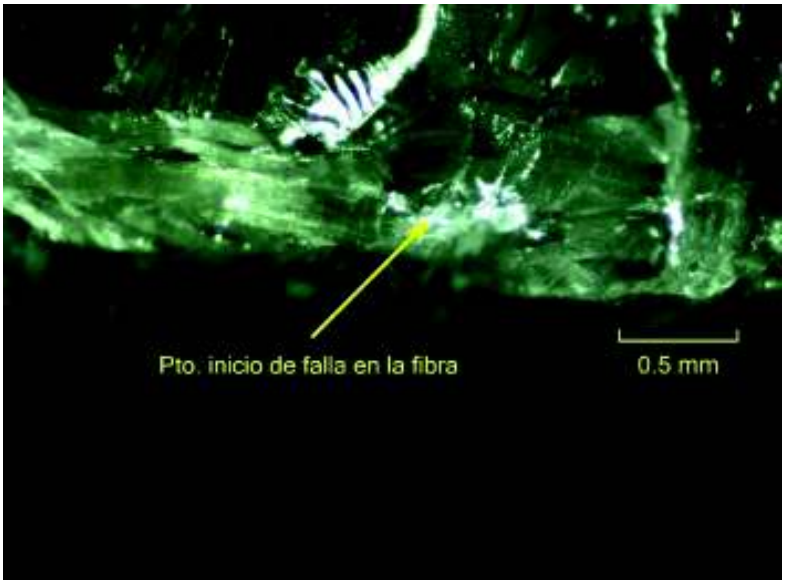


Figura 3.43. Probeta 9V a flexión, ampliación 30X.

(Fuente: Propia)

Figura 3.44. Probeta 9V a flexión, ampliación 50X.

(Fuente: Propia)

3.7.3. Grupo de probetas sin carga (SC) a flexión

De manera similar a las probetas de los grupos anteriores en la Figura 3.45, se observa una fractura frágil con zonas lisas y rugosas bien marcadas encabezadas por el avance radial del frente de falla. En la Figura3.46, de la misma manera sucede el desgarramiento del refuerzo y a continuación se propaga la fractura hacia la matriz polimérica.

Figura 3.45. Probeta sin carga (SC) a flexión, ampliación 10X.

(Fuente: Propia)

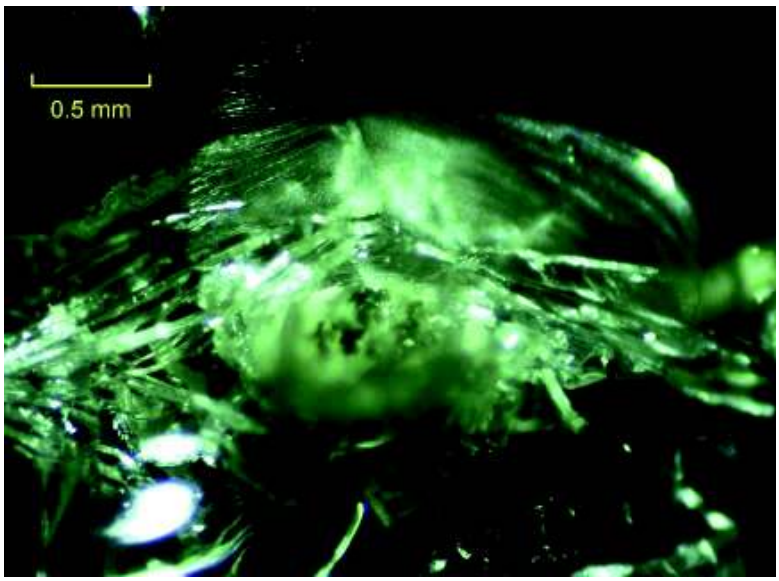


Figura 3.46. Probeta sin carga (SC) a flexión, ampliación 30X.

(Fuente: Propia)

3.8. Cuadro resumen comparación de resultados frente a otros estudios

En la Tabla 3.26, se realiza una comparación de los resultados del presente estudio de titulación con varias investigaciones de materiales compuestos precargados, el cuadro está dividido según el tipo de material utilizado para la fabricación del compuesto, propiedades evaluadas, método de precarga y finalmente los resultados obtenidos.

Cabe destacar que en la mayoría de las investigaciones se realizó estudios con refuerzos sintéticos precargados. En la última parte del cuadro se encuentra el resumen del presente proyecto de titulación.

Tabla 3.26. Comparación de resultados frente a otras investigaciones.

Referencia	Material	Propiedades	Método de precarga	Resultados
(Pang & Fancey, 2008)	Nylon unidireccional y resina epoxy fracción volumétrica del 53%.	Propiedades de tracción.	Estiramiento en plataforma vertical.	La resistencia y el módulo a tracción se incrementaron en 31 y 15% respectivamente; para la resistencia a la tracción el incremento es de 135 a 172 MPa aproximadamente.
(Schulte & Marissen, 1992)	Fibra de aramida (0°) / Fibra de carbono (90°) / Epoxi compuesto de capas cruzadas híbridas con secuencia de laminado (0/90/90/0).	Propiedades de tracción en dirección de la fibra y agrietamiento transversal	Cierre mecánico de ranura en V.	La precarga aumentó el esfuerzo promedio a tracción en 3.3%, lo que significa un aumento de 555 a 571 MPa, aproximadamente.
(Sui, Yao, & Zhou, 1995)	Laminado de vinil (poli (alcohol vinílico)) de fibra / epoxi-aluminio (VIRALL).	Propiedades de tracción en dirección de la fibra	No se especifica.	El módulo de resistencia a tracción se incrementó de 48.1 a 51.5 GPa. Este incremento se realizó de una probeta sin carga a una probeta precargada de 300 MPa.

(Motahhari & Cameron, 1998)	E-fibra de vidrio / epoxi compuesto unidireccional. Fracción volumétrica de 62 %	Propiedades de impacto	Máquina horizontal de precarga.	Existe un aumento del 33% en la resistencia al impacto para el compuesto precargado. El incremento es de 60 MPa en comparación con los compuestos sin precarga.
(Zaidi, Magniez, & Miao, 2015)	Hilo de fibra natural (Lino) precargado reforzado con matriz polimérica.	Propiedades mecánicas del material compuesto	Máquina horizontal de precarga.	La resistencia y módulo a tracción de los materiales compuestos precargados fueron significativamente superior al del compuesto sin precarga. Los mejores resultados tuvieron un incremento del 15 y 36%, lo que significa un aumento en la resistencia a la tracción de 190 a 215 MPa y el módulo a la tracción de 10 a 14 GPa.
Proyecto de titulación	Matriz poliéster reforzado con tejido plano de yute precargado.	Propiedades mecánicas de tracción, flexión e impacto.	Máquina horizontal de precarga.	Las probetas precargadas al 15% presentaron un mejor comportamiento a tracción teniendo como resultado un incremento del 66%. Lo que significa un aumento en la resistencia de 20.88 a 34.68 MPa. Las probetas precargadas al 15% en el ensayo a flexión presentaron un incremento del 19%. Lo que significa un aumento en la resistencia de 51.78 a 61.86 MPa.

Fuente: Propia

3.9. Aplicaciones en la industria aeroespacial

Dependiendo de su función las estructuras de los aviones ligeros pueden provenir de diversos materiales como maderas, metales y materiales compuestos. La selección del material dependerá de varios factores de diseño como son la resistencia a la tracción, flexión, impacto, tenacidad a la fractura, agrietamiento, densidad, temperatura y corrosión. Además, se deben considerar los costos de material y del proceso de manufactura del elemento a partir del material. (European Union Aviation Safety Agency, 2018)

Los materiales compuestos ofrecen ahorros significativos de peso en comparación a otros materiales como son los metales. Al obtener un material con un buen desempeño mecánico en comparación a su peso se puede reducir la cantidad de elementos complementarios de la estructura como también la eliminación de sujetadores y remaches. Además, los materiales compuestos de matriz polimérica brindan mejor resistencia frente a la corrosión en comparación a otros materiales.

Las propiedades de resistencia y rigidez de un material compuesto dependen de la orientación de la fibra ya sea como fibras libres o en una estructura tejida o mallada. Es por eso que las propiedades del nuevo material pueden ser diseñadas en función de las cargas estructurales que deberán soportar ya en uso. La mayoría de los elementos aeroespaciales son fabricados a partir de varios planos de fibras unidireccionales. Estos planos generalmente son diseñados con una orientación de fibra de 0 ,90 y 45 grados. (Gundlach, 2014)

La mayor carga soportada por un ala son fuerzas de flexión y torsión, aquí la mayoría de las fibras son orientadas en una dirección de 0 grados. Esta distribución permite que el material reaccione a los esfuerzos generados por flexión, además, puede diseñarse una orientación de 45 grados para intensificar la resistencia frente a los esfuerzos generados por la torsión.

La “European union aviation safetey agency” recomienda que para la aplicación de un material compuesto en estructuras aeroespaciales esta debe cumplir requisitos de resistencia y deformación para condición de carga crítica. El análisis estructural debe ser aplicado solo si el material de la estructura se ajusta a aquellos procedimientos ingenieriles que han demostrado ser métodos confiables en trabajas anteriores. Las pruebas dinámicas son aceptables si las condiciones de simulación así lo permiten.

La “European union aviation safetey agency” en su normativa para el diseño de aeronaves ligeras (CS-VLA) aplica los criterios de las normas ASTM F3114 – 15 “Standard specification for structures”, ASTM F3115 “Specification for structural durability for small airplanes” y la ASTM F3116 “Specification for design loads and conditions” para aprobar o no la aplicación de diferentes materiales entre ellos materiales compuestos sintéticos. (European Union Aviation Safety Agency, 2018). La “European Union Aviation Safetey Agency” sugiere los materiales dados en la Tabla 3.27. Estos pueden ser tomados como recomendación suficiente para el diseño de las estructuras en aviones ligeros. El objetivo principal es que estos elementos estructurales tengan vidas adecuadas y seguras.

Tabla 3.27. Resistencia máxima de materiales aprobados por “European union aviation safetey agency”.

Material	Niveles máximos de resistencia permitido
Fibra de vidrio y resina epoxy	250 MPa
Fibra de carbono y resina epoxy	400 MPa
Madera	ANC-18[1]
Aleaciones de aluminio	La mitad de la resistencia a la rotura de la tensión.
Aleaciones de acero	La mitad de la resistencia a la rotura de la tensión.

(Fuente: European Union Aviation Safety Agency, 2018)

Cabe destacar que estas normas solo sirven de referencia ya que no existe ningún requerimiento específico para materiales compuestos fabricados a partir de fibras naturales. Se debe realizar un procedimiento adecuado de pruebas para comprobar las propiedades mecánicas de resistencia del material compuesto y comprobar que este cumpla con las especificaciones de diseño en función de una base estadística. De no existir esta información por el fabricante del material se debe realizar un análisis de confiablidad del material por el diseñador.

En la norma ASTM F3114-15 recomienda para la fabricación de estructuras de aeronaves ligeras, materiales compuestos de fibra de vidrio o fibra de carbono en resina epoxy, también brinda una alternativa para la construcción como son diferentes tipos de maderas ligeras.

A continuación, en la Tabla 3.28, se muestra algunos materiales compuestos comúnmente utilizados en la industria aeroespacial con sus características y al final se compara con las probetas de mejor características obtenidas de este estudio de titulación.

[1] ANC-18 Es el bolletin ANC " Design of wood aircraft structures" publicado en 1944 por Comité de Criterios de Diseño de las Aeronaves Ejército-Marina-Civil (USA)

Tabla 3.28. Tabla comparativa de diferentes materiales aplicados en la industria aeroespacial.

Material	Resistencia a la tracción [MPa]	Elasticidad [MPa]	Densidad [gr/cm^3]
Grafito- Resina epoxy (0)	758-1241	144.78	1.55
Grafito- resina epoxy (45)	116	16	1.55-1.6
E vidrio - epoxy	724	30	1.96
Aramida epoxy	1379	30	1.96
Boron epoxy	1345	207	1.9
Maderas ANC-18			
Balsa	12	4000	0.20
Abeto	39	16400	0.53
Roble	39	16600	0.75
Material precargado			
9V	34.68	1930	1.19

(Fuente: Propia)

Existe un mejor desempeño en función de la resistencia a la tracción de las fibras sintéticas en comparación con los materiales de madera y el material compuesto natural precargado. En relación al módulo elástico, el material precargado y las maderas presentan módulos de elasticidad elevados, lo que nos da a entender un comportamiento rígido de estos materiales. En cambio la densidad en los tres tipos de materiales puede ser comparable ya que presentan valores próximos.

3.9.1. Aplicaciones en la industria civil

Actualmente la industria civil se busca el desarrollo de sistemas de paneles cuyo objetivo principal es el montaje rápido. Una de las principales ventajas de este tipo de construcciones es la capacidad de realizar trabajos de mantenimiento en cortos periodos de tiempo, a su vez, simplifica los procedimientos y materiales necesarios para reemplazar techos o estructuras que ya hayan cumplido su vida útil. Materiales paneleados permiten al diseñador tener una amplia gama de productos con diferentes formas de terminaciones, modulaciones y dimensiones.

Los sistemas pueden ser auto portante o fijo, y estos son colocados en estructuras de soporte que normalmente son de materiales de mayor resistencia como: aluminio, acero inoxidable,

acero galvanizado, madera etc. Los techos de estructuras se pueden dividir en dos grandes grupos: metálicos y no metálicos.

En el mercado comúnmente se emplean dos tipos de materiales para la fabricación de techos los cuáles son: vidrio templado y policarbonato. A continuación, en la Tabla 3.29, contiene propiedades mecánicas de los materiales que son más utilizados en la construcción de techos de estructuras.

Tabla 3.29. Propiedades mecánicas de los materiales no metalicos utilizados en la construcción de techos.

Material	Resistencia a tracción [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Vidrio templado	29 -100	40-100	70**000**
Policarbonato	35-63	80-90	2255

(Fuente: Acimco)

En el campo de paneles y tableros, recientemente la investigación realizada por Bektas y su grupo de investigadores, desarrollaron un compuesto multicapas a partir de una mezcla de tallos de girasol y madera de álamo en ciertas proporciones utilizando urea-formaldehído (UF) adhesivos. Los paneles, con una densidad de 0.7 g/cm^3, se fabricaron con las proporciones de 25, 50 y 75 por ciento de partículas de tallos de girasol o álamo. Los paneles eran sometidos a diversas pruebas de propiedades mecánicas. Estos resultados mostraron que todos los paneles proporcionan las propiedades requeridas por los estándares normales para paneles de construcción. (Bektas, Guler, Kalayciog˘lu, Mengeloglu, & Nacar, 2005)

A continuación, en la Tabla 3.30, se tienen los resultados obtenidos del compuesto formado por tallos de girasol y madera de álamo.

Tabla 3.30. Propiedades mecánicas del compuesto de tallos de girasol/madera de álamo.

Probeta (%) Tallos de girasol (T) Madera de álamo(P)	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
T0%P100%	25.3	2963
T25%P75%	22.96	2511
T50%P50%	22.03	2681
T75%P25%	19.53	2440
T100%P0%	15.65	1800

(Fuente: Bektas, Guler, Kalayciog˘lu, Mengeloglu, & Nacar)

El material de compuesto de yute precargado presenta características competitivas con los ejemplos antes expuestos de materiales ocupados para la construcción, lo que demuestra su aplicabilidad en la industria de construcción. El compuesto precargado del grupo de probetas 9V posee una resistencia a la tracción de 33.2 MPa superior a la del compuesto girasol/Madera, además se mantiene competitivo frente al policarbonato y el vidrio templado. A continuación, resumimos estos resultados en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31. Comparaciones materiales para la construcción y material compuesto.

Material	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Vidrio templado	29 - 100	**70 000**
Policarbonato	35 - 63	2255
T25%P75%	22.96	2511
9V	34.68	1930

(Fuente: Propia)

3.9.2. Aplicaciones en la industria automotriz

Una filial de la compañía Mercedes Benz fue pionera en el concepto de utilizar materiales compuestos reforzados con fibras naturales en el proyecto ‘'Proyecto Beleem'' con sede en Sao Paulo, Brasil. Durante este proyecto se utilizó fibras de coco en los vehículos comerciales durante un período de 9 años. Es importante mencionar que Mercedes Benz utiliza puertas a base de yute en sus vehículos clase E desde 1996. Este suceso motivo a Chrysler a utilizar fibras de naturales desde septiembre de 2000. (Suddell & Evans, 2005)

Suddel y Evans encaminan una de sus investigaciones en la industria automotriz, la cual se enfoca en la aplicación de fibras de algodón con matriz de poliéster en el cuerpo del coche “Trabant” de Alemania Oriental. A continuación, en la Tabla 3.32, se muestra un resumen de las propiedades mecánicas del material duroplast (algodón + poliéster) utilizado para la fabricación del auto “Trabant”.

Tabla 3.32. Propiedades mecánicas del compuesto algodón y poliéster.

Material	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Duroplast	60	9000

(Fuente: Suddell & Evans)

Este material era parte de varios elementos estructurales del automóvil, sin embargo, su composición volumétrica no se encuentra registrada o especificada por derechos de autor.

La mayoría de las fibras de tallo estudiadas se obtienen del lino, cáñamo, kenaf y yute. Estas fibras son renovables y no abrasivas para los equipos durante la producción, pueden incinerarse al final de su ciclo de vida para recuperar energía, ya que poseen un apropiado poder calorífico. Así mismo, son más seguras durante su producción y no representan un posible problema de salud para el pulmón humano a diferencia de la fibra de vidrio.

Las aplicaciones automotrices representan una de las mejores oportunidades para los materiales termoplásticos rellenos de fibra natural debido a algunas ventajas distintivas sobre los compuestos de fibra de vidrio. Estos combinan peso ligero entre 35 y 40% más liviano que el vidrio, bajo costo, mejor absorción de choques y aislamiento acústico. Algunas posibles aplicaciones potenciales en este campo pueden ser: puertas, paneles de instrumentos, bandejas de paquetes, cajas de guantes, reposabrazos y respaldos de asiento. (Pervaiz y Sain, 2003)

El estudio realizado por Pervaiz y Sain indicó en su investigación de termoplásticos reforzados con fibra natural a base de cáñamo son candidatos prometedores en aplicaciones automotrices donde se requiere una alta rigidez. A partir de este estudio de caracterización mecánica obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Propiedades mecánicas del compuesto de cáñamo.

Cáñamo Fracción volumétrica %	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
64	40	62
68	50	59
70	58	60

Fuente: (Pervaiz y Sain, 2003)

La Tabla 3.34, muestra la comparación entre los resultados del estudio de Pervaiz-Sain, y los resultados de Suddel-Evans, además de los obtenidos del compuesto de poliéster más yute.

Tabla 3.34. Comparación de materiales en la industria automotriz y el material precargado.

Material	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]
Cáñamo 64%	40	62
Cáñamo 68%	50	59
Cáñamo 70%	58	60
Duroplast	60	N/A
9V	34.68	61.86

(Fuente: Propia)

Cabe destacar que el porcentaje volumétrico del compuesto precargado de yute es inferior al de los demás materiales. La resistencia a la tracción sigue manteniéndose inferior frente a los otros materiales, sin embargo, la resistencia a la flexión es más competitiva.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Acorde a los resultados expuestos en el capítulo 3, se afirma que los objetivos planteados en este proyecto se cumplieron satisfactoriamente, debido a que no existió inconveniente en la obtención, fabricación y caracterización del material compuesto precargado.

El molde de precarga uniaxial de acero ASTM A36 permite precargar el tejido de yute hasta una carga de 500 N, además, este modelo mantiene la compresión necesaria durante la elaboración del material compuesto lo cual nos da como resultado un buen acabado superficial.

El tiempo ideal de curado es de 24 min antes de colocar la tapa del molde, es decir, una vez que se añade el catalizador MEKT se debe contabilizar 24 min y después se procede al sellado del molde. De igual manera los porcentajes ideales para el curado de la resina para esta investigación fueron de 11% de estireno monómero, 0.5% de octoato de cobalto y 0.75% de catalizador mekt.

La importancia de trabajar con fibra de yute radica en el hecho de que el producto es altamente comercializado, lo que facilita la adquisición de este material en comparación con otras fibras naturales. Además, el material tiene una buena calidad como tejido.

Al comparar las diferentes precargas aplicadas al tejido del compuesto con respecto al poliéster, se tiene un aumento del esfuerzo máximo a tracción y módulo elástico en todas las configuraciones. El compuesto reforzado con tejido de yute a una precarga de 9V, con fracción volumétrica de 5%, con estireno y 15 días de curado fue el que presentó la mayor resistencia a la tracción con un valor de 35 MPa, la cual constituyó un incremento del 76% con respecto a la resina poliéster. Por otro lado, el material reforzado con tejido de yute a una precarga de 6V, ofreció el mayor módulo elástico con 1936 MPa, esto representó un aumento del 65%.

Al comparar las diferentes precargas aplicadas al tejido del compuesto con respecto al poliéster con tejido sin carga (SC), se tiene un aumento del esfuerzo máximo a tracción y módulo elástico en todas las configuraciones de precargas aplicadas en el que sobresale la probeta 9V con un aumento de 66% en el esfuerzo máximo a tracción y un 16% en el módulo elástico, por lo tanto, se establece la importancia de la precarga en materiales compuestos.

Observando los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y flexión se establece un intervalo de precarga ideal del 15 al 20% de la rotura del tejido de yute, por lo tanto, en este punto se tienen las mejores propiedades mecánicas para este material compuesto

Al comparar las diferentes precargas aplicadas al tejido del compuesto con respecto al poliéster, se tiene un aumento del esfuerzo máximo a flexión y módulo elástico en todas las configuraciones. El mayor incremento para el esfuerzo máximo a flexión se estableció en la probeta 3V con un aumento de 189% y para el módulo elástico se estableció en la probeta 11V con un aumento de 92%.

Al comparar las diferentes precargas aplicadas al tejido del compuesto con respecto al poliéster con tejido sin carga (SC), se tiene un aumento del esfuerzo máximo a flexión en todas las configuraciones. El mayor incremento para el esfuerzo máximo a flexión se estableció en la probeta 3V con un aumento del 56%, sin embargo, el módulo elástico solo se incrementó en los grupos de probetas 3V y 11V donde el aumento fue de 10% y 21% respectivamente. Esto se debe a que el ensayo se realizó en dirección perpendicular al de la precarga.

El área de impacto de la probeta objetivo sin carga (SC) es significativamente mayor que las áreas de las probetas que tienen refuerzo precargado (9V, 13V y 3V). El material precargado se rigidiza por lo tanto limita la expansión de las cargas de impacto en dirección de la precarga.

El grupo de precarga 9V presentó una menor área de impacto en comparación con el grupo de precarga 13V, sin embargo, esta diferencia no es tan apreciable. Esto se debe a que la mayor cantidad de energía durante el impacto fue absorbida por la matriz del material compuesto más no en un inicio por el refuerzo. Esto se puede compensar variando la fracción volumétrica del material, pero el objeto de este estudio fue evaluar la influencia de la precarga en el material compuesto.

La precarga de la matriz durante el proceso de manufactura del material compuesto permitió la homogeneización lineal del tejido, es decir, reduciendo el número de hilares torcidas o disparejas. Esto es beneficioso ya que reduce el número de concentradores de esfuerzos

generados por estas distribuciones disparejas durante la compresión en la fabricación del material.

A partir de la rotura de la fibra del tejido en las probetas, siempre se presentaron patrones de fractura radial entorno a la matriz del material compuesto, presentando zonas rugosas de fractura. Una vez que la resistencia del refuerzo era vencida en los ensayos mecánicos, se expandía en toda la zona de falla una fractura característica de los materiales frágiles.

.

4.2. Recomendaciones

Evaluar la influencia de la adherencia entre el tejido natural y refuerzo, además como afecta al correcto desempeño del material compuesto.

Estudiar la maquinabilidad de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, y proponer técnicas que faciliten la manufactura de productos desarrollados complejos a partir de estos materiales.

Se recomienda utilizar la precarga para la obtención de nuevos materiales con diferentes fibras naturales para aumentar las propiedades mecánicas del material.

Se recomienda utilizar el mismo material compuesto propuesto en esta investigación, pero con diferente porcentaje volumétrico para verificar las ventajas de la variación volumétrica en materiales precargados.

Se recomienda buscar métodos eficientes de manufactura con la finalidad de disminuir el costo y tiempo de fabricación que es lo más vital en temas de nuevos materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] X.-S. Yi, S. Du, and L. Zhang, Composite Materials Engineering, Volume 1, vol. 1. 2018.

[2] A. K. F. Hassan and O. A. Abdullah, “New Methodology for Prestressing Fiber Composites,” Univers. J. Mech. Eng., vol. 3, no. 6, pp. 252–261, 2016.

[3] C. E. Carraher, “Polymer Chemistry, Sixth Edition,” Sixth Ed., pp. 1–902, 2003.

[4] D. W. Green, J. E. Winandy, and D. E. Kretschmann, “Mechanical properties of wood determined,” Science (80-.)., vol. 46, no. 1195, pp. 516–517, 1917.

[5] F. J. Perosanz, M. Serrano, C. Martínez, and J. Lapeña, “Cálculo de la tenacidad de fractura a través de ensayos dinámicos,” Rev. Metal., vol. 34, no. 5, pp. 399–406, 2010.

[6] X. Ming-qing, Z. Ling, and W. Lai-sheng, “Game analysis of product innovations aimed at differentiation in markets with network externalities,” Proc. - 2008 Int. Work. Model. Simul. Optim. WMSO 2008, vol. 1, no. June, pp. 175–178, 2009.

[7] A. Gopinath, M. Senthil Kumar, and A. Elayaperumal, “Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices,” Procedia Eng., vol. 97, pp. 2052–2063, 2014.

[8] A. Deb, S. Das, A. Mache, and R. Laishram, “A Study on the Mechanical Behaviors of Jute-polyester Composites,” Procedia Eng., vol. 173, pp. 631–638, 2017.

[9] M. R. Sanjay, K. Gopalakrishna, G. R. Arpitha, B. Yogesha, and L. L. Naik, “Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview,” Nat. Resour., vol. 07, no. 03, pp. 108–114, 2016.

[10] P. Herrera Franco and A. Valadez-González, Fiber-Matrix Adhesion in Natural Fiber Composites. 2010.

[11] M. K. Saravanakumar, B. V. Ramnath, V. Naveenkumar, C. Elanchezhian, G. Ramakrishnan, and M. Rajendrakumar, “Review on mechanical properties of natural fiber composites.,” Mater. Today Proc., vol. 5, no. 1, pp. 1785–1790, 2018.

[12] D. G. R. William D. Callister, Jr., Materials science and engineering and introduction., Eighth., vol. 1. 2010.

[13] S. T. Chiu, Y. Y. Liou, Y. C. Chang, and C. L. Ong, “Low velocity impact behavior of

prestressed composite laminates," Mater. Chem. Phys., vol. 47, no. 2–3, pp. 268–272, 1997.

[14] M. S. Salit, M. Jawaid, N. Bin Yusoff, and M. E. Hoque, "Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites," Manuf. Nat. Fibre Reinf. Polym. Compos., no. June, pp. 1–383, 2015.

[15] M. S. Salit, M. Jawaid, N. Bin Yusoff, and M. E. Hoque, "Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites," Manuf. Nat. Fibre Reinf. Polym. Compos., pp. 1–383, 2015.

[16] C. Garnier, T. Djilali, R. Brault, and S. Mistou, "Impact Resistance of Composite Materials under Biaxial Preloading," Key Eng. Mater., vol. 482, no. June, pp. 39–48, 2011.

[17] S. Motahhari and J. Cameron, "Impact strength of fiber pre-stressed composites," Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 17, no. 2. pp. 123–130, 1998.

[18] A. Moudood, A. Rahman, A. Öchsner, M. Islam, and G. Francucci, "Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance," J. Reinf. Plast. Compos., vol. 38, no. 7, pp. 323–339, 2019.

[19] C. Eaborn, Handbook of Spectroscopy. Vol. II, vol. 117, no. 1. Weinheim: Wiley, 2002.

[20] K. S. Ahmed and S. Vijayarangan, "Tensile, flexural and interlaminar shear properties of woven jute and jute-glass fabric reinforced polyester composites," J. Mater. Process. Technol., vol. 207, no. 1–3, pp. 330–335, 2008.

[21] R. S. Alma Hodzic, Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Properties Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2014.

[22] I. Jones, Ultrasonic and dielectric welding of textiles. 2013.

[23] Gibson Ronald F., "Principles of Composite Material Mechanics," Isbn0070234515 9780070234512, no. 205, pp. xxvii, 579 p., 1994.

[24] K. Hawk, "Wood in small aircraft construction," Introd. to Aerosp. Mater., pp. 411–427, 2012.

[25] S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi, and M. Kochubabu, "Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review," Ind. Crops Prod., vol. 33, no. 1, pp. 7–22, 2011.

[26] F. C. Campbell, Manifacturing Process for Advanced Composites. 2014.

[27] C. Medrano and J. Restrepo, “ANÁLISIS DE LAMINADOS DE MATERIALES COMPUESTOS CON PRECARGA EN SU PLANO Y SOMETIDOS A IMPACTO,” Historia Santiago., pp. 41–322, 2010.

[28] K. Sehanobish, Engineering Plastics and Plastic Composites in Automotive Applications. 2011.

[29] J. Gundlach, “Designing Unmanned Aircraft Systems: A Comprehensive Approach, Second Edition,” Des. Unmanned Aircr. Syst. A Compr. Approach, Second Ed., 2014.

[30] D. O. D. W. DC, Composite Materials Handbook. Polymer Matrix Composites Materials Properties, vol. 2. 2000.

[31] S. C. A. A. Richard Horrocks, Subhash Anand, Ed., Handbook of Technical Textiles Handbook of Technical Textiles, A. Richard Horrocks Volume 12 of Woodhead Publishing Series in Textiles, Reprint. Woodhead Publishing, 2000.

[32] A. B.-G. Katherine Townsend, Ed., Textile Design: Principles, Advances, and Applications, Limited. Woodhead Publishing, 2011.

[33] M. Muthukumar and S. F. Edwards, “Chain Statistics and Scaling Concepts,” Compr. Polym. Sci. Suppl., pp. 1–47, 2012.

[34] J. W. C. Pang and K. S. Fancey, “Analysis of the tensile behaviour of viscoelastically prestressed polymeric matrix composites,” Compos. Sci. Technol., vol. 68, no. 7–8, pp. 1903–1910, 2008.

[35] S. C. Zunjarrao and R. P. Singh, “Characterization of the fracture behavior of epoxy reinforced with nanometer and micrometer sized aluminum particles,” Compos. Sci. Technol., vol. 66, no. 13, pp. 2296–2305, 2006.

[36] G. X. Sui, G. Yao, and B. L. Zhou, “Influence of artificial pre-stressing during the curing of VIRALL on its mechanical properties,” Compos. Sci. Technol., vol. 53, no. 4, pp. 361–364, 1995.

[37] K. Schulte and R. Marissen, “Influence of artificial pre-stressing during curing of CFRP laminates on interfibre transverse cracking,” Compos. Sci. Technol., vol. 44, no. 4, pp. 361–367, 1992.

[38] S. Heimbs, T. Bergmann, D. Schueler, and N. Toso-PentecÔte, “High velocity impact on preloaded composite plates,” Compos. Struct., vol. 111, no. 1, pp. 158–168, 2014.

[39] R. C. Adams, S. Advani, David E. Alman, and Finn Roger Andressen, “ASM Handbook Volume 21 - Composites,” ASM Int., vol. 21, p. 2605, 2001.

[40] M. Fan, Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction. 2016.

[41] O. de las naciones unidas para la alimentación y Agricultura., “Organizacion de las naciones unidas para la alimentación y agricultura.,” 2017. [Online]. Available: http://www.fao.org/news/story/es/item/9803/icode/.

[42] Anthony R. Bunsell, Ed., Handbook of properties of textile and technical fibers, Second. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018.

[43] J. P. Carey, Handbook of Advances in Braided Composite Materials Theory, Production, Testing and Applications. 2016.

[44] Civil Aviation Safety Authority and A. Government, “Review of aviation safety regulation of remotely piloted aircraft systems,” no. May, p. 23, 2018.

[45] European Union Aviation Safety Agency, CS-VLA Easy Access Rules for Very Light Aeroplanes. 2018.

[46] S. Garcia, “Análisis de Laminados de Materiales Compuestos con Precarga en su Plano y Sometidos a Impacto,” p. 183, 2007.

[47] S. Group, S. Engineers, C. Society, and T. S. Group, Standard Method of Detailing Structural Concrete A manual for best practice, Third., vol. 44, no. June. 2006.

[48] M. S. S. · M. J. N. B. Y. · M. E. Hoque, Ed., Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites, Illustrate. Springer, 2015.

[49] K.L. Pickering, Ed., Properties and Performance of Natural-Fibre Composites Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Illustrate. Elsevier Science, 2008.

[50] N. H. Mostafa, Z. N. Ismarrubie, and S. M. Sapuan, “Fibre prestressed polymer-matrix composites : a review,” 2017.

[51] A. P. M. Oxford, Introduction to Aerospace Materials Woodhead Publishing in Materials, Illustrate. Elsevier, 2012.

[52] I. M. Daniel and Ori Ishai, Eds., Engineering mechanics of composite materials(Second Edition), Second Edi. New York: Oxford, 2006.

[53] Y. Singh, Dileep ;Zhu, Dongming ;Zhou, Ed., Applications of Engineering Ceramics

and Composites Design , Development , and Applications of Engineering Ceramics and Composites, Wiley. Vancouver, British Columbia, 2009.

[54] J. Bai, Ed., Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2013.

[55] V. M.Karbhari, Ed., Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites techniques and applications. Woodhead Publishing, 2013.

[56] Ryszard M. Kozłowski, Ed., Handbook of Natural Fibres: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation Woodhead Publishing Series in Textiles, Illustrate. Elsevier, 2012.

[57] U. S. M. B. A. C. S. on A. F.-N.-C. A. D. C. Forest Products Laboratory (U.S.), Design of wood aircraft structures, Second., vol. 85498, no. December. Subcommittee on Air Force-Navy-Civil Aircraft Design Criteria, Munitions Board, Aircraft Committee, 1951, 2007.

[58] A. MORTENSEN and Ecole, Eds., Materials., Concise Enclyclopedia of compostie, Second. Elsevier, 2007.

[59] L. J. Markwardt, “Aircraft woods: their properties, selection, and characteristics,” no. 1079, p. 34, 1931.

ANEXOS.

Anexo I. Ensayo de rotura del tejido de yute. 105
Anexo II. Ficha técnica de la resina poliéster.....107
Anexo III.Planos del molde de precarga. 108

Anexo I. Ensayo de rotura del tejido de yute.

jueves, 28 de junio de 2018

INSTRON

Instron Applications Laboratory

ASTM D5035-08 STANDARD TEST METHOD FOR BREAKING FORCE AND ELONGATION OF TEXTILE FABRICS (STRIP METHOD)

NOMBRE CLIENTE: Tesis Mecanica Carlos Diaz Yute Longitudinal 28-06-2018.is_tens

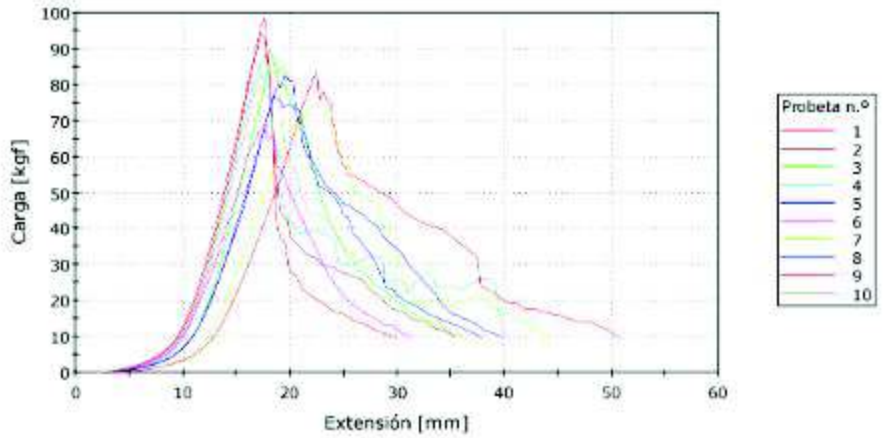
2C

Tabla de valores predeterminados

Número de probetas en la muestra	3
Test configuration	- Test machine (model/serial #) - Load cell (capacity/serial #) - Type of clamping device & clamping pressure
Test Conditions	Warp- standard conditions
Any Modifications of Jaw Faces Used?	no
Conditioned or wet testing, or both	
Size of Jaw Faces Used	3 X 1
Testing Machine Used?	ex. 3345
Was allowance made for shrinkage?	
Were sizing or finished removed?	
Precarga	Verdadero

jueves, 28 de junio de 2018

Probeta 1 a 10



	CargaalBreak (Standard) [kgf]	Apparent Elongation at Breaking Force [mm/mm]	TiempoalBreak (Standard) [s]
1	98,25989	0,20505	3
2	94,14181	0,20416	3
3	87,61008	0,20216	3
4	85,51733	0,18517	3
5	76,87242	0,21417	3
6	69,08668	0,20254	3
7	74,82588	0,25387	4
8	82,46049	0,21862	3
9	83,61067	0,25011	4
10	90,32092	0,20767	3
Media	84,27062	0,21435	3
Desviación estándar	8,94833	0,02169	0,35151

Anexo II. Ficha técnica de la resina poliéster.

Poliacrilart Cía. Ltda.

SINTAPOL 437

SINTAPOL 437 es una resina de poliéster insaturado tipo ortoftálico, transparente para uso general.

Características:

Facilidad de uso por su carácter préacelerada El agente tixotrópico reduce la tendencia de escurrimiento.

Muy buen balance entre dureza y flexibilidad. Excelente resistencia al impacto.

Exotérmico moderado que evita distorsiones por exceso de calor. Reducida contracción.

Muy buena humectación de fibra de vidrio. Muy buena compatibilidad con cargas minerales.

Aplicaciones:

SINTAPOL 437 es recomendada para todo tipo de productos reforzados con fibra de vidrio para uso industrial o artesanal, con laminado manual o con spray.

También se aplica con el proceso de enrollado de Filamentos para productos como tubos y tanques y postes de fibra de vidrio.

Propiedades de la resina liquida:

Apariencia:	Transparente, rosada, levemente turbia por el agente tixotropico.
% No volátiles:	60+-2
Viscosidad Gardner	600 +-200
Índice de tixotropía	3+-1
Numero acidez sobre solidos	Max. 40

Propiedades de curado:	
Tiempo de gel (100g a 25ºC, 1,5ml MEK peróxido)	10 + - 3 min
Temperatura de Exotérmia:	140 a 150 ºC

Suministro: SINTAPOL 437 se envasa en tambores metálicos de 225kg neto.

Almacenamiento: La resina de poliéster debe almacenarse en tambores cerrados, bajo techo y a una temperatura máxima de 25ºC. Bajo estas condiciones la resina tiene una estabilidad de 3 meses desde la fecha de venta. En condiciones más calientes (alrededor de 30ºC) se debe usar el producto preferiblemente hasta los 2 meses de la misma fecha.

Anexo III.Planos del molde de precarga.