

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LAS FIBRAS
DE CABUYA TRATADAS CON BICARBONATO DE SODIO Y
SU COMPATIBILIDAD MECÁNICA CON MATRICES
TERMOESTABLES MEDIANTE EL MÉTODO DE PULL OUT**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniera Mecánica

AUTORA

Sheyla Antoanette Escuadra Lopez (ORCID: 0000-0002-1539-4634)

ASESORES

Samuel Charca Mamani (ORCID: 0000-0002-8302-7393)

Sergio Candiotti Barrenechea (ORCID: 0000-0002-8821-2176)

Lima – Perú

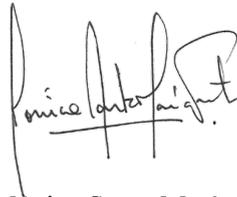
2023

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LAS FIBRAS DE CABUYA TRATADAS CON BICARBONATO DE SODIO Y SU COMPATIBILIDAD MECÁNICA CON MATRICES TERMOESTABLES MEDIANTE EL MÉTODO DE PULL OUT” ha sido elaborada por la señorita Sheyla Antoanette Escuadra Lopez, con la asesoría de Samuel Charca Mamani, identificado con DNI 24717255 y de Sergio Alonso Candiotti Barrenechea identificado con DNI 46084103, y que se presenta para obtener el título profesional de Ingeniero mecánico, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster
Directora de Investigación

En Barranco, el 3 de marzo de 2023

Dedicatoria:

A mis padres, Caytano Escuadra y Sara Lopez, por su constante apoyo durante toda mi vida.

Y a mis más fieles compañeros, que han sido mi alegría y motivación. Gracias Yuki, Babas, Tsuki, Kira, Osaka y Tokio.

Agradecimientos:

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional.

A mi asesor y profesor Samuel Charca, por sus consejos y apoyo durante la tesis.

A mi asesor y compañero Sergio Candiotti, que me ayudó incontables veces a solventar mis dudas en la presente investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN.....	14
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	22
1.1. Fibras naturales.....	22
1.1.1. Fibra vegetal: Microestructura.....	25
1.1.2. Fibra vegetal: Cabuya como materia prima	27
1.2. Tratamientos químicos en fibras naturales	29
1.3. Ensayo de resistencia a la tracción de fibras	30
1.4. Materiales compuestos	36
1.4.1. Matrices poliméricas para materiales compuestos.....	38
1.5. Ensayo de propiedades mecánicas de polímeros.....	40
1.6. Ensayo de caracterización de interfaz fibra/matriz.....	42
1.7. Ensayo de desprendimiento por tracción (<i>Pull-out test</i>)	43
1.8. Distribución de Weibull	47
1.9. Estadística no paramétrica.....	48
1.9.1. Prueba de Wilcoxon para dos muestras independientes	49
1.9.2. Prueba de Kruskal-Wallis	50
CAPÍTULO II METODOLOGÍA	52
2.1. Tipo de investigación	53
2.2. Enfoque de investigación.....	53

2.3.	Fuentes de información	53
2.4.	Técnicas de recolección y análisis de información	54
2.5.	Procedimiento.....	55
2.5.1.	Tratamiento superficial de las fibras naturales.	55
2.5.2.	Medición de densidad de las fibras naturales.	58
2.5.3.	Prueba de absorción de humedad (a condición de humedad equilibrio)	58
2.5.4.	Prueba de tensión de las fibras y obtención de áreas.....	59
2.5.5.	Medición de densidad de los polímeros.....	62
2.5.6.	Prueba de flexión de los polímeros.....	63
2.5.7.	Prueba de desprendimiento por tensión (Pull out test)	65
2.5.8.	Análisis numérico del método de <i>pull out</i> mediante el software <i>Abaqus CAE</i>	67
CAPÍTULO III RESULTADOS		70
3.1.	Área transversal y diámetro de la fibra de cabuya.....	70
3.2.	Densidad de la fibra de cabuya.....	73
3.3.	Absorción de humedad de la fibra de cabuya.....	74
3.4.	Análisis de flexibilidad del sistema (MTS Exceed y tabs).....	75
3.5.	Curva esfuerzo-deformación de la fibra de cabuya.....	75
3.6.	Propiedades mecánicas de las fibras.....	76
3.7.	Propiedades físicas y mecánicas de las matrices	79
3.8.	Propiedades mecánicas de compatibilidad fibra matriz: Análisis experimental	81
3.9.	Propiedades mecánicas de compatibilidad fibra/matriz: Análisis numérico	85
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES.....		94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		96

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Comparación de CED, GHC y mPT para diferentes fibras de reforzamiento.....	19
Tabla 1.2 Propiedades físicas y mecánicas típicas de las fibras naturales y sintéticas.....	24
Tabla 1.3 Composición química promedio de la Furcraea andina.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Composición actual de desechos anuales en el mundo.....	14
Figura 1.2 Clasificación de las fibras naturales.....	23
Figura 1.3 Comparación de modulo específico entre fibras naturales y fibra de vidrio (E-glass).....	24
Figura 1.4 Estructura interna de fibra de lino.....	26
Figura 1.5 Representación esquemática de la estructura de una fibra de origen vegetal: medio laminar, pared primaria, pared secundaria externa (S1), pared secundaria medio (S2), pared secundaria interna (S3), y lumen.....	27
Figura 1.6 Cabuya “Furcraea andina”.....	28
Figura 1.7 Solubilidad de bicarbonato de sodio en agua.....	30
Figura 1.8 Curva típica de esfuerzo-deformación unitaria de las fibras vegetales.....	31
Figura 1.9 a) Fibra en el tab y b) Probeta colocada en la máquina de tracción.....	32
Figura 1.10 Curva estándar de fuerza vs desplazamiento.....	33
Figura 1.11 Gráfica lineal de ΔLF vs l_0A	33
Figura 1.12 Gráfica esfuerzo deformación de sistema y fibra.....	34
Figura 1.13 Configuración de material compuesto.....	37
Figura 1.14 Principales matrices de materiales compuestos.....	39

Figura 1.15 Comparación de propiedades mecánicas y costo de resinas utilizadas como matrices en materiales compuestos.....	39
Figura 1.16. a) Configuración de fuerza y soporte para la caracterización del compuesto. b) radio de elementos a contacto con la probeta.	40
Figura 1.17 Representación esquemática de la base del modelo de arrastre por cortante (shear lag model) a) sin aplicación de carga, b) con aplicación de carga y, c) especificación del comportamiento en la interfaz.	44
Figura 1.18 Representación esquemática de la prueba de tracción de una sola fibra donde se muestra a) la geometría de la probeta, b) curva σ - ϵ , c) inicio del desprendimiento, d) durante del desprendimiento y, e) durante la extracción por fricción.	44
Figura 2.1 Flujograma de la metodología propuesta.	52
Figura 2.2. Materiales a utilizar en el tratamiento: a) bicarbonato de sodio, b) agua destilada y c) parte central de cabuya.	56
Figura 2.3. Solución con 8% de bicarbonato de sodio en agua destilada: a) sin mezclar y b) mezclada completamente.....	56
Figura 2.4. Fibras de cabuya sumergidas en tratamiento con bicarbonato de sodio.	57
Figura 2.5. Fibras de cabuya con menor longitud.	58
Figura 2.6 Probeta para la prueba de tracción de las fibras naturales.	60
Figura 2.7 Elaboración de probeta para medir el área transversal de la fibra.	61
Figura 2.8. Muestras para la medición de áreas transversales.....	62
Figura 2.9 Configuración para la medición de densidad de las resinas en las dos posiciones requeridas: a) medición de masa de la probeta en aire y b) medición de masa de la probeta sumergida en agua	63

Figura 2.10 Dimensiones estándar para material polimérico.	64
Figura 2.11 Probetas de prueba de flexión para a) resina poliéster y b) resina epóxica.....	64
Figura 2.12 Prueba de flexión para a) espécimen antes de la prueba y b) espécimen durante la prueba.	65
Figura 2.13 Molde para probetas de desprendimiento por tensión: a) soportes laterales, b) Molde de silicona y c) Fibra de cabuya con cinta aislante.	66
Figura 2.14 Probeta para el ensayo de desprendimiento por tensión.	67
Figura 2.15 Vista isométrica de modelo numérico con punto de carga y restricciones definidas.	68
Figura 2.16 Vista de la superficie del modelo numérico.....	69
Figura 3.1 Micrografía de área de sección transversal de las fibras de cabuya.....	70
Figura 3.2. Distribución puntual de los diámetros equivalentes de las fibras de cabuya.	71
Figura 3.3 Porcentaje de área de lumen presente en cada grupo de fibra estudiada.	72
Figura 3.4 Área efectiva de cada grupo de fibra estudiada.	72
Figura 3.5 Variación de densidad de cada grupo de fibra estudiada.	73
Figura 3.6 Variación de absorción de humedad de cada grupo de fibra estudiada.	74
Figura 3.7 Determinación de flexibilidad del sistema a) Análisis de flexibilidad b) Flexibilidad del sistema.....	75
Figura 3.8 Curva esfuerzo-deformación unitaria.....	76
Figura 3.9. Propiedades mecánicas de los grupos de fibra estudiadas donde a) resistencia a la tracción, b) módulo elástico inicial y c) deformación unitaria.	77

Figura 3.10 Diagrama de Weibull de la resistencia a la tracción de las fibras estudiadas ...	78
Figura 3.11 Diagrama de Weibull del módulo elástico inicial de las fibras estudiadas	78
Figura 3.12 Diagrama de Weibull de la deformación unitaria de las fibras estudiadas	79
Figura 3.13 Densidades de resina poliéster y epóxica.....	79
Figura 3.14 Propiedades mecánicas de las resinas estudiadas donde a) resistencia a la tracción, b) módulo elástico inicial y c) deformación unitaria.	80
Figura 3.15 Distribución de los valores de IFSS	81
Figura 3.16 Distribución de los valores de módulo elástico.....	83
Figura 3.17 Distribución de los valores de deformación unitaria.....	83
Figura 3.18 Curva esfuerzo deformación de la prueba interfacial con a) resina poliéster y b) resina epóxica	84
Figura 3.19 Relación de la caída de fuerza con respecto a la corrección de a) parámetro exponencial y b) parámetro de rigidez de contacto cohesivo.....	85
Figura 3.20 Comparación de diagrama IFSS vs deformación unitaria de los resultados experimentales y numéricos para a) ST-PL, b) ST-EP, c) 4D-PL, d) 4D-EP, e) 7D-PL y f) 7D-EP	86
Figura 3.21 Relación entre longitud de la interfaz vs a) 50% y b) 100% del valor máximo del esfuerzo cortante interfacial (S12) para todos los modelos computacionales de pull out con resina poliéster y epóxica estudiados.....	87
Figura 3.22 Distribución del esfuerzo cortante interfacial (S12) en modelo computacional de pull out de la fibra sin tratamiento a) con respecto a longitud de la interfaz b) embebido en resina poliéster (ST-PL) y c) embebido en resina epóxica (ST-EP).....	88

Figura 3.23 Distribución del esfuerzo cortante interfacial (S12) en modelo computacional de pull out de la fibra con 4 días de tratamiento a) con respecto a longitud de la interfaz b) embebido en resina poliéster (4D-PL) y c) embebido en resina epóxica (4D-EP)..... 89

Figura 3.24 Distribución del esfuerzo cortante interfacial (S12) en modelo computacional de pull out de la fibra con 7 días de tratamiento a) con respecto a longitud de la interfaz b) embebido en resina poliéster (7D-PL) y c) embebido en resina epóxica (7D-EP)..... 89

Figura 3.25 Relación entre longitud de la interfaz vs a) 50% y b) 100% del valor máximo del esfuerzo axial en la zona central de la fibra (S22) de todos los modelos computacionales de pull out con resina poliéster y epóxica 90

Figura 3.26 Distribución del esfuerzo axial en la fibra (S22) en modelo computacional de pull out de la fibra sin tratamiento a) con respecto a longitud de fibra embebida b) embebida en resina poliéster (ST-PL) y c) embebida en resina epóxica (ST-EP). 91

Figura 3.27 Distribución del esfuerzo axial en la fibra (S22) en modelo computacional de pull out de la fibra tratada por 4 días a) con respecto a longitud de fibra embebida b) embebida en resina poliéster (4D-PL) y c) embebida en resina epóxica (4D-EP). 91

Figura 3.28 Distribución del esfuerzo axial en la fibra (S22) en modelo computacional de pull out de la fibra tratada por 7 días a) con respecto a longitud de fibra embebida b) embebida en resina poliéster (4D-PL) y c) embebida en resina epóxica (4D-EP). 92

RESUMEN

Los materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas generan problemas de contaminación ambiental, durante toda su vida útil, debido a que no son fácilmente reciclables, mucho menos son biodegradables. Por esta razón, las fibras naturales se han considerado como una alternativa ecológica; sin embargo, no pueden ser utilizadas como refuerzo en su estado natural debido a su compatibilidad con las matrices poliméricas. Para mejorar esta propiedad, las fibras son sometidas a tratamientos químicos tales como mercerización, salinización, entre otros; no obstante, estos tratamientos tienen un impacto negativo en el medio ambiente y en la salud de las personas.

Por ello, el presente proyecto de tesis plantea el estudio de las propiedades físicas/mecánicas de la fibra de cabuya sometidas a un tratamiento utilizando bicarbonato de sodio, además de estudiar su compatibilidad interfacial con matrices termoestables para ser considerado como refuerzo de este tipo de matrices en material compuesto, de esta manera reducir la contaminación ambiental y otorgar un valor agregado a las fibras como materia prima. Inicialmente, se determinarán las propiedades mecánicas de las fibras a diferentes tiempos de tratamiento. La evaluación de las propiedades mecánicas de la interacción entre la fibra y matriz se realizará mediante el método experimental llamado prueba de desprendimiento por tensión y serán validadas utilizando la mecánica computacional.

Como resultado, se obtuvo mejores propiedades mecánicas en las fibras tratadas por 7 días donde la resistencia, el módulo elástico y la deformación unitaria encontradas son de 744 MPa, 28.775 GPa y 0.037 mm/mm respectivamente. De igual modo, los resultados óptimos en la prueba interfacial fueron con las fibras mencionadas anteriormente embebidas en resina epóxica donde se obtuvo una resistencia interfacial de 6.30 MPa; además, se validó el modelo computacional con una diferencia menor al 5% en las propiedades mecánicas.

PALABRAS CLAVES:

Fibras naturales; Cabuya; Interfaz; desprendimiento por tensión; tratamiento; bicarbonato de sodio.

ABSTRACT

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CABUYA FIBERS TREATED WITH SODIUM BICARBONATE AND THEIR MECHANICAL COMPATIBILITY WITH THERMOSETTING MATRICES BY PULL OUT METHOD

Composites reinforced with synthetic fibers generate environmental pollution problems throughout their useful life, because they are not easily recyclable, much less biodegradable. For this reason, natural fibers have been considered an ecological alternative; however, they cannot be used as reinforcement in their natural state due to their compatibility with polymer matrices. To improve this property, the fibers are subjected to chemical treatments such as mercerization, salinization, etc. However, these treatments have a negative impact on the environment and people's health.

For all the above, this thesis project proposes the study of the physical/mechanical properties of cabuya fiber subjected to a treatment using sodium bicarbonate, in addition to studying its interfacial compatibility with thermosetting matrices to be considered it as a reinforcement of this type of matrices in composite material, thus reducing pollution environmental and giving added value to fibers as raw material. Initially, the mechanical properties of the fibers will be determined at different treatment times. The evaluation of the mechanical properties of the interaction between the fiber and the matrix will be carried out with experimental method called pull out test and will be validated using computational mechanics.

As a result, better mechanical properties were obtained in the fibers treated for 7 days where the stress, elastic modulus and strain found are 744 MPa, 28.775 GPa and 0.037 mm/mm respectively. Similarly, the optimal results in the interfacial test were with the previously mentioned fibers embedded in epoxy resin where an interfacial shear stress of 6.30 MPa was obtained; in addition, the computational model was validated with a difference of less than 5% in the mechanical properties.

KEYWORDS:

Natural fibers; Cabuya; Fiber/Matrix Interface; Pull out; Sodium bicarbonate

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se desecha 2000 millones de toneladas de residuos sólidos anualmente en todo el mundo [1], donde se observa al material plástico como el principal residuo inorgánico y no biodegradable con una participación del 14%, es decir, 280 millones de toneladas (Figura 1.1). Por lo que, debido a la consciencia mundial sobre la contaminación del medio ambiente y el calentamiento global, los residuos y desechos humanos que afectan al ecosistema además del hecho de que, a largo plazo, habrá escasez de los productos petroquímicos y no renovables [2], con una caída de la demanda del 50% en los próximos 20 años [3], ha conllevado a la generación de nuevos materiales ya que la mejor manera de contrarrestar estos efectos en el ambiente es mediante el uso de materiales renovables y no tóxicos.

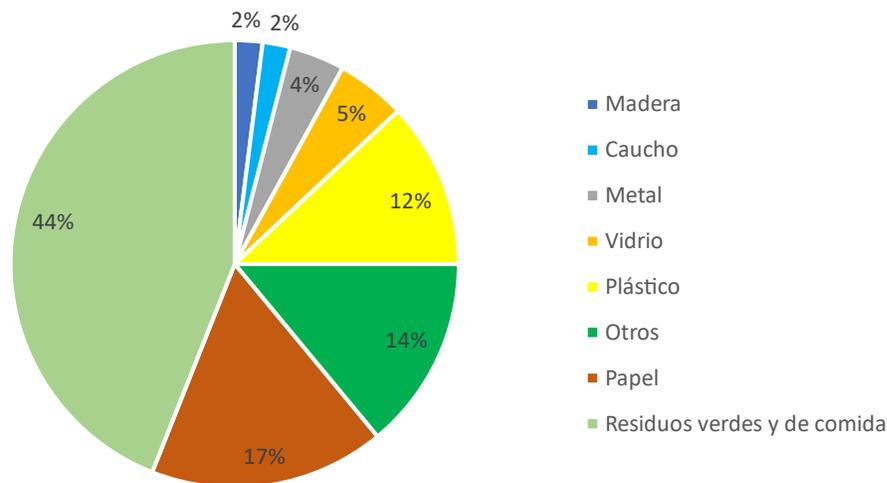


Figura 1.1 Composición actual de desechos anuales en el mundo.

Fuente: Adaptado de Kilpeläinen y Happonen. Awareness Adds to Knowledge. Stage of the Art Waste Processing Facilities and Industrial Waste Treatment Development. [4]

Dentro de los materiales plásticos, se encuentran los materiales compuestos de matriz polimérica, los cuales se han posicionado en la industria de manera significativa, superando una producción anual de 100 millones de dólares en el mercado mundial [5]. Su popularidad es debido al amplio rango de propiedades mecánicas específicas, lo cual genera que se pueda

utilizar para diferentes propósitos y, a la creciente demanda principalmente en la industria de materiales y estructuras de alto rendimiento [6].

Dentro de ello, el 95% de fibras utilizadas como material de refuerzo en matrices termoplásticas y termoestables corresponde a la fibra de vidrio [2], esto debido a su bajo costo y a su esfuerzo de tracción, su propiedad principal, ya que puede alcanzar entre 3-4 GPa, por lo que se ha podido utilizar en diferentes aplicaciones [5]. Uno de los usos más comunes que se le ha dado, es como refuerzo de los álabes de los aerogeneradores, con una vida útil de 20 a 25 años. Esto ha generado problemas recientemente debido a que no se puede reciclar fácilmente y su destino son los vertederos de basura. Una de las soluciones que se le ha dado es quemarlas para generar energía, sin embargo, genera gases contaminantes además de que la energía emitida no es considerable a comparación de otros métodos por lo no es viable. Solo en Estados Unidos se removerán 32 000 álabes en los próximos 4 años [7]. Otro problema que ha surgido en la actualidad es en la industria automotriz, los autos cada vez son más pesados debido a la implementación de equipos electrónicos y otros, lo cual produce un mayor consumo de combustible o baterías más grandes en el caso de los autos eléctricos [8] ya que se ha estimado que alrededor del 75% del consumo de energía está relacionado directamente con el peso del vehículo por lo cual es un parámetro crítico [2]. Una de las soluciones ha sido utilizar aceros ligeros y materiales compuestos reforzados con fibra sintética pero su costo es mayor debido al mecanizado que necesita, y su reciclaje que no es fácil [8].

Con las dos situaciones anteriormente mencionadas, se puede observar que el principal problema recae en el impacto negativo al medio ambiente que estas fibras sintéticas generan durante todo su ciclo de vida. La conciencia mundial sobre la contaminación del medio ambiente y el calentamiento global, los residuos y gases contaminantes generados que afectan al ecosistema impacta directamente al estado del planeta. Considerando lo anteriormente mencionado y el hecho de que, a largo plazo, habrá escasez de los productos petroquímicos y no renovables [2], ha conllevado a la generación de nuevos materiales ya que la mejor manera de contrarrestar estos efectos en el ambiente es mediante el uso de

materiales renovables y no tóxicos, tales como las fibras naturales y su uso como alternativa para reemplazar las fibras sintéticas. [2]

El uso de las fibras naturales como refuerzo de matrices poliméricas sintéticas tiene sustento debido a que han demostrado mejorar las propiedades mecánicas de las mismas tales como el esfuerzo de tracción, flexión e impacto [9], [10]; debido a ello, están siendo empleadas en diversas industrias tales como la industria textil, geotextil, automotriz, empaquetamiento, construcción, mobiliaria, entre otros, debido a la amplia gama de propiedades mecánicas que presentan [11]; además que, a comparación de las fibras sintéticas, poseen propiedades mecánicas específicas similares, son eco amigables, biodegradables, generan menos peligro durante su procesamiento y tienen un menor costo [10], en consecuencia podrían reducir el costo de los compuestos entre un 25 a 50% a comparación de los materiales compuestos reforzados con de fibra de vidrio. [2]

Dentro de las fibras naturales, existen múltiples que han sido profundamente estudiadas debido a que son fibras comerciales tales como la lana, lino, sisal, cáñamo etc. [2]. Por otro lado, a lo largo del Perú existen diferentes recursos naturales de donde se pueden extraer las fibras, uno de estos es la *Furcraea Andina* (familia Agavaceae), conocida comúnmente en el Perú como Cabuya o Fique en Ecuador y Colombia. En Perú, esta fibra ha servido comúnmente para la fabricación de herramientas manuales como sogas, sacos y cuerdas, pudiendo tener un potencial de producción de más de 50 mil toneladas anuales que podrían aprovecharse industrialmente [12]

Cabe recalcar que el comportamiento de los materiales compuestos está supeditado a las características de la matriz, la fibra y principalmente, de la interacción fibra/matriz; si la interfaz no es la óptima, el proceso de transferencia de carga no será adecuado, por ende, la calidad del material compuesto tendrá significativa limitación en sus propiedades mecánicas [6]. Desafortunadamente, por lo general las fibras naturales no son compatibles con las resinas sintéticas, por ello, las fibras son sometidas a tratamientos químicos que modifican sus propiedades superficiales, mejorando la calidad de la interacción fibra/matriz, el tratamiento más utilizado es la mercerización usando hidróxido de sodio. Estos tratamientos afectan negativamente al medio ambiente ya que expiden gases contaminantes, son tóxicos

para la salud humana y animal, y los residuos fluentes deben tener un tratamiento especial, además en Perú el hidróxido de sodio es un producto fiscalizado por la SUNAT, lo cual requiere permisos especiales para su uso industrial, todo ello aumenta el costo final de la fibra [13] [14]. Es por esta razón que en los últimos años se está buscando tratamientos alternativos menos agresivos al medio ambiente, tales como usando el bicarbonato de sodio el cual tiene un menor costo, no es tóxico y sus residuos son fácilmente tratables; además, se ha evidenciado que el tratamiento con bicarbonato de sodio mejora las propiedades de la fibra, además de aumentar la calidad de la interfase fibra/matriz [15], [16].

Por las razones antes mencionadas, a través de la tesis se busca evaluar el efecto del tratamiento de las fibras usando una solución de bicarbonato de sodio, se evalúan las propiedades físicas y mecánicas de las fibras; además, de las propiedades de interacción fibra/matriz.

Alcance

La presente tesis tiene como alcance el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de cabuya sometidas a un tratamiento químico utilizando 8% en peso de bicarbonato de sodio donde se considera la duración del tratamiento como parámetro variable y se obtendrán 4 grupos de fibras a estudiar: sin tratamiento y con tratamiento de 4, 7 y 14 días. Dentro de las propiedades físicas se obtendrán únicamente las áreas transversales, densidades y absorción de humedad, esta última se realizará según la norma ASTM D629-2015. Por otro lado, dentro de las propiedades mecánicas se obtendrá los valores de esfuerzo de falla, módulo de elástico y deformación unitaria de falla según la norma ASTM C1557-2020.

Con respecto a las matrices poliméricas termoestables, se utilizará la resina poliéster no saturada y la resina epóxica. Se obtendrán sus densidades mediante la norma D792-2020, además de las propiedades mediante flexión en tres puntos según norma ASTM D790-2017 para polímeros.

Sobre el mecanismo de transferencia de carga a través de la interfaz, solo se analizará las fibras sin tratamiento y con los dos tratamientos con mejores resultados de esfuerzo de tracción y módulo de Young para obtener las propiedades comparativas de la compatibilidad fibra/matriz según la prueba de desprendimiento por tensión y su respectivo modelamiento numérico en el software *Abaqus CAE*.

Antecedentes

Estudios de aplicaciones de fibras nativas del Perú en la industria son escasas, salvo lo desarrollado en los últimos años por un grupo de investigación en UTEC. Dentro de los estudios realizados, resalta la metodología desarrollada para la extracción y obtención de fibras óptimas usando tratamientos de mercerización; además de ello, los autores determinaron la composición química, las propiedades mecánicas de la fibra bajo diferentes condiciones de carga y en su aplicación como refuerzo de matrices sintéticas.

Dentro de las investigaciones recientes de la fibra de cabuya, se encuentra su uso como refuerzo de resina poliéster, donde se ha obtenido un incremento de la resistencia a la tracción de esta resina en un 164%, y su uso en aplicaciones que requieran menos de 50 MPa [8]. También se ha estudiado como refuerzo de un material biodegradable hecho de almidón de papa, como resultado se obtuvo una mejora del 15% en el esfuerzo de tracción con un contenido de peso de 12.5% de fibra de cabuya. [9].

Por otro lado, el tratamiento con bicarbonato de sodio para la optimización de las propiedades mecánicas se ha utilizado en diversas fibras tales como sisal, donde se obtuvo un incremento de +197.9% y +115% en el esfuerzo de tensión y módulo elástico con un tiempo de tratamiento de 120 horas [10]. Otro estudio demostró un incremento de 23.7% en el esfuerzo tensión de un compuesto de PLA reforzado con 30% en peso de fibra de sisal tratada con 10% de NaHCO_3 por 72 horas [11]. También se estudió otras fibras tales como la fibra de coco, donde se obtuvo un incremento de 17% en el esfuerzo tensión con un tratamiento de 120 horas con 12 wt%¹ NaHCO_3 [12]. Se obtuvo un incremento del 46.23%

¹ Porcentaje en peso

en esfuerzo de tracción y 50.82% en modulo elástico en las fibras de Zalacca tratadas con 10% NaHCO₃ por 120 horas [13]. En la fibra de lino y linaza, se obtuvo un incremento de 43% y 81% en esfuerzo de tracción y modulo elástico con un tratamiento de 20% NaHCO₃ por 120 horas [14].

En la mayoría de los estudios arriba mencionados, utilizan el espesor aparente como parámetro, para determinar las áreas, el espesor aparente, la cual se mide usando un microscopio, este método ignora la irregularidad de la fibra y no considera el área del lumen.

Justificación y motivación

El uso de fibras naturales y la generación de nuevos materiales amigables al medio ambiente reducirá la contaminación y los efectos ambientales debido a que reemplazará materiales sintéticos utilizando materiales renovables y no tóxicos, además de que reducirá la dependencia de los productos no renovables como los productos petroquímicos. [2]

El impacto ambiental se puede cuantificar con tres valores: la demanda de energía acumulada (CED²), factor ambiental global; emisiones de gases de efecto invernadero (GHC³) y puntaje de impacto ambiental agregado. En la Tabla 1.1, se puede observar una comparación de estos factores para las fibras utilizadas como refuerzo de matrices en materiales compuestos, donde se encuentra diferencias significativas en los valores de CED y GHC considerando fibras naturales [6].

Fibra	CED (MJ/kg)	GHC (kg de CO ₂ e/kg)	Ecopoints (mPT/kg)
Fibra de carbono genérico	286 - 704	2231	833
Fibra de vidrio genérico	45	2.6	264
Linaza (<i>Flax</i>)	9.6 - 12.4	0.4	350
Cáñamo (<i>Hemp</i>)	6.8 - 13.2	1.6	-
Jute	3.8 - 8	1.3 - 19	-

Tabla 1.1 Comparación de CED, GHC y mPT para diferentes fibras de reforzamiento.

Fuente: Adaptado de Campilho, R. D, Natural Fiber Composites [6].

² Demanda de energía acumulada

³ Emisiones de gases de efecto invernadero

Por ello, deben ser competitivos, estos materiales deben tener un bajo costo, ser biodegradables y sean recursos que se puedan encontrar en la naturaleza; sin embargo, estas características también deben estar presentes en el tratamiento y en todo el proceso de manufactura que conlleve para optimizar la sostenibilidad de todo el proceso de obtención del material de refuerzo. [6]

Por otro lado, cabe recalcar que el Perú ha sido declarado como uno de los 17 países denominados megadiversos, una de las razones es porque posee un total de 20,375 especies en la flora, de las cuales 5,509 son endémicas del territorio peruano y solo 4,400 de estas son utilizadas por el hombre [1]. En consecuencia, se cuenta con diversos recursos naturales; sin embargo, no se explota el máximo potencial de estos debido a los limitados estudios que hay. La cabuya ha sido utilizada únicamente en herramientas básicas y manuales, además no se cultiva por lo que su crecimiento se realiza de manera natural; algunas estimaciones sugieren que se podría alcanzar una producción de más de 50 mil toneladas anuales [12].

Objetivo general

Evaluar el efecto del tratamiento de bicarbonato de sodio en las propiedades físicas-mecánicas de la fibra de cabuya y su compatibilidad interfacial con matrices de resina poliéster y epóxica.

Objetivos específicos

- Determinar experimentalmente las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de cabuya tratadas con bicarbonato de sodio con diferentes tiempos de tratamiento.
- Caracterizar las propiedades mecánicas de la matriz a utilizar
- Evaluar las propiedades de interacción fibra/matriz mediante el método de desprendimiento por tensión (*pull out test*).
- Evaluar las propiedades de interacción fibra/matriz mediante el modelamiento numérico del método de desprendimiento por tensión (*pull out test*) mediante el software *Abaqus CAE*.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico permite conocer los conceptos y parámetros básicos para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales, la matriz y su compatibilidad fibra/matriz según normas internacionales de la ASTM⁴. Así mismo, los conceptos estadísticos necesarios para cuantificar las diferencias entre los conjuntos de fibras y compuestos a estudiar.

1.1. Fibras naturales

Las fibras se pueden dividir en dos grupos generales: sintéticas o hechas por el hombre y las fibras naturales; esta última se puede clasificar según su origen como animal, mineral y vegetal (Figura 1.2) [6]:

- Las fibras minerales están compuestas por una estructura cristalina natural, se pueden diferenciar de las fibras sintéticas ya que estas mayormente tienen una estructura amorfa [17]. Dentro de las fibras minerales naturales, la más conocida es el asbesto, cuyo uso principal era ser utilizado como refuerzo del cemento; sin embargo, su uso ha sido prohibido ya que tiene efectos cancerígenos.
- Las fibras animales están conformadas por una estructura proteínica mayormente compuestas por queratina; estas fibras presentan las ventajas de un lento envejecimiento y menor capacidad de absorción de humedad que las fibras vegetales.
- Las fibras vegetales están conformadas principalmente por la celulosa y/o lignocelulosa, y han sido ampliamente estudiadas ya que son un recurso abundante y que muchas veces está disponible como un desecho industrial [18]. Estas fibras se pueden dividir entre dos grandes grupos: fibras vegetales

⁴ *American Society for Testing and Materials*, en inglés.

madereras y no madereras, este último grupo subdividido según la parte de la planta de la que se obtiene la fibra.

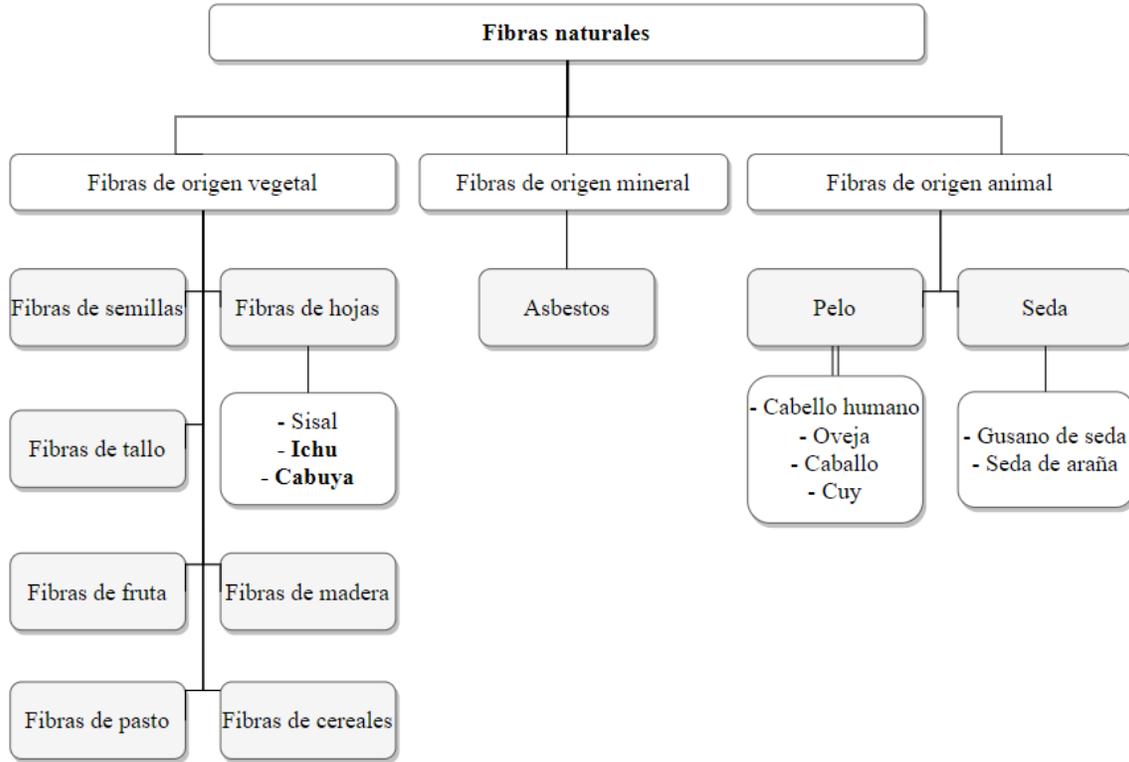


Figura 1.2 Clasificación de las fibras naturales.
Fuente: Adaptado de S. Mishra. Fibre Structure [18].

Dentro de las fibras vegetales, existe un amplio rango y variabilidad de propiedades mecánicas y físicas, tal como se observa en la Tabla 1.2, esto debido a su naturaleza orgánica y, también a los métodos de evaluación. También se puede apreciar una diferencia significativa en la densidad, aunque está por debajo de 1.6 g/cm^3 , lo cual permite reducir el peso de los materiales.

Por otro lado, las propiedades mecánicas son menores a comparación de la fibra de vidrio; sin embargo, debido a la baja densidad, las propiedades específicas son comparables entre ambas. Esto se puede observar claramente en la Figura 1.3, donde se aprecia, en ciertas fibras, un mayor módulo elástico específico.

Fibras	Densidad (g/cm ³)	Diámetro (um)	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Elongación por tracción [%]
Fibra de vidrio (<i>E-glass</i>)	2.5 - 2.59	<17	2000 - 3500	70.0 - 76.0	1.8 - 4.8
Abaca	1.5	-	400 - 980	6.2 - 20.0	1.0 - 10.0
Bamboo	0.6 - 1.1	25 - 40	140 - 800	11.0 - 32.0	2.5 - 3.7
Coco	1.15 - 1.46	10 - 460	92 - 230	2.8 - 6.0	15.0 - 51.4
Algodón	1.5 - 1.6	10 - 45	287 - 800	5.5 - 12.6	3.0 - 10.0
Linaza (<i>Flax</i>)	1.4 - 1.5	12 - 600	343 - 2000	27.6 - 103.0	1.2 - 3.3
Cáñamo (<i>Hemp</i>)	1.4 - 1.5	25 - 500	270 - 900	23.5 - 90.0	1.0 - 3.5
Henequén	1.2	-	430 - 570	10.1 - 16.3	3.7 - 5.9
Jute	1.3 - 1.49	20 - 200	320 - 800	8.0 - 78.0	1.0 - 1.8
Sisal	1.33 - 1.5	8 - 200	363 - 700	9.0 - 38.0	2.0 - 7

Tabla 1.2 Propiedades físicas y mecánicas típicas de las fibras naturales y sintéticas.
Fuente: Adaptado de Campilho, R. D, Natural Fiber Composites [6]

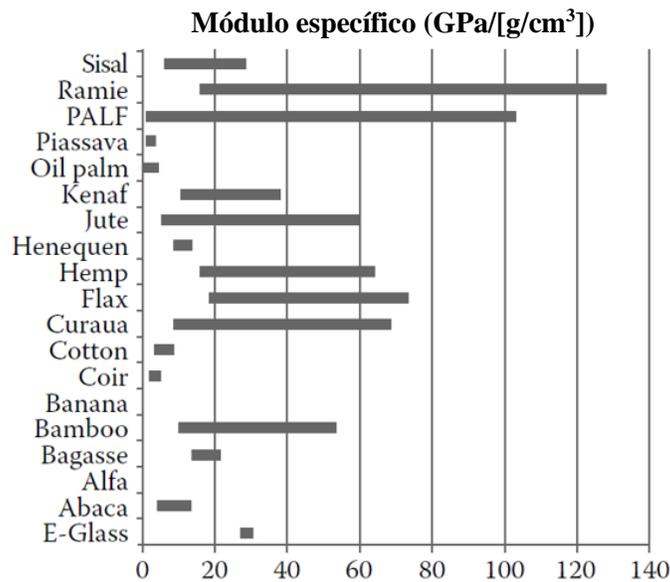


Figura 1.3 Comparación de modulo específico entre fibras naturales y fibra de vidrio (E-glass).
Fuente: Adaptado de Campilho, R. D, Natural Fiber Composites [6]

Por otro lado, una de las características que afectan las propiedades mecánicas de las fibras y el compuesto es su capacidad de absorber humedad ya que las fibras aumentan su volumen aparente. Para ello, es necesario conocer el contenido de humedad de la fibra al obtener sus propiedades mecánicas [6]. El contenido de humedad se puede calcular tal como se muestra en (1.1) [11]. Cabe recalcar que el procedimiento para el cálculo se basa en la norma ASTM D629 [19].

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{A - B}{A} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Donde:

A = masa de la muestra recibida en gramos

B = masa de la muestra secada al horno en gramos.

1.1.1. Fibra vegetal: Microestructura

Como indican los autores [6], [11], [20] y [21], las plantas están compuestas por celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina principalmente. Cada uno de estos componentes serán descritos a continuación:

- La celulosa es un polímero natural y biodegradable que se caracteriza por ser hidrofílico, es decir, capta e interactúa fácilmente con el agua; cuenta con morfología semi cristalina, que unidas conforman las microfibras; es la principal responsable de las propiedades mecánicas ya que otorga resistencia y rigidez a las fibras naturales, además, se puede presentar de manera cristalina y/o no cristalina, Se ha demostrado que está correlacionada y tienen un gran efecto en la densidad y el esfuerzo de tracción, entre otras características.
- La hemicelulosa es un polisacárido hidrofílico, suele encontrarse junto a la celulosa debido a que la incrusta en la matriz correspondiente de la capa; además de ello, se encarga de la degradación, micro absorción y degradación térmica. Se ha demostrado que, mientras mayor cantidad de hemicelulosa haya en la fibra, mayor será el módulo de Young y el esfuerzo específico.
- La lignina es un polímero hidrofóbico de estructura amorfa que otorga rigidez a la planta, lo que hace que estas puedan erguirse hasta grandes alturas. Actúa como un pegamento entre fibras y tiene una gran correlación con el ángulo de la microfibra ya que eliminar esta sustancia, permite una mejor alineación de las fibrillas, lo que contribuye con un aumento de la resistencia a la tracción y rigidez.

- La pectina es el elemento responsable de la flexibilidad de las plantas, la degradación de la pectina reduce el esfuerzo de la fibra, por ello, está correlacionado directamente con la densidad y el ángulo de la microfibrilla.
- La cera vegetal contiene alcalinos, ácidos grasos, entre otros elementos químicos que suelen interferir con la compatibilidad fibra matriz.

Las fibras vegetales se obtienen de tallos, hojas, pastos y otros como se mencionó anteriormente. En la Figura 1.4, se muestra la estructura interna de una fibra de lino obtenida desde el tallo hasta la microfibrilla. Se puede observar que cada paquete de fibras está conformado por otro de dimensiones menores. Aunque esto se cumple en todas las fibras, las dimensiones varían según la planta [22].

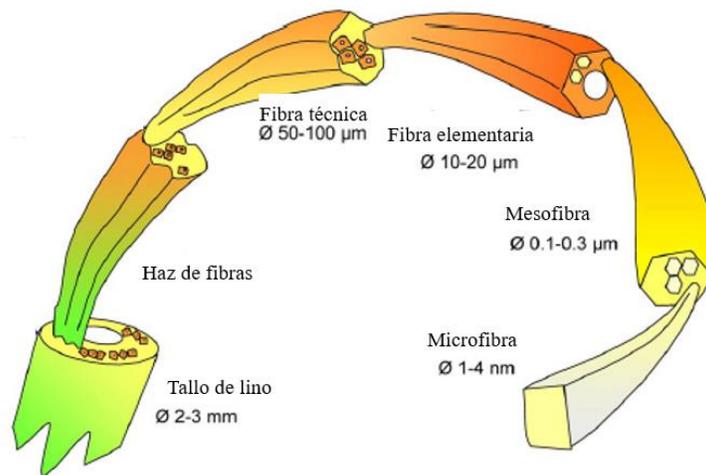


Figura 1.4 Estructura interna de fibra de lino.

Fuente: H. L. Bos. Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds [22].

Las composición química y dimensiones en la microestructura vegetal (Figura 1.5) influyen en las propiedades de la fibra, estas dependen de la especie de la planta y la parte específica de la que se obtiene la fibra, madurez de la fibra, ubicación de cultivo, condiciones ambientales, característica de la tierra, entre otros [6]. A continuación, se describen los principales niveles o capas de la fibra vegetal:

- El lumen es el canal central, también considerado como un espacio vacío ya que se encarga de transportar el agua y los nutrientes, este está rodeado por capas

llamadas pared secundaria, primaria y medio laminar, donde la celulosa está mayormente presente en las paredes secundarias.

- La pared secundaria está compuesta por fibrillas de celulosa cristalina en forma espiral unidas mediante lignina y hemicelulosa. Un dato importante es que en esta capa se encuentra la mayor cantidad de celulosa y, por ende, la que es responsable de las propiedades mecánicas de las fibras.
- La pared primaria está conformada por un arreglo de fibrillas de celulosa amorfa en una matriz de pectina, hemicelulosa y lignina, y proteína. El medio laminar está conformado mayormente por pectina, la cual actúa como un pegamento para las fibras. Cabe recalcar que la dirección de la fibrilla depende de la capa en donde se encuentre.

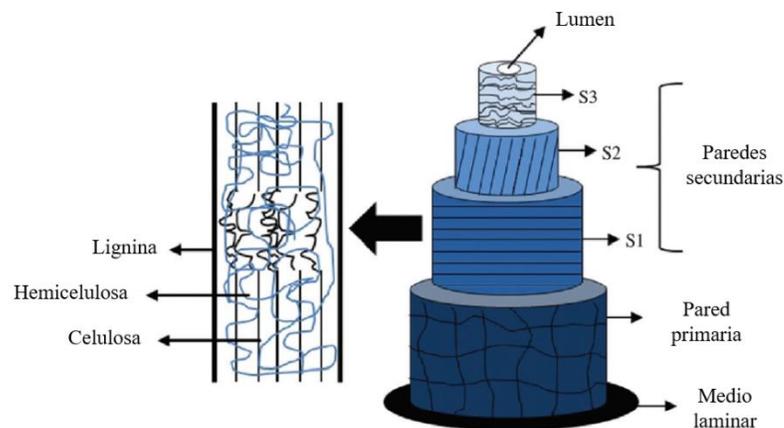


Figura 1.5 Representación esquemática de la estructura de una fibra de origen vegetal: medio laminar, pared primaria, pared secundaria externa (S1), pared secundaria medio (S2), pared secundaria interna (S3), y lumen.

Fuente: P. Pereira. Vegetal fibers in polymeric composites: A review [23].

1.1.2. Fibra vegetal: Cabuya como materia prima

La cabuya *Furcraea Andina* (Figura 1.6) también conocida como cabuya blanca, maguey, fique, agave o pita, pertenece a la familia de *Asparagaceae*. Físicamente, las dimensiones de la cabuya pueden llegar a ser 2 m x 20 cm, son de color verde y tiene hojas duras y largas que terminan en punta; además, es importante mencionar que a los 3 o 4 años de la planta recién se puede proceder a la obtención de las fibras. La composición química promedio de la fibra extraída se puede observar en la Tabla 1.1. [12],[24],[25]



Figura 1.6 Cabuya “*Furcraea andina*”.

Fuente: L. De la Torre. Agave americana and Furcraea andina: Key Species yo Andean Cultures in Ecuador. [24]

Se encuentra mayormente en las zonas andinas de Ecuador, Colombia, Perú y Bolivia. En Perú, se suele encontrar en las zonas secas o áridas de los departamentos de Huánuco, Cajamarca, Apurímac y Huancayo, además de que puede desarrollarse en Ancash, Cusco, Junín, Lima y la Libertad debido a que se desarrollan en altitudes de 1500 a 3800 msnm en el sur de país; y en el norte, entre 1000 a 3000 msnm.

El uso de las fibras de cabuya estaba delimitado para sacos, cuerdas, vestimentas; por otro lado, con sus hojas y otras partes de la planta se puede producir miel y licor. En Perú, el crecimiento de esta planta se da naturalmente, es decir, no se realiza el cultivo de la cabuya [12],[24].

Componente químico	Porcentaje (%)
Celulosa	48.19
Hemicelulosa	11.3
Lignina	17.24
Extractivos	22.09
Ceniza	2.54
Humedad	9.7

Tabla 1.3 Composición química promedio de la *Furcraea andina*.

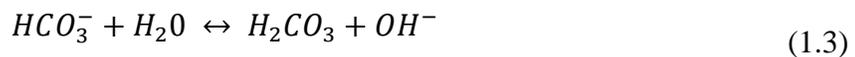
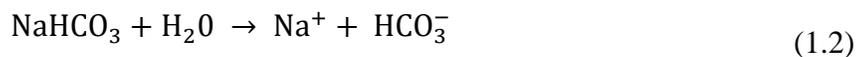
Fuente: S. Mori. Caracterización fisicoquímica y superficial de las fibras endémicas del Perú. [25]

1.2. Tratamientos químicos en fibras naturales

La interacción fibra/matriz es un aspecto importante para la correcta transferencia de propiedades ya que la fuerza actúa primero en la matriz y luego se transfiere a la fibra mediante la interfaz. Naturalmente, las fibras pueden contar con la presencia de ceras y otras sustancias que pueden interferir en el contacto directo de estos dos materiales, es por ello por lo que las fibras naturales son sometidas a diversos tratamientos superficiales para mejorar la adhesión superficial y a su vez, mejorar las propiedades mecánicas de la fibra y del material compuesto.

Uno de los tratamientos más utilizados es la mercerización, en el cual se utiliza una solución con hidróxido de sodio; sin embargo, esto conlleva algunas desventajas. El hidróxido de sodio es un producto fiscalizado en el Perú, eso quiere decir que es un producto que requiere un control y seguimiento por lo cual no se puede comprar ni utilizar libremente [13]. Por otro lado, este componente impacta negativamente a la salud humana y al medio ambiente. Según la NFPA [26], se clasifica con riesgo de peligrosidad 3 debido a que puede causar daños temporales y/o permanentes bajo un corto tiempo de exposición hacia la persona tales como problemas respiratorios y sangrados [27]. En el ambiente, esta sustancia puede ocasionar deterioro de las capas de suelos, calidad de las aguas y daño a los ecosistemas, afectando la conservación de especies tanto acuáticas como terrestres [14][28].

Por todas las razones mencionadas anteriormente, últimos estudios se han enfocado en utilizar un nuevo tratamiento totalmente ecológico donde se usa una solución de bicarbonato de sodio. Esta solución es levemente alcalina debido a la formación de ácido carbónico e ion hidróxido tal como se muestra en (1.2) y (1.3) por lo que se puede suponer una interacción similar a la que ocurre en el tratamiento de mercerización [15].



Entonces, tanto el tratamiento con hidróxido de sodio como el de bicarbonato de sodio remueven cierta porción de hemicelulosa, lignina y ceras en la superficie externa de la fibra, e incrementa las propiedades mecánicas de las fibras, esto reduce el diámetro de la fibra y,

además, puede causar degradación en la fibra si el tiempo de tratamiento es demasiado largo por lo que es un factor importante [15], por ello, hay que encontrar los parámetros óptimos del tratamiento para obtener las mejores propiedades tanto para la fibra como para el compuesto. Para lo cual, hay que tener en cuenta la solubilidad máxima que se puede obtener en agua debido a que se requiere que sea una solución uniforme, esto depende de la temperatura tal como se muestra en Figura 1.7 [29].

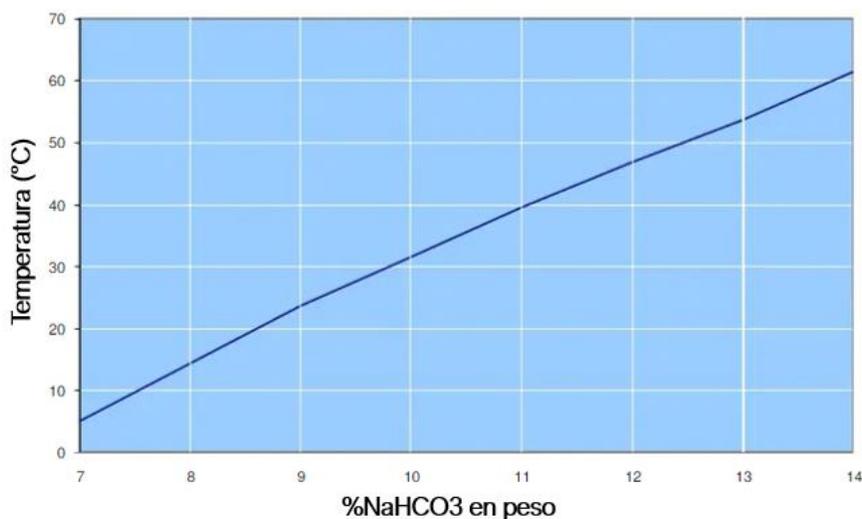


Figura 1.7 Solubilidad de bicarbonato de sodio en agua.

Fuente: TATA Chemical Europe Limited. Solubility of Sodium Bicarbonate in Water % NaHCO₃ by Weight Solubility of Sodium Bicarbonate in Water [29]

1.3. Ensayo de resistencia a la tracción de fibras

El ensayo de resistencia a la tracción de las fibras permite obtener las curvas de esfuerzo-deformación unitaria, para ello, cabe recalcar que la curva típica para fibras vegetales tiene un comportamiento casi lineal donde se puede observar 3 segmentos: primero, una región lineal donde se obtiene el módulo inicial, seguido de una ligera curvatura dada por el colapso de la pared primaria de la fibra y desunión de los componentes celulósicos y no celulósicos debido a imperfecciones presentes; y, por último, se observa una ruptura súbita al llegar a su máximo esfuerzo, lo cual indica una falla de tipo frágil [30][31].

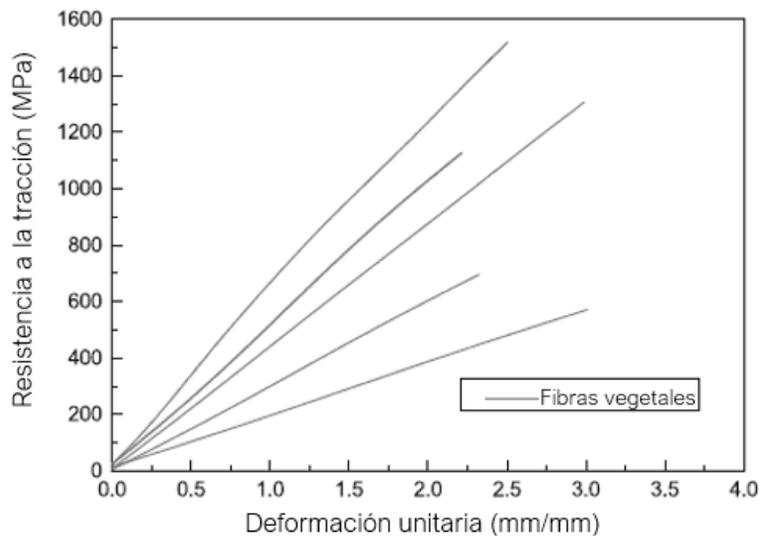


Figura 1.8 Curva típica de esfuerzo-deformación unitaria de las fibras vegetales.

Fuente: M. Aslan, G. Chinga-Carrasco, B. F. Sørensen y B. Madsen. Strength variability of single flax fibres. [30]

Para realizar la prueba de tracción de algún material, se realiza una probeta la cual se coloca en una máquina de tracción; sin embargo, para obtener dichas propiedades de las fibras naturales o sintéticas se tiene circunstancias diferentes debido a sus dimensiones, por ello, se tiene que cumplir con el procedimiento detallado en la norma ASTM C1557-14. [32]

El primer detalle que surge es si la fibra se coloca directamente en las mordazas de agarre (o *grips*, en inglés) de la máquina de tracción, se dañaría debido al aplastamiento, y al hacer la prueba, influiría a que la rotura se produzca en estos extremos dañados, dando valores inexactos. Por ello, la primera consideración que se realiza es la colocación de una porta probeta o tabs en los extremos de las fibras como se muestra en la Figura 1.9a, la forma del tab varía dependiendo de las mordazas de la máquina de tracción ya que se modifica para que funcione adecuadamente. Así, antes de iniciar el ensayo, se debe cortar al medio del tab como se muestra en la Figura 1.9b. Cabe recalcar que todos los parámetros tales como la tasa de deformación, dimensiones del tab, posición de la fibra y longitud de la colocación del pegamento, se tienen que mantener constantes para todas las pruebas de la fibra. [32]

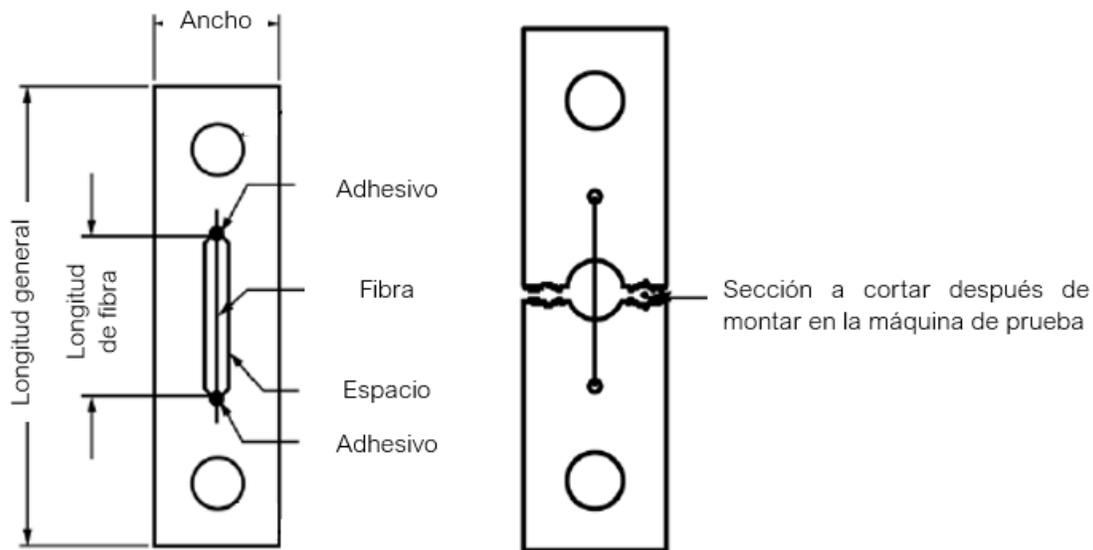


Figura 1.9 a) Fibra en el tab y b) Probeta colocada en la máquina de tracción
Fuente: ASTM C1557-14 [32].

Es necesario tener en cuenta que, al realizar la prueba de tracción, se obtendrá la deformación del sistema, es decir tanto de la fibra como del tab utilizado, esto se expresa en (1.4):

$$\Delta L = \Delta l + C_s F \quad (1.4)$$

Donde:

ΔL = Deformación total del sistema (mm)

Δl = Deformación de la fibra (mm)

C_s = Flexibilidad del sistema (mm/N)

F = Fuerza de tensión realizada (N)

$C_s F$ = Deformación del tab

Con los datos de la prueba de tracción de cada fibra, se realiza una curva fuerza-deformación para calcular la pendiente de la zona lineal ($\frac{\Delta L}{F}$), tal como se muestra en la Figura 1.10.

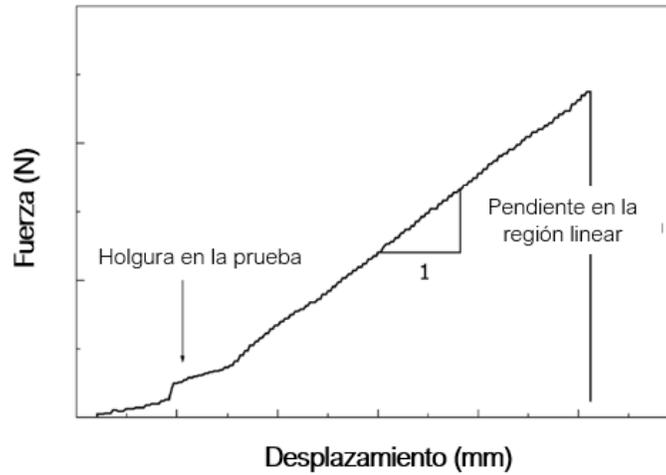


Figura 1.10 Curva estándar de fuerza vs desplazamiento.
Fuente: ASTM C1557-14 [32].

Luego de ello, se divide la ecuación 4 entre la fuerza, obteniendo $\frac{\Delta L}{F} = \frac{\Delta l}{F} + C_s$, donde se sabe que $\frac{F}{EA} = \frac{\Delta l}{l_0}$ y despejando se obtiene $\frac{F}{\Delta l} = \frac{EA}{l_0}$. Con ello en cuenta, la ecuación (1.4) se convierte en (1.5); se linealiza gráficamente tal como se muestra en la Figura 1.11. Finalmente, se obtiene la inversa del módulo elástico como pendiente y flexibilidad del sistema, que será el intercepto de la recta con el eje vertical. [32]

$$\frac{\Delta L}{F} = \frac{l_0}{EA} + C_s \quad (1.5)$$

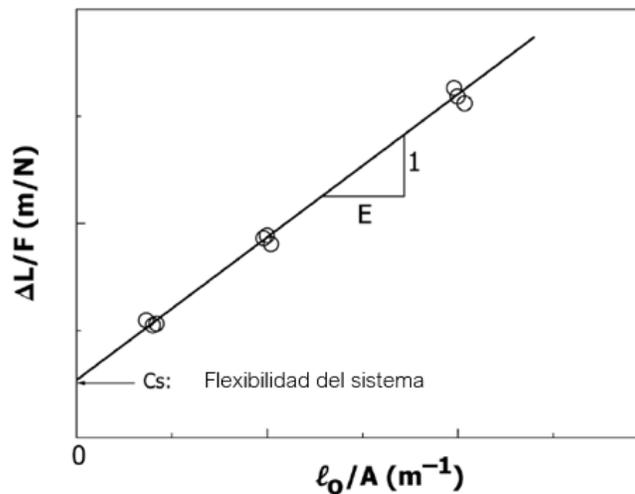


Figura 1.11 Gráfica lineal de $\frac{\Delta L}{F}$ vs $\frac{l_0}{A}$.
Fuente: ASTM C1557-14 [32].

Hay que entender que el valor de la flexibilidad del sistema es un factor importante ya que afecta directamente el valor de módulo de Young y la deformación unitaria de la fibra tal como se muestra en la Figura 1.12 mientras mayor sea la flexibilidad del sistema, mayor será la variación con respecto al obtenido del sistema.

Debido a la variabilidad de las propiedades de la fibra, una manera de comprobar que el valor de la flexibilidad del sistema está bien definido es comparar el módulo de elasticidad de la fibra obtenido con el procedimiento detallado anteriormente con el módulo de elasticidad aparente, el cual se detallará a continuación.

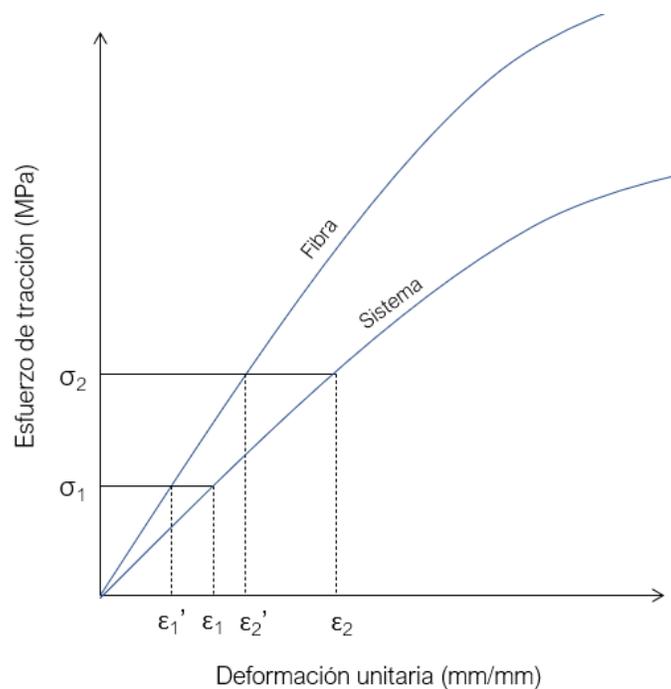


Figura 1.12 Gráfica esfuerzo deformación de sistema y fibra.
Fuente: Elaboración propia.

Lo que se quiere hallar es una dependencia del módulo de elasticidad de la fibra con respecto al módulo de elasticidad del sistema en general, cuyo valor se tiene como dato inicial, por lo tanto, se define este valor tal como se muestra en (1.6). Cabe recalcar que para hallar el módulo elástico se obtiene la pendiente en la zona lineal de la curva, para ambos casos se mantiene constantes los valores del esfuerzo final e inicial y los datos que varían son las deformaciones unitarias final e inicial correspondiente al esfuerzo en cada curva.

$$E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{\Delta F}{A} \cdot \frac{L_0}{\Delta L} \quad (1.6)$$

Donde:

σ_2 = Esfuerzo de tracción final en la zona lineal de la curva (MPa)

σ_1 = Esfuerzo de tracción inicial en la zona lineal de la curva (MPa)

ε_1 = Deformación unitaria del sistema, correspondiente a σ_1 (mm/mm)

ε_2 = Deformación unitaria del sistema, correspondiente a σ_2 (mm/mm)

De la misma manera, para el módulo de elasticidad aparente de la fibra, se tiene el mismo procedimiento, tal como se muestra en (1.7).

$$E_{apa} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2' - \varepsilon_1'} \quad (1.7)$$

Donde:

ε_1' = Deformación unitaria del sistema, correspondiente a σ_1 (mm/mm)

ε_2' = Deformación unitaria del sistema, correspondiente a σ_2 (mm/mm)

Por otro lado, se sabe que la deformación unitaria de la fibra se puede interpretar como (1.8).

$$\varepsilon' = \frac{\Delta l}{L_0} = \frac{\Delta L - C_s F}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} - \frac{C_s F}{L_0} \quad (1.8)$$

Con ello, se puede relacionar ambas deformaciones tanto del sistema como de la fibra, esta relación se muestra en (1.9) y (1.10).

$$\varepsilon' = \varepsilon - \frac{C_s F}{L_0} \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_2' - \varepsilon_1' = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \frac{C_s}{L_0} (F_2 - F_1) = \Delta \varepsilon - \frac{C_s}{L_0} * \Delta F \quad (1.10)$$

Por último, se reemplaza (1.10) y (1.11) en (1.7) para hallar finalmente la fórmula a utilizar mostrada en (1.13).

$$\Delta F = \Delta \sigma \cdot A \quad (1.11)$$

$$E_{apa} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2' - \varepsilon_1'} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon - \frac{C_s}{L_o} \Delta F} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \left(\frac{1}{1 - \frac{C_s}{L_o} \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \cdot A} \right) \quad (1.12)$$

$$E_{apa} = \frac{E_s}{1 - C_s E_s \frac{A}{L_o}} \quad (1.13)$$

1.4. Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos que están conformados por al menos dos componentes. La matriz suele ser polimérica, metálica o cerámica, y es donde se incrusta el material de refuerzo. Este último suele tener mayores propiedades mecánicas, normalmente cerámicos y de forma alargada. Otro término utilizado es el de bio compuestos, que son aquellos que están conformados con fibras naturales y resina sintética, fibra sintética y resina o ambos pueden ser materiales naturales [5].

Por otro lado, el material compuesto puede configurarse de diferentes maneras para obtener el material compuesto: monofilamentos, fibras cortas, largas, partículas, entre otros. La configuración más utilizada es con fibras largas en una dirección determinada debido a que se obtiene un mayor volumen de fracción alcanzando el valor de 60-70% [5].

Otra característica física importante a tener en cuenta es la densidad del material, el cual puede ser calculado con (1.14), esto siguiendo los lineamientos de la norma D792 [33].

$$d = \frac{a}{a - b} \cdot d_{H20} \quad (1.14)$$

Donde:

d = Densidad del material (kg/m³)

a = masa aparente de la muestra del espécimen cuando está completamente seco (kg)

b = masa aparente de la muestra del espécimen cuando está completamente sumergido (kg)

d_{H_2O} = densidad del agua que es igual a 998 (kg/m³)

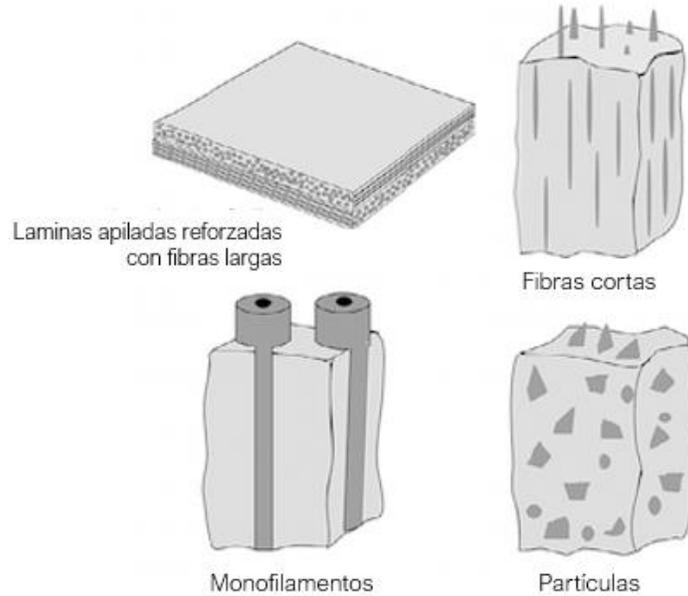


Figura 1.13 Configuración de material compuesto.
Fuente: T. W. Clyne. An introduction to composite materials [5]

El comportamiento mecánico del material compuesto depende del volumen de fracción de cada uno de los materiales, debido a que actúan por transferencia de carga, que pasa por la matriz y mediante la interfaz actúa en la fibra, por lo que se puede expresar tal como se muestra en (1.15). Por otro lado, el compuesto se considera como eficiente cuando el material de refuerzo soporta una proporción relativamente mayor a la que soporta la matriz.

$$f \bar{\sigma}_f + (1 - f) \bar{\sigma}_m = \sigma_A \quad (1.15)$$

Donde:

f = Volumen de fracción del material de compuesto (%)

$\bar{\sigma}_f$ = Resistencia del material de refuerzo (MPa)

$\bar{\sigma}_m$ = Resistencia de la matriz (MPa)

σ_A = Carga aplicada (MPa)

1.4.1. Matrices poliméricas para materiales compuestos

La matriz es la parte del compuesto encargada de mantener la unión con las fibras y transmitir la carga hacia las fibras mediante la interfaz que las une, por ello es importante elegir la matriz correcta ya que afecta la compatibilidad fibra/matriz y, en consecuencia, las propiedades mecánicas y físicas (durabilidad, impacto ambiental, etc.) del material compuesto. Las matrices para materiales compuestos pueden ser metales, cerámicos o polímeros, estos últimos son los más utilizados y estudiados con fibras naturales, los cuales son clasificados como polímeros termoplásticos y termoestables [6].

Los polímeros termoplásticos son aquellos que se ablandan o se funden a altas temperaturas, lo que hace que el material sea flexible y deformable para darle la forma requerida ya que luego puede volver a solidificarse mientras se enfría a temperatura ambiente. Estos ciclos se pueden repetir, lo que permite que sea reciclable y reutilizado, por ello son considerados parcialmente biodegradables, aunque estén basados en petróleo, una desventaja es que son muy pocos los que se pueden trabajar en estado líquido. El uso de los termoplásticos representa el 80% del consumo de total de plásticos debido a que se puede hacer combinaciones de termoplásticos compatibles, lo que genera que mejorarlos y así aumentar su uso. Los más utilizados en el área de materiales compuestos son el polipropileno (PP) y polietileno (PE) [34][35].

Por otro lado, los polímeros termoestables se caracterizan por degradarse a altas temperaturas sin pasar por el estado líquido. Generalmente, las propiedades mecánicas de estos polímeros son mejores que los termoplásticos; sin embargo, tienen algunas desventajas tales como menor resistencia al impacto, mayor tiempo en los ciclos de producción debido al tiempo que conlleva la reacción química de reticulación, liberación de gases, en la mayoría de los casos son tóxicos, de algunos polímeros cuando están en el proceso de endurecimiento y después de su uso, no se puede reutilizar. El uso de los termoestables es alrededor de 12% a 20% del consumo total de plásticos [34],[36], y los más utilizados en el área de materiales compuestos reforzados con fibras naturales son la resina poliéster, seguido de la resina epóxica [6], estos se muestran en la Figura 1.14.

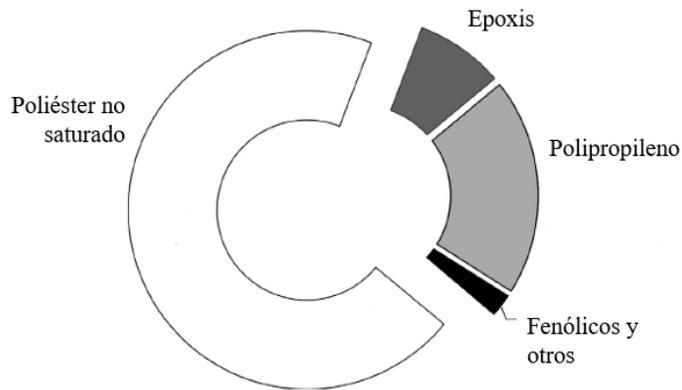


Figura 1.14 Principales matrices de materiales compuestos.
Fuente: M. Biron. Thermosets and Composites. [37]

En la Figura 1.15 se muestra una comparación de propiedades mecánicas y costo de las resinas mencionadas. La resina epóxica posee mayor módulo elástico y propiedades de adherencia que la resina poliéster; sin embargo, la mayor diferencia surge en accesibilidad y costo, donde el precio de la resina epóxica puede superar por más del 30% a la resina poliéster.

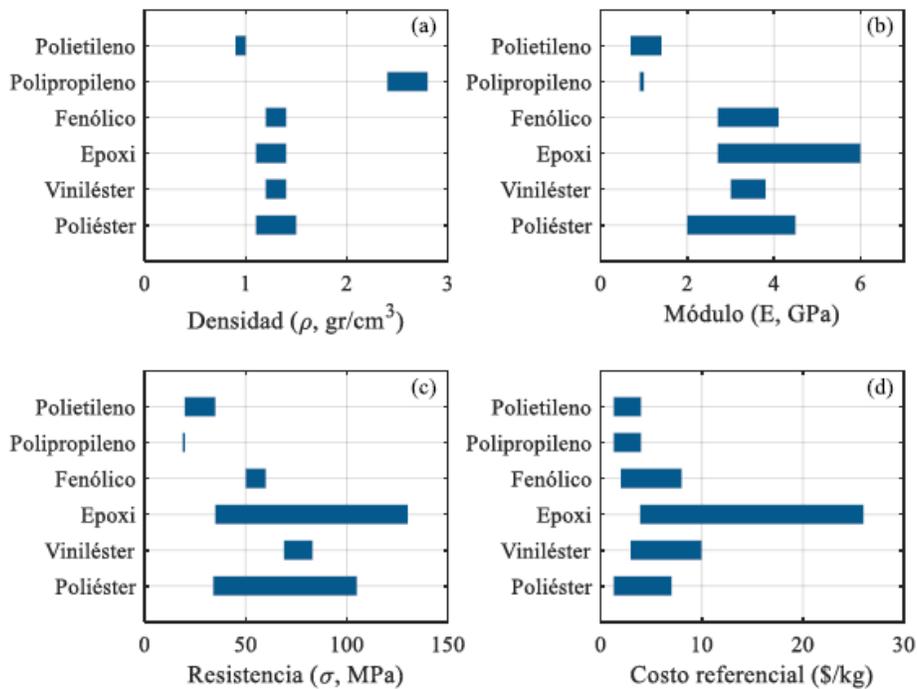


Figura 1.15 Comparación de propiedades mecánicas y costo de resinas utilizadas como matrices en materiales compuestos.

Fuente: S. Candiotti. Caracterización y modelamiento de la fibra de ichu para su uso como refuerzo en materiales compuestos laminados. [38]

Para la caracterización de los materiales poliméricos y plásticos se utilizará la norma ASTM D790 utilizada para determinar las propiedades mecánicas por flexión de los polímeros/plásticos [39] donde se utilizará el procedimiento A descrito en la norma debido a las condiciones y dimensiones de las probetas a obtener. Esta misma norma se utiliza para polímeros reforzados por lo que también se utilizará para evaluar los materiales compuestos.

1.5. Ensayo de propiedades mecánicas de polímeros

La configuración utilizada será la de carga de tres puntos con soportes fijos y punta de carga tal como se muestra en la Figura 1.16a y se seguirá el procedimiento A descrito en la norma ASTM D790 [39]. Cabe recalcar que los contactos cilíndricos que actuarán sobre la zona de soporte y carga deben tener un radio mínimo de 3.2 milímetros.

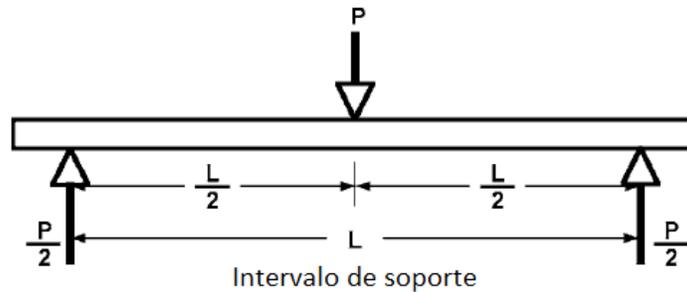


Figura 1.16. a) Configuración de fuerza y soporte para la caracterización del compuesto. b) radio de elementos a contacto con la probeta.

Fuente: ASTM D790 [39]

La tasa de deformación se hallará para cada probeta según la fórmula descrita en (1.11).

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (1.16)$$

Donde:

R = Tasa de deformación (mm/min)

L = Longitud de soporte (mm)

d = Espesor de probeta (mm)

Z = Tasa de deformación de la fibra exterior, donde Z debe ser 0.01 (mm)

Para obtener una resistencia válida, debe ocurrir una falla en cualquiera de las superficies externas sin dañar una falla por corte interlaminar o aplastamiento de los soportes. En la superficie donde ocurre tensión, puede ser una falla por grieta y por compresión un pandeo local.

Obtenido 5 pruebas exitosamente, se hallarán 3 propiedades mecánicas elementales: resistencia a la flexión la cual es igual a la resistencia máxima en la cara externa, módulo de flexión y la deformación unitaria en la capa superior. Para ello, se utilizará las fórmulas para deflexión de vigas debido a que la probeta tiene una forma rectangular, y la fuerza se ejerce de manera puntual en el centro de esta.

La resistencia a la flexión σ_f se calcula con (1.17); sin embargo, el momento flector máximo para una carga concentrada en el centro se puede hallar tal como se indica en (1.18). La inercia que se generará será en el eje x' , es decir, el eje horizontal y central de la probeta, por lo cual se utilizará (1.19) [40]. Utilizando todas las fórmulas descritas, se halla (1.20) para obtener el resultado final.

$$\sigma_f = \frac{M \cdot c}{I} \quad (1.17)$$

$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad (1.18)$$

$$Ix' = \frac{1}{12} b \cdot d^3 \quad (1.19)$$

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1.20)$$

Donde:

σ_f = Esfuerzo a la flexión (MPa)

M = Momento flector (N.mm)

c = Distancia desde el eje neutro hasta donde se realiza el esfuerzo igual a la mitad del ancho (mm)

$I = \text{Inercia (mm}^4\text{)}$

$P = \text{Carga aplicada (N)}$

Por otro lado, deflexión en la superficie externa se halla con (1.21). Del mismo modo, la deformación unitaria se obtiene despejando la variable de la ecuación anterior obteniendo (1.22), por último, el módulo elástico inicial se halla con (1.23).

$$D = \frac{rL^2}{6d} \quad (1.21)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (1.22)$$

$$E_f = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (1.23)$$

Donde:

$D = \text{Deflexión en el centro de la probeta (mm)}$

$r = \text{Deformación unitaria (mm/mm)}$

$\varepsilon_f = \text{Deformación en la superficie externa (mm/mm)}$

$m = \text{pendiente de la región lineal inicial de la curva de fuerza-deformación (N/mm)}$

$E_f = \text{Módulo elástico inicial (MPa)}$

1.6. Ensayo de caracterización de interfaz fibra/matriz

La caracterización de la interfaz fibra/matriz es la clave para predecir que estos dos materiales interaccionen con el rendimiento deseado y se pueda cumplir el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas; para esto, es necesario recalcar el principio de funcionamiento: la matriz, el elemento con menor propiedad mecánica, es el responsable de unir todo el material ya que, dentro de este, estarán las fibras que permite aumentar las propiedades del material; estas dos están conectadas por el área de interfaz, la cual es responsable de la transferencia de carga y tensión. [41]

Para el estudio cuantitativo de la interacción fibra matriz, existen varias pruebas micromecánicas que miden el valor medio de la resistencia al corte interfacial (*IFSS*, por sus siglas en inglés), pero las más conocidas son la prueba de desprendimiento por tracción de una sola fibra (*single fiber pull-out test*), prueba de micro desprendimiento por tracción (*Micro bond test*), prueba de expulsión (*push-out test*) y prueba de fragmentación (*fragmentation test*) [42]. La prueba de micro desprendimiento es una de las pruebas consideradas más eficaces debido a que mide directamente el IFSS además de ser relativamente simple, por lo que ha sido ampliamente utilizada, mayormente con polímeros termoplásticos, además de ello, se ha encontrado correlaciones entre los métodos de desprendimiento por tracción, utilizado mayormente con matrices de polímeros termoestables. [43]

Un dato interesante es que se ha mencionado que para compuestos con matrices que tienen una mayor deformación que la fibra, es mejor utilizar la prueba de fragmentación. Y, otro lado, para matrices frágiles, es mejor que se utilice las pruebas de extracción de fibra [41]. Sin embargo, el resultado de estos métodos es comparativo, es decir, se puede evaluar qué materiales tienen una mejor unión y transferencia de carga, y también entre mismos materiales con diferentes tratamientos superficiales.

1.7. Ensayo de desprendimiento por tracción (*Pull-out test*)

La prueba se realiza con una probeta donde se incrusta parcialmente una fibra dentro del plano medio de la matriz, la fibra de la probeta se extrae con una fuerza paralela a esta, la fuerza va incrementando hasta que la fibra se retire completamente de la matriz y sin romperse en el proceso.

Los datos de fuerza y desplazamiento que se obtienen son interpretados con el modelo de arrastre por cortante (*shear lag model*, en inglés). Este modelo indica que la transferencia de carga de la matriz a la fibra se da mediante esfuerzos cortantes en el área de la interfaz debido a que, al ejercer la fuerza en la fibra, la parte de la matriz que se encuentra junto a la

fibra se deforme y esto genera esfuerzos cortantes en esta zona. Este proceso se puede observar esquemáticamente en la Figura 1.17 [44],[5].

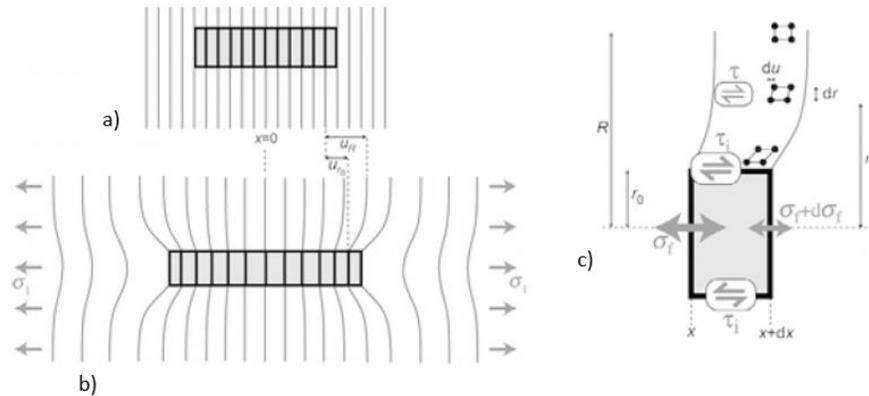


Figura 1.17 Representación esquemática de la base del modelo de arrastre por cortante (*shear lag model*) a) sin aplicación de carga, b) con aplicación de carga y, c) especificación del comportamiento en la interfaz.

Fuente: T. W. Clyne. An introduction to composite materials [5].

La distribución de esfuerzos (Figura 1.18) se produce en tres etapas, el comportamiento en la curva esfuerzo-desplazamiento se muestra en la Figura 1.18 c, d y e respectivamente. Cabe recalcar que el pico que se muestra en la curva se refiere al esfuerzo que causa el desprendimiento. [5]

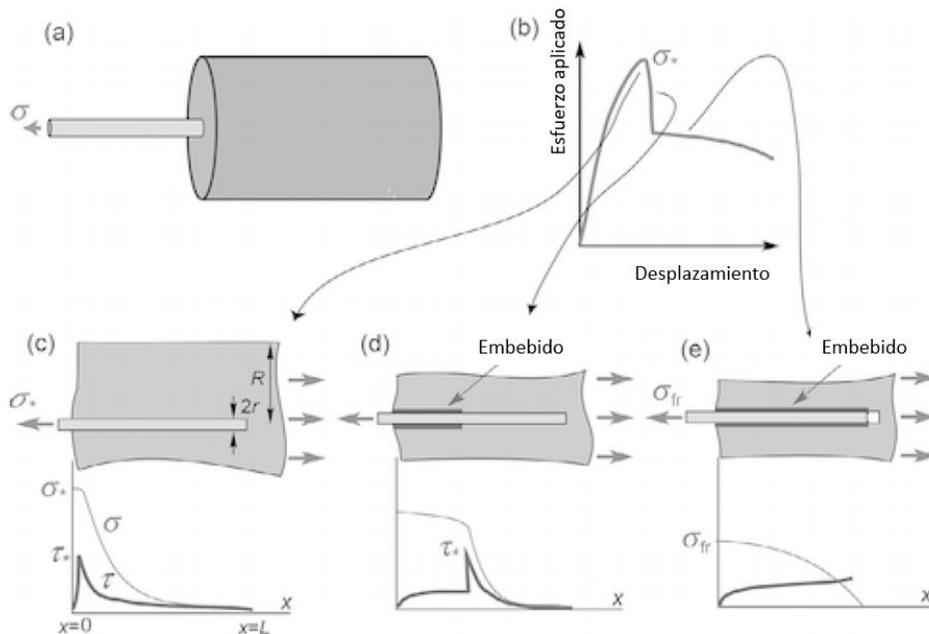


Figura 1.18 Representación esquemática de la prueba de tracción de una sola fibra donde se muestra a) la geometría de la probeta, b) curva σ - ϵ , c) inicio del desprendimiento, d) durante del desprendimiento y, e) durante la extracción por fricción.

Fuente: T. W. Clyne. An introduction to composite materials [5].

El esfuerzo interfacial está directamente influenciado por la longitud embebida de la fibra (L), el diámetro de la fibra (D_f), el módulo de Young (E_f) tanto de la fibra como de la matriz (E_m) y el espesor de la capa adhesiva o de revestimiento superficial de la fibra (t_a) [45].

Matemáticamente, el modelo se basa en la diferencia entre el esfuerzo de tracción que ocurre en las caras de los extremos de la fibra, que está siendo considerado un cilindro perfecto, y el esfuerzo de tracción que ocurre en el área interfacial, con ello se obtiene la siguiente fórmula $-(\pi r_0^2)d\sigma_f = \tau_i(2\pi r_0 dx)$, así se obtiene (1.24) .

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{r_0} \quad (1.24)$$

Donde:

σ_f = Resistencia de tracción de fibra (MPa)

x = Longitud de la fibra incrustada en determinado momento (mm)

τ_i = Resistencia cortante interfacial (MPa)

r_0 = Radio de la fibra (mm)

Para hallar el esfuerzo cortante de la interfaz, se iguala el valor ocurrido en dos zonas circunferenciales distintas $2\pi r_1 \tau_1 dx = 2\pi r_2 \tau_2 dx$, simplificando se obtiene $\tau = \tau_i \frac{r_0}{r}$. Luego, se considera el desplazamiento de la matriz tal como se muestra en (1.25)

$$\gamma = \frac{\tau}{G_m} = \frac{du}{dr} \quad (1.25)$$

Donde:

G_m = Módulo cortante (GPa)

u = velocidad (mm/s)

Considerando que la deformación unitaria de la matriz es uniforme, es decir, $\frac{du}{dr} = 0$, se obtiene (1.26).

$$\tau_i = \frac{(u_R - u_{r0}) \cdot G_m}{r_0 \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (1.26)$$

Considerando que, en la prueba de desprendimiento, la matriz y fibra se encuentran paralelas y presentan una relación de radio R/r , se obtiene (1.27) de (1.25) y (1.26).

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = - \frac{E_m \cdot (u_R - u_r)}{(1 + V_m) \cdot r^2 \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (1.27)$$

Donde:

V_m = coeficiente de Poisson de la matriz

E_m = Modulo de Young (GPa)

Luego, se considera que la adhesión interfacial es perfecta y que se desprecia la deformación de la matriz lejos de la fibra, obteniendo que $\frac{du_r}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$ y $\frac{du_R}{dx} = 0$. Se expresa el módulo cortante en relación con el módulo de Young y ratio de Poisson de la matriz y se obtiene $E_m = 2G_m(1 + v_m)$. Estas consideraciones se reemplazan en la ecuación 3, luego se diferencia y se obtiene (1.28).

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{n^2}{r^2} \cdot \sigma_f \quad (1.28)$$

Donde $n = \sqrt{\frac{E_m}{E_f(1+v_m) \ln\left(\frac{R}{r}\right)}}$.

Se diferencia y se considera que $\sigma_f(x=0) = \sigma$ y $\sigma_f(x=L) = 0$, se obtiene la ecuación final del esfuerzo de tracción en la fibra σ_f , la cual se muestra (1.29).

$$\sigma_f = \sigma \left[\frac{\sinh\left(\frac{n \cdot (L-x)}{r}\right)}{\sinh\left(\frac{nL}{r}\right)} \right] \quad (1.29)$$

$$\sigma_f = \frac{P}{\pi \cdot r^2} \quad (1.30)$$

Finalmente, la fórmula del esfuerzo cortante interfacial que se haya utilizado (1.27), se muestra en (1.31).

$$\tau_i = \frac{n\sigma}{2} \cosh\left(\frac{n(L-x)}{r}\right) \operatorname{cosech}\left(\frac{nL}{r}\right) \quad (1.31)$$

El esfuerzo cortante de la interfaz que causa el desprendimiento de la fibra (τ_*) y el esfuerzo axial de la fibra (σ_*) están relacionados cuando se considera que $x=0$. Como resultado se obtiene (1.32).

$$\tau_* = \frac{n \cdot \sigma_*}{2} \cosh\left(\frac{n \cdot L}{r}\right) \quad (1.32)$$

1.8. Distribución de Weibull

Las propiedades mecánicas de las fibras naturales presentan gran variabilidad y es frecuente que no puedan ser representadas mediante una distribución normal; por otro lado, puede utilizarse para trabajar con materiales frágiles y/o dúctiles [46]; por ello, la distribución de Weibull de dos parámetros ha sido empleada como la distribución estadística para evaluar la resistencia y capacidad de deformación de estos materiales.

El cálculo de la probabilidad de falla de un material según Weibull está expresado en (1.33) [47]. El parámetro de forma representa la variabilidad de la propiedad del material, y el parámetro de escala es la propiedad del material cuando la probabilidad de falla es 63%; esta se linealiza con logaritmo neperiano como se muestra en (1.34).

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, x > 0 \quad (1.33)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right) = \beta \cdot \ln x - (\beta \cdot \ln \eta) \quad (1.34)$$

Donde:

x = Dato o propiedad a estudiar

β = Parámetro de forma

η = Parámetro de escala

En esta ecuación, el valor de x representa la propiedad a evaluar; y $F(x)$, la probabilidad acumulativa de falla de la fibra, el cual se estimó mediante el índice de probabilidad de valor de rango medio (1.35). Si se plotea una gráfica con $\ln x$ en el eje de abscisas y, $\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right)$ en el eje de ordenadas, mediante un ajuste lineal es posible obtener los valores del módulo de Weibull, β , y el Weibull característico, η .

$$F(x) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (1.35)$$

Donde:

i = Número de fibra ensayada

n = Número total de fibras ensayadas

1.9. Estadística no paramétrica

Según M. Triola [48], la estadística no paramétrica se utiliza debido a que no se requiere que la población distribuida normalmente. Además de ello, a comparación de sus paramétricas correspondientes, las pruebas no paramétricas tienen una eficiencia mayor al 90%, por lo que no es un factor significativo.

Las pruebas no paramétricas por utilizar en el estudio son la prueba de Wilcoxon o Prueba U de Mann Whitney y la prueba de Kruskal-Wallis (ambas con 95% de eficiencia a comparación de sus pruebas paramétricas correspondientes) ya que se aplica para analizar muestras de grupos independientes, es decir, que no tienen una correlación entre grupos. Ambos muestran un análisis comparativo que afirman la hipótesis nula o la niegan y afirman la hipótesis alternativa de que las muestras provienen de poblaciones con medianas iguales o diferentes, respectivamente. [48]

1.9.1. Prueba de Wilcoxon para dos muestras independientes

La idea general reside en que, si se combinan las muestras se le asigna un rango, es decir, el número a cada elemento de acuerdo con su posición en la lista ordenada, y como resultado el rango de una muestra predominante en un extremo y el otro igual, se concluye que tienen medianas diferentes.

Para utilizar la prueba de Wilcoxon es necesario utilizar únicamente dos muestras aleatorias simples independientes, cada una con 5 datos como mínimo para cada grupo [48]. La hipótesis nula y alternativa son las siguientes:

H_0 = Las muestras provienen de poblaciones con medianas iguales.

H_1 = Las muestras provienen de poblaciones con medianas diferentes.

Por otro lado, los datos estadísticos de la prueba se calculan tal como se muestra en (1.36), (1.37) y (1.38):

$$z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (1.36)$$

$$\mu_R = \frac{n_1(n_1 + n_2 + 1)}{2} \quad (1.37)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{n_1 n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (1.38)$$

Donde:

z = valor estadístico de prueba

R = suma de los rangos de la muestra con tamaño n_1

μ_R = media de los valores R muestrales que se espera cuando las dos poblaciones tienen medianas iguales

σ_R = desviación estándar de los valores R muestrales que se espera cuando dos poblaciones tienen medianas iguales

n_1 = tamaño de la muestra de la cual se encuentra la suma de rangos R

n_2 = tamaño de la otra muestra

El procedimiento para encontrar el valor de dato estadístico de prueba se muestra a continuación:

1. Se combina las dos muestras en una sola, se ordena los datos de menor a mayor valor numérico y se le asigna un número a cada elemento de acuerdo con su posición en la lista ordenada. En caso haya números de igual magnitud, el rango que se utilizará es la media de los rangos implicados.
2. Se encuentra la suma de rangos para cada muestra.
3. Se calcula el valor estadístico de prueba.
4. Se compara con los valores críticos de z , si es que está dentro de los valores críticos, se afirma la hipótesis nula, si se encuentra fuera de los valores críticos, se afirma la hipótesis alternativa.

1.9.2. Prueba de Kruskal-Wallis

Para utilizar la prueba de Kruskal-Wallis es necesario utilizar tres o más muestras aleatorias simples independientes, cada una con 5 datos como mínimo para cada grupo [48]. La hipótesis nula y alternativa son las siguientes:

H_0 = Las muestras provienen de poblaciones con medianas iguales.

H_1 = Las muestras provienen de poblaciones con medianas diferentes.

Por otro lado, los datos estadísticos de la prueba se calculan tal como se muestra en (1.39) y

(1.40):

$$H = \frac{12}{N \cdot (N + 1)} \cdot \left(\frac{R_1^2}{n_1} + \frac{R_2^2}{n_2} + \dots + \frac{R_k^2}{n_k} \right) - 3 \cdot (N + 1) \quad (1.39)$$

(1.40)

$$gl = k - 1$$

Donde:

k = cantidad de muestras diferentes.

H = valor estadístico de prueba.

R = suma de los rangos de la muestra correspondiente

n = número de observaciones en la muestra correspondiente.

gl = grados de libertad.

El procedimiento para encontrar el valor de dato estadístico de prueba se muestra a continuación:

1. Se combina todas las muestras en una sola, se ordena los datos de menor a mayor valor numérico y se le asigna un número a cada elemento de acuerdo con su posición en la lista ordenada. En caso haya números de igual magnitud, el rango que se utilizará es la media de los rangos implica.
2. Se encuentra la suma de rangos para cada muestra.
3. Se calcula el valor estadístico de prueba.
4. Se compara con los valores críticos correspondiente al grado de libertad calculado. Si el valor está dentro de los valores críticos, se afirma la hipótesis nula, si se encuentra fuera de los valores críticos, se afirma la hipótesis alternativa.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En este capítulo, se detalla la metodología para determinar los objetivos planteados en el presente estudio. Se divide en 3 etapas principales: la obtención de propiedades físicas y mecánicas de las fibras de cabuya con diferentes tiempos de tratamiento, obtención de las propiedades físicas y mecánicas de los polímeros, y de las propiedades de interfaz fibra matriz experimental y numéricamente. El procedimiento por seguir en cada una de las etapas se detalla en la Figura 2.1.

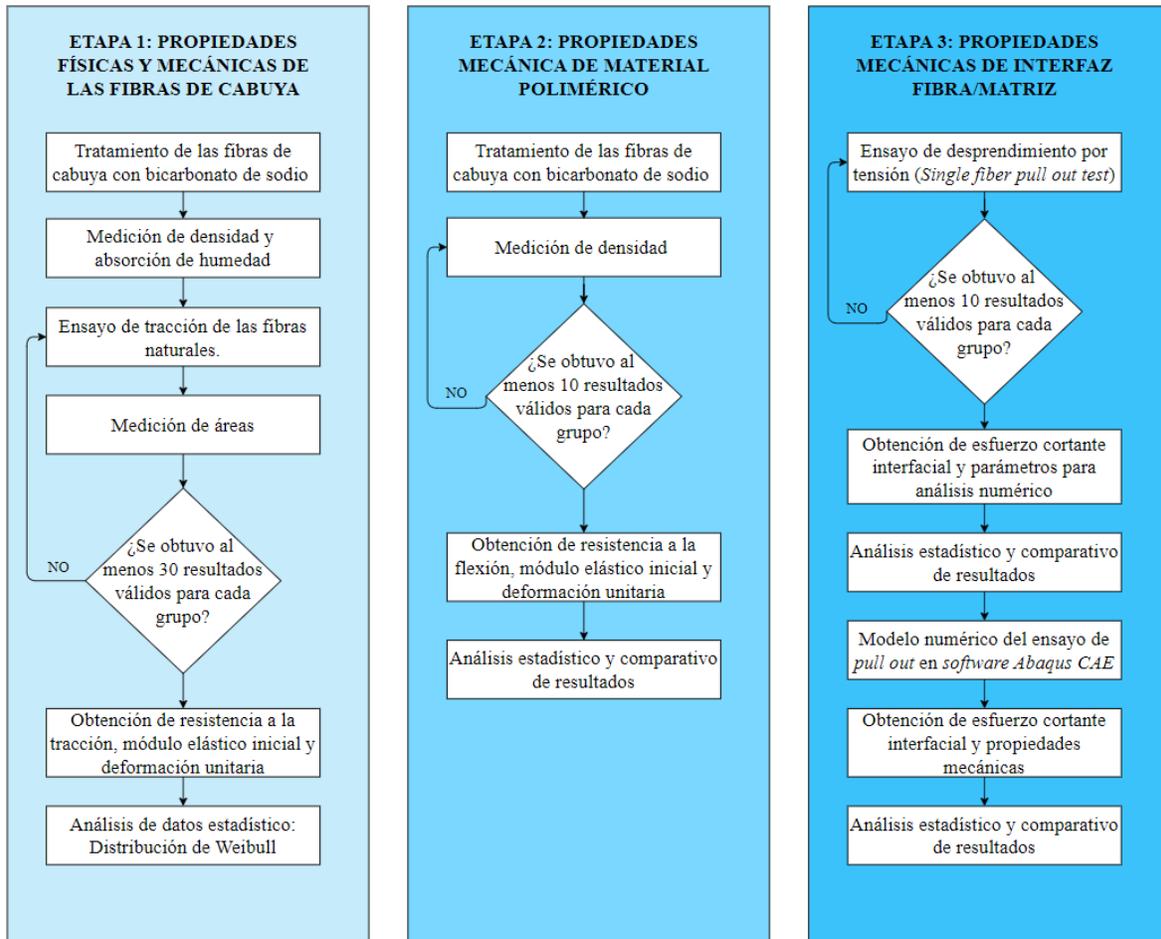


Figura 2.1 Flujograma de la metodología propuesta.
Fuente: Elaboración propia

2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se realiza es principalmente experimental debido a que durante toda la tesis se recolecta datos cuantitativos mediante experimentos según norma. El fenómeno de estudio es el tratamiento ecológico de las fibras de cabuya con bicarbonato de sodio donde se cuenta con las condiciones constantes (temperatura y concentración, humedad) y una condición variable (tiempo de tratamiento) , con ello se pretende determinar los efectos en las propiedades mecánicas y físicas tanto en la fibra e interfaz fibra/matriz mediante un análisis estadístico para validar o refutar la hipótesis planteada la cual sería la mejora de propiedades mecánicas debido al tratamiento propuesto.

De igual manera, se puede considerar una investigación exploratoria debido a que el efecto de este nuevo tratamiento en fibras naturales se ha empezado a estudiar en los últimos años, sin embargo, no se ha realizado con la fibra de cabuya por lo que su efecto con cualquier condición variable es aún desconocido. Es por ello por lo que, de validar la hipótesis planteada, este estudio será un punto de partida para el seguimiento y profundización del efecto del tratamiento con bicarbonato de sodio en la fibra de cabuya.

2.2. Enfoque de investigación

La presente tesis cuenta con un enfoque cuantitativo, debido a que se evaluarán diferentes propiedades tanto físicas como mecánicas en todas las etapas de la investigación, las cuales serán comparadas para obtener resultados de mejora mediante un análisis estadístico.

2.3. Fuentes de información

Dentro de las fuentes de información se cuenta con artículos científicos, libros, normas, entre otras, que abarcan temas que ayudarán a entender, justificar y desarrollar la presente tesis. Como fuente de información primaria se tiene a las normas para la

caracterización mecánica de las fibras y polímeros, artículos científicos centrados en el estudio del comportamiento de la fibra de cabuya y el comportamiento interfacial, efecto y explicación, entre otros.

Por otro lado, como fuente de información secundaria se tiene diversos libros que explican el comportamiento de las fibras naturales, artículos que recopilan diversos estudios de fibras naturales y comportamiento interfacial mediante la prueba de desprendimiento por tensión donde se puede observar la tendencia de propiedades mecánicas para una futura comparación, además de metodología sugerida para cada etapa y análisis estadístico sugerido y su correcta interpretación.

2.4. Técnicas de recolección y análisis de información

En las técnicas de recolección de información, se destaca la bibliografía debido a que es la guía para que el procedimiento se realice con las normas estandarizadas, la explicación de los resultados obtenidos y comparación de resultados de estudios externos. Para los artículos científicos se tendrá en cuenta la calidad de la revista científica en la que es publicada con la página web Scimago que permite verificar dicho valor debido a que divide la calidad por cuartiles, otro punto es la cantidad de citas del material debido a que esto garantiza que otros autores confirman su información.

El segundo tipo de recolección de información o de datos será de manera experimental. Para garantizar que los resultados obtenidos sean válidos se cuenta con diferentes equipos para controlar las condiciones ambientales tanto humedad como temperatura. Además, se seguirá un estricto control y recomendaciones de las diferentes normas tanto en los materiales como en el trabajo manual a realizar en los experimentos para garantizar la constancia de los factores que pudieran influir en los resultados obtenidos. Por último, también se hará uso del software Abaqus para la obtención de data en el caso del modelo numérico del estudio interfacial fibra/matriz.

En el caso del análisis de información, se realizará mediante el análisis estadístico requerido en cada etapa de la investigación según las fuentes de información y revisión bibliográfica recomendada.

2.5. Procedimiento

2.5.1. Tratamiento superficial de las fibras naturales.

Estudios recientes demuestran que el tratamiento con solución de bicarbonato de sodio son una alternativa viable para mejorar la adhesividad de la fibra con la matriz, además de mejorar las propiedades mecánicas de las fibras naturales; sin embargo, estas mejoras pueden variar dependiendo de la concentración, temperatura y el tiempo de tratamiento [15].

Por ello, las fibras de cabuya serán sometidas a diversos parámetros de tiempo con la máxima concentración de bicarbonato de sodio, la cual depende de la temperatura ambiente. En el caso actual, la solubilidad máxima es de 8.5% en peso de NaHCO_3 debido a la temperatura ambiental promedio de 18°C [29]. Tomando en cuenta una ligera variación en el ambiente por la baja de temperatura en las noches, los tratamientos se realizarán con un 8% en peso de NaHCO_3 en 800 gramos de agua destilada. Esto debido a la cantidad necesaria para que la fibra pueda ser sumergida totalmente en la solución. Cabe recalcar que se trabajará en un ambiente controlado por lo cual, esta acción es preventiva. Con los parámetros definidos de la solución definida, el tratamiento con bicarbonato de sodio se realiza de la siguiente manera:

1. Las fibras son seleccionadas de la parte central de la fibra de cabuya, es decir, se excluye la raíz y la punta de esta, esto debido a que suelen estar deteriorados por el proceso de extracción mecánica de las fibras. Y se prepara los insumos para el tratamiento tal como se muestra en Figura 2.2.



Figura 2.2. Materiales a utilizar en el tratamiento: a) bicarbonato de sodio, b) agua destilada y c) parte central de cabuya.
Fuente: Elaboración propia.

2. Se prepara la solución con 800 gramos de agua destilada y 8% en peso de bicarbonato de sodio, luego se agita mecánica hasta lograr una mezcla uniforme, lo que equivale a 1 hora (demostrado experimentalmente) tal como se muestra en Figura 2.3.

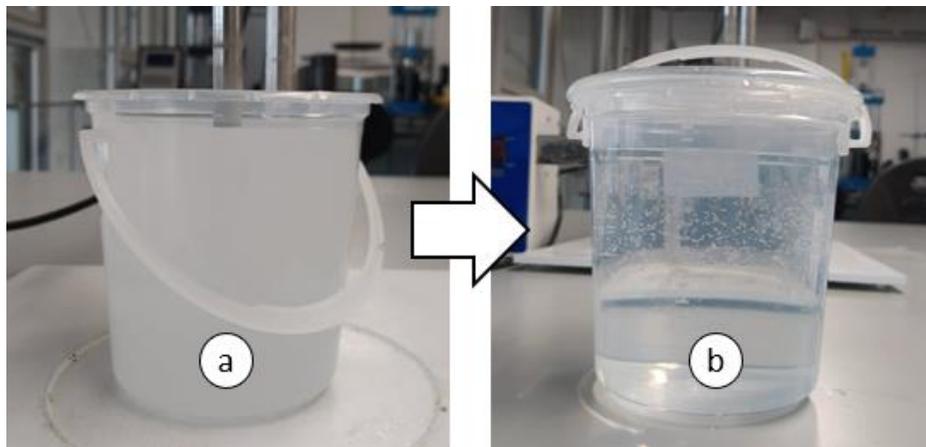


Figura 2.3. Solución con 8% de bicarbonato de sodio en agua destilada: a) sin mezclar y b) mezclada completamente.
Fuente: Elaboración propia.

3. Se coloca 20 gramos de la fibra escogida en un envase rectangular, se vierte la solución y se colocan soportes para que la fibra se mantenga dentro de la solución tal como se muestra en la Figura 2.4. Cabe recalcar que la cantidad de la fibra se calculó aproximando la cantidad necesaria para las pruebas de densidad, humedad, ensayos de tracción y desprendimiento por tensión.



Figura 2.4. Fibras de cabuya sumergidas en tratamiento con bicarbonato de sodio.
Fuente: Elaboración propia.

4. Se deja reposar las fibras en un ambiente controlado y con el envase totalmente cerrado por un tiempo de 4, 7, 14 y 21 días. La cantidad de duración de tratamiento se evaluó considerando otras referencias donde se obtuvo un rango de tiempo en el cual se obtiene los resultados óptimos con el tratamiento [15][49][50].
5. Luego del tratamiento, las fibras serán lavadas en agua destilada hasta remover los residuos de la solución química. Esto se comprueba visualmente cuando el agua esté transparente y cuando se obtenga un resultado de pH neutro medido con el medidor de pH.
6. Las fibras se mantienen en el agua para poder separar cada fibra individualmente. Esto se realiza con pinzas quirúrgicas para no dañar las fibras.
7. Las fibras se secan en una estufa a una temperatura de 60 °C por 24 horas, debido a que a esta temperatura las fibras no se dañan y se garantiza que estén completamente secas [38].

2.5.2. Medición de densidad de las fibras naturales.

La densidad de las fibras de cabuya se obtendrá para cada grupo estudiado con y sin tratamiento para observar si existe una diferencia significativa que pueda afectar a las propiedades mecánicas.

1. Para garantizar un resultado óptimo y exacto se tritura las fibras obtenidas previamente con una velocidad constante. Esto debido a que las fibras deben ser de un tamaño mínimo para utilizar el picnómetro automático *Ultrapyc 1200e* (Figura 2.5)

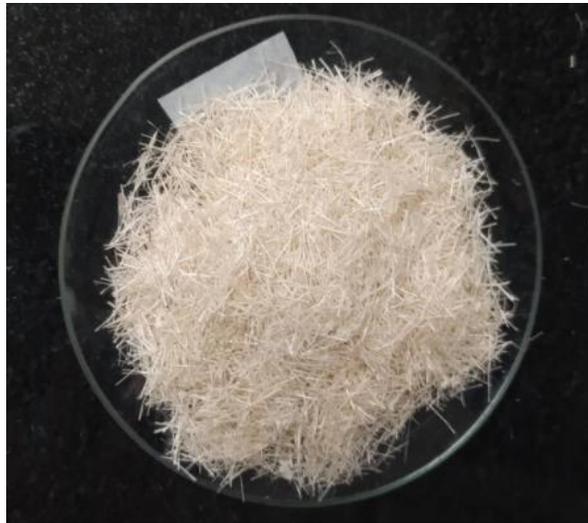


Figura 2.5. Fibras de cabuya con menor longitud.
Fuente: Elaboración propia.

2. Las fibras serán secadas en la estufa a 100°C por 1 hora para que estén completamente secas.
3. Se pesará cada una de las pruebas debido a que este valor se debe introducir en el picnómetro para hallar la densidad.
4. Se repetirá 5 repeticiones por cada grupo para realizar un análisis estadístico con la prueba de Wilcoxon para demostrar si hubo un cambio en las propiedades.

2.5.3. Prueba de absorción de humedad (a condición de humedad equilibrio)

La absorción de humedad es un parámetro importante en las fibras naturales ya que las propiedades mecánicas se ven afectadas directamente, mientras absorba mayor humedad,

el esfuerzo de tracción se reducirá [11]; por ello, se determinará la absorción máxima de humedad de cada grupo de fibra a una humedad relativa de 57-60 % RH debido a que está dentro del rango de humedad ambiente y además que las pruebas de tracción se estudiarán a esta condición.

El procedimiento para realizar la prueba se detalla a continuación:

1. Se obtendrá el peso del vidrio de reloj que se utilizará como recipiente de las fibras en una balanza de precisión.
2. Se colocará 3 g de fibra previamente secadas a 100 °C por 1 hora en la estufa.
3. Las fibras se mantendrán en el ambiente de 50 ± 1.5 %RH y se medirá la masa cada 5 minutos y luego de 24 h debido a que en este tiempo las fibras ya están saturadas.

2.5.4. Prueba de tensión de las fibras y obtención de áreas

Se ensayará las fibras naturales para obtener esfuerzo de falla, la deformación unitaria de falla y el módulo elástico de cada grupo de fibra a estudiar, para lograrlo se seguirá el procedimiento que se detalla a continuación.

El ensayo de tracción de las fibras se desarrollará con la máquina MTS exceed E42 con una celda de carga de 10 N para mayor exactitud en la medición. Por otro lado, se utilizará una tasa de deformación de 0.5 mm/min ya que, a velocidades menores a estas, se reducen las propiedades mecánicas debido a la relajación de la fibra por sus propiedades viscoelásticas [38], sin embargo, a velocidad igual o superior a la elegida no existe un cambio significativo. Otra característica importante es la longitud de la fibra ensayada, la cual para este trabajo será de 10 mm debido a que esto minimiza la aparición de defectos en la fibra y, en consecuencia, evita la obtención de datos y valores errados de las propiedades.

Al tener la longitud de fibra, y tasa de deformación de ensayo, se procede a preparar las probetas. La fibra se colocará en tabs de papel (según norma ASTM C1557-14) que para todas las pruebas deben tener las dimensiones constantes [38]. La adhesión de la fibra al tab se realizará con cinta y resina de base epóxica tal como se muestra en la Figura 2.6, donde se detalla el procedimiento de colocación de materiales en la porta probeta.

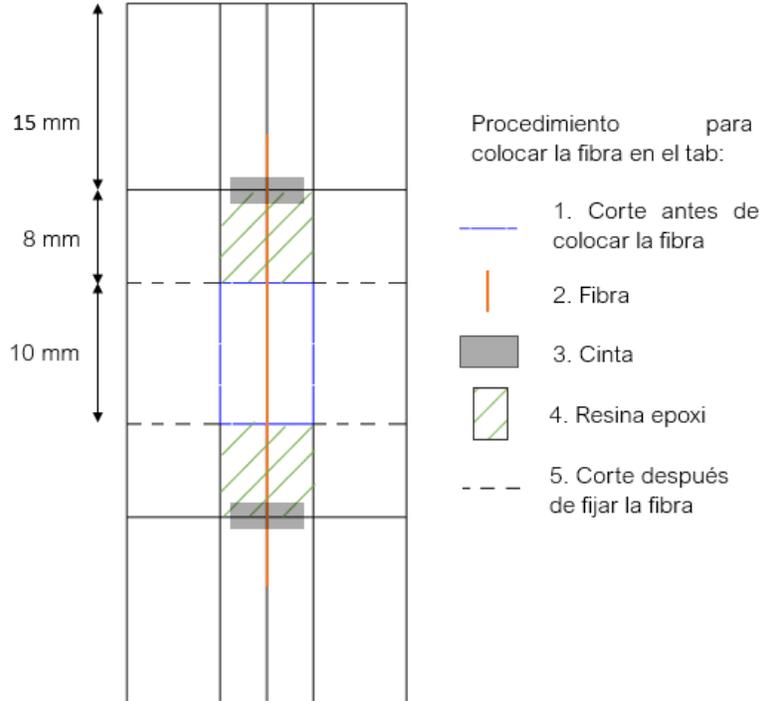


Figura 2.6 Probeta para la prueba de tracción de las fibras naturales.
Fuente: Adaptado de ASTM C1557-14 [32].

Se realizarán los ensayos necesarios para obtener 30 resultados válidos para cada grupo de fibras estudiadas con y sin tratamiento, es decir, la falla se debe realizar en la zona central de la fibra. Cabe recalcar que las fibras a estudiar estarán en un espacio del laboratorio de UTEC donde se puede controlar la temperatura y humedad relativa del ambiente para que estos parámetros se mantengan constantes y no afecten en los resultados.

En base a un estudio anterior [38], se realizará el siguiente procedimiento una vez finalizadas las pruebas de tracción:

1. Se coloca uno de los extremos de la fibra ensayada y se coloca encima de una base de resina sólida con una separación de 5 mm del filo y fijada con cinta aislante y resina poliéster (Figura 2.7). La separación sirve para pulir la zona y observar el plano donde se coloca las fibras y realizar la medición de áreas de manera totalmente perpendicular. Cabe recalcar que la resina sólida tiene una composición de 36 gramos de resina poliéster, 6 gramos de mono estireno, 24

gotas de octato de cobalto (acelerador) y 24 de peróxido de metil etil cetona (catalizador), con dicha proporción, la resina solidifica en 1 hora. Cabe mencionar que las composiciones para preparar la resina se obtuvieron de manera experimental en el laboratorio de tecnología de materiales de UTEC donde se tuvo en cuenta el tiempo de endurecimiento únicamente ya que no se realizará ninguna prueba a la resina en esta etapa.

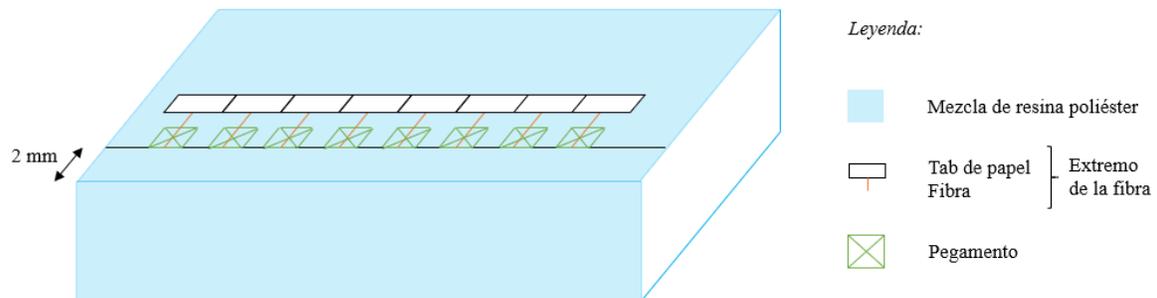


Figura 2.7 Elaboración de probeta para medir el área transversal de la fibra.
Fuente: Elaboración propia.

2. Se coloca la misma resina en fase líquida para que cubra las fibras, sin embargo, contará con una composición diferente para que se observe una diferencia en el color de ambas partes y se pueda diferenciar el plano donde se encuentran las fibras. La composición será de 36 gramos de resina poliéster; 6 gramos de monoestireno; 18 gotas de octato de cobalto, y 18 gotas de peróxido de metil etil cetona. Esta mezcla permitirá que la resina siga siendo transparente y que el proceso de curado alcance las 3 horas.
3. La resina será lijada y pulida 2 mm como máximo para obtener la medida de área transversal más exacta y precisa para obtener la probeta mostrada en Figura 2.8. Finalmente, la fibra se colocará perpendicularmente al lente del microscopio Olympus gx50 para medir su área transversal. Esto se realizará en conjunto con el *software Microscope Image Analysis Software* de *Olympus Stream*.



Figura 2.8. Muestras para la medición de áreas transversales.
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para determinar la verdadera deformación de cada grupo estudiado, esta se re-calculará tras realizar un análisis de la flexibilidad del sistema como dicta la norma ASTM C1557-14 y así, obtener la verdadera curva esfuerzo-deformación de las fibras estudiadas, además, cabe recalcar que el módulo de elasticidad se calculará de la región lineal inicial en el rango de 0.1% a 0.3% tal como se menciona en [51].

2.5.5. Medición de densidad de los polímeros

La medición de densidad de los polímeros, se realizará mediante los lineamientos descritos en la norma D792 (Figura 2.9) [33]. El procedimiento para realizar la prueba se detalla a continuación:

1. Se medirá la muestra en el aire.
2. Se coloca un soporte y un recipiente de inmersión encima de la balanza sin que este último se apoye en la balanza.
3. El soporte que ayuda a sostener la muestra a medir debe apoyarse en la balanza y luego sumergir el espécimen.
4. Se sugiere repetir el procedimiento mínimo cinco especímenes por muestra; sin embargo, se repetirá el procedimiento para todas las probetas ensayadas.

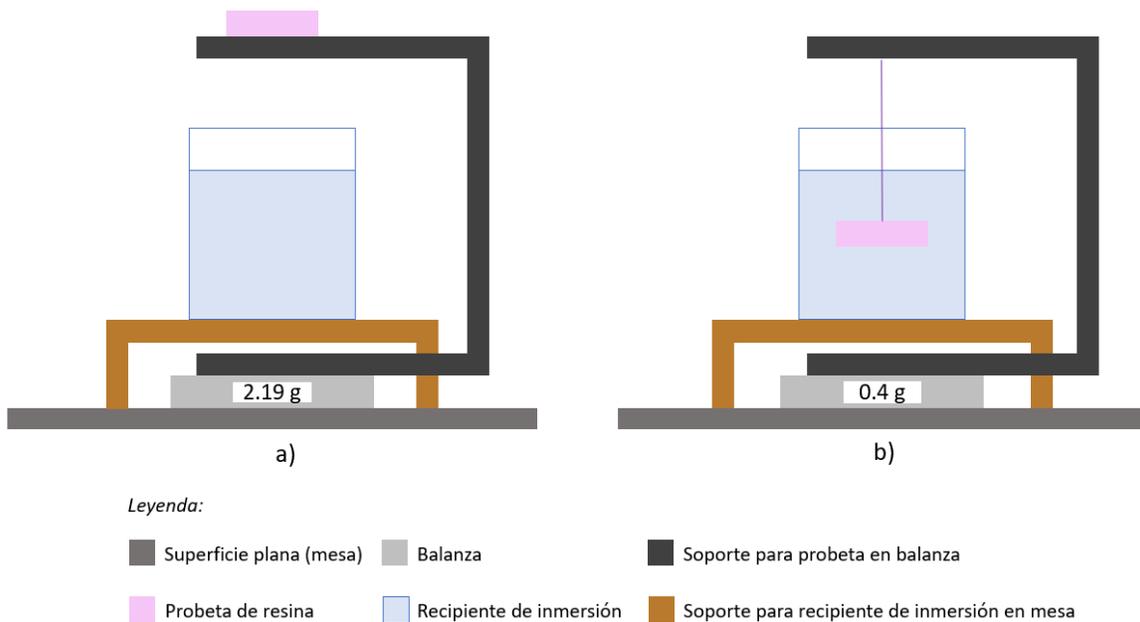


Figura 2.9 Configuración para la medición de densidad de las resinas en las dos posiciones requeridas: a) medición de masa de la probeta en aire y b) medición de masa de la probeta sumergida en agua
Fuente: Elaboración propia

2.5.6. Prueba de flexión de los polímeros

Para la obtención de propiedades mecánicas tanto para la resina poliéster y epóxica, se seguirá el procedimiento descrito en la norma ASTM D790. Primero, las probetas deben tener una razón de longitud de soporte L y espesor de 16:1, por otro lado, el ancho debe ser menor a un cuarto de la longitud entre los soportes, además que la longitud total de la probeta debe ser un 20% más larga de la longitud de soporte. Con ello, se utilizará un espesor de 4 mm, ancho de 13 mm y un largo aproximado de 80 mm tal como se muestra en la Figura 2.10.

La resina poliéster y epóxica se fabrican en un molde rectangular de silicona. Se realiza el lijado y pulido hasta obtener las dimensiones requeridas para las pruebas respectivas (Figura 2.11). Se debe realizar a una tasa de deformación según el cálculo descrito en la norma que depende de las dimensiones y, luego, obtener 5 pruebas exitosas como mínimo para cada caso. [39]

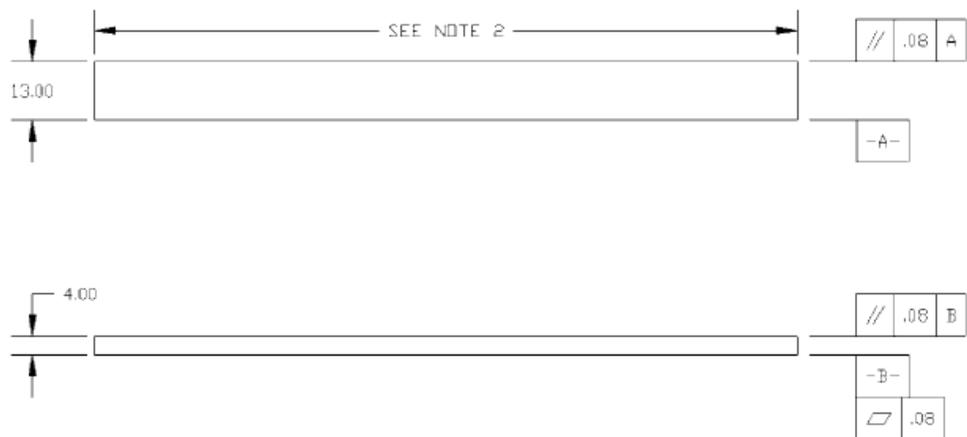


Figura 2.10 Dimensiones estándar para material polimérico.
Fuente: ASTM D790 [39]

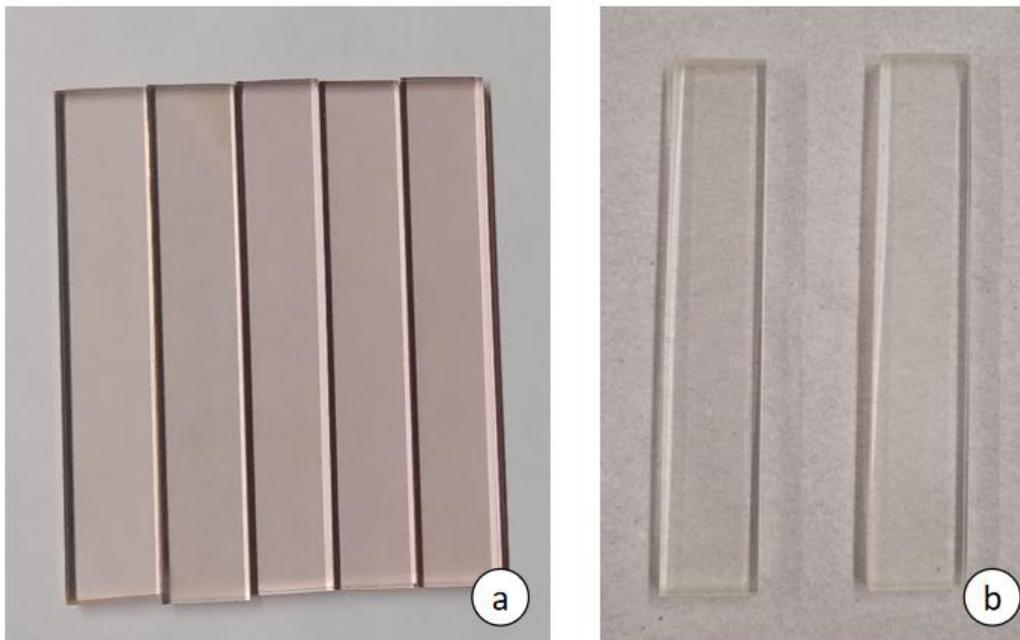


Figura 2.11 Probetas de prueba de flexión para a) resina poliéster y b) resina epóxica
Fuente: Elaboración propia.

Por último, la configuración para el ensayo de flexión se muestra en la Figura 2.12, esta se desarrollará con la máquina MTS exceed E42 con una celda de carga de 10 N para mayor exactitud en la medición.

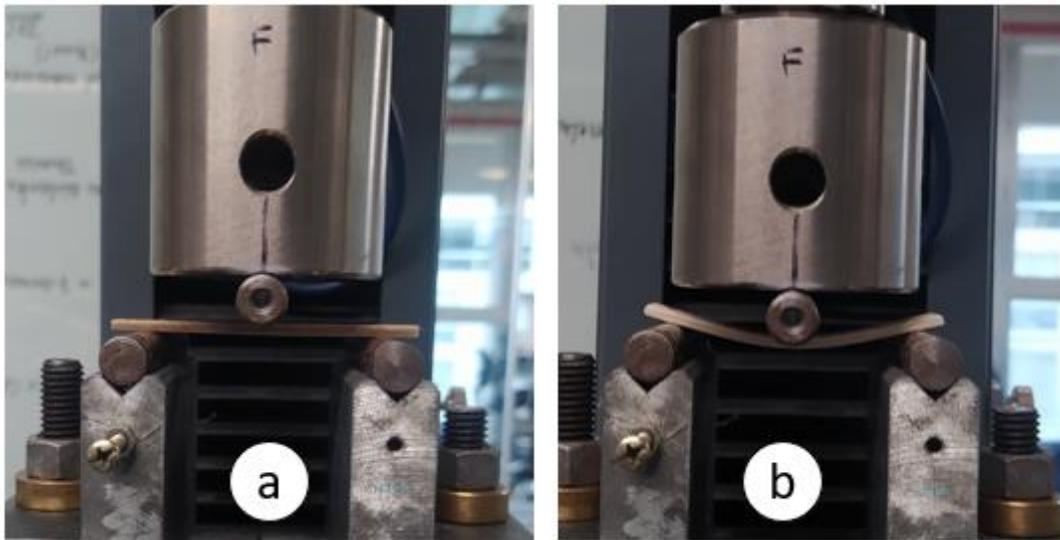


Figura 2.12 Prueba de flexión para a) espécimen antes de la prueba y b) espécimen durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia

2.5.7. Prueba de desprendimiento por tensión (Pull out test)

En esta parte, se describirá el procedimiento para hallar el esfuerzo de desprendimiento de la interfaz fibra/matriz en donde se analizará 3 grupos de fibras con 2 tipos de resina: fibra de cabuya sin tratamiento y los dos grupos de fibras con mayores propiedades mecánicas (esfuerzo de tracción y módulo elástico); con resina poliéster epóxica.

Debido a que esta prueba no se ha realizado anteriormente en el laboratorio. Se prepararán moldes de silicona rectangulares para obtener las probetas. Se utilizará un bisturí quirúrgico que permitan colocar la fibra estirada embebiendo una longitud de 2 mm que atraviese de manera transversal la probeta de resina. Luego de obtener el molde para las probetas y haber definido la longitud embebida, se seguirá el siguiente procedimiento:

1. Se coloca dos soportes a los lados del molde donde se apoyarán las fibras.
2. Se coloca las fibras estiradas en las aberturas del molde sin ejercer fuerza para no dañarlas y apoyando cada extremo en los soportes laterales. Para mantener la fibra recta y estirada, se coloca cinta adhesiva en cada extremo. Estos pasos están ilustrados en la Figura 2.13.

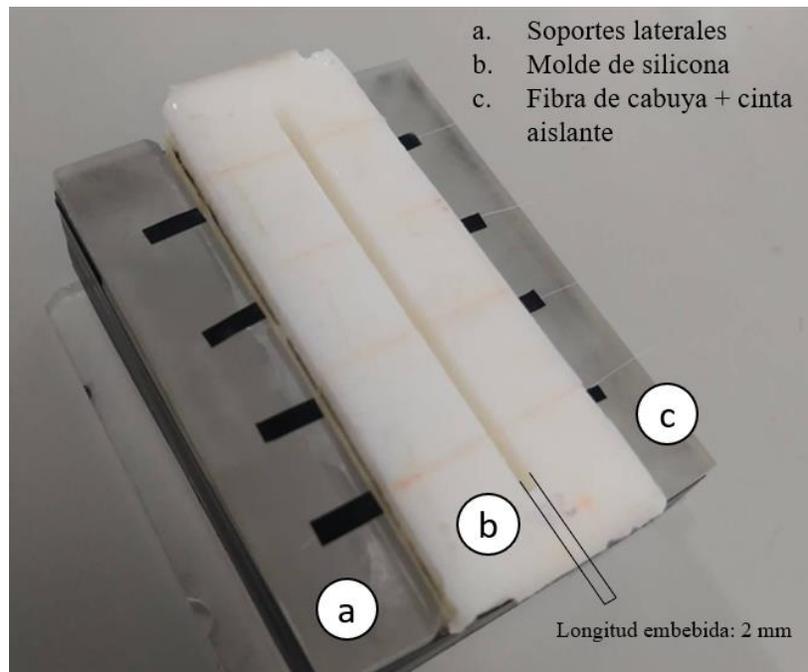


Figura 2.13 Molde para probetas de desprendimiento por tensión: a) soportes laterales, b) Molde de silicona y c) Fibra de cabuya con cinta aislante.
Fuente: Elaboración propia.

3. Se prepara la resina poliéster no saturado y, mientras está en estado líquido, se coloca de manera continua dentro del molde de silicona, este proceso se realizará por medio de una jeringa de 5 ml para que la resina se inserte adecuadamente dentro del molde y no rebalse.
4. Se procede al proceso de curado y post curado de la matriz a temperatura ambiente por 24 horas.
5. Se extrae la probeta del molde sin dañar las fibras.
6. En uno de los extremos se coloca un extremo del tab de papel [52] previamente diseñado. Luego de ello, se coloca resina poliéster y cinta en el tab para asegurar la adhesividad y sujeción de la fibra tal como se muestra en la Figura 2.14

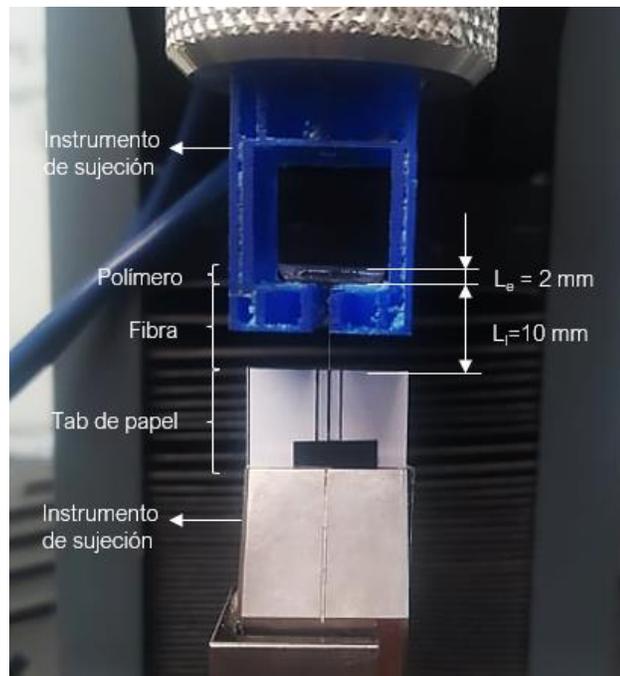


Figura 2.14 Probeta para el ensayo de desprendimiento por tensión.
Fuente: Elaboración propia.

La prueba se realiza con la máquina MTS exceed E42 a una tasa de deformación de 1 mm/min [53] y se realizarán las pruebas necesarias para obtener al menos 10 ensayos aceptables para cada grupo estudiado, es decir, que la fibra sea retirada de la matriz sin sufrir una rotura de por medio.

2.5.8. Análisis numérico del método de *pull out* mediante el software *Abaqus CAE*

Para el modelamiento numérico, se elegirá un caso específico de todos los grupos evaluados en la prueba experimental, por lo que se realizará 6 estudios en total. Las propiedades físicas mecánicas de la fibra y matriz, las propiedades cohesivas de la interfaz requeridas para el modelo, se obtendrán de las pruebas experimentales previamente realizadas.

Debido al costo computacional, el modelo numérico se representará de manera axisimétrica, es decir, la geometría será simétrica alrededor de un eje (Figura 2.15), lo que significa que se considerará que la fibra tiene un área circular perfecta.

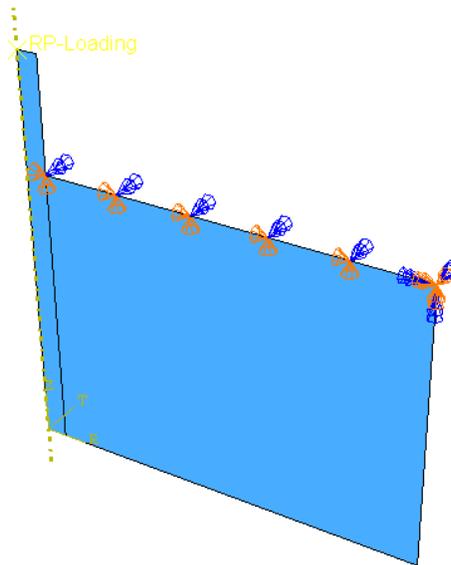


Figura 2.15 Vista isométrica de modelo numérico con punto de carga y restricciones definidas.
Fuente: Elaboración propia.

Además, se debe realizar una calibración del modelo numérico para obtener el resultado más semejante al hallado experimentalmente, lo cual depende principalmente de la densidad de mallado, tipo de elemento (detallado anteriormente) y la precisión/exactitud del resultado.

Los principales puntos para que la configuración del software represente el comportamiento de *pull out* se describen en los siguientes párrafos.

En las propiedades de interacción de contacto, se debe detallar el comportamiento cohesivo y el daño. En el primero, se debe colocar la rigidez de contacto cohesivo, el cual corresponde a la pendiente de la curva fuerza-desplazamiento. En el segundo mencionado, se coloca como inicio del comportamiento el esfuerzo cortante interfacial (IFSS) como esfuerzo nominal máximo; y como evolución del daño determinado por el desplazamiento total y el parámetro exponencial que lo caracteriza. Cabe recalcar que se deberá realizar un ajuste al valor de la rigidez de contacto cohesivo y parámetro exponencial en caso no se obtenga un resultado similar al experimental.

Con respecto al enmallado (Figura 2.16), tanto para la fibra como para la matriz, el tipo de elemento seleccionado será el cuádruple dominado (*quad-dominated*), específicamente el CAX4R, el cual utiliza elementos cuádruples (4 nodos) en general, pero triangulares (3 nodos) en zonas de transición, es decir, cuando un lado toca el eje de revolución en algún punto. Además de ello, se considera integración reducida, lo que significa que cuenta solo un punto de integración situado en el centroide del elemento, esto es sugerido cuando se realiza una deformación unitaria uniforme ya que se calcula valores promedio para cada elemento [54] [55]. Por último, para determinar la densidad de la malla correcta, nos basamos en que los valores del esfuerzo interfacial sean menores a un 5%; por lo que, en la fibra y la zona de la matriz cerca a esta, se colocará un tamaño de elemento de 0.005 mm.

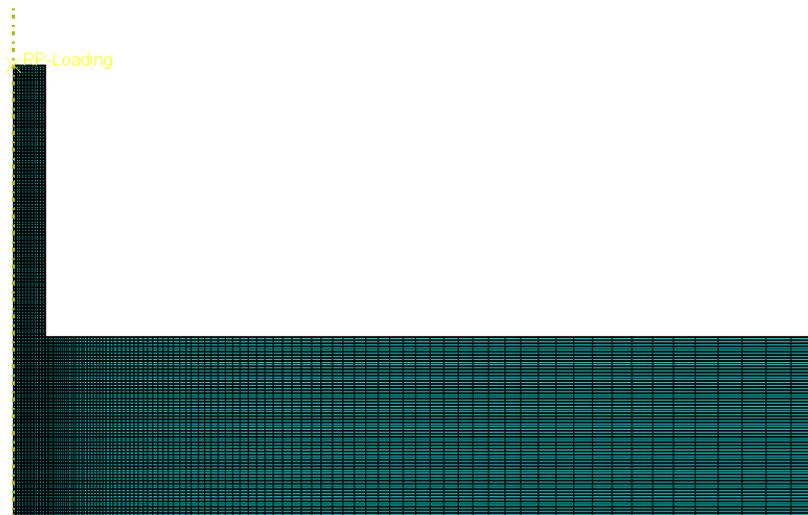


Figura 2.16 Vista de la superficie del modelo numérico
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1. Área transversal y diámetro de la fibra de cabuya

Se realizó micrografías a un conjunto de fibras embebidas en resina para observar la variabilidad en el área de sección transversal de los grupos de fibra tratada y sin tratar. En la Figura 3.1 se puede observar que las secciones transversales tienen formas irregulares y existe variación de tamaño; además de ello, cuentan con lúmenes internos, espacios vacíos internos, los cuales pueden contribuir a la baja densidad, pero no a las propiedades mecánicas. Debido a la existencia de lúmenes, el cálculo de las propiedades mecánicas debe realizarse con las áreas efectivas y no con las aparentes (considerando el lumen como sólido, en vez de hueco) debido que darán resultados erróneos; sin embargo, esta última ayuda a calcular el diámetro equivalente de las fibras.

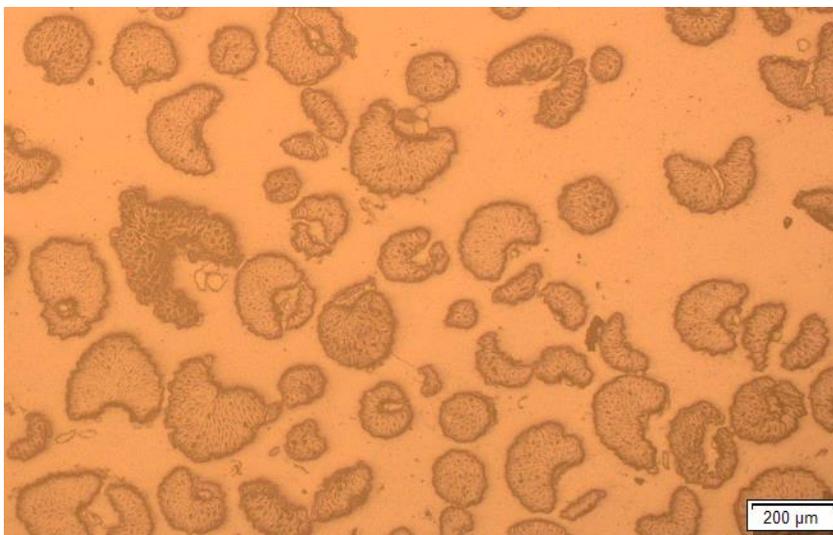


Figura 3.1 Micrografía de área de sección transversal de las fibras de cabuya.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.2, se muestra una comparación de la distribución de datos del diámetro equivalente calculado para las fibras, donde se observó que el valor disminuye con el tratamiento de 4 y 7 días de duración, esto puede ser debido a la remoción de pared celular

superficial e impurezas presentes [6]. Luego de ello, en el tratamiento de 14 días aumenta ligeramente, esto puede ser causa de la separación parcial de las fibrillas debido a la eliminación de su matriz de unión, las cuales suelen ser de hemicelulosa y lignina tal como se ha observado con otros tratamientos alcalinos [6]. Cabe recalcar que se comprobó que hay una diferencia significativa entre los valores hallados entre los diámetros equivalentes de las fibras sin tratar y tratadas a los 7 días con la prueba de Wilcoxon donde la máxima disminución del diámetro equivalente fue de 13.67% con respecto al grupo de fibras sin tratar.

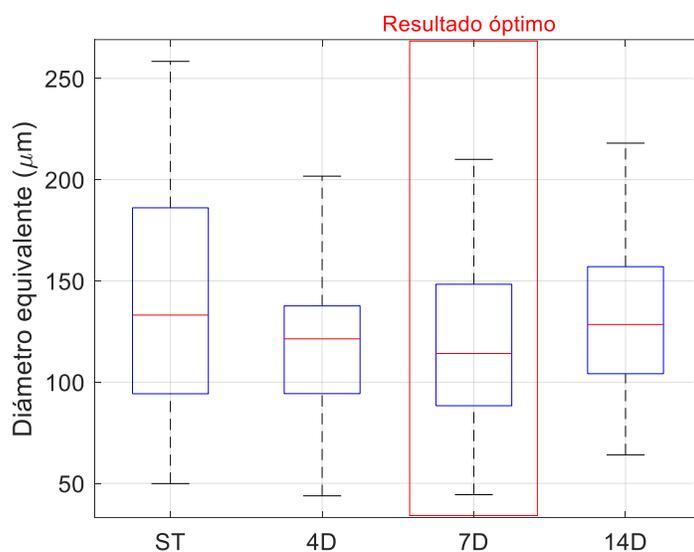


Figura 3.2. Distribución puntual de los diámetros equivalentes de las fibras de cabuya.
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la Figura 3.3 se muestra la disminución del porcentaje del área del lumen en los 3 grupos de fibras tratadas. Esto demuestra el efecto de contracción en este mismo realizado por el tratamiento, lo que resulta beneficioso debido ya que no aporta a las propiedades mecánicas, además de ganar estabilidad dimensional. De igual modo se realizó la prueba de Wilcoxon, donde se demostró una variación significativa entre los grupos de fibras sin tratamiento con las fibras tratadas a los 7 y 14 días, donde la mayor disminución fue de 6% con respecto al grupo sin tratar.

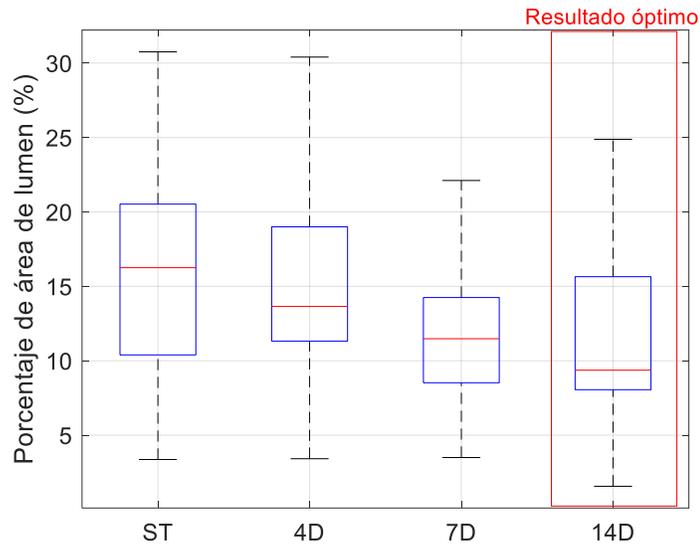


Figura 3.3 Porcentaje de área de lumen presente en cada grupo de fibra estudiada.
Fuente: Elaboración propia

Por último, se calculó el área efectiva de las fibras que dependen de las dos características anteriormente halladas debido a que es la parte sólida de la fibra. La distribución de los datos obtenidos y la mediana se puede observar en la Figura 3.4 y la prueba de Wilcoxon demostró una diferencia significativa entre el grupo de fibras sin tratar y 7 días de tratamiento, donde se obtuvo un aumento del 40%.

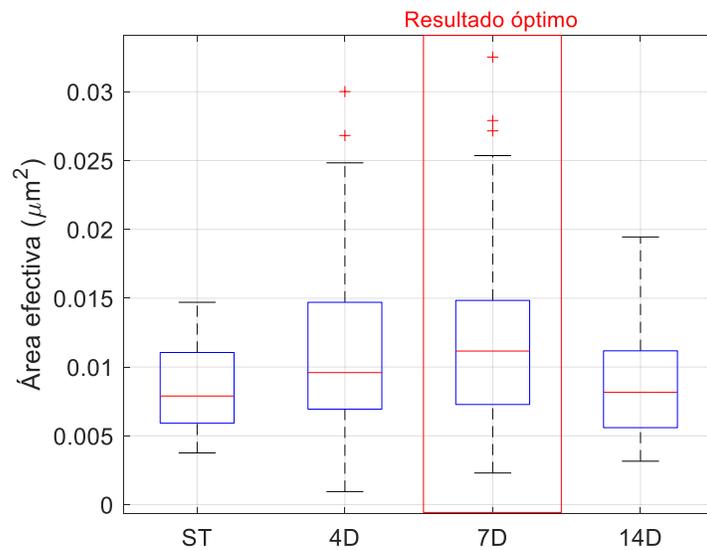


Figura 3.4 Área efectiva de cada grupo de fibra estudiada.
Fuente: Elaboración propia

3.2. Densidad de la fibra de cabuya

Las densidades de los grupos de fibras de cabuya estudiadas se muestran en la Figura 3.5, donde se observa un incremento de la propiedad en las fibras tratadas, con un aumento máximo de 4.6% en el grupo tratadas por 4 días.

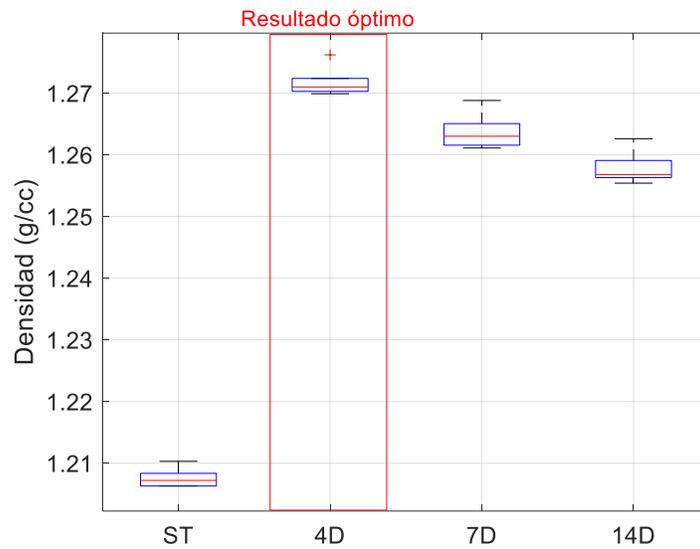


Figura 3.5 Variación de densidad de cada grupo de fibra estudiada.
Fuente: Elaboración propia

Se realizó la prueba de Wilcoxon para muestras independientes el cual demostró un cambio significativo entre todas las muestras de fibras sin tratar y tratadas. El aumento de esta propiedad puede ser debido a la separación de componentes solubles y no celulósicos de la fibra tales como la lignina que presenta una menor densidad con respecto a la celulosa [6]. Esto se observa también debido a que la lignina es responsable del color de las fibras y luego del lavado se observa que la solución transparente se tiñe de marrón; sin embargo, también pudo ser acciones de las ceras superficiales. Otro punto que contribuye a este aumento es la disminución de área de lumen, pared celular y otros extractivos tal como se mencionó anteriormente en el punto 3.1.

Por otro lado, la disminución de la densidad de las fibras tratadas a 7 y 14 días se debe a la degradación de la fibra, el aumento en la relación de celulosa amorfa con respecto a la celulosa cristalina ya que la primera tiene una menor densidad con respecto a la segunda [56].

Esta degradación puede afectar directamente a los resultados de propiedades mecánicas tales como el esfuerzo de tracción y módulo elástico.

3.3. Absorción de humedad de la fibra de cabuya

Se halló la curva de absorción de humedad a través del tiempo de cada grupo de fibra estudiada. Tal como se muestra en la Figura 3.6, se halla una absorción de humedad similar en los grupos de fibra sin tratamiento, tratadas por 4 y 14 días, donde se obtuvo una absorción de humedad máxima similar, con un valor de $10.08\% \pm 0.04$. Sin embargo, en el tratamiento de 14 días esta propiedad disminuyó hasta 9.25% . Este comportamiento está directamente relacionado con el área de lumen debido a que es la parte que absorbe mayor humedad por ser un hueco vacío, por lo que tienen la misma tendencia. Además de ello, de la influencia del tratamiento de aumentar relativamente la celulosa y en consecuencia disminuir la hemicelulosa y lignina, ambas hidrofílicas [6].

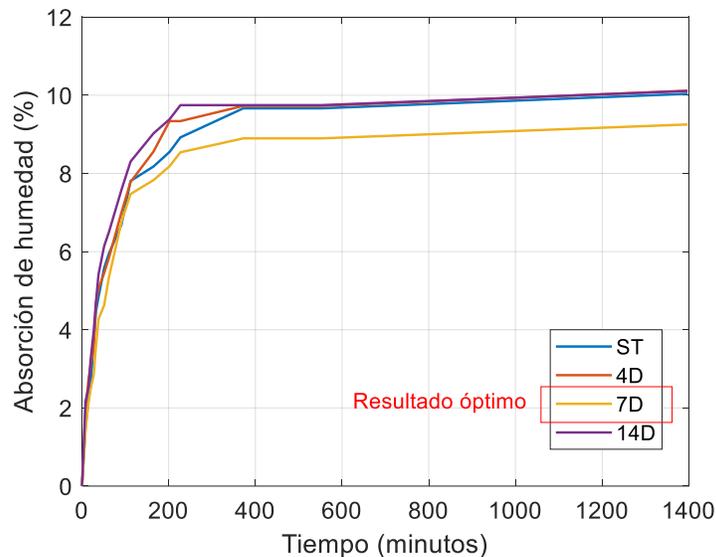


Figura 3.6 Variación de absorción de humedad de cada grupo de fibra estudiada.
Fuente: Elaboración propia

3.4. Análisis de flexibilidad del sistema (MTS Exceed y tabs)

Se realizó el análisis de flexibilidad para los grupos de fibra sin tratamiento y con 4,7 y 14 días de tratamiento tal como se muestra en la Figura 3.7 a). Se puede observar que la correlación de ajuste lineal es similar en todos los casos estudiados y el valor de R^2 es mayor al 85%.

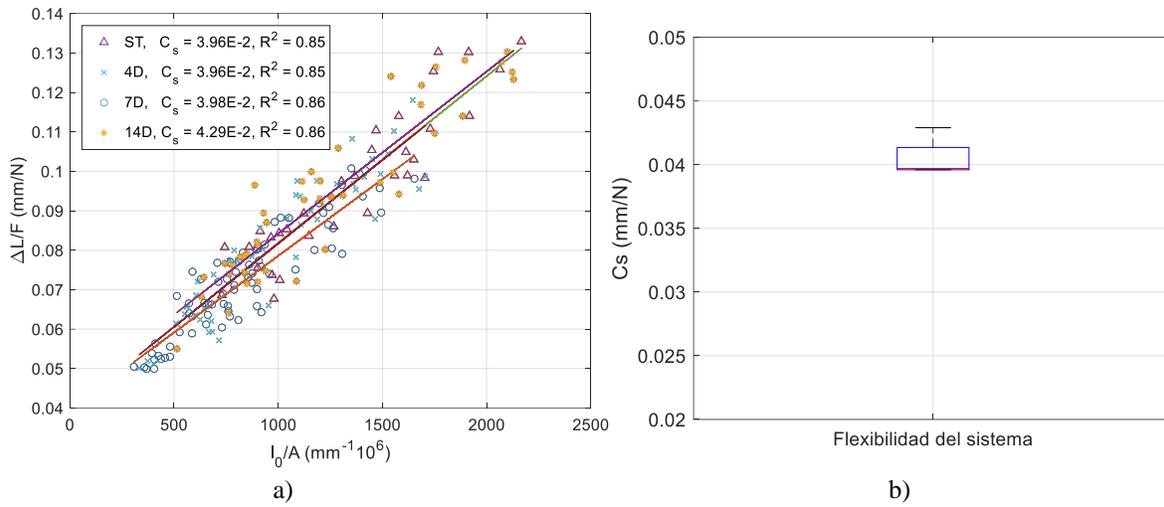


Figura 3.7 Determinación de flexibilidad del sistema a) Análisis de flexibilidad b) Flexibilidad del sistema
Fuente: Elaboración propia

En el caso de los valores de flexibilidad también se observa poca variabilidad tal como se muestra en la Figura 3.7 b), lo que confirma la correcta realización de las pruebas, es decir que se hicieron de forma igual para que los resultados no sean influidos por otros factores tales como el tipo y tamaño del papel utilizado para el tab de la fibra, el pegamento y cinta, entre otros.

3.5. Curva esfuerzo-deformación de la fibra de cabuya

En la Figura 3.8 se muestran las curvas típicas de esfuerzo-deformación unitaria de cada uno de los grupos estudiados. En el primer tramo, se observa una región lineal, rango donde se obtiene el módulo inicial; luego de ello, se observa una curvatura dada por el colapso de la pared primaria de la fibra y desunión de los componentes celulósicos y no

celulósicos debido a imperfecciones presentes; y, por último, ocurre una ruptura súbita al llegar a su máximo esfuerzo, lo cual indica una falla de tipo frágil.

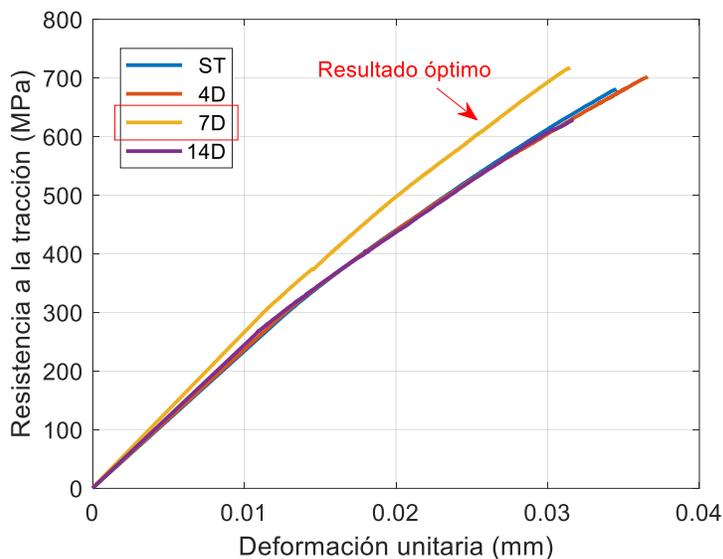


Figura 3.8 Curva esfuerzo-deformación unitaria
Fuente: Elaboración propia

3.6. Propiedades mecánicas de las fibras

En la Figura 3.9 se puede observar la variación de los valores de las propiedades de resistencia a la tracción, módulo inicial y deformación unitaria de cada grupo estudiado donde se encontró una diferencia significativa en el módulo inicial y deformación unitaria de las fibras sin tratamiento y las fibras tratadas por 7 días con la prueba de Wilcoxon.

El aumento de la rigidez o módulo era esperado debido al aumento relativo de celulosa (densidad). Luego, en el tratamiento de 14 días, se observa una disminución, esto puede deberse a la degradación de la fibra debido al tiempo de exposición al tratamiento, además de pérdida de pectina.

Otro cambio demostrado con la prueba de Wilcoxon se encuentra en la deformación unitaria de las fibras sin tratar y con tratamiento de 14 días. Esto se debe a la disminución de la hemicelulosa durante el procesamiento ya que, como se ha mencionado anteriormente, es

uno de los componentes que unen las microfibrillas y permite a que se deforme más debido al soporte que brinda [57].

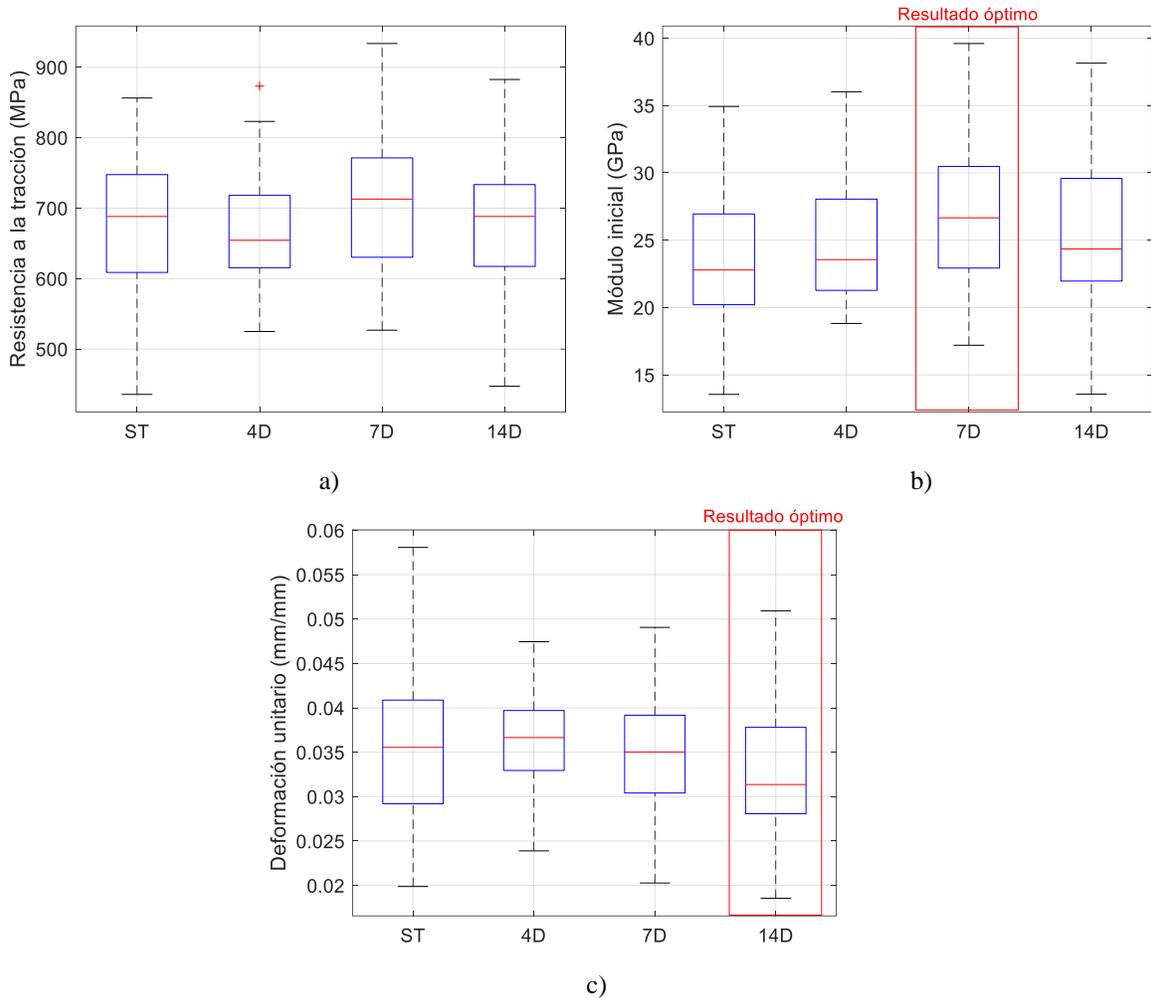


Figura 3.9. Propiedades mecánicas de los grupos de fibra estudiadas donde a) resistencia a la tracción, b) módulo elástico inicial y c) deformación unitaria.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12, se muestra el ajuste lineal de la distribución de Weibull, donde en todos los casos se calculó un alto valor de R2 (>80%) lo que demuestra el adecuado uso de dicha distribución; del mismo modo, se observa los parámetros de módulo de Weibull y las propiedades característica σ_0 , E_0 , y ϵ_0 , sea el caso, de resistencia a la tracción, módulo de Young y deformación unitaria, respectivamente, donde los mayores efectos del tratamiento fueron de un aumento de 25.35 MPa o 3.53% en la

resistencia, 3.31 GPa o 13% en módulo y una disminución de la deformación en un 0.0035 mm/mm u 8.9% con respecto al grupo de fibras sin tratar.

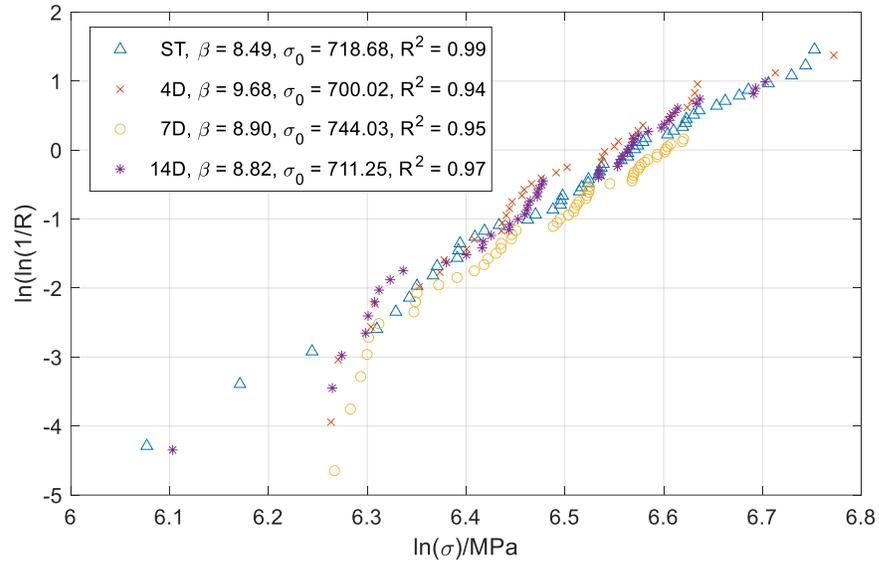


Figura 3.10 Diagrama de Weibull de la resistencia a la tracción de las fibras estudiadas
Fuente: Elaboración propia

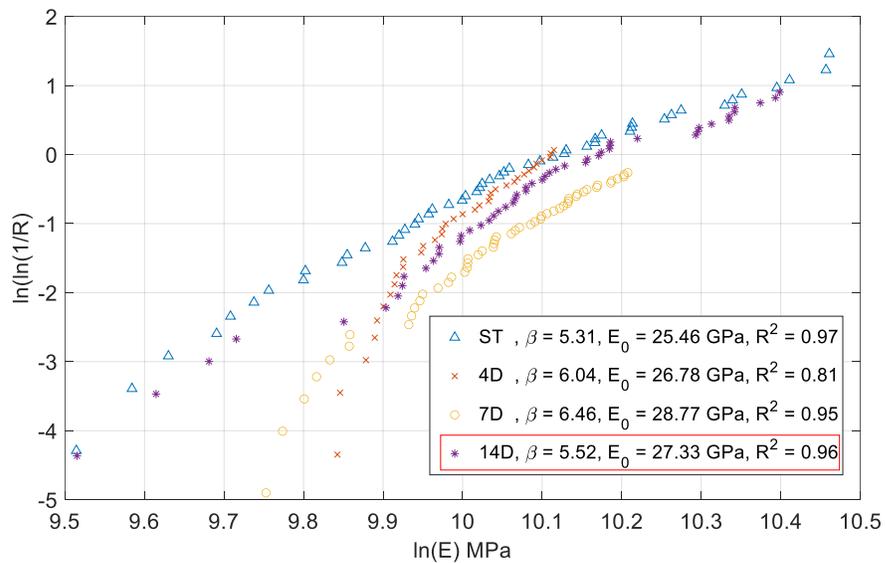


Figura 3.11 Diagrama de Weibull del módulo elástico inicial de las fibras estudiadas
Fuente: Elaboración propia

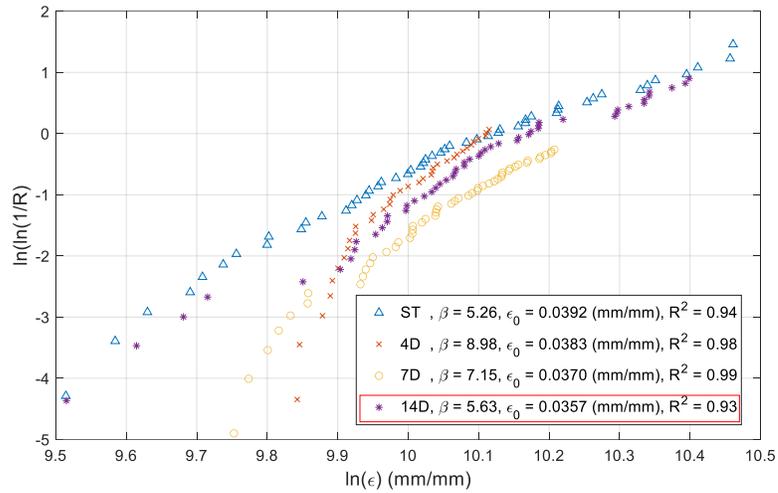


Figura 3.12 Diagrama de Weibull de la deformación unitaria de las fibras estudiadas
Fuente: Elaboración propia

3.7. Propiedades físicas y mecánicas de las matrices

Se obtuvo la densidad tanto para la resina poliéster y epóxica tal como se muestra en la Figura 3.13. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango normal según la bibliografía. Y de acuerdo a la prueba de Wilcoxon, no hay cambio significativo entre ambas.

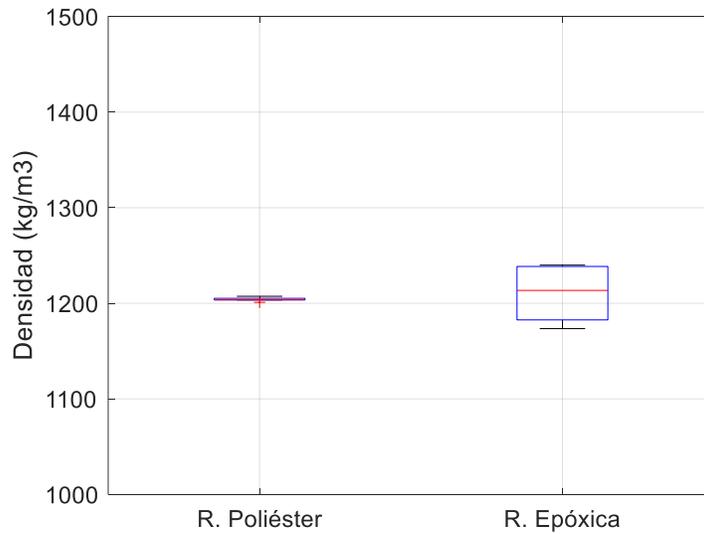


Figura 3.13 Densidades de resina poliéster y epóxica
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las propiedades mecánicas (Figura 3.14), según el análisis de Wilcoxon, no se obtuvo un cambio significativo en la resistencia de flexión. Por el contrario, se obtuvo una diferencia de 27.35% en el módulo elástico y de 92% en la deformación unitaria de la resina epóxica con respecto a la resina poliéster. Esto es debido a su naturaleza dúctil. En ambos casos se realizó un curado a una temperatura de 24°C y post curado a una temperatura de 60° por 24 horas cada uno.

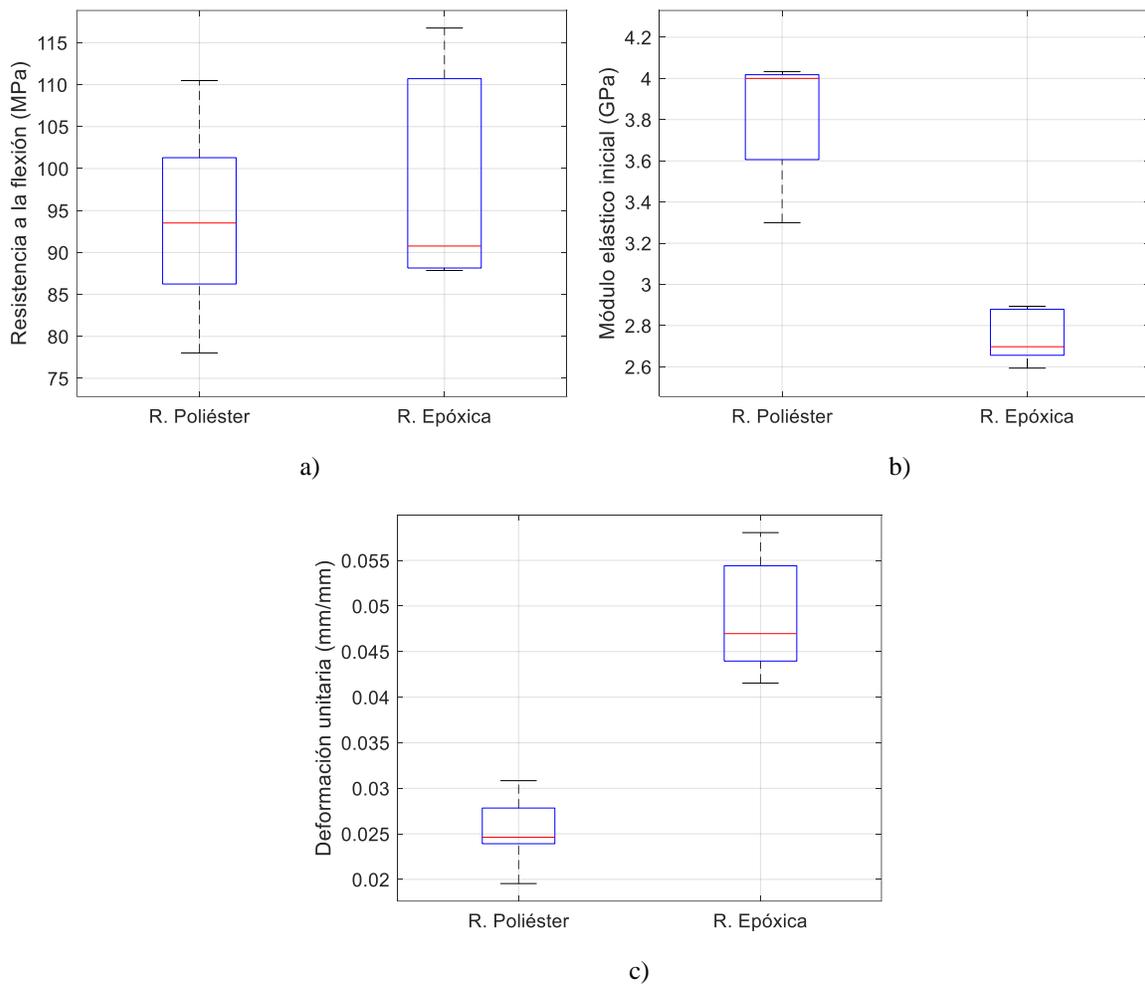
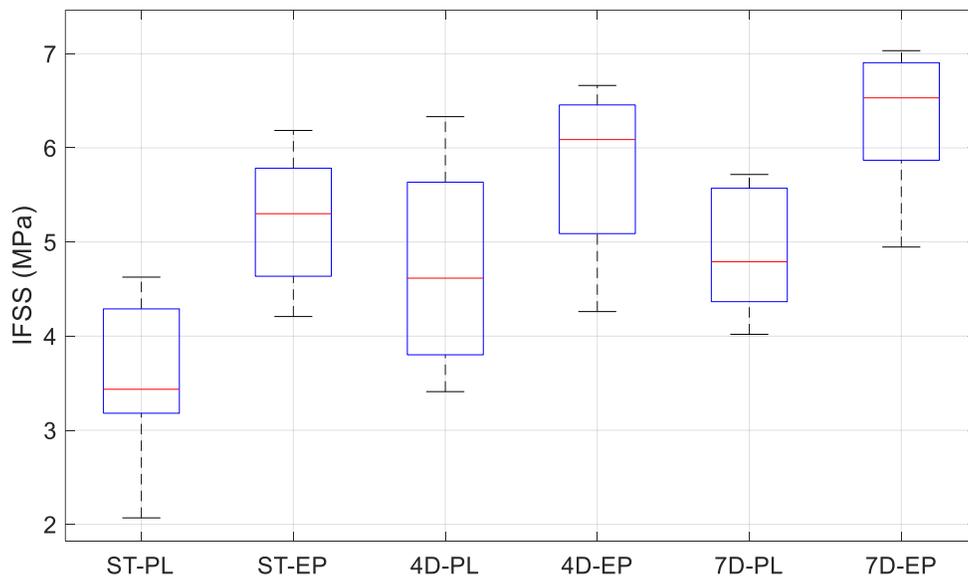


Figura 3.14 Propiedades mecánicas de las resinas estudiadas donde a) resistencia a la tracción, b) módulo elástico inicial y c) deformación unitaria.

Fuente: Elaboración propia

3.8. Propiedades mecánicas de compatibilidad fibra matriz: Análisis experimental

Según la prueba de Kruskal-Wallis y Wilcoxon, en el caso de la resina poliéster se obtuvo un aumento en los resultados de IFSS⁵ (Figura 3.15) en las fibras tratadas por 4 y 7 días en comparación a las fibras no tratadas (33.72% y 36.13%, respectivamente); sin embargo, entre ellas no hubo un cambio significativo. En el caso de la resina epóxica, se obtuvo un aumento de 20.37% entre las fibras sin tratar y las fibras tratadas por 7 días; y realizando una comparación entre ambas resinas, se obtuvo un aumento de 46.19% entre las fibras no tratadas y de 29.26% entre las tratadas por 7 días.



Donde:

- ST-PL = Fibra sin tratamiento embebida en resina poliéster
- ST-EP = Fibra sin tratamiento embebida en resina epóxica
- 4D-PL = Fibra tratada por 4 días embebida en resina poliéster
- 4D-EP = Fibra tratada por 4 días embebida en resina epóxica
- 7D-PL = Fibra tratada por 7 días embebida en resina poliéster
- 7D-EP = Fibra tratada por 7 días embebida en resina epóxica

Figura 3.15 Distribución de los valores de IFSS
Fuente: Elaboración propia

⁵ Esfuerzo cortante interfacial

Como se pudo ver en los resultados, se observa una menor fuerza de unión en las fibras no tratadas, ello debido a la superficie más lisa y la presencia de impurezas superficiales; además de ello también debido a la incompatibilidad entre la naturaleza hidrofílica de las fibras con ambas resinas ya que son hidrofóbicas [58]; sin embargo, entre ambas, la resina epóxica tiene una mayor resistencia a la adherencia, lo que justifica un mayor resultado en estos grupos. La mejora en la compatibilidad también se debe al aumento de área superficial de contacto como resultado del aumento de la rugosidad en la superficie por la exposición de las fibrillas individuales al disminuir las paredes celulares, es decir, eliminación de impurezas y también, la disminución de componentes no celulósicos. [6]. Así mismo, no se obtuvo un cambio considerable entre las fibras tratadas por 4 y 7 días debido a que sus propiedades físicas y mecánicas han resultado sin variaciones significativas.

Con respecto al módulo inicial de la curva esfuerzo interfacial – deformación (Figura 3.16), se comprobó un aumento en las fibras tratadas por 4 días y 7 días comparadas a las no tratadas tanto en el caso de la resina poliéster (34.75% y 55.52%, respectivamente) y epóxica (26.40% y 41.13%, respectivamente). Sin embargo, comparando los mismos tratamientos entre ambas resinas, no se encontró un cambio significativo. El módulo inicial se debe a la longitud libre de la fibra antes del inicio de la separación de la interfaz, por lo que podemos decir que depende de las propiedades de las fibras y no de la resina, eso explica porque no hay cambios significativos al utilizar diferentes matrices [59].

En cuanto a la deformación unitaria (Figura 3.17), no se encontró cambio con respecto a los grupos con las mismas matrices, debido a lo mencionado anteriormente, es decir, que depende del comportamiento de la fibra en sí. Comparando los mismos tratamientos entre ambas resinas, se encontró un aumento de 33.60%, 19.61% y 36.08% para los grupos sin tratamiento, tratados por 4 días y por 7 días, respectivamente. El aumento en el módulo elástico en los grupos con resina epóxica se debe a la mayor ductilidad de la matriz.

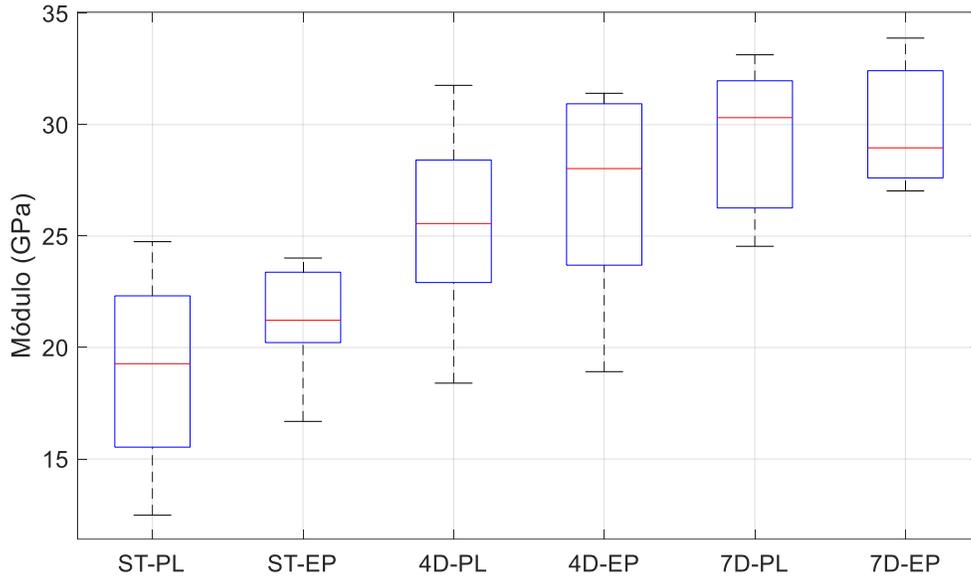


Figura 3.16 Distribución de los valores de módulo elástico
Fuente: Elaboración propia

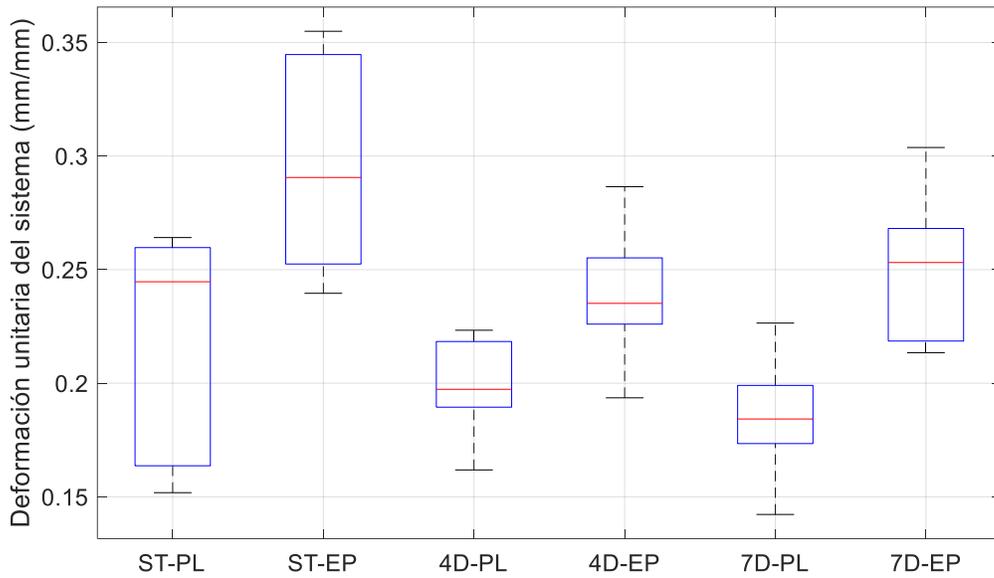


Figura 3.17 Distribución de los valores de deformación unitaria
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.18, se muestra la curva típica del esfuerzo cortante interfacial (IFSS) y la deformación unitaria del sistema para la resina poliéster y resina epóxica. Como primera

región, se puede observar un incremento lineal hasta alcanzar la resistencia cortante máxima lo que indica que la fibra está totalmente desunida. Mientras la resistencia va aumentando, también lo hace la deformación unitaria, esto se puede interpretar como un aumento del comportamiento dúctil. La fisura ha iniciado, sin embargo, la fuerza de adherencia mayor evita la evolución de la grieta y la separación de la fibra.

Una segunda región muestra una caída drástica, lo que indica una liberación de energía almacenada y, por consiguiente, la formación de grietas. Se observa una caída más pronunciada en el caso de la resina epóxica lo que indica una mayor energía almacenada antes de la separación total fibra/matriz debido a la calidad de la fuerza de unión.

Por último, en una tercera región, se observa una disminución del esfuerzo que se lleva de manera exponencial, ello debido la fibra se desliza disminuyendo el área de contacto entre fibra y matriz y es extraída progresivamente a una velocidad constante hasta ser extraída completamente por lo que la carga final es de cero. Esta última región indica un cambio del movimiento de estático a cinético [60], por lo que se considera como un tipo de falla friccional. Cabe recalcar que este comportamiento es normal cuando la dureza de la fibra es mayor a la matriz [61] [62].

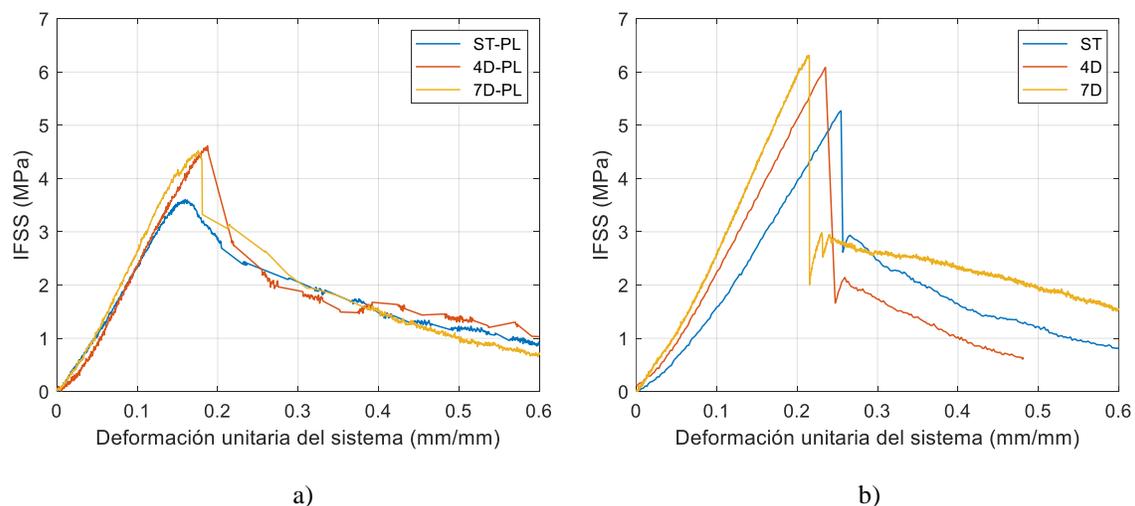


Figura 3.18 Curva esfuerzo deformación de la prueba interfacial con a) resina poliéster y b) resina epóxica
 Fuente: Elaboración propia

3.9. Propiedades mecánicas de compatibilidad fibra/matriz: Análisis numérico

Antes de realizar el modelamiento numérico, se halló el valor de rigidez de contacto cohesivo y el parámetro exponencial del daño. Para las pruebas de *pull out* con resina poliéster, se utilizó los valores hallados experimentalmente; por el contrario, para las pruebas con resina epóxica, se realizó una corrección debido a que la zona de caída drástica de la fuerza afecta al resultado.

Con ello, se halló una relación proporcional considerando la magnitud resultante entre la fuerza máxima menos la fuerza final tras la caída abrupta. En la Figura 3.19, se muestra la relación porcentual entre la magnitud de caída de la fuerza y la corrección porcentual del parámetro exponencial y rigidez de contacto cohesivo, donde se observó un coeficiente de determinación mayor a 90% en ambos casos.

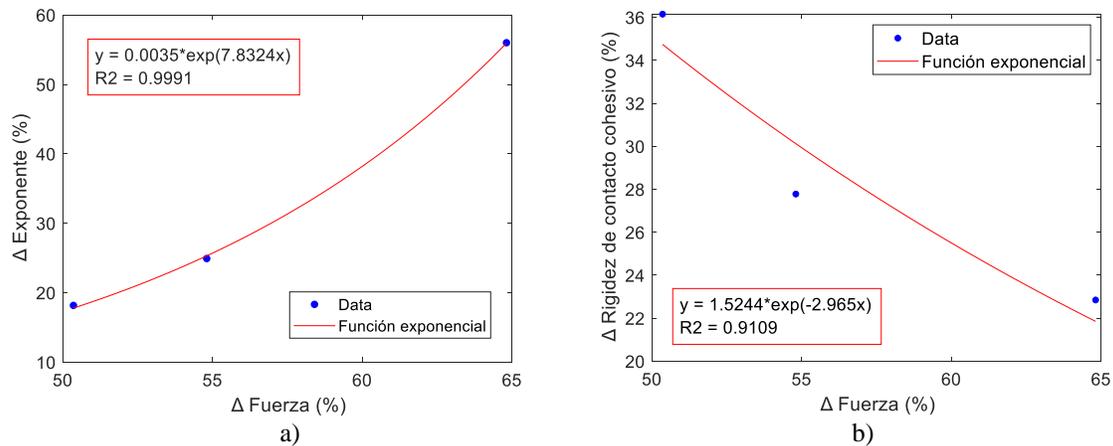


Figura 3.19 Relación de la caída de fuerza con respecto a la corrección de a) parámetro exponencial y b) parámetro de rigidez de contacto cohesivo.

Fuente: Elaboración propia

Con los parámetros corregidos, se realizó el modelamiento numérico de la curva esfuerzo-deformación unitaria para cada caso estudiado y se comparó con el resultado experimental correspondiente tal como se muestra en la Figura 3.20. Se puede observar que el resultado numérico se ajusta al resultado experimental en la etapa ascendente de la fuerza. Luego, se observa que mientras más marcada es la caída de la fuerza, mayor es la diferencia obtenida en la etapa de deslizamiento de la fibra; esto se debe a disminuye la similitud con la función exponencial se a este comportamiento.

Comparando los resultados tanto del IFSS, módulo de Young y deformación unitaria, la diferencia se encuentra dentro de 5%, por lo que se puede decir que el modelo numérico es válido.

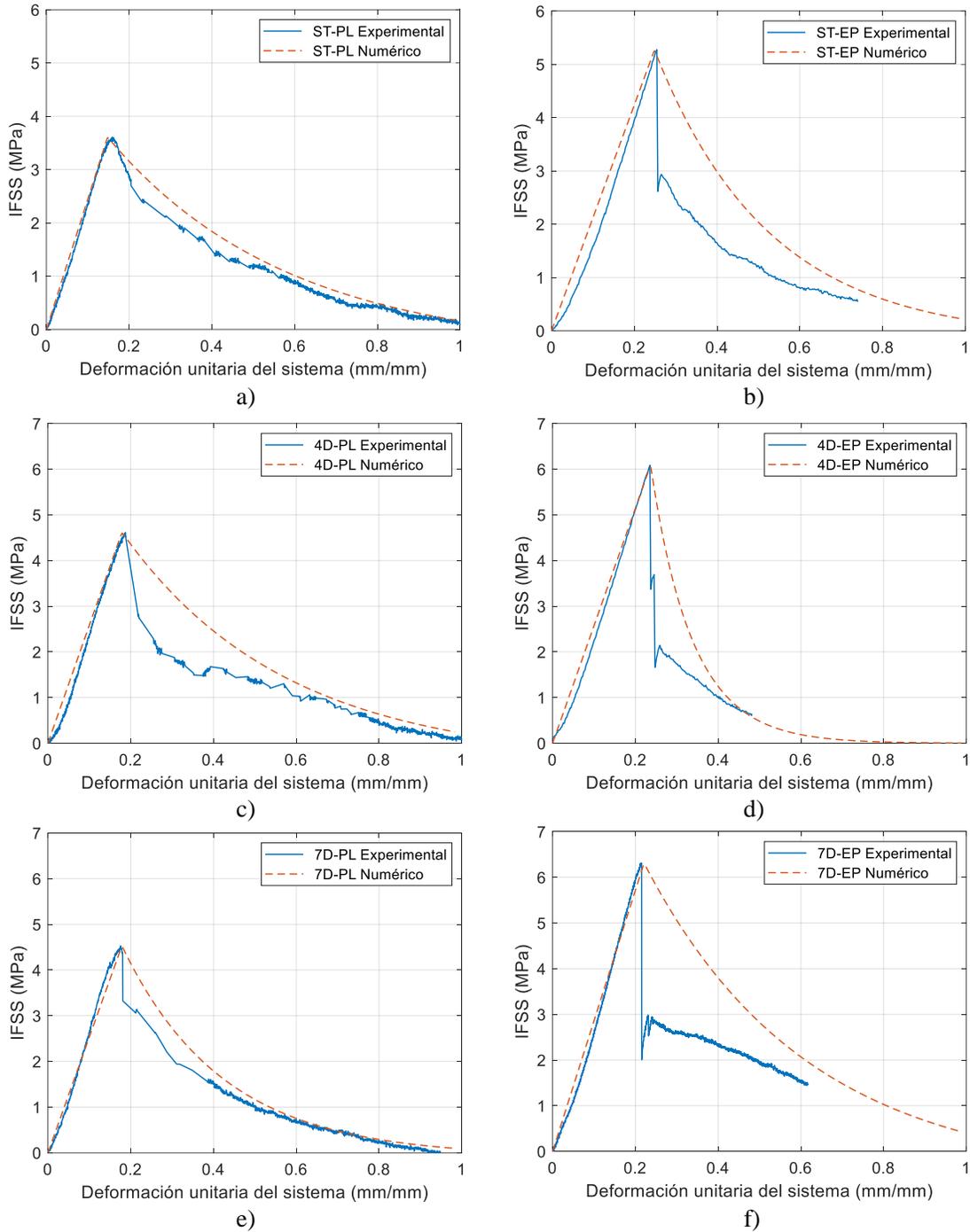


Figura 3.20 Comparación de diagrama IFSS vs deformación unitaria de los resultados experimentales y numéricos para a) ST-PL, b) ST-EP, c) 4D-PL, d) 4D-EP, e) 7D-PL y f) 7D-EP

Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos cortantes en la interfaz se muestran en la Figura 3.21, se halló el valor del esfuerzo cortante de la interfaz (IFSS, mencionado en el software Abaqus como S12) al 50%, el cual coincide con la mitad del valor máximo, esto verifica su comportamiento lineal. Los resultados del modelo numérico coinciden a los hallados experimentalmente con un error menor al de 3% en todos los casos.

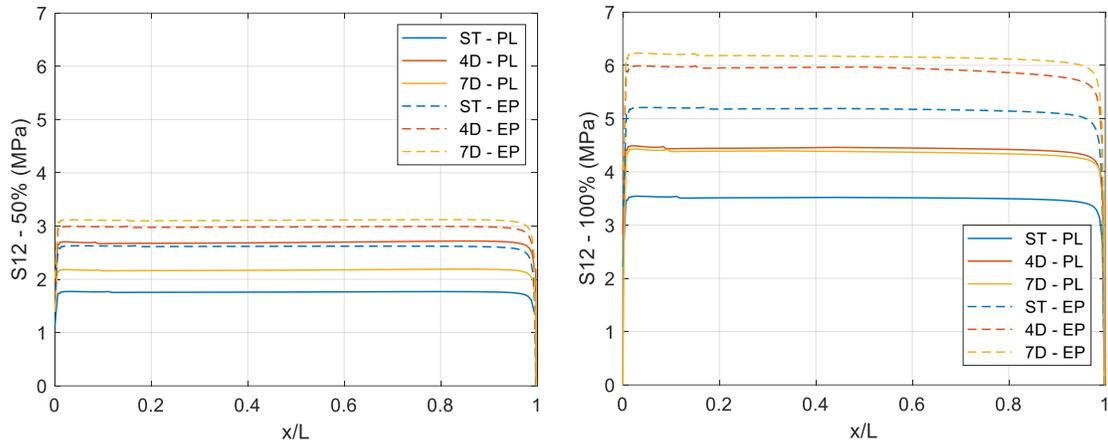


Figura 3.21 Relación entre longitud de la interfaz vs a) 50% y b) 100% del valor máximo del esfuerzo cortante interfacial (S12) para todos los modelos computacionales de *pull out* con resina poliéster y epóxica estudiados

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.22a, se observa el esfuerzo cortante en la interfaz (S12) para las fibras no tratadas donde se halló un incremento del 47% en la IFSS máxima de la fibra embebida en resina epóxica con respecto a la embebida en resina poliéster. En la Figura 3.22b y c, se percibe que el esfuerzo cortante en la interfase (S12) es mayor en la parte central y menor en los extremos libre tanto para la resina poliéster y epóxica respectivamente.

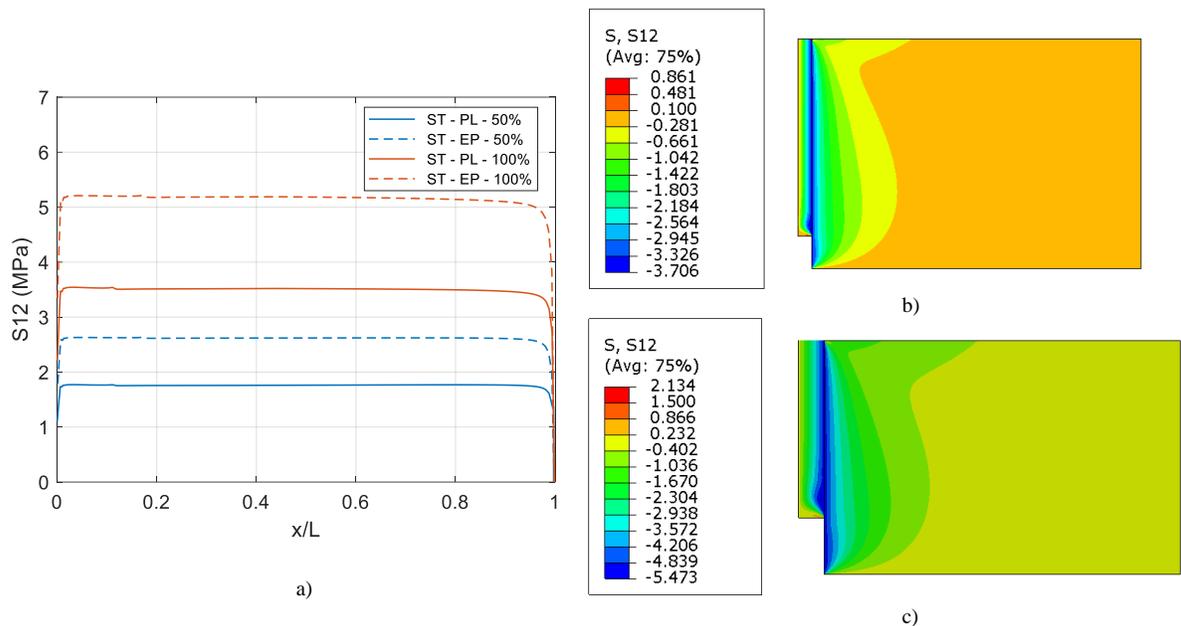


Figura 3.22 Distribución del esfuerzo cortante interfacial (S_{12}) en modelo computacional de pull out de la fibra sin tratamiento a) con respecto a longitud de la interfaz b) embebido en resina poliéster (ST-PL) y c) embebido en resina epóxica (ST-EP).

Fuente: Elaboración propia

De igual manera en los casos siguientes. En la Figura 3.23a con respecto a las tratadas por 4 días, se observa la evolución del esfuerzo cortante en la interfaz, donde se halló un incremento del 33% en la IFSS máxima de la fibra embebida en resina epóxica con respecto a la embebida en resina poliéster. En la Figura 3.23b y c, se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente.

En la Figura 3.24a, se observa el esfuerzo cortante en la interfaz (S_{12}) para las fibras tratadas por 7 días, donde se halló un incremento del 41% en la IFSS máxima de la fibra embebida en resina epóxica con respecto a la embebida en resina poliéster. En la Figura 3.24b y c, se observa el desarrollo del esfuerzo S_{12} en el sistema. Cabe recalcar que todas las comparaciones se realizarán a los casos de resina epóxica en base a los de resina poliéster.

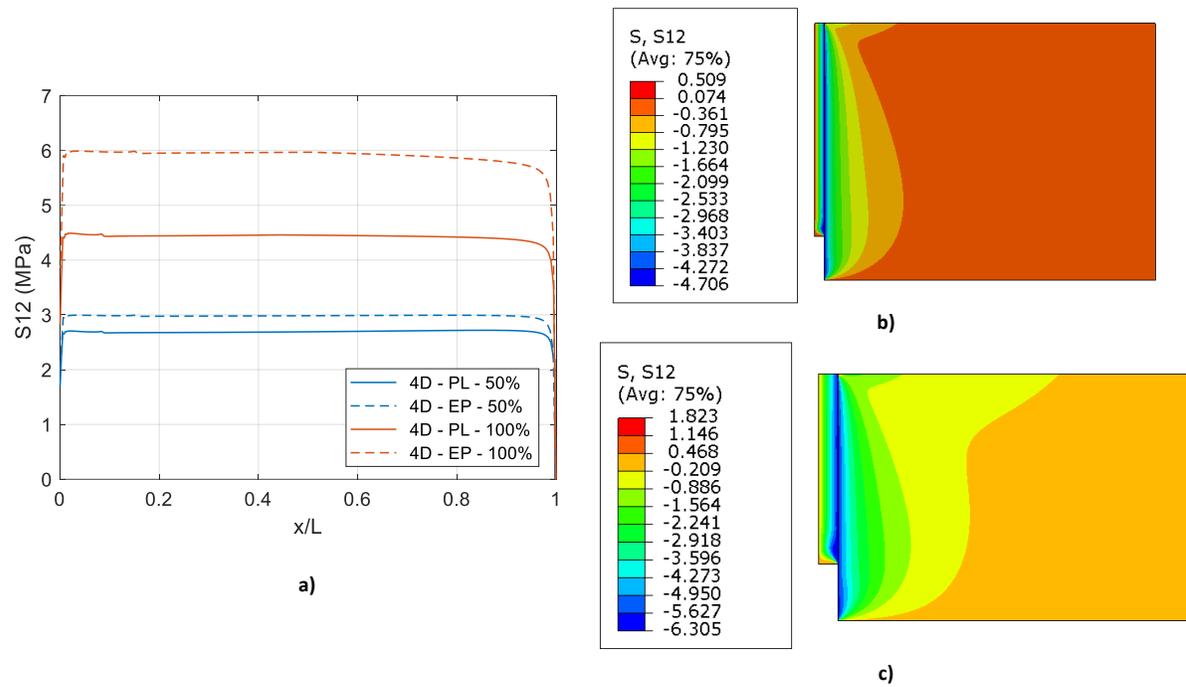


Figura 3.23 Distribución del esfuerzo cortante interfacial (S_{12}) en modelo computacional de pull out de la fibra con 4 días de tratamiento a) con respecto a longitud de la interfaz b) embebido en resina poliéster (4D-PL) y c) embebido en resina epóxica (4D-EP).

Fuente: Elaboración propia

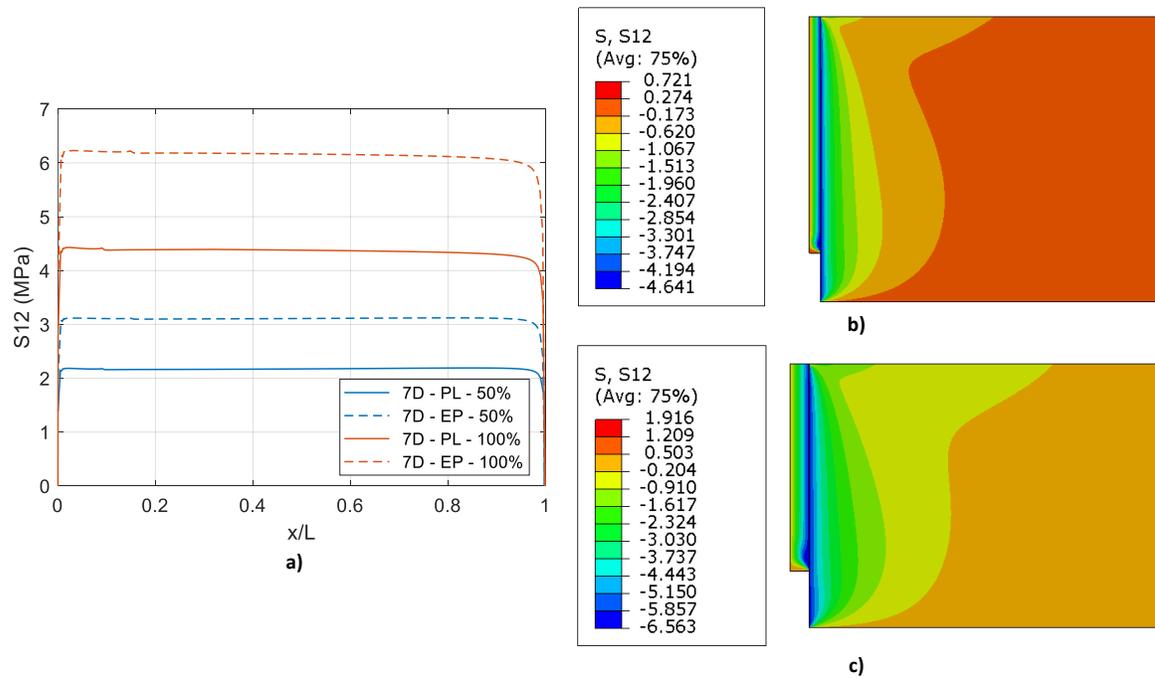


Figura 3.24 Distribución del esfuerzo cortante interfacial (S_{12}) en modelo computacional de pull out de la fibra con 7 días de tratamiento a) con respecto a longitud de la interfaz b) embebido en resina poliéster (7D-PL) y c) embebido en resina epóxica (7D-EP).

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la Figura 3.25 se muestran los valores al 50% y 100% del esfuerzo axial (S_{22}) en la zona central de la fibra. Al 50% S_{22} , se observa una extracción de la fibra del 8-11%, 11-13% en los grupos de resina poliéster y epóxica, respectivamente; por consiguiente, al 100% S_{22} , se observa una extracción de fibra del 15-18% y 22-25% en las fibras embebidas en resina poliéster y epóxica. Este comportamiento se debe a la mayor fuerza necesaria para separar la fibra de la matriz, por lo que permite una mayor deformación de la fibra antes de la separación total de la fibra/matriz.

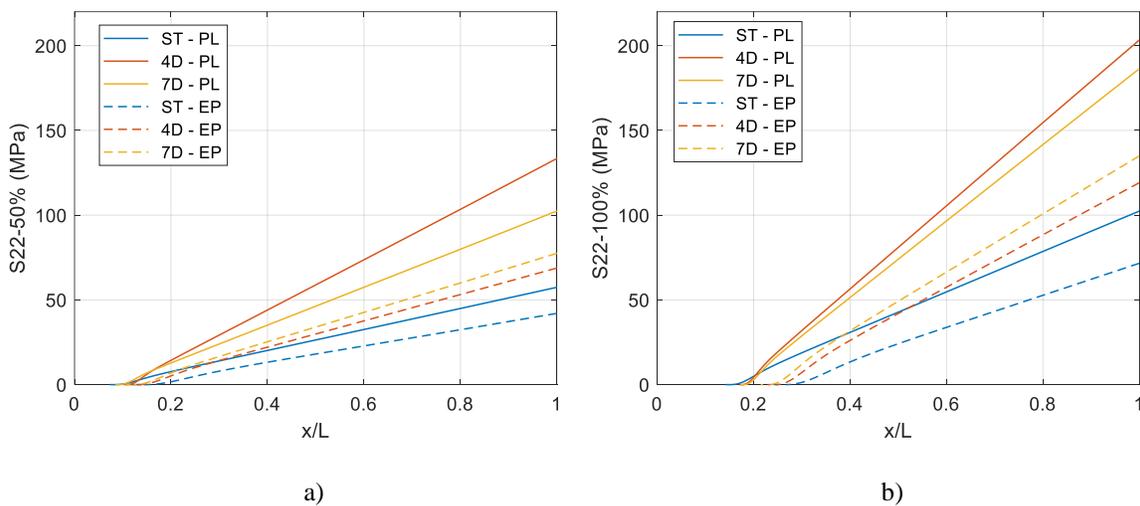


Figura 3.25 Relación entre longitud de la interfaz vs a) 50% y b) 100% del valor máximo del esfuerzo axial en la zona central de la fibra (S_{22}) de todos los modelos computacionales de *pull out* con resina poliéster y epóxica

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al esfuerzo axial obtenido en las fibras no tratadas (Figura 3.26), el radio de la fibra sin tratamiento embebidas en resina epóxica (ST-EP) es 73.4% mayor que en las embebidas en resina poliéster (ST-PL); por lo que, aunque la fuerza sea mayor en un 129%, el esfuerzo axial máximo, es menor en un 30%. También se puede observar gráficamente la distribución de esfuerzos en el sistema fibra y matriz, donde se observa la concentración de esfuerzos en la zona superior central de la matriz ya que esta actúa como restricción para la extracción de la fibra.

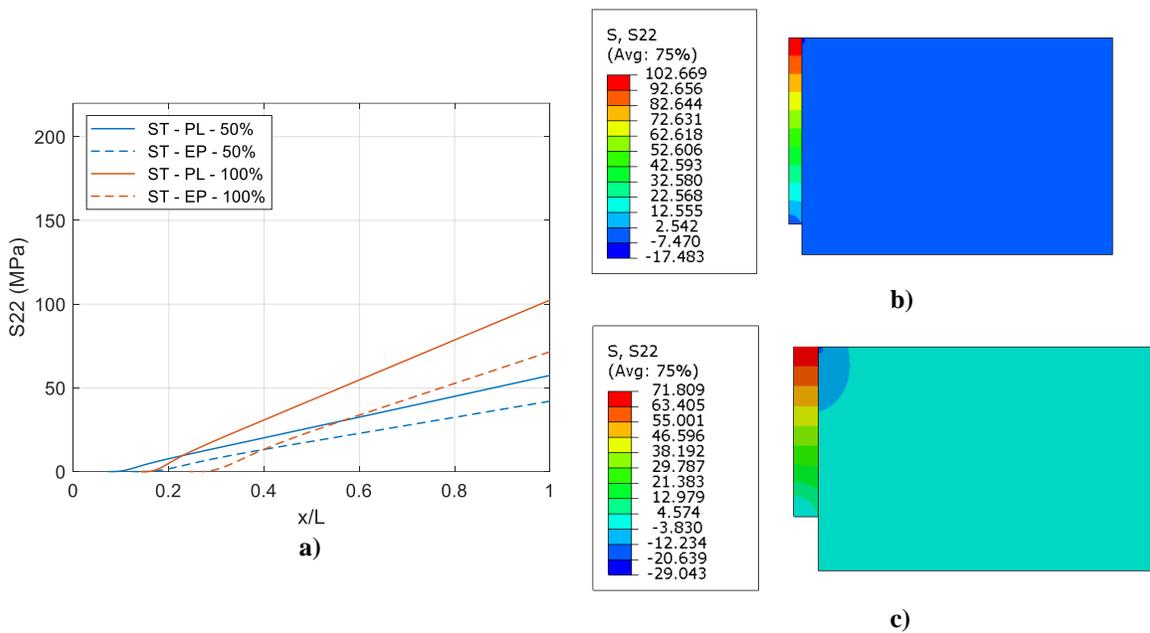


Figura 3.26 Distribución del esfuerzo axial en la fibra (S_{22}) en modelo computacional de pull out de la fibra sin tratamiento a) con respecto a longitud de fibra embebida b) embebida en resina poliéster (ST-PL) y c) embebida en resina epóxica (ST-EP).

Fuente: Elaboración propia

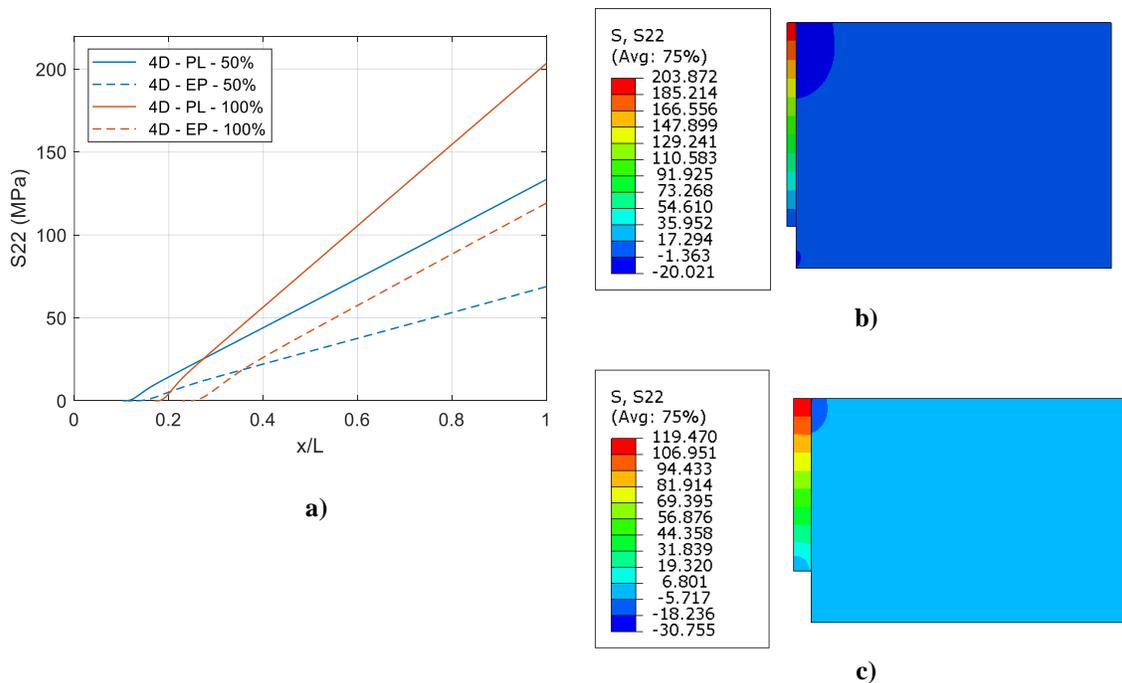


Figura 3.27 Distribución del esfuerzo axial en la fibra (S_{22}) en modelo computacional de pull out de la fibra tratada por 4 días a) con respecto a longitud de fibra embebida b) embebida en resina poliéster (4D-PL) y c) embebida en resina epóxica (4D-EP).

Fuente: Elaboración propia

En los grupos con fibras tratadas por 4 días (Figura 3.27), la fibra embebida en la resina epóxica (4D-EP) cuenta con un radio mayor en un 73%; una fuerza axial menor en un 117% y el esfuerzo axial mayor en un 41.41% con respecto a la embebida en resina poliéster (4D-PL). En la Figura 3.27b y c, se observa la distribución de esfuerzos axiales en el sistema en resina poliéster y epóxica respectivamente con el mismo comportamiento ya descrito.

En el caso de las fibras tratadas por 7 días, la fibra embebida en la resina epóxica (7D-EP) tiene un radio mayor en un 54%; la fuerza axial menor en un 102%; sin embargo, el esfuerzo axial mayor en un 28% (Figura 3.28 a) con respecto a la embebida en resina poliéster (4D-PL). En la Figura 3.28b y c, se observa la distribución de esfuerzos axiales en el sistema para la fibra embebida en la resina poliéster y epóxica respectivamente.

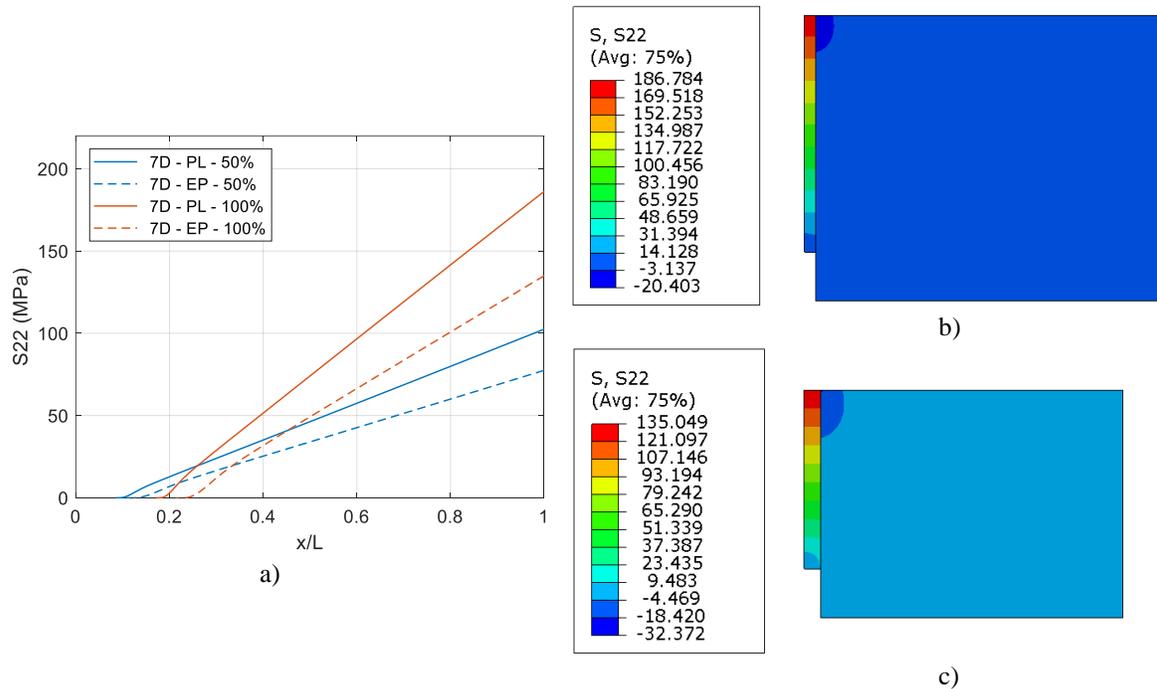


Figura 3.28 Distribución del esfuerzo axial en la fibra (S_{22}) en modelo computacional de pull out de la fibra tratada por 7 días a) con respecto a longitud de fibra embebida b) embebida en resina poliéster (4D-PL) y c) embebida en resina epóxica (4D-EP).

Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo axial (S_{22}) aumenta en las fibras tratadas debido a que mejora la compatibilidad y la fuerza se transfiere en mayor medida a las fibras. Sin embargo, el valor de los esfuerzos es mayor en los grupos de resina poliéster que en la resina epóxica; esto es

debido a que el esfuerzo axial tiene una relación inversamente proporcional con el diámetro de la fibra: mientras mayor es el diámetro, menor es el esfuerzo axial ya que se distribuye en una mayor área. Al ser modelos con data experimental, los diámetros son diferentes, siendo mayores en los casos con resina epóxica tal como se mencionó anteriormente.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

A continuación, se describen las conclusiones de la presente tesis:

1. Se determinó las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de cabuya con tratamiento de solución al 8% en peso de bicarbonato de sodio de duración de 4, 7 y 14 días. El tratamiento de 4 días demostró un mayor aumento de densidad con 4.6%; sin embargo, el menor porcentaje de lumen se encontró para el grupo de 14 días y menor absorción de humedad para el grupo de fibras tratadas por 7 días. Las propiedades mecánicas no sufrieron un cambio significativo, excepto en el módulo elástico inicial con un aumento 13%. Esto se debe a que el tratamiento actúa únicamente en el área superficial de la fibra.
2. Se caracterizó la resina poliéster no saturada, donde la resistencia a la flexión y el módulo de Young fue de 93.9 MPa y 3.78 GPa con 12 y 0.3 de desviación estándar, respectivamente. En el caso de la resina epóxica sus propiedades de resistencia a la flexión y módulo de Young fueron de 98.5 MPa y 2.7 GPa con 12 y 0.1 de desviación estándar, respectivamente. Al ser materiales poliméricos sintéticos y el buen acabado superficial que se le realizó, se obtuvo una menor variabilidad a comparación de las fibras naturales.
3. Se evaluó las propiedades de interfaz fibra matriz según el método de desprendimiento por tensión (*pull out test*) donde se observó un mayor valor del esfuerzo cortante interfacial en las fibras tratadas por 7 días con matriz epóxica, con un aumento de hasta el 76% en comparación de las fibras sin tratamiento con matriz de resina poliéster. Aunque los valores para los tratamientos de 4 días y 7 días fueron similares, se eligió las fibras tratadas por 7 días y con matriz de resina epóxica como mejor opción para el material compuesto debido a la mayor

homogeneidad en el esfuerzo cortante interfacial con una desviación estándar 16% menor con respecto a las fibras con cuatro días de tratamiento.

4. Se evaluó las propiedades de interfaz fibra matriz mediante el modelamiento numérico del método de desprendimiento por tensión (*pull out test*) donde se pudo observar una similitud con una diferencia menor al 5% en las propiedades mecánicas tales como el esfuerzo cortante interfacial y módulo inicial. También se halló la distribución del esfuerzo axial en la fibra, cuyo valor máximo depende tanto de la fuerza aplicada como del radio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. J. Rogoff and F. Screve, *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation*, 3rd ed. William Andrew, 2019.
- [2] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. 2005. doi: 10.1201/9780203508206.ch1.
- [3] S. Evans, “Analysis: World has already passed ‘peak oil’, BP figures reveal,” *Carbon Brief*, Sep. 15, 2020. <https://www.carbonbrief.org/analysis-world-has-already-passed-peak-oil-bp-figures-reveal> (accessed Nov. 28, 2021).
- [4] M. Kilpeläinen and A. Happonen, “Awareness Adds to Knowledge. Stage of the Art Waste Processing Facilities and Industrial Waste Treatment Development,” *Current Approaches in Science and Technology Research Vol. 4*, no. May, pp. 125–148, 2021, doi: 10.9734/bpi/castr/v4/9636d.
- [5] T. W. Clyne and D. Hull, *An Introduction to Composite Materials*, 3ra edición. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781139050586.
- [6] R. D. S. G. Campilho, *Natural fiber composites*. CRC Press, 2015. doi: 10.1201/b19062.
- [7] C. Martin, “Wind turbine Blades can’t be recycled, so they’re piling up in landfills,” *Bloomberg Green*, Feb. 05, 2020.
- [8] Fraunhofer, “Press Release : Porsche launches low-volume production with bio-based materials from Fraunhofer WKI Porsche launches low-volume production with bio-based materials from Fraunhofer WKI,” *Fraunhofer*, Jul. 01, 2019.
- [9] S. Mori, C. Tenazoa, S. Candiotti, E. Flores, and S. Charca, “Assessment of Ichu Fibers Extraction and Their Use as Reinforcement in Composite Materials,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 17, no. 5, pp. 700–715, 2020, doi: 10.1080/15440478.2018.1527271.
- [10] N. Kumar, A. Singh, and R. Ranjan, “Fabrication and mechanical characterization of horse hair (HH) reinforced polypropylene (PP) composites,” *Mater Today Proc*, vol. 6, no. 5, p. 0.55303, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.078.
- [11] C. V. Stevens, *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. 2010. doi: 10.5772/9848.

- [12] S. Candiotti, J. Cubas, E. Flores, and S. Charca, “Estudio de la Disponibilidad de la Cabuya (‘Furcraea Andina’) en el Perú,” Lima, 2018.
- [13] MEF, “D.S. N° 268-2019-EF,” 2019.
- [14] C. Walker, R. Sibly, S. Hopkin, and D. Peakall, *Principles of Ecotoxicology*, CRC press. 2012.
- [15] V. Fiore, T. Scalici, F. Nicoletti, G. Vitale, M. Prestipino, and A. Valenza, “A new eco-friendly chemical treatment of natural fibres: Effect of sodium bicarbonate on properties of sisal fibre and its epoxy composites,” *Compos B Eng*, vol. 85, pp. 150–160, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.09.028.
- [16] B. Bakri, A. E. E. Putra, A. A. Mochtar, I. Renreng, and H. Arsyad, “Sodium bicarbonate treatment on mechanical and morphological properties of coir fibres,” *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 5562–5572, 2018, doi: 10.15282/ijame.15.3.2018.12.0427.
- [17] M. Boillat, “Synthetic mineral fibers,” *Schweiz Med Wochenschr*, vol. 129, no. 12, Mar. 1999.
- [18] S. P. Mishra, *Fibre Structure*. Woolhead Publishing India Pvt. Limited, 2016.
- [19] ASTM D629-15, “Standard test methods for quantitative analysis of textiles,” *ASTM Internacional*, 2015, doi: 10.1520/D0629-15.1.
- [20] D. Klemm, B. Heublein, H. P. Fink, and A. Bohn, “Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material,” *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 44, no. 22, pp. 3358–3393, 2005, doi: 10.1002/anie.200460587.
- [21] A. Komuraiah, N. S. Kumar, and B. D. Prasad, “Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties,” *Mechanics of Composite Materials*, vol. 50, no. 3, pp. 359–376, 2014, doi: 10.1007/s11029-014-9422-2.
- [22] H. L. Bos, J. Müssig, and M. J. A. van den Oever, “Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 37, no. 10, pp. 1591–1604, 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.10.011.
- [23] P. H. F. Pereira *et al.*, “Vegetal fibers in polymeric composites: A review,” *Polimeros*, vol. 25, no. 1, pp. 9–22, 2015, doi: 10.1590/0104-1428.1722.

- [24] L. De La Torre, I. Cummins, and E. Logan-Hines, “Agave americana and Furcraea andina: Key species to andean cultures in Ecuador,” *Bot Sci*, vol. 96, no. 2, pp. 246–266, 2018, doi: 10.17129/botsci.1813.
- [25] S. Mori, C. Tenazoa, E. Flores, and S. Charca, “Caracterización fisicoquímica y superficial de las fibras endémicas del Perú,” Lima, Perú, 2017.
- [26] “National Fire Protection Association (NFPA),” in *NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*, Quincy, Massachusetts. USA: NFPA, 2012.
- [27] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, “Sodium Hydroxide (NaOH) CAS 1310-73-2; UN 1823 (solid); UN 1824 (solution),” *Managing Hazardous Materials Incidents*, 2011. <https://www.atsdr.cdc.gov/MHMI/mmg178.pdf>
- [28] M. E. Arcos Serrano and C. Izcapa Treviño, “Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México,” *Centro Nacional de Prevención de Desastres*, 2003.
- [29] TATA Chemicals Europe Limited, “Solubility of Sodium Bicarbonate in Water % NaHCO₃ by Weight Solubility of Sodium Bicarbonate in Water,” United Kingdom.
- [30] M. Aslan, G. Chinga-Carrasco, B. F. Sørensen, and B. Madsen, “Strength variability of single flax fibres,” *J Mater Sci*, vol. 46, no. 19, pp. 6344–6354, 2011, doi: 10.1007/s10853-011-5581-x.
- [31] P. S. Mukherjee and K. G. Satyanarayana, “Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1 - sisal fibres,” vol. 19, no. 12, pp. 3925–3934, 1984.
- [32] ASTM C1557-14, *Standard Test Method for Tensile Strength and Young’s Modulus*. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2015. doi: 10.1520/C1557-14.2.
- [33] ASTM D792, “ASTM D792 - 20: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics,” *American Society for Testing and Materials*, vol. 14, pp. 1–5, 2020.
- [34] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Second Edition*. Elsevier, 2013. doi: 10.1016/C2011-0-05605-3.
- [35] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, 3rd Editio. Elsevier, 2018. doi: 10.1016/c2017-0-01099-6.

- [36] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, “Progress report on natural fiber reinforced composites,” *Macromol Mater Eng*, vol. 299, no. 1, pp. 9–26, 2014, doi: 10.1002/mame.201300008.
- [37] M. Biron, *Thermosets and composites: Material Selection, Applications, Manufacturing, and Cost Analysis*, 2nd Editio., vol. 148. Elsevier, 2014.
- [38] S. A. Candiotti Barrenechea, “Caracterización y modelamiento de la fibra de ichu para su uso como refuerzo en materiales compuestos laminados,” Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, 2019.
- [39] ASTM INTERNATIONAL, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D790,” *Annual Book of ASTM Standards*, 2019.
- [40] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mecánica de materiales*, 5ta ed. The McGRAW-HILL Companies, 2009.
- [41] S. Zhandarov and E. Mäder, “Characterization of fiber/matrix interface strength: Applicability of different tests, approaches and parameters,” *Compos Sci Technol*, vol. 65, no. 1, pp. 149–160, 2005, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.07.003.
- [42] L. Yang and J. L. Thomason, “Interface strength in glass fibre-polypropylene measured using the fibre pull-out and microbond methods,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 41, no. 9, pp. 1077–1083, 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.10.005.
- [43] B. Liu, Z. Liu, X. Wang, G. Zhang, S. Long, and J. Yang, “Interfacial shear strength of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide measured by the microbond test,” *Polym Test*, vol. 32, no. 4, pp. 724–730, 2013, doi: 10.1016/j.polymertesting.2013.03.020.
- [44] H. L. Cox, “The elasticity and strength of paper and other fibrous materials.,” *British journal of applied physics*, vol. 3, no. 3, pp. 72–79, 1952.
- [45] K. tak Lau, P. yan Hung, M. H. Zhu, and D. Hui, “Properties of natural fibre composites for structural engineering applications,” *Compos B Eng*, vol. 136, no. September 2017, pp. 222–233, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.038.
- [46] C. Viney, “Fracture of Natural Polymeric Fibres,” *Fiber Fracture*, pp. 303–328, 2002, doi: 10.1016/b978-008044104-7/50014-9.

- [47] B. Waloddi Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *J Appl Mech*, vol. Vol. 18, pp. 293–297, 1951.
- [48] M. F. Triola, "Estadística no paramétrica," in *Estadística*, 12^o Edició., Pearson, 2018, pp. 597–653.
- [49] S. Chaitanya and I. Singh, "Sisal Fiber-Reinforced Green Composites: Effect of Ecofriendly Fiber Treatment Saurabh," *Polym Compos*, vol. 39, no. 12, pp. 4310–4321, 2018, doi: 10.1002/pc.
- [50] P. Sahu and M. K. Gupta, "Effect of ecofriendly coating and treatment on mechanical, thermal and morphological properties of sisal fibre," *Indian J Fibre Text Res*, vol. 44, no. 2, pp. 199–204, 2019.
- [51] S. Candiotti, J. L. Mantari, C. E. Flores, and S. Charca, "Assessment of the mechanical properties of peruvian *Stipa Obtusa* fibers for their use as reinforcement in composite materials," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 135, no. May, p. 105950, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105950.
- [52] U. Nirmal, N. Singh, J. Hashim, S. T. W. Lau, and N. Jamil, "On the effect of different polymer matrix and fibre treatment on single fibre pullout test using betelnut fibres," *Mater Des*, vol. 32, no. 5, pp. 2717–2726, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.01.019.
- [53] Y. Li, C. Hu, and Y. Yu, "Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 39, no. 4, pp. 570–578, 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.07.005.
- [54] Abaqus Version 6.5 Documentation, "Element formulation and integration," *ABAQUS/CAE User's Manual*.
- [55] ABAQUS Version 6.6 Documentation, "Swept meshing of surfaces," *ABAQUS/CAE User's Manual*.
<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usi/default.htm?startat=pt03ch17s10s02.html> (accessed Feb. 21, 2023).
- [56] H. Suryanto, E. Marsyahyo, Y. S. Irawan, and R. Soenoko, "Effect of alkali treatment on crystalline structure of cellulose fiber from mendong (*fimbristylis globulosa*) straw," *Key Eng Mater*, vol. 594–595, pp. 720–724, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.720.

- [57] M. Symington, O. David-West, W. Banks, and R. Pethrick, "Effect of alkalis on the mechanical properties of natural fibres," in *13th European Conference on Composite Materials (EECM 13)*, 2008.
- [58] H. M. Akil, M. F. Omar, A. A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. A. M. Ishak, and A. Abu Bakar, "Kenaf fiber reinforced composites: A review," *Mater Des*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4107–4121, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.008.
- [59] V. Bheemreddy, K. Chandrashekhara, L. R. Dharani, and G. E. Hilmas, "Modeling of fiber pull-out in continuous fiber reinforced ceramic composites using finite element method and artificial neural networks," *Comput Mater Sci*, vol. 79, pp. 663–673, 2013, doi: 10.1016/j.commatsci.2013.07.026.
- [60] K. J. Wong, B. F. Yousif, and K. O. Low, "The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 224, no. 3, pp. 139–148, 2010, doi: 10.1243/14644207JMDA304.
- [61] C. Redon, H. Hoshiro, V. C. Li, and C. Wu, "Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, no. 6, pp. 399–406, 2001.
- [62] B. Chun, D. Y. Yoo, and N. Banthia, "Achieving slip-hardening behavior of sanded straight steel fibers in ultra-high-performance concrete," *Cem Concr Compos*, vol. 113, no. April, p. 103669, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103669.