



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Material compuesto epóxico/fique, como refuerzo externo en elementos de concreto sometidos a flexión**

**Ing. Oscar David Beltrán Martínez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia  
2023



# **Material compuesto epóxico/fique, como refuerzo externo en elementos de concreto sometidos a flexión**

**Ing. Oscar David Beltrán Martínez**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería- Estructuras**

Directora:

PhD Patricia Luna Tamayo

Línea de Investigación:

Materiales de construcción para estructuras

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2022



*Encomienda a Jehová tus obras, y tus pensamientos serán afirmados.  
Proverbios 16:3 RVR1960*

*A mi madre, Esperanza, por su amor, esfuerzo  
y valentía ante la vida.*

*A mi esposa, Vanessa, por su amor, apoyo y  
ayuda incondicional.*

*A mi hijo, Samuel David, quien me motiva a  
esforzarme cada día más.*



## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, que siempre me ha acompañado, ha guiado mis pasos y me ha permitido cumplir sueños que desde niño tuve presente.

A mi esposa, quien siempre ha sido mi ayuda idónea, siempre ha creído en mí y me ha dado lo más lindo que tengo: mi hijo.

A mi pequeño hijo, que con tan solo dos años tiene la facultad de inspirarme y motivarme a ser un mejor ser humano cada día, el brillo de sus ojos y su linda sonrisa son mi mayor energizante día tras día.

A mis familiares más cercanos, en quienes siempre he encontrado un apoyo y cariño incondicional.

A mi amada Universidad Nacional de Colombia, por el amor y gusto hacia el estudio que sembró en mí y por la formación académica que me dio desde el pregrado hasta la maestría en ingeniería.

Agradecimiento especial a la ingeniera Patricia Luna, quien dirigió mi trabajo de grado de pregrado y de posgrado. Me enseñó con mucha dedicación como se investiga, como se escribe la ciencia, como ella misma dice, me enseñó y contagió el amor hacia la investigación, me enseñó el maravilloso mundo de las fibras aplicadas en la ingeniería estructural, y me enseñó la materia por la cual me apasioné por las estructuras: Análisis Estructural Aplicado.

A mi amigo, colega y socio, el ingeniero Michael Socha, con quien desde el pregrado soñábamos con ejercer la Ingeniería Civil, y hasta el día de hoy la hemos ejercido con honor y responsabilidad.

Finalmente, a todas esas personas que han aportado felicidad en mi vida, algunas continúan presentes, otras no, sin embargo, aportar felicidad en la vida de alguien es algo invaluable.



## Resumen

En esta investigación se determinó la influencia de reforzar externamente vigas de concreto sometidas a flexión empleando un compuesto hecho con matriz epóxica y fibras de fique. Para esto se caracterizó mecánicamente la fibra de fique antes y después de ser sometida a un tratamiento alcalino. El tratamiento alcalino usado fue a base de hidróxido de sodio (NaOH), logrando con este procedimiento mejorar las propiedades mecánicas de la fibra de fique. Posteriormente, se caracterizó mecánicamente el tejido de fique, previamente sometido al tratamiento alcalino. Se fabricó una matriz epóxica, la cual fue sometida a ensayos de tensión para determinar sus propiedades mecánicas. Para la fabricación del compuesto epóxico/fique (EF) se emplearon dos tipos de tejidos, un tejido tupido (D) y un tejido ralo (MD), obteniendo mayores prestaciones mecánicas al emplear el tejido tupido, con un contenido de fibras de fique del 10 %, como fracción de peso. Se fabricaron vigas de concreto empleando dos tipos de resistencia a la compresión, una de 17 MPa y la otra de 24 MPa. Estas vigas fueron reforzadas externamente, en la cara inferior del elemento, empleando el compuesto EF. Posteriormente, fueron sometidas al ensayo a flexión de cuatro puntos para evaluar el comportamiento de las vigas reforzadas ante esfuerzos de flexión. Al reforzar estas vigas con el compuesto EF se observó que la resistencia a la flexión aumentó entre un 15 y 20 % para vigas con concreto de 17 MPa y un 10 % para las vigas hechas con concreto de 24 MPa. El módulo de elasticidad de las vigas reforzadas aumentó hasta un 20 % y las deflexiones se redujeron. Se propusieron unas expresiones teóricas para ser comparadas con los resultados obtenidos en el laboratorio, logrando precisión en las ecuaciones determinadas para la evaluación de esfuerzos en vigas compuestas, y una buena aproximación en la ecuación definida para la evaluación del momento nominal de la viga reforzada externamente con EF.

**Palabras clave:** Fibras de fique, fibras naturales, materiales compuestos, matriz epóxica, refuerzo externo, reforzamiento en vigas.

Epoxy/fique composite material, as external reinforcement in concrete elements subjected to flexion

## Abstract

In this research, the influence of externally reinforcing concrete beams subjected to bending using a composite made with an epoxy matrix and fique fibers was determined. For this, the fique fiber was mechanically characterized before and after being subjected to an alkaline treatment. The alkaline treatment used was based on sodium hydroxide (NaOH), achieving with this procedure to improve the mechanical properties of fique fiber. Subsequently, the fique fabric, previously subjected to alkaline treatment, was mechanically characterized. An epoxy matrix was manufactured, which was subjected to stress tests to determine its mechanical properties. For the manufacture of the epoxy/fique composite (EF) two types of fabrics were used, a dense fabric (D) and a sparse fabric (MD), obtaining greater mechanical performance when using the dense fabric, with a fique fiber content of 10%, as a weight fraction. Concrete beams were manufactured using two types of compressive strength, one of 17 MPa and the other of 24 MPa. These beams were externally reinforced, on the lower face of the element, using the EF compound. Subsequently, they were subjected to the four-point bending test to evaluate the behavior of the reinforced beams under bending stresses. When reinforcing these beams with the EF compound, it was observed that the flexural strength increased between 15 and 20% for beams with 17 MPa concrete and 10% for beams made with 24 MPa concrete. The elastic modulus of the reinforced beams increased up to 20% and deflections were reduced. Some theoretical expressions were proposed to be compared with the results obtained in the laboratory, achieving precision in the equations determined for the evaluation of forces in composite beams, and a good approximation in the equation defined for the evaluation of the nominal moment of the externally reinforced beam. with EF.

**Keywords:** Fique fibers, natural fibers, composite materials, epoxy matrix, external reinforcement, beam reinforcement.





## Contenido

Resumen.....	IX
Contenido.....	XII
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas.....	XVII
Lista de símbolos y abreviaturas.....	XIX
<b>1. Estado del arte.....</b>	<b>25</b>
1.1 Fibras Naturales.....	27
1.1.1 Fibras de yute.....	28
1.1.2 Fibras de kenaf.....	29
1.1.3 Fibras de sisal.....	29
1.1.4 Fibras de lino.....	30
1.1.5 Fibras de bambú.....	30
1.2 Fique.....	31
1.2.1 Producción de la fibra de fique.....	32
1.2.2 Usos del fique.....	33
1.2.3 Propiedades químicas y mecánicas de la fibra de fique.....	35
1.3 Materiales Compuestos reforzados con fibras naturales.....	35
1.3.1 Matrices poliméricas.....	37
1.3.2 Tratamiento en fibras naturales para elaboración de materiales compuestos.....	38
1.3.3 Compuestos reforzados con fibras naturales (NFRP).....	39
1.4 Elementos de concreto reforzados externamente con fibras naturales.....	41
<b>2. Fibras de fique.....</b>	<b>45</b>
2.1 Metodología.....	45
2.1.1 Materiales.....	45
2.1.2 Tratamiento alcalino.....	46
2.1.3 Determinación del <i>System compliance</i> .....	46
2.1.4 Ensayos a tensión.....	49
2.2 Resultados y discusión.....	51
2.2.1 <i>System compliance</i> .....	51
2.2.2 Caracterización mecánica de la fibra de fique.....	54
2.3 Conclusiones del estudio de la fibra de fique.....	57
<b>3. Compuestos.....</b>	<b>58</b>
3.1 Compuesto epóxico/fique.....	58
3.1.1 Materiales.....	58
3.1.2 Fabricación de probetas de la matriz epóxica y del tejido de fique.....	60
3.1.3 Fabricación del compuesto epóxico/fique.....	63

3.1.4	Ensayos a tensión en probetas de matriz epóxica .....	65
3.1.5	Ensayos de tensión en probetas del tejido de fique .....	67
3.1.6	Ensayos a tensión en probetas de compuesto epóxico/fique .....	68
3.1.7	Resultados y discusión.....	70
3.2	Reforzamiento externo de vigas de concreto sometidas a flexión .....	76
3.2.1	Materiales y elaboración del compuesto.....	77
3.2.2	Fabricación del compuesto concreto/epóxico-fique .....	77
3.2.3	Ensayos a flexión en el compuesto concreto/epóxico-fique.....	79
3.2.4	Resultados y discusión.....	82
3.3	Conclusiones del estudio de los compuestos.....	86
<b>4.</b>	<b>Comparación de resultados experimentales con el análisis teórico.....</b>	<b>88</b>
4.1	Cálculo de deflexión.....	88
4.2	Vigas compuestas .....	90
4.2.1	Deformaciones y esfuerzos.....	91
4.2.2	Análisis de vigas de concreto reforzadas con compuestos FRP .....	92
4.3	Comparación de resultados experimentales con los teóricos.....	97
4.3.1	Resultados y discusión.....	99
4.4	Conclusiones de la comparación de resultados experimentales con resultados teóricos.....	105
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>106</b>
5.1	Conclusiones.....	106
5.2	Recomendaciones .....	108
<b>6.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>109</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Distribución por sectores industriales, uso de materiales compuestos. Adaptado de (López M., 2012).....	25
Figura 1-2: Clasificación de materiales compuestos. Adaptado de (Estrada, 2010). .....	36
Figura 1-3: Ensayo a flexión en vigas. Flexión 4 puntos .....	42
Figura 1-4: Comportamiento vigas reforzadas externamente con compuestos reforzados con fibras de kenaf. Adaptado de (Hafizah et al., 2014).....	42
Figura 1-5: Comportamiento de vigas reforzadas con FFRP en función de las capas de compuesto empleadas. Adaptado de (Yan et al., 2015).....	43
Figura 2-1: Obtención de la fibra. (a): Costales fabricados con fique. (b): Fibra de fique.	45
Figura 2-2: Ensayo de tensión en fibras: (a) Máquina de ensayos; (b) sistema de fijación; (c) mordaza empleada; (d) montaje del espécimen para ensayo. ....	47
Figura 2-3: (a) Marco de papel empleado para ensayo a tensión de las fibras. (b) Disposición de la fibra en el rótulo. ....	47
Figura 2-4: (a) Estéreo- Microscopio empleado. (b) Imagen procesada para medir el área de la sección transversal de las fibras. ....	48
Figura 2-5: Marco de papel empleado para ensayos de tensión. ....	50
Figura 2-6: Determinación del <i>System compliance</i> $C_s$ .....	51
Figura 2-7: Curva esfuerzo-deformación para fibras de fique empleadas para determinar el $C_s$ .....	52
Figura 2-8: Curva esfuerzo contra deformación de la fibra de fique, con y sin tratamiento alcalino. ....	55
Figura 3-1: Tejidos empleados como refuerzo del compuesto. (a) Tupido (denso) (b) Ralo (menos denso). ....	59
Figura 3-2: Medición de espesor espaciamentos entre hiladas. (a) Tupido (b) Ralo.....	59
Figura 3-3: Bosquejo del molde de cartón empleado para la fabricación de las probetas de la matriz epóxica. ....	61
Figura 3-4: Dimensiones de las probetas para ensayos de tensión. ....	61
Figura 3-5: Probeta de matriz epóxica .....	61
Figura 3-6: Dimensiones de las probetas de tejido de fique.....	62
Figura 3-7: Bosquejo del tejido de fique con matriz epóxica en los extremos. ....	62
Figura 3-8: (a) Tejido de fique cortado. (b) Probeta de compuesto epóxico/fique .....	64
Figura 3-9: Sección transversal compuesto epóxico/fique. (a) compuesto con tejido tupido. (b) compuesto con tejido ralo. ....	64
Figura 3-10: Montaje probetas de matriz epóxica en máquina de ensayos.....	66

Figura 3-11: Montaje probetas de tejido de fique en máquina de ensayos.....	67
Figura 3-12: Montaje del compuesto epóxico/fique en máquina de ensayos. ....	69
Figura 3-13: Curva esfuerzo contra deformación típica de la matriz epóxica. ....	70
Figura 3-14 Curva esfuerzo contra deformación típica del tejido de fique .....	72
Figura 3-15: Curva esfuerzo contra deformación típica del compuesto epóxico/ fique. ...	74
Figura 3-16: Dimensiones viguetas de concreto fabricadas.....	78
Figura 3-17: Vigas reforzadas con el compuesto epóxico/fique. Compuesto Concreto/epóxico-fique.....	78
Figura 3-18: Probeta del compuesto concreto/epóxico-fique (CEF). ....	79
Figura 3-19: Esquema montaje para ensayo a flexión de vigas. Adaptado de ASTM C78. ....	80
Figura 3-20: Montaje de probetas para ensayo a flexión. ....	80
Figura 3-21:Falla típica vigas de concreto sin refuerzo .....	83
Figura 3-22: Secuencia de falla típica de las vigas del compuesto concreto/epóxico-fique. ....	83
Figura 3-23: Curva carga contra deflexión compuesto concreto/epóxico-fique. Concreto de 17 Mpa. ....	84
Figura 3-24: Curva carga contra deflexión compuesto concreto/epóxico-fique. Concreto de 24 MPa.....	85
Figura 4-1: Modelo de la viga en estudio .....	88
Figura 4-2: Configuración viga compuesta concreto epóxico/fique. Adaptado de (Gere & Goodno, 2013).....	90
Figura 4-3: Sección transversal vigas compuestas. Dimensiones en mm. ....	91
Figura 4-4: Diagrama de deformaciones y fuerzas internas de viga reforzada externamente con compuesto epóxico- fique. (a) sección transversal de la viga, (b) diagrama de deformaciones, (c) distribución parabólica de esfuerzos, (d) distribución de esfuerzos rectangulares equivalente.....	93
Figura 4-5: Distribución de fuerzas internas cuando falla el compuesto.....	94
Figura 4-6: Distribución de fuerzas internas un instante antes de la falla del compuesto	96
Figura 4-7: Comparación de resultados teóricos y experimentales. Compuestos fabricados con concreto de 17 MPa.....	102
Figura 4-8: Comparación de resultados teóricos y experimentales. Compuestos fabricados con concreto de 24 MPa.....	103

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Producción mundial de fuentes de fibras naturales. Adaptado de (Faruk et al., 2012) .....	27
Tabla 1-2: Composición química de fibras naturales. Porcentaje en peso. Adaptado de (Mohammed et al., 2015).....	28
Tabla 1-3: Propiedades físico-mecánicas de fibras naturales. Adaptado de (Mohammed et al., 2015) y (Tong et al., 2017) .....	28
Tabla 1-4: Producción de fique por departamentos Colombianos. Adaptado de (Echeverri et al., 2015) .....	31
Tabla 1-5: Composición química de fibras de fique. Porcentaje en peso. Adaptado de (Pinzón Galvis, 2013). .....	35
Tabla 1-6 Propiedades físico-mecánicas de fibras de fique. Adaptado de (Muñoz et al., 2018). .....	35
Tabla 1-7: Materia prima para producir materiales compuestos. ....	38
Tabla 2-1: Grupos de fibras definidos para ensayos. ....	48
Tabla 2-2: Valores promedios de las propiedades mecánicas de la fibra de fique obtenidos en la determinación del <i>System compliance</i> .....	52
Tabla 2-3: <i>p – valores</i> obtenidos del análisis estadístico de las propiedades mecánicas de la fibra de fique empleando diferentes longitudes de ensayo. ....	54
Tabla 2-4: Propiedades mecánicas de la fibra de fique con tratamiento alcalino. ....	55
Tabla 2-5: Propiedades mecánicas de la fibra de fique sin tratamiento alcalino. ....	56
Tabla 2-6: <i>p – valores</i> obtenidos del análisis estadístico de las propiedades mecánicas de la fibra de fique con y sin tratamiento alcalino. ....	57
Tabla 3-1: Espesor y separación de hiladas, de los tejidos de fique. ....	59
Tabla 3-2: Especímenes de ensayo compuesto epóxico/fique. ....	65
Tabla 3-3: Propiedades mecánicas matriz epóxica .....	71
Tabla 3-4: Valores promedio de las propiedades mecánicas de la matriz.....	71
Tabla 3-5: Propiedades mecánicas del tejido de fique tupido .....	72

Tabla 3-6: Propiedades mecánicas del tejido de fique ralo .....	73
Tabla 3-7: Valores promedio de las propiedades mecánicas del tejido de fique.....	73
Tabla 3-8: Propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique empleando tejido tupido (denso).....	75
Tabla 3-9: Propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique empleando tejido ralo (menos denso).....	75
Tabla 3-10: Valores promedio de las propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique.....	76
Tabla 3-11: Propiedades de los materiales empleados para la mezcla de concreto.....	77
Tabla 3-12: Dosificación de materiales para mezclas de concreto.....	77
Tabla 3-13: Nomenclatura de especímenes de ensayo.....	81
Tabla 3-14: Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique fabricado con concreto de 17 MPa.....	84
Tabla 3-15: Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique fabricado con concreto de 24 MPa.....	85
Tabla 4-1: Valores promedio de las propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique determinados experimentalmente .....	98
Tabla 4-2: Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 17 MPa determinadas experimentalmente.....	98
Tabla 4-3: Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 24 MPa determinadas experimentalmente.....	98
Tabla 4-4: Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 17 MPa determinadas teóricamente.....	101
Tabla 4-5: Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 24 MPa determinadas teóricamente.....	101
Tabla 4-6: Comparación de propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente y analíticamente. Compuestos hechos con concreto de 17 MPa.....	102
Tabla 4-7: Comparación de propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente y analíticamente. Compuestos hechos con concreto de 24 MPa.....	103

## Lista de Símbolos y abreviaturas

$A_c$	: Área transversal de la probeta de compuesto epóxico/fique, mm <sup>2</sup>
$A_f$	: Área transversal de la fibra de fique, mm <sup>2</sup>
$A_m$	: Área transversal de la probeta de matriz epóxica, mm <sup>2</sup>
$A_t$	: Área transversal del tejido de fique, mm <sup>2</sup>
C	: Distancia al eje neutro de la viga, mm
CFRP	: Material compuesto reforzado con fibras de carbono
$C_s$	: Sistem Compliance
C.V.	: Coeficiente de variación, %
D	: Compuesto epóxico/fique empleando tejido tupido
$E_c$	: Módulo de elasticidad del compuesto epóxico/fique, MPa
$E_f$	: Módulo de elasticidad de la fibra de fique, MPa
$E_h$	: Módulo de elasticidad del concreto, MPa
$E_m$	: Módulo de elasticidad de la matriz epóxica, MPa
$E_t$	: Módulo de elasticidad aparente del tejido de fique, MPa
$\delta$	: Deflexión en vigas, mm
$\varepsilon$	: Deformación unitaria
$\varepsilon_{bi}$	: Deformación inicial en la fibra del compuesto
$\varepsilon_{ci}$	: Deformación inicial a compresión fibra extrema de concreto
$\varepsilon_{cl}$	: Deformación adicional luego de la carga en el concreto
$\varepsilon_{cl}$	: Deformación adicional luego de la carga en el concreto
$\varepsilon_{frpl}$	: Deformación adicional luego de la carga en el compuesto

---

$\varepsilon_t$	: Deformación unitaria en las probetas de tejido de fique
$\varepsilon_w$	: Deformación unitaria en las probetas del compuesto epóxico/fique
$f'_c$	: Resistencia a la compresión del concreto, MPa
$F_f$	: Fuerza de tensión en la falla, N
$FP$	: Fracción en peso de fibras de fique dentro del compuesto, %
$FRP$	: Material compuesto reforzado con fibras
$GFRP$	: Material compuesto reforzado con fibras de vidrio
$I$	: Inercia de la sección, mm <sup>4</sup>
$K$	: Factor que permite encontrar el eje neutro de la sección
$L$	: Longitud de la viga, mm
$m$	: Pendiente de una recta
MD	: Compuesto epóxico/fique empleando tejido ralo
$M_n$	: Momento nominal, N*m
$NFRP$	: Material compuesto reforzado con fibras naturales
$P$	: Carga aplicada, N
$R$	: Resistencia a la flexión, MPa
$\sigma_t$	: Esfuerzo de tensión, MPa
$\sigma_{tc}$	: Esfuerzo de tensión en el compuesto epóxico/fique, MPa
$\sigma_{tm}$	: Esfuerzo de tensión en la matriz epóxica, MPa
$\sigma_{tt}$	: Esfuerzo de tensión en el tejido de fique, MPa
$\sigma_{x1}$	: Esfuerzo normal a flexión en el material 1, MPa
$\sigma_{x2}$	: Esfuerzo normal a flexión en el material 2, MPa
VA	: Viga fabricada con concreto de 24 MPa
VB	: Viga fabricada con concreto de 17 MPa



## Introducción

Los materiales compuestos son aquellos que están conformados por dos o más materiales, que al unirse dan como resultado un material con propiedades mecánicas no encontradas de forma aislada en sus constituyentes. El uso de este tipo de materiales es frecuente en la ingeniería estructural y la industria de la construcción debido a su eficiencia y facilidad de manejo, en algunos casos. Por ejemplo, el material compuesto más empleado actualmente, es el concreto reforzado, el cual está conformado por la unión de una matriz de concreto reforzada con barras de acero, lo cual permite obtener un material competente para resistir esfuerzos de tracción, compresión, torsión, entre otros.

Dentro de los materiales compuestos existe un grupo denominado FRP (Fiber Reinforced Polymers), los cuales constan principalmente de una matriz polimérica y un refuerzo. El refuerzo de este tipo de materiales son las fibras, las cuales pueden ser sintéticas o naturales. Las fibras sintéticas más comunes empleadas hoy en día son la fibra de carbono y la fibra de vidrio (Gómez, Ramón, & Guzman, 2017), mientras que la fibra natural más utilizada es la que proviene del bambú (Estrada, 2010). En la actualidad, el uso de FRP reforzados con fibras sintéticas tiene un mayor avance y desarrollo si se compara con la evolución de los FRP reforzados con fibras naturales; sin embargo, las fibras naturales tienen un gran potencial, razón por la cual esta investigación presenta el estudio de materiales compuestos reforzados con fibra de fique, que es una fibra natural abundante en Colombia.

En Colombia el fique se cultiva a lo largo de todo el país, y su uso principal se presenta en el sector de la agricultura, en la elaboración de sacos o costales para almacenamiento de productos agrícolas, elaboración de lasos, fabricación de artesanías, entre otros (Echeverri, Franco, & Velásquez, 2015). Con base en esto, este estudio pretende evaluar el uso de fibras de fique en el reforzamiento de vigas de concreto. Para el desarrollo de esta investigación, en primer lugar, se determinaron las propiedades mecánicas de las fibras de fique, luego se fabricó un FRP denominado compuesto epóxico/fique, conformado por una matriz epóxica reforzada con fibras de fique, el cual fue caracterizado mecánicamente. Posteriormente, se reforzaron externamente vigas de concreto con el

---

compuesto epóxico/fique y se evaluó la resistencia a la flexión de estos elementos con y sin refuerzo. Finalmente, se realizó una comparación de los resultados experimentales y los resultados teóricos obtenidos del análisis de vigas compuestas sometidas a flexión.

Para llevar a cabo esta investigación se plantearon los siguientes objetivos:

- Objetivo general:

Determinar la influencia de reforzar externamente vigas de concreto con compuestos epóxico/fique, en su resistencia a flexión y módulo de elasticidad.

- Objetivos específicos:

- I. Caracterizar mecánicamente la fibra de fique y el compuesto epóxico/fique.
- II. Caracterizar mecánicamente vigas en concreto reforzadas externamente con compuestos epóxico/fique.
- III. Comparar los resultados experimentales de las vigas reforzadas externamente con compuesto epóxico/fique, con los resultados obtenidos del análisis teórico.

Estos objetivos fueron desarrollados en la Universidad Nacional de Colombia, y la metodología, resultados y conclusiones se presentan en los cinco capítulos que conforman este documento: Estado del arte, Fibras de fique, Compuestos, Comparación de resultados experimentales con el análisis teórico y Conclusiones y recomendaciones. A continuación, se explica brevemente la estructura de los capítulos enunciados.

En el primer capítulo, Estado del arte, se contextualiza al lector acerca de los materiales compuestos, su uso a nivel mundial y las aplicaciones más frecuentes de este tipo de compuestos. A su vez, se presenta un resumen de las fibras naturales empleadas a nivel mundial en diversas aplicaciones. También se expone el desarrollo y aplicaciones que tiene el fique en Colombia, mostrando algunos resultados de estudios anteriores donde se determinaron sus propiedades mecánicas, tratamientos químicos para mejorar su comportamiento, entre otros. Seguido a esto, se exponen los avances que se han obtenido en el estudio de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales y finalmente se citan algunos estudios de refuerzo de elementos de concreto empleando estos compuestos.

En el capítulo dos, Fibras de fique, se presenta la metodología adoptada para caracterizar mecánicamente la fibra; seguido a esto, se presentan los resultados obtenidos y la discusión de los mismos. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas del estudio de la fibra de fique.

El capítulo tres, Compuestos, está dividido en tres partes. En la primera parte se presenta el procedimiento usado para la fabricación del compuesto epóxico/fique y la metodología

seguida para poder caracterizar mecánicamente este compuesto. En el final de esta primera parte se presenta los resultados y discusión del estudio del compuesto epóxico/fique. La segunda parte de este capítulo expone como se fabricaron y reforzaron externamente las vigas de concreto usando el compuesto epóxico/fique. Se presenta la metodología empleada para el ensayo a flexión de estas vigas, posteriormente se muestran los resultados y discusión. La tercera y última parte de este capítulo muestra las conclusiones obtenidas del estudio experimental de los compuestos.

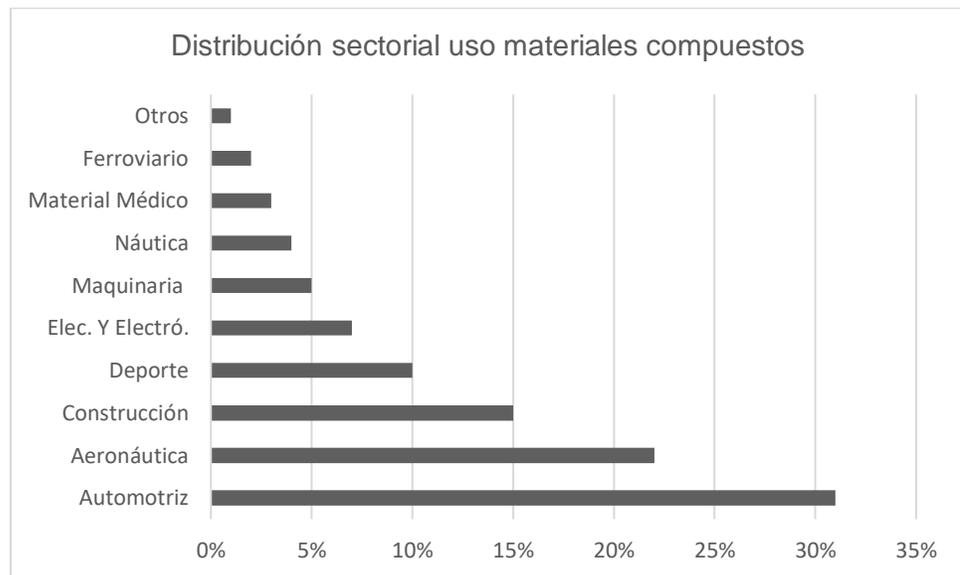
En el capítulo cuatro se presenta la deducción de las expresiones empleadas para el análisis teórico del material compuesto. Inicialmente se expone la expresión para el cálculo de deflexiones, seguido a esto se presentan las ecuaciones con las cuales se puede analizar el comportamiento de los esfuerzos que sufre el compuesto y posteriormente se propone una ecuación para encontrar el momento nominal de las vigas reforzadas externamente con el compuesto epóxico/fique. Finalmente se presenta la comparación de los resultados experimentales con los teóricos junto con sus respectivas conclusiones.

El capítulo cinco, expone las conclusiones generales obtenidas del estudio de la fibra de fique, el estudio del compuesto epóxico/fique, el análisis de las vigas reforzadas externamente con este compuesto y la comparación de resultados teóricos versus los experimentales. Como parte final, se presentan dentro de este capítulo una serie de recomendaciones que pueden ser tenidas en cuenta para futuras investigaciones relacionadas con los temas tratados en este documento.

# 1. Estado del arte

El uso de materiales compuestos conformados por fibras poliméricas tiene sus inicios en la década de 1930, donde fueron usados por primera vez en la fabricación de barcos empleando tejidos a base de fibras de vidrio y resinas de poliéster. Con el paso del tiempo, su uso se extendió a diversos sectores industriales como el automotriz, el de telecomunicaciones, el textil, el de la construcción y la ingeniería, entre otros. También son usados en la medicina, en la fabricación de implantes artificiales, material quirúrgico, etc. (López M., 2012). En la Figura 1-1 se muestra la distribución de por sectores de las industrias que emplean materiales compuestos.

**Figura 1-1:** Distribución por sectores industriales, uso de materiales compuestos. Adaptado de (López M., 2012)



Los materiales compuestos son aquellos que están constituidos por dos o más materiales, que se unen para así lograr obtener mayores prestaciones mecánicas. Básicamente, están formados por dos partes o fases, la primera de ellas, se conoce como la matriz, la cual es la encargada de unir o aglomerar los materiales que forman el compuesto, la segunda parte, se conoce como el refuerzo, el cual puede ser laminado, fibroso, en partículas, entre otros. Las matrices empleadas en la fabricación de materiales compuestos pueden ser de origen cerámico, metálico o polimérico, siendo las matrices poliméricas las más empleadas (Gómez et al., 2017).

Aquellos materiales compuestos que son reforzados por fibras son conocidos como FRP, por sus siglas en inglés (Fiber Reinforced Polymer). Estas fibras, a su vez, pueden ser de dos tipos: fibras sintéticas o naturales. Dentro de las fibras sintéticas se encuentran principalmente las fibras de carbono y las fibras de vidrio, las cuales son empleadas en los distintos sectores industriales mencionados anteriormente debido a que tienen unas

---

propiedades mecánicas excepcionales (Gómez et al., 2017). Los compuestos conformados a base de fibras de carbono son denominados CFRP, de la misma manera, aquellos compuestos que están hechos a base de la fibra de vidrio se denominan GFRP, y sus principales usos se ven en la elaboración de piezas automotrices, fabricación de armazones para aviones o naves marítimas debido a su baja densidad, elaboración de líneas de vida empleadas en seguridad industrial debido a su eficiencia ante esfuerzos de tensión, elaboración de textiles de alta resistencia, recubrimientos anticorrosión en zonas marítimas, entre otros.

Si bien, el uso de los FRP es más frecuente en otros sectores diferentes al de la construcción, se debe reconocer que en la últimas décadas se ha incrementado las aplicaciones en este campo (Pradeep, Raja, Ramachandran, & Retnam, 2015). Los materiales tradicionales empleados en la industria de la construcción como el concreto reforzado, el acero estructural, el aluminio, los bloques de mampostería, entre otros, tienen un comportamiento muy eficiente ante las distintas sollicitaciones a las que se ven sometidos durante su vida útil, y a bajos costos, a diferencia de los FRP, que pueden, en algunos casos, llegar a encarecer los proyectos de construcción. Con base en esto, se puede decir que el uso de los FRP en la construcción se ve limitado en ocasiones por temas de presupuesto, si se compara el costo de emplear materiales tradicionales (López M., 2012).

El uso de los materiales compuestos reforzados con fibras en aplicaciones de la construcción civil y arquitectura se ha venido haciendo poco a poco. Hoy en día se emplean FRP en acabados arquitectónicos, tales como pisos, paneles decorativos, fachadas livianas, elementos no estructurales, impermeabilización de cubiertas, sistemas de protección o aislamientos, entre otros. En lo que tiene que ver con la construcción civil, el uso de FRP ha ido mejorando notablemente, pues hoy en día su uso se extiende desde aplicaciones en la ingeniería estructural, hasta aplicaciones en la ingeniería geotécnica y de cimentaciones (Al-mahaidi, 2018). Desde el punto de vista estructural, se han logrado desarrollar aplicaciones de los FRP en reforzamientos estructurales, siendo los CFRP los compuestos más usados, con los cuales se pueden reforzar vigas sometidas a flexión, vigas sometidas a cortante, aumentar la capacidad de columnas dando confinamiento al núcleo de concreto (encamisando), hasta reforzamiento y aumento de la resistencia de los nudos de unión viga-columna, brindando una capacidad mayor a la estructura (Tudjono, Lie, & Hidayat, 2015). En la ingeniería de cimentaciones se emplean FRP para estabilizar suelos, contención de taludes, filtros para manejos de aguas, entre otros.

Dentro de los avances más importantes en el uso de materiales compuestos en ingeniería, se destaca el uso de fibras naturales como refuerzo de los FRP, o como se les denomina NFRP por sus siglas en inglés (natural fiber reinforced polymer). Las fibras naturales pueden llegar a desarrollar propiedades mecánicas adecuadas que pueden ser aprovechadas en la ingeniería estructural tales como resistencia a la tensión alta, módulos de elasticidad, alargamientos antes de rotura altos, bajos peso, alta resistencia, entre otros (Tong, Chin, Doh, & Gim bun, 2017). La principal ventaja del uso de fibras naturales como

refuerzos de FRP comparados con el uso de fibras sintéticas, es que, las fibras naturales producen un gasto energético menor que el que demanda la elaboración de fibras sintéticas (Joshi, Drzal, Mohanty, & Arora, 2004) generando un menor impacto ambiental. Desde el punto de vista económico, las fibras naturales tienen un costo menor que las fibras sintéticas, lo cual puede ser ventajoso para usos y aplicaciones en el sector de la construcción. Si bien, las propiedades mecánicas de las fibras naturales son inferiores a las que se pueden obtener con el uso de fibras sintéticas, diversos estudios (Hafizah et al., 2014; Menna et al., 2015; Tong et al., 2017) han demostrado que es viable el empleo de estas fibras en aplicaciones estructurales tales como reforzamiento de elementos estructurales o no estructurales, pues aumentan de la capacidad a flexión y control de deflexiones en vigas (Yan, Su, & Chouw, 2015), entre otros.

## 1.1 Fibras Naturales

Las fibras naturales se pueden definir brevemente como aquellas que no son fabricadas por el hombre, las cuales pueden provenir de las plantas o de algunos animales (Mohammed, Ansari, Pua, Jawaid, & Islam, 2015). En las últimas décadas, el uso de las fibras naturales ha aumentado considerablemente, pues como se mencionó anteriormente, poseen ciertas ventajas tanto ambientales como económicas, si se comparan con las fibras sintéticas. A nivel mundial, dentro de las fibras naturales más empleadas y comercializadas se encuentran el bambú, bagazo de caña de azúcar, yute, kenaf, lino, sisal, cáñamo y coco (Ku, Wang, & Trada, 2011). En la Tabla 1-1 se muestra la producción a nivel mundial de la fuente de donde se obtienen estas fibras (Faruk, Bledzki, Fink, & Sain, 2012). Así mismo, dependiendo de donde se obtengan las fibras se pueden clasificar en fibras de estera (yute, lino, cáñamo y kenaf) las cuales se caracterizan por ser extraídas directamente de las hojas de las plantas, fibras foliares (sisal, bagazo de caña de azúcar) que se obtienen de los tallos de las plantas, fibras de semillas (fibra de coco) productos de los frutos que producen las plantas, entre otros (Ticoalu, Aravinthan, & Cardona, 1997).

**Tabla 1-1:** Producción mundial de fuentes de fibras naturales. Adaptado de (Faruk et al., 2012)

<b>Fuente de la fibra</b>	<b>Producción Mundial (t)</b>
Bambú	30.000.000
Bagazo de caña de azúcar	75.000.000
Yute	2.300.000
Kenaf	970.000
Lino	830.000
Sisal	375.000
Cáñamo	214.000
Fibra de coco	100.000

En los últimos años, se ha estudiado el uso de fibras naturales para aplicaciones propias de la ingeniería y la construcción, siendo las fibras de yute, kenaf, sisal, lino y bambú las más empleadas en este sector (Tong et al., 2017). A continuación, se presenta una breve

descripción estas fibras. En la Tabla 1-2 y Tabla 1-3 se presentan la composición química y propiedades mecánicas de las fibras mencionadas, respectivamente.

**Tabla 1-2:** Composición química de fibras naturales. Porcentaje en peso. Adaptado de (Mohammed et al., 2015)

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Otros (%)
Yute	61-71	14-20	12-13	0.5
Kenaf	72	20.3	9	-
Sisal	65	12	9.9	2
Lino	71	18.6-20.6	2.2	1.5
Bambú	26-43	30	21-31	-

**Tabla 1-3:** Propiedades físico-mecánicas de fibras naturales. Adaptado de (Mohammed et al., 2015) y (Tong et al., 2017)

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento en la rotura (%)
Yute	1.46	400-800	10-30	1.8
Kenaf	1.20	295	43	1.6
Sisal	1.33	600-700	38	2-3
Lino	1.41	100-1500	60-80	1.6
Bambú	0.91	140-800	46	1.4

### 1.1.1 Fibras de yute

El yute es una planta de la familia de las malváceas, que se cultiva en regiones tropicales y en algunos países del sur de Asia, como India, países del norte de África como Egipto y Sudan, entre otros (Tara Sen & Reddy, 2013). La fibra de yute se obtiene al separar las primeras capas del tallo de la planta, mediante procesos mecánicos en los cuales se emplean unos molinos o rodillos que separan las fibras sin generar daños significativos en esta. El uso de la fibra de yute tiene sus inicios hace ya varios siglos, cuando se empezó a usar en la elaboración de tejidos para almacenamiento de otros productos agrícolas (Pradeep et al., 2015), y actualmente sus usos se han extendido para decoración de paredes, elaboración de cuerdas, tejidos para cubrir áreas y materiales de aislamiento y almacenamiento de productos, entre otros (Tong et al., 2017).

Si bien, el proceso de extracción de las fibras de yute es relativamente sencillo, en ocasiones estas son sumergidas en agua la cual se agita a bajas revoluciones generando una ligera expansión de la fibra. Las fibras de yute están compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa y una pequeña cantidad de lignina (Tabla 1-2) que trae consigo proteínas y extractos inorgánicos (Tara Sen & Reddy, 2013) y poseen una densidad baja, y a su vez pueden desarrollar módulos de elasticidad competentes.

### 1.1.2 Fibras de kenaf

El Kenaf es una planta de la familia de las malváceas también conocida científicamente como *Hibiscus cannabinus*, la cual tiene características similares a las que presenta el algodón y el yute (Alam, Hassan, & Muda, 2015), se cultiva principalmente en el sudeste asiático, en algunas regiones de África y en el sur de Europa. Los principales productores de kenaf a nivel mundial son China e India (Hafizah et al., 2014), países en los cuales el principal uso que se le da a esta planta es la extracción de sus fibras para elaborar productos textiles, sin embargo, también es empleado en la industria automotriz, la industria de telecomunicaciones y en las últimas décadas ha presentado un aumento en las aplicaciones de la construcción (Ribot, Ahmad, Mustaffa, & Alam, 2011).

La extracción de fibras de kenaf se hace directamente del tallo de la planta, por medio de procesos mecánicos (Tong et al., 2017), con los cuales no se degrada la fibra considerablemente. La composición química de estas fibras se caracteriza por su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, con bajo contenido de lignina (Tabla 1-2), sin embargo, debido a sus propiedades mecánicas es una fibra muy empleada, pues tiene una densidad baja y resiste esfuerzos de tensión considerables presentando deformaciones en la falla de hasta el 6.9 %, como se muestra en la Tabla 1-3.

### 1.1.3 Fibras de sisal

El sisal es una planta que se cultiva en regiones semiáridas de México, Brasil y algunas regiones de África, pero se considera que su origen se produjo en México y Centro América, pues existen registros desde la época del imperio Maya, que datan de usos de esta planta para elaboración de cuerdas y tejidos, de tal manera que en la lengua Maya el sisal se conoce como *Henequén* (T. Sen & Jagannatha, 2011). Se caracteriza por tener unas grandes hojas que se abren alrededor de su tallo, asemejándose a una “piña gigante”, de estas hojas se extraen las fibras que se emplean para la fabricación de artesanías, muebles, papel y eventualmente en procesos de construcción. La extracción de las fibras se realiza por medio de un proceso manual, en la cual se emplean cuchillos o discos acerrados que van cortando las hojas en la dirección más larga (Tara Sen & Reddy, 2013), obteniendo así fibras largas que son aprovechadas para elaborar diferentes productos, como los mencionados anteriormente.

El componente principal de las fibras de sisal, es la celulosa, la cual llega a ser hasta del 65%, mientras que la hemicelulosa y lignina pueden estar entre un 9% a 12%. Desde el punto de vista mecánico, se destaca su capacidad de resistir esfuerzos de tensión, pues estos pueden llegar a de hasta 700 MPa y alcanzar deformaciones antes de la falla de hasta el 3%, razón por la cual, uno de sus principales usos desde hace muchos años es la fabricación de sogas y cuerdas (Alberto Pérez Gracia, n.d.). En las Tablas 1-2 y 1-3 se muestra la composición química y las propiedades mecánicas de las fibras de sisal respectivamente.

### 1.1.4 Fibras de lino

El lino, científicamente llamado *Linum usitatissimum*, es una planta que se ha empleado desde hace siglos por la humanidad, sus primeros registros datan en Egipto en el siglo IV A.C., en donde se empleaban tejidos de lino en las mortajas que envolvían a los cuerpos momificados, también se usaba en Turquía en desde esos tiempos, en la fabricación de productos textiles (Ali et al., 2018). Si bien, el proceso de preparación de las fibras de lino es complejo, pues necesita de procesos mecánicos y químicos, esta fibra es ampliamente usada en la fabricación de ropa pues es muy dócil al momento de hilar y demás (Mohammed et al., 2015).

Las fibras de lino se caracterizan por que están compuestas por un alto contenido de celulosa (hasta un 71%) y de hemicelulosa (entre 18 y 20%). Por esta razón la absorción de agua de las fibras tanto en procesos de manufactura o ya en uso, se considera alto, pues puede alcanzar valores de hasta un 20% (Ticoalu et al., 1997). Dentro de sus propiedades mecánicas, se destaca la resistencia a la tensión que pueden desarrollar, pues esta alcanza esfuerzos de hasta 1500 MPa y presenta módulos de elasticidad que hasta 80 GPa, así como deformaciones antes de la falla entre 1.2% y 1.6% (Charlet, Eve, Jernot, Gomina, & Breard, 2009). La composición química y las propiedades de la fibra de lino se presentan en las tablas 1-2 y 1-3 respectivamente.

### 1.1.5 Fibras de bambú

El bambú es una planta que pertenece a la familia de los pastos Poaceae y al género Bambusoidae, el cual hace parte de la familia de las gramíneas, una las familias más extensas e importantes que emplea el ser humano para diversos usos (Liu, Song, Anderson, & Chang, 2012) y está presente en todos los continentes, menos en Europa. A su vez, se reconoce como una de las plantas de más rápido crecimiento a nivel mundial y es de vital importancia en los ecosistemas en los cuales está presente, pues ayuda a la conservación de la biodiversidad y el proceso de cultivo se considera sostenible, pues no amenaza la conservación de los bosques tropicales (Zakikhani, Zahari, & Sultan, 2014).

Como se mostró en la Tabla 1-1, el bambú tiene una gran productividad (Faruk et al., 2012), esto debido a que sus propiedades mecánicas son muy competentes para usos estructurales, de tal manera que actualmente se construyen estructuras de mediana complejidad empleando elementos estructurales elaborados con bambú .

Las fibras de bambú son extraídas directamente de los tallos de la planta mediante procesos mecánicos, biológicos o químicos, los cuales se definen con base en el uso que se le vaya a dar a la fibra, pues se debe procurar una afectación mínima de esta. Los procesos mecánicos se basan en la extracción manual de las fibras, o empleando rodillos o piedras para esto. Los procesos biológicos son aquellos en los se usan ciertas enzimas para lograr una separación, o descomposición de la lignina que está adherida a las fibras. Los procesos químicos están basados en separar la celulosa, la hemicelulosa y la lignina,

estos procesos son muy efectivos, pero en ocasiones deterioran en exceso la fibra (Estrada, 2010). En Colombia también se encuentra presente el bambú, la especie más abundante de esta planta es la *Guadua angustifolia*, la cual se considera que tiene la mejores propiedades mecánicas y físicas entre las demás especies de bambúes, y además, tiene una durabilidad alta por naturaleza (Cuéllar & Muñoz, 2010).

Finalmente se puede decir que las fibras de bambú son las fibras naturales más competentes desde el punto de vista mecánico si se comparan con las demás fibras mencionadas, debido a que presentan una baja densidad, desarrollan módulos de elevados, y su deformación en la falla es baja (T. Sen & Jagannatha, 2011). En la tabla 1-3 se muestra la comparación de las propiedades mecánicas de las fibras naturales más empleadas en el sector de los materiales compuestos.

## 1.2 Fique

El fique es una planta cultivada en Colombia, y en algunos otros países de Suramérica, denominada científicamente como *furcraea sp*, la cual tiene su origen desde hace ya cientos de años en las regiones tropicales de América. En Colombia, se tienen registros del uso del fique desde la época precolombina en la elaboración de cuerdas, redes de pescar, chozas, enjalmas, mantas, entre otros usos dado por los indígenas que habitaban el territorio (Martínez, 2010). Actualmente, el cultivo de fique es realizado principalmente por indígenas y pequeños grupos de agricultores, que tienen como actividad económica principal la comercialización de diversos productos agrícolas. Si bien, los cultivos de fique son pequeños, pues en general, los agricultores que se dedican a su producción cuentan con territorios de máximo tres hectáreas, la producción de fique a nivel nacional es alta, siendo los departamentos de Cauca, Nariño, Antioquia, Santander, Caldas, Boyacá y Risaralda (Echeverri et al., 2015). En la Tabla 1-4 se presenta la cantidad de fique que produce cada departamento por año.

La planta de fique se puede encontrar en zonas con pisos térmicos templados o medios, es decir, entre los 1200 y 1800 m.s.n.m., de tal manera que las temperaturas en las cuales se logra un buen cultivo de estas plantas oscilan entre los 18 y 25°C, pero se ha observado que deben estar expuestas a una luminosidad solar de hasta seis horas al día, pues las plantas que están bajo sombra desarrollan hojas débiles y con poca producción de fibras (Mera & García, 2013).

**Tabla 1-4:** Producción de fique por departamentos Colombianos. Adaptado de (Echeverri et al., 2015)

Departamento	Toneladas por año	%
Cauca	7338	40.0
Nariño	6724	36.0
Antioquia	2309	12.0
Santander	1678	9.0
Caldas	141	2.0
Boyacá	87	0.7

Risaralda

49

0.3

En Colombia se producen diferentes tipos de fique de los cuales se extrae la fibra de fique, que se conoce popularmente como cabuya, entre los cuales los más importantes son (Martínez, 2010):

- Fique Tunosa común: también conocido como *furcraea andina* es nombrado así debido a que se cultiva en zonas de alta cordillera, como las que se encuentran en los departamentos de Antioquia y Caldas. Se caracteriza principalmente por tener hojas grandes y espinadas, a las cuales se les extrae un contenido de fibras bajo pero resistentes.
- Fique Uña de águila: recibe su nombre debido a que sus hojas tienen espinas encorvadas en sus bordes y en su punta presenta un pequeño “aguijón”. Esta es la planta más empleada en los departamentos de Cauca y Nariño, y se caracteriza por producir fibras de mejor calidad y de alta resistencia.
- Fique Bordo de oro: recibe este nombre debido a que sus hojas adquieren un tono verde brillante con una línea amarilla con espinas pequeñas. La producción de este tipo de fique se da en zonas con temperaturas entre los 20 y 25°C, con alturas sobre el nivel del mar entre los 1200 y 1600 m, como las que se presentan en algunas partes de los departamentos de Boyacá y Santander. Se caracteriza por producir una gran cantidad de fibra, pero no tan resistentes como las mencionadas anteriormente, por tal razón el uso de la cabuya que se extrae de estas se emplea principalmente en elaboración de artesanías (Echeverri et al., 2015).
- Fique Ceniza: recibe este nombre porque sus hojas de color verde por encima y por debajo presentan un color grisáceo, a diferencia de los mencionados anteriormente, sus hojas carecen de espinas. Se caracteriza principalmente por que produce una gran cantidad de fibra, la cual es delgada y de textura suave, por lo cual es empleada para fabricar artesanías o tejidos como enjalmas (Mera & García, 2013).

### 1.2.1 Producción de la fibra de fique

Como se mencionó anteriormente, en Colombia la fibra de fique se conoce como cabuya. Se caracteriza principalmente por ser de color amarillo y por ser larga, a diferencias de otras fibras naturales, las cuales, por su configuración celular, o por su proceso de extracción son de longitudes cortas. Dentro del proceso de extracción de esta fibra, solo se aprovecha alrededor del 5% del peso total de la hoja, y el 95% sobrante se conoce como bagazo, que por lo general es desechado (Echeverri et al., 2015). Las fibras de fique tiene gran similitud con las fibras de sisal, de tal manera que es frecuente encontrar estudios en los que se suelen confundir estas dos fibras (Pinzón Galvis, 2013). Sin embargo, el proceso de extracción y producción de la fibra de fique es más complejo y consta de diferentes etapas como cultivo, corte, despalmado, desespinado, desfibrado, fermentación, secado y empaque o almacenamiento (Echeverri et al., 2015). A continuación, se presenta una breve descripción de estas etapas:

- **Corte:** consiste básicamente en despendar las hojas de la planta, los agricultores llaman a estas hojas “pencas”. Este proceso se realiza mediante elementos cortantes como machetes u hoz, y se debe ser cuidadoso al realizar los cortes, pues si no se hace adecuadamente puede deteriorarse la planta. Algunos de los cuidados que se deben tener son cortar solamente hojas maduras, con ángulos menores a 40° respecto a tallo, efectuar solo entre tres y cuatro cortes al año, hacer el corte lo más cercano al tallo, entre otros (Martínez, 2010).
- **Despalmado:** consiste básicamente en cortar las hojas por la mitad, para reducir su longitud y facilitar el proceso de extracción de la fibra.
- **Desespinado:** en este proceso se retiran las espinas de las hojas, con el fin de facilitar su transporte y almacenamiento.
- **Desfibrado:** consiste en separar de la corteza de la hoja de las fibras de fique, este proceso se realiza por medio de rodillos que funcionan manualmente o impulsados por motores mecánicos. Para obtener la fibra de fique, se ingresa las bases de las hojas en las máquinas, las cuales cortan las fibras y desechan el bagazo.
- **Fermentación:** una vez obtenidas las fibras, son sumergidas en agua, con el fin de lograr un lavado de la fibra, retirando así algunas de las impurezas presentes en las fibras. Este lavado recibe el nombre de fermentación debido a que se realiza en tranques de cemento o ladrillo por un lapso de 24 horas aproximadamente, estos tanques, deben ser de gran capacidad, pues se necesita que el agua empleada cubra en su totalidad a las fibras.
- **Secado:** una vez son retiradas las fibras de los tanques de fermentación se procede a extenderlas sobre cuerdas o cercas con el fin de que la cantidad de agua que poseen y que aumentó en la fermentación disminuya. En este proceso también es usual retirar algunas impurezas que se detecten a simple vista, empleando cepillos u otros elementos.
- **Empaque:** finalmente las fibras secas, son sacudidas y desenredadas, para ser empacadas en manojos de un kilogramo aproximadamente. Estos manojos a su vez, son atados en grupos de hasta 50, para ser distribuidos a los fabricantes de los diversos productos que se realizan con el fique.

### 1.2.2 Usos del fique

Como se mencionó anteriormente, el fique en Colombia se ha usado desde hace muchos siglos, teniendo así sus primeros registros en la época precolombina. Actualmente, se puede decir que los usos que se le da al fique en el país se dividen en tres grandes sectores: artesanal, agricultor y en el sector de la construcción, donde se conocen como fibro-reforzados (Martínez, 2010).

En el sector artesanal, se destacan los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas y Nariño, pues en estos, se encuentran una gran variedad de artesanías dentro de las que se resaltan las alpargatas de fique, que a su vez hacen parte de los trajes típicos y representativos del folclor nacional, sombreros, bolsos, telares decorativos, entre otros (Echeverri et al., 2015). La elaboración de estas artesanías se hace a partir de la cabuya,

---

la cual es hilada mediante husos o ruelas mecánicas, eventualmente se le da color, mediante un proceso de teñido con el cual se busca básicamente, mejorar la calidad del producto, y ampliar la oferta del mismo para los usuarios de este tipo de artesanías. Además de estos productos mencionados, también se fabrica papel artesanal hecho a base de las fibras de fique, el cual se considera de buena calidad si se evalúa en términos de rasgado y consistencia, sin embargo, la fabricación de este papel es un tema de investigación, pues si se compara con el papel tradicional o el papel hecho a base de caña de azúcar, el papel de fique presenta desventajas en sus costos y procesos de fabricación (Mera & García, 2013).

En el campo de la agricultura, el fique se usa de muchas maneras, como, por ejemplo, en la producción de biofertilizantes, los cuales son obtenidos a partir de los residuos del proceso de desfibrado, que contienen un alto porcentaje de nutrientes y de materia orgánica que funciona como un abono natural para los cultivos. Otra aplicación del fique en este sector, es la elaboración de agrotexiles o biomantos, los cuales son empleados para detener o controlar procesos de erosión, estabilización de taludes, filtros para manejos de aguas subterráneas o de escorrentía y como sistemas de contención o prevención de fenómenos de remoción en masa (M. Hidalgo, Muñoz, & Quintana, 2012). Debido a que las fibras de fique son largas, el principal uso que se les da en la agricultura es la fabricación empaques para productos agrícolas. A estos empaques se les conoce como costales (o sacos), estos costales a su vez pueden ser de dos tipos: tupido o semitupido, donde la diferencia principal es la densidad de cada uno, de tal manera que el costal de fique tupido posee hilos hechos de fibra que están muy pegados entre sí, en dos direcciones, formando cuadrículas entre hilos, con espaciamentos casi nulos, mientras que, en los costales semitupidos estos espaciamentos con más grandes, es decir el costal es menos denso (Teles et al., 2015). Finalmente, cabe mencionar, que con la fibra de fique se elaboran lazos, cuerdas, enjalmas, cinchas, retrancas, entre otros productos de uso típico en las labores del campo.

En el campo de la ingeniería y la construcción, la fibra de fique se emplea para la elaboración de los materiales denominados Fibro Reforzados, los cuales surgieron gracias investigaciones que buscaban evaluar la sustitución de fibras como el asbesto o la fibra de vidrio en la fabricación de materiales de construcción (Alberto Pérez Gracia, n.d.; Gómez, Alvarez, Rojo, & Vázquez, 2012; Pinzón Galvis, 2013). Actualmente se fabrican tejas, bloques, cielo rasos, postes y adoquines empleando la fibra de fique como base del fibro refuerzo (Martínez, 2010). Comúnmente, los fibro-reforzados tienen como matriz cementante o aglutinante cemento hidráulico, arcilla o yeso, y han demostrado ser competentes para resistir impactos, resistencia a la compresión de entre 17 y 21 MPa, y eventualmente resistir altos esfuerzos de flexión (M. A. Hidalgo, Muñoz, & Quintana, 2011). Debido a las propiedades mecánicas que presentan las fibras de fique se han desarrollado estudios para más aplicaciones estructurales del fique, como por ejemplo reforzamiento de muros de mampostería (Menna et al., 2015), fabricación de NFRP empleando fibras de fique (Muñoz & Mina, 2014), (M. Hidalgo et al., 2012), (Ramón Valencia et al., 2015), entre otros.

### 1.2.3 Propiedades químicas y mecánicas de la fibra de fique

Dentro de las propiedades químicas de las fibras de fique se destaca el alto contenido de celulosa y hemicelulosa, que están alrededor del 60 y 30% respectivamente (Muñoz, Hidalgo, & Mina, 2018). Desde el punto de vista mecánico, las fibras de fique han mostrado un buen comportamiento, pues tienen una densidad baja de aproximadamente  $1.10 \text{ g/m}^3$ , desarrollan esfuerzos de tensión del orden de los 310 MPa, un módulo de elasticidad promedio de 7.50 GPa, y un alargamiento en la rotura cercano al 5%. (Pinzón Galvis, 2013), (Gómez et al., 2012). En la Tabla 1-5 y 1-6 se muestran la composición química y las propiedades mecánicas de la fibra de fique, respectivamente.

**Tabla 1-5:** Composición química de fibras de fique. Porcentaje en peso. Adaptado de (Pinzón Galvis, 2013).

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Otros (%)
Fique	57-60	29-34	13-15	-

**Tabla 1-6** Propiedades físico-mecánicas de fibras de fique. Adaptado de (Muñoz et al., 2018).

Fibra	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	Esfuerzo a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento en la rotura (%)
Fique	1.10	310	7.5	4.96

## 1.3 Materiales Compuestos reforzados con fibras naturales

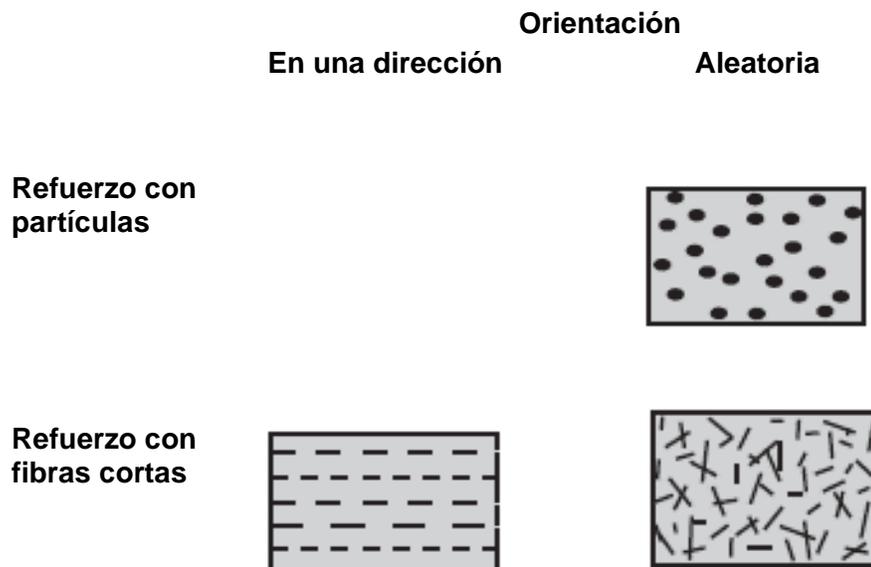
Se denominan materiales compuestos a aquellos que están formados por dos o más materiales o fases, que actúan conjuntamente para obtener así una mayor eficiencia en su comportamiento mecánico (López M., 2012). Estos materiales, generalmente, están conformados por dos fases denominadas matriz y refuerzo. La matriz constituye un material aglomerante empleado para lograr el comportamiento mecánico deseado, como por ejemplo, mayor resistencia a la tensión, aumento de la resistencia a efectos producidos por el cambio de temperatura, resistencia al fuego, entre otros; por otro lado, el refuerzo es el material que aporta gran parte de la resistencia mecánica, dureza y rigidez del compuesto.

Los materiales compuestos son comunes en la naturaleza. Un ejemplo de esto, son los huesos de los mamíferos, los cuales están conformados por una matriz porosa que está reforzada por medio de fibras de colágeno (Segurado, 2004). Otro ejemplo es la madera, que está compuesta por una matriz de lignina, que se refuerza por medio de fibras de

celulosa. El uso de materiales compuestos no es nuevo para el hombre, pues desde hace siglos se emplean ladrillos hechos con adobe, lo cuales constan de una matriz hecha de arcilla reforzada con fibras como el pasto o la paja (Estrada, 2010). Actualmente, el material más empleado en la ingeniería estructural y la construcción es el concreto reforzado, el cual está hecho de una matriz cementante elaborada a base de cemento hidráulico reforzada con barras o fibras de acero (Matallana, 2019).

Dependiendo del tipo de refuerzo, su geometría y orientación, los compuestos que se conforman de dos fases se pueden clasificar de tres maneras: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras cortas y los compuestos de que son reforzados empleando fibras largas. Aquellos que son reforzados por partículas se consideran materiales cuasi- homogéneos e isotrópicos, pues su refuerzo está orientado de manera aleatoria dentro de la matriz. Los compuestos reforzados con fibras cortas son aquellos en los cuales las fibras se introducen de manera discontinua, que pueden estar orientadas en una dirección, de tal manera que se consideran ortotrópicos, o pueden estar orientadas aleatoriamente, caso en el cual se considera material isotrópico. Finalmente, los compuestos reforzados con fibras largas presentan un refuerzo continuo a lo largo de todo el material, este puede estar orientado en una o varias direcciones de las cuales dependerá si es isotrópico u ortotrópico (Estrada, 2010). En la figura 1-2 se muestra la clasificación de los materiales compuestos, dependiendo de la orientación, geometría y tipo de refuerzo.

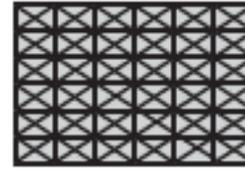
**Figura 1-2:** Clasificación de materiales compuestos. Adaptado de (Estrada, 2010).



Refuerzo con  
fibras largas



Ortotrópico



Isotrópico

### 1.3.1 Matrices poliméricas

La función principal de la matriz es transmitir los esfuerzos a las fibras de refuerzo, así como conglomerarlas y protegerlas, brindando flexibilidad y proporcionando la forma deseada del compuesto. Actualmente, las matrices más usadas son las poliméricas, metálicas y cerámicas; sin embargo, las poliméricas abarcan aproximadamente el 90% de las matrices empleadas en la elaboración de materiales compuestos (Sreekumar, 2008).

Las matrices poliméricas pueden ser de dos tipos, termoestables o termoplásticas. Las matrices termoplásticas están compuestas por polímeros de cadenas lineales, que tienen moléculas con enlaces intramoleculares fuertes y débiles, por tal razón, estas matrices se caracterizan particularmente por que se pueden derretir o ablandar con calor para modificar su forma. La principal desventaja que presentan estos polímeros es que su procesamiento es complejo de controlar, en especial cuando son cristalinos o semi-cristalinos, pues esto hace que su vida útil sea más corta debido a procesos de fatiga, o cambios de temperatura bruscos que pueden debilitar directamente al compuesto. Las matrices termoplásticas más comunes en la fabricación de materiales compuestos son el polietileno, poliestireno, policarbonatos, entre otros (Sreekumar, 2008).

Por otro lado, las matrices termoestables se caracterizan porque bajo la influencia de calor, agentes químicos o luz cambian irreversiblemente. Los polímeros que conforman estas matrices poseen una estructura molecular en forma de red, la cual posee unos fuertes enlaces covalentes, lo que permite que pasen de ser un material fluido y soluble a ser rígido e insoluble (Estrada, 2010). Este tipo de matrices poseen propiedades mecánicas, químicas y térmicas muy competentes, lo que hace que sean los polímeros más empleados en la fabricación de materiales compuestos. Las matrices termoestables más comunes son el poliéster, las poliamidas, el fenol formaldehído y las resinas epóxicas, siendo estas últimas las más empleadas en el campo de la ingeniería y la construcción (Brent, 2006).

Con base en lo anterior, se puede establecer que la materia prima para la elaboración de materiales compuestos está dividida en dos grandes grupos: refuerzo y matriz. El refuerzo a su vez, puede ser obtenido de fibras sintéticas como la de carbono, vidrio, acero, entre otros, o puede provenir de las fibras naturales como las expuestas anteriormente. En la tabla 1-7 se presenta la materia prima para la producción de compuestos.

**Tabla 1-7:** Materia prima para producir materiales compuestos.

	Tipo	Más empleados	Compuesto
<b>Refuerzo</b>	Sintéticas	Carbono, vidrio, acero	FRP
	Naturales	Bambú, yute, lino, sisal, kenaf, fique	NFRP
<b>Matrices Poliméricas</b>	Termoplástica	Polietileno, poliestireno, policarbonatos	FRP
	Termoestable	Poliéster, poliamidas, resinas epóxicas	FRP o NFRP

### 1.3.2 Tratamiento en fibras naturales para elaboración de materiales compuestos

Las fibras naturales se han convertido en una alternativa muy eficiente, desde el punto de vista de la sostenibilidad en la fabricación de materiales compuestos. Sin embargo, presentan ciertas desventajas al momento de ser empleadas como material de refuerzo de una matriz polimérica. La principal desventaja que existe en el uso de las fibras naturales (si se comparan con las fibras sintéticas) es que estas tienen un carácter hidrofílico, lo que genera cierto grado de incompatibilidad con las matrices poliméricas, pues estos polímeros generalmente son hidrofóbicos (Muñoz & Mina, 2014). Para mitigar estos efectos negativos, se han desarrollado diferentes tipos de tratamientos o procedimientos sobre las fibras, los cuales pueden ser procedimientos físicos, químicos o la combinación de estos dos. El objetivo principal de estos tratamientos es modificar la composición de las paredes celulares de las fibras, las cuales están compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. En ese sentido, se han estudiado diferentes tipos de procedimientos como por ejemplo la esterificación, que es un tratamiento químico en el cual se emplean ésteres para producir una reacción entre los ácidos carboxílicos y alcoholes que actúan sobre las paredes de la fibra reduciendo así la celulosa y hemicelulosa (Wullin, Endo, & Hirotsu, 2010). La acetilación también se ha implementado como tratamiento químico, en cual se emplean hidroxilos del grupo de los acetilos para generar mejoras en la composición química de las paredes de la fibra (Gañán & Mondragón, 2014). Dentro de los procedimientos físicos se han desarrollado tratamientos con plasma, en los cuales somete la superficie de la fibra a “bombardeo” de moléculas de plasma, las cuales hacen que la rugosidad de la superficie de la fibra aumente con el fin de mejorar la interfaz matriz-fibra en los compuestos (Luna, Mariño, Lizarazo, & Beltrán, 2017). Sin embargo, el tratamiento más importante y más empleado es el de mercerización o tratamiento alcalino (Castro, Palencia, Gutiérrez, Vargas, & Gañán, 2007).

El tratamiento alcalino o alcalinización, consiste en sumergir las fibras en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración determinada, durante un intervalo de tiempo, para luego ser sometidas a un lavado o a la acción de un agente ácido suavizante, logrando así una variación en los componentes de las paredes celulares de la fibra, contribuyendo a la mejora en la interfaz matriz-fibra, generando mejores rendimientos

mecánicos tanto en la fibra como en el compuesto (Castro et al., 2007). Se han desarrollado diferentes estudios (Castro et al., 2007; Cuéllar & Muñoz, 2010; Gómez et al., 2012; Muñoz et al., 2018; Muñoz & Mina, 2014; Raju, Hiremath, & Roy Mahapatra, 2018) que evalúan las variables de este tratamiento como lo son: la concentración del hidróxido de sodio, el tiempo que permanece la fibra sumergida en la solución, la temperatura entre otros, de los cuales se puede concluir que las concentraciones ideales para tratar las fibras están entre el 2 y 5% de NaOH, durante un tiempo de 30 minutos a 5 horas, entre temperaturas de 18 a 25°C. Es importante mencionar, que estas variables deben ser controladas, debido que si las fibras son expuestas a concentraciones altas, tiempos prolongados, temperaturas elevadas, o cualquier combinatoria de estas, se puede deteriorar la fibra generando pérdida en la propiedades mecánicas y químicas (Muñoz et al., 2018).

### **1.3.3 Compuestos reforzados con fibras naturales (NFRP)**

Los compuestos reforzados con fibras naturales están hechos con base de matrices poliméricas, y se les denomina NFRP por sus siglas en inglés (natural fiber reinforced polymer). Las características de estos compuestos están en función de las propiedades de la fibra empleada para su refuerzo y su orientación dentro de la matriz. De acuerdo con la literatura (M. A. Hidalgo et al., 2011; Tong et al., 2017), las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales son altamente, incluso dentro del mismo tipo de fibra. Por otra parte, la orientación de las fibras dentro de la matriz es determinante en el comportamiento mecánico del compuesto, como se expuso anteriormente (ver Figura 1-2). Los NFRP que están conformados por matrices termoplásticas se emplean en la industria automotriz, mientras que los NFRP hechos con matrices termoestables son empleados en el campo de la construcción (Charlet et al., 2009).

En los últimos años, el uso de NFRP para aplicaciones estructurales ha aumentado considerablemente, de tal manera que hoy en día se construyen y diseñan sistemas de cubiertas con estos compuestos, se refuerzan elementos estructurales como vigas de pórticos, vigas o estribos de puentes, entre otros (Mohammed et al., 2015). Dentro de los compuestos reforzados con fibras naturales más comunes, se encuentran aquellos elaborados usando fibras de yute, bambú, lino y kenaf, los cuales han demostrado ser materiales competentes para diferentes solicitaciones estructurales (Tong et al., 2017).

#### **Compuestos de fibra de yute**

Los compuestos reforzados por medio de fibras de yute emplean generalmente matrices de poliéster o resinas epóxicas, y son comúnmente empleados en la elaboración de láminas para reforzar vigas de concreto sometidas a esfuerzos de flexión (T. Sen & Reddy, 2013). Algunos estudios realizados (Pradeep et al., 2015; T. Sen & Jagannatha, 2011; Tong et al., 2017) han caracterizado este tipo de compuestos. Por ejemplo, para contenidos de fibra entre el 20 y 30%, dentro de una resina epóxica, se han obtenido esfuerzos de tracción de hasta 100 MPa (Tong et al., 2017), aumentando considerablemente la capacidad de carga de los elementos estructurales reforzados con

estos compuestos. Es importante aclarar, que los compuestos fabricados con yute generalmente se clasifican como ortotrópicos, pues debido a que sus fibras son largas, éstas se ubican en la matriz de manera paralela al eje principal, generando esta característica, sin embargo, en algunos casos, y con un proceso de tratamiento y corte de la fibra se han fabricado compuestos que podrían ser considerados cuasi-isotrópicos (T. Sen & Reddy, 2013).

### **Compuestos de fibra de kenaf**

Las matrices más empleadas en este tipo de compuestos son las resinas epóxicas, poliéster y el vinilester, con las cuales se fabrican NFRP laminares para usos estructurales o decorativos. Estos compuestos laminares generalmente tienden a tener un comportamiento ortotrópico, debido a que las fibras son largas, sin embargo, para algunos usos textiles, se fabrican compuestos con fibras orientadas aleatoriamente generando así materiales isotrópicos. Se han fabricado compuestos que resisten esfuerzos de tensión entre 58 MPa y 100 MPa, para contenidos de fibra del 15% y el 48% respectivamente (Tong et al., 2017). Además, se ha comprobado que entre mayor sea el contenido de fibra en el compuesto la capacidad de carga aumenta. Sin embargo, se recomienda no trabajar con más del 60% de contenido de fibra pues esto puede generar una interfaz matriz-fibra inestable, ocasionando planos de falla, y por ende disminución en la resistencia final del NFRP (Ribot et al., 2011).

### **Compuestos de fibra de lino**

Este tipo de compuestos son elaborados con los hilos de lino que generalmente son de diámetro pequeño, armados en dos direcciones, siendo las matrices epóxicas las más comunes su fabricación. Algunos estudios (Yan et al., 2015), (Sowndharya, Kathirvel, & Yuvaraj, 2019), han logrado establecer que los compuestos reforzados con lino, necesitan un contenido de fibra superior al 20% para alcanzar propiedades estructurales aptas para ser empleados en refuerzo de vigas sometidas a esfuerzos de flexión o de cortante. Se han fabricados compuestos reforzados con lino que han alcanzado esfuerzos de tensión entre 100 y 112 MPa, así como módulos de elasticidad de entre 8 y 9 GPa. Es importante mencionar, que en algunas aplicaciones como refuerzo de vigas, se elaboran compuesto que se disponen en capas, de tal manera que entre más capas se emplean para consolidar el compuesto, mayores son sus propiedades mecánicas (resistencia a la tensión y módulo de elasticidad) (Yan et al., 2015).

### **Compuestos de fibra de bambú**

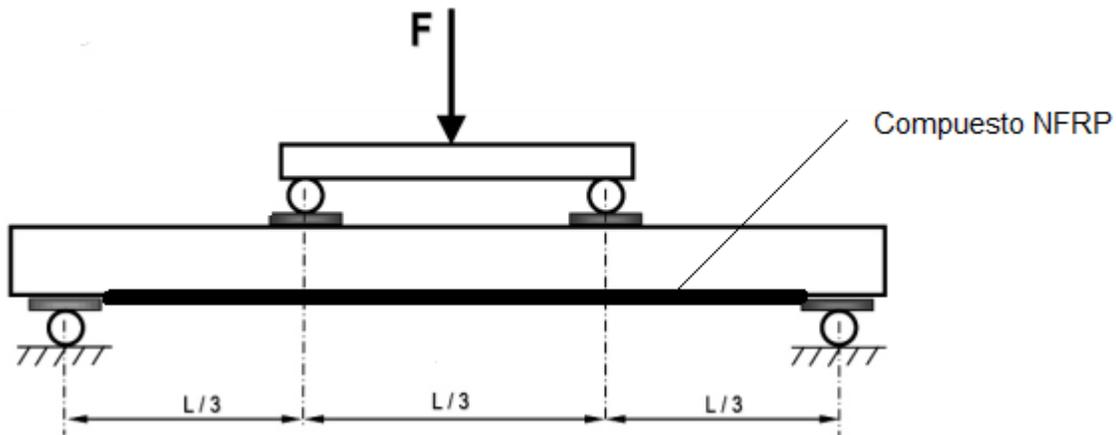
Las matrices más comunes en la fabricación de compuestos reforzados con fibras de bambú son las resinas epóxicas y el poliéster, con las cuales se han elaborado compuestos de una alta competitividad mecánica, de tal manera que en algunas aplicaciones de la ciencia de los materiales, se ha logrado reemplazar el refuerzo de fibras sintéticas de vidrio,

por el uso de fibras de bambú (Tong et al., 2017). Los compuestos a base de bambú, tienen la ventaja de tener una densidad baja y alta resistencia ante cargas de tensión, esto gracias a las propiedades que tienen las fibras de refuerzo, pues como se mencionó anteriormente, el bambú es una de las fibras naturales más competentes, desde el punto de vista mecánico. Por otra parte, los compuestos desarrollados con matrices epóxicas han alcanzado mayores resistencias que los que emplean matrices de poliéster. Por ejemplo, para un contenido de fibra del 70%, con resina epoxi, se alcanzaron esfuerzos de tensión de hasta 265 MPa, con módulos de elasticidad del orden de 12 GPa (Zakikhani et al., 2014), mientras que para compuestos que emplean matrices de poliéster, el contenido de fibra óptimo encontrado es inferior al 20%, alcanzando esfuerzo de tensión del orden de 130 MPa y módulos de elasticidad de 5.5 GPa (Cuéllar & Muñoz, 2010; Tong et al., 2017).

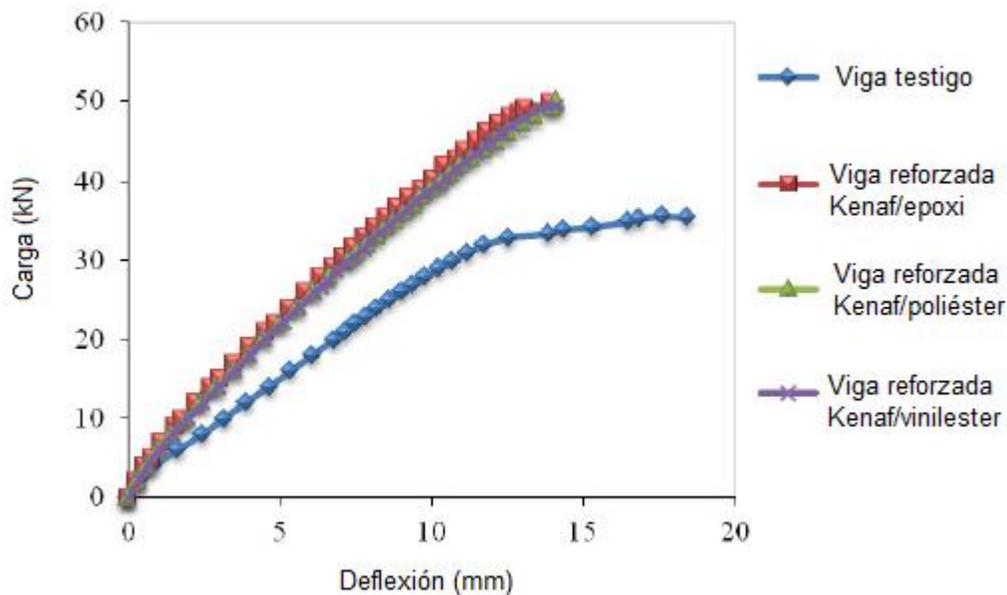
## **1.4 Elementos de concreto reforzados externamente con fibras naturales**

Las fibras de origen natural han recibido mucha atención por parte de los investigadores y trabajadores del sector de la construcción y la ingeniería, debido a los beneficios ambientales y económicos que estas pueden tener. Así pues, en los últimos años se han desarrollado estudios que pretenden evaluar la viabilidad de los usos estructurales de compuestos que se refuerzan con fibras naturales. Si bien, el material de construcción más empleado en todo el mundo es el concreto (Matallana, 2019), este presenta ciertas desventajas, por así decirlo, cuando es sometido a esfuerzos de tensión o corte que superan los valores admisibles que puede resistir antes de la falla, generalmente frágil. Por tal razón, los elementos estructurales de concreto son reforzados interna o externamente para así brindar mayor capacidad de carga, siendo el acero o las fibras de acero, el refuerzo más empleado desde hace ya muchos años. Con base en esto, se han realizado varios estudios en los cuales se evalúa el comportamiento de los elementos de concreto sometidos a flexión, que son reforzados externamente con compuestos hechos a base de fibras naturales, analizando la capacidad de carga, patrones de grietas, comportamiento de deflexiones, módulos de elasticidad, entre otros (Sowndharya et al., 2019). A continuación, se mencionan algunos estudios desarrollados en elementos de concreto reforzados por medio de NFRP.

Estudios experimentales realizados por (Hafizah et al., 2014) muestran el comportamiento de vigas de concreto sometidas a flexión, reforzadas externamente con varios tipos de polímeros reforzados con fibra de kenaf, manejando un 50% de contenido de volumen de fibra. Se utilizaron tres tipos de compuestos: laminares conformados por matriz epóxica, laminares empleando matriz de poliéster y laminares compuestos por matrices de vinilester. En este tipo de ensayos, es común someter la viga de concreto a un estado de flexión pura, si no se quiere tener en cuenta efectos de acciones cortantes, de tal manera que se emplea el montaje denominado “flexión 4 puntos”. En la Figura 1-3 se muestra un esquema del montaje típico para este tipo de ensayos.

**Figura 1-3:** Ensayo a flexión en vigas. Flexión 4 puntos

Los resultados de esta investigación indicaron que todas las vigas que fueron reforzadas con los compuestos mejoraron su rendimiento estructural, obteniendo un aumento del 40% en la carga última resistida y una reducción de la deflexión o flecha de la viga de 24%. También evidenció que el compuesto conformado por matriz epóxica presentó capacidades ligeramente mayores a los compuestos hechos con poliéster y vinilester. En la figura 1-4 se muestra el comportamiento de las vigas reforzadas con los compuestos, comparadas con la viga testigo o viga de control, la cual no tenía refuerzo externo.

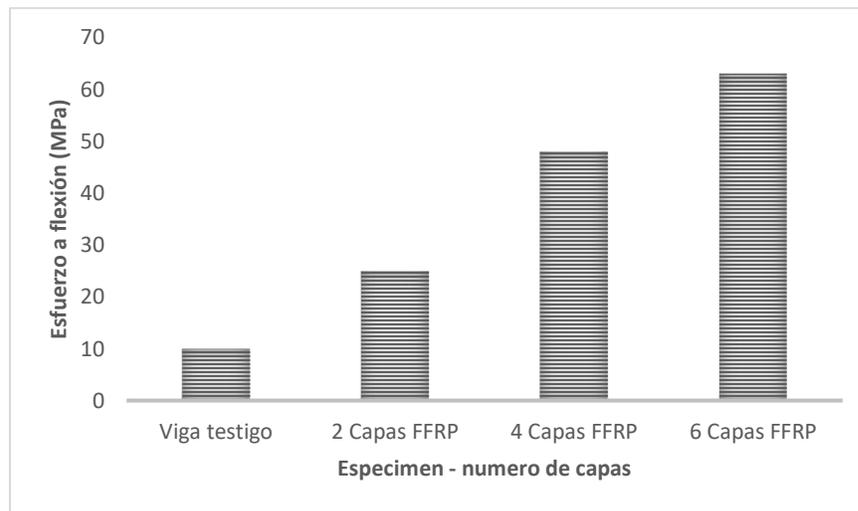
**Figura 1-4:** Comportamiento vigas reforzadas externamente con compuestos reforzados con fibras de kenaf. Adaptado de (Hafizah et al., 2014)

Por otra parte, se han evaluado compuestos reforzados con fibras de lino y matrices epóxicas, denominados FFRP por sus siglas en inglés (Flax Fabric Reinforced Polymer),

en estas investigaciones (Yan et al., 2015) los compuestos se elaboraron en forma de láminas, ubicados en la cara inferior de las vigas, como se indica en la Figura 1-3. Este estudio determinó que las vigas que son reforzadas con estos compuestos aumentan considerablemente su capacidad de carga, y que este aumento es proporcional al número de láminas o de capas que se utilicen. En la Figura 1-5 se muestra el comportamiento ante esfuerzo de flexión de las vigas estudiadas en función de las capas dispuestas como refuerzo.

Los compuestos hechos con las fibras de lino han sido comparados con otros que tienen como refuerzo fibras de vidrio, alcanzando unas propiedades mecánicas similares cuando se emplean como refuerzo externo en vigas de concreto. Por ejemplo, (Hallonet, Ferrier, & Michel, 2019) comparó el comportamiento de los FFRP respecto a los compuestos de vidrio, cuando son sometidos a esfuerzo de tensión ocasionados por la flexión actuante en las vigas de concreto a las que se adhieren como refuerzo, demostrando que el FFRP aumenta la capacidad de carga de los elementos estructurales hasta un 30%, mientras que las fibras de vidrio aumentan entre un 40 y 50% esta capacidad. Sin embargo, las deflexiones en elementos reforzados con FFRP disminuyeron un 20%, logrando un comportamiento aceptable, al ser comparadas con los compuestos de vidrio.

**Figura 1-5:** Comportamiento de vigas reforzadas con FFRP en función de las capas de compuesto empleadas. Adaptado de (Yan et al., 2015)



Al estudiar los polímeros reforzados con fibras de yute y matriz a base de poliéster, (Aladdin, Alaa, & Ezzat, 2018) demostraron que el compuesto puede ser empleado como refuerzo en elementos de concreto como losas y vigas, pues este, alcanzó valores de resistencia superiores hasta en un 70%, respecto a la resistencia nominal del acero dulce (grado 350/240). Esta investigación concluyó que para losas hechas en concreto liviano que son reforzadas con compuesto hechos con fibra de yute, la capacidad a flexión de estos elementos aumentó hasta 5.5 veces, logrando disminuir las deflexiones hasta en un 20 %, planteando así un sistema de losas y vigas hechas con concreto liviano, reforzadas

con este tipo de compuestos, que pueden ser eficientes para edificaciones familiares de uno o dos pisos, ideales para viviendas de interés social o viviendas para el sector rural.

Los compuestos reforzados con fibras de sisal, también se han empleado como refuerzo en elementos de concreto. Por ejemplo, (Machado & Dos Santos, 2017) elaboraron un compuesto con estas fibras y matriz de resina epóxica, el cual al ser puesto como refuerzo en vigas de concreto, demostró que la capacidad de carga de las vigas reforzadas con este compuesto aumentaba hasta 4 veces, en comparación de la viga testigo. Esto sin lugar a duda, puede darnos indicios del potencial uso que tienen los materiales que se refuerzan con las fibras de sisal.

Finalmente, se puede decir, que los NFRP tienen propiedades mecánicas que hacen viable su uso en aplicaciones estructurales, tales como reforzamiento de vigas, losas, columnas, pues no solo mejoran la capacidad de carga de los elementos, sino que también contribuyen en aspectos como la durabilidad del concreto (Sowndharya et al., 2019).

## 2. Fibras de fique

En este capítulo se presentan los procedimientos y resultados obtenidos en el estudio de la caracterización mecánica de las fibras de fique. La evaluación de las propiedades mecánicas de la fibra se realizó para fibras con y sin tratamiento alcalino, con el fin de determinar posibles alteraciones ocasionadas por el tratamiento empleado, con las cuales se reforzó el material compuesto epóxico/fique. Adicionalmente, se presentan las conclusiones obtenidas referentes a las propiedades mecánicas de la fibra de fique.

### 2.1 Metodología

#### 2.1.1 Materiales

Para esta investigación se empleó fibra de fique la cual fue obtenida de costales o sacos, que son utilizados en el almacenamiento de productos agrícolas. En la Figura 2-1 se muestra el tejido del costal de donde se extrajeron las fibras (a) y algunas fibras extraídas (b), las cuales fueron sometidas a pruebas de tensión, para determinar su resistencia y módulo de elasticidad.

**Figura 2-1:** Obtención de la fibra. (a): Costales fabricados con fique. (b): Fibra de fique.



(a)



(b)

Luego de obtener las fibras, se seleccionó un grupo de estas para ser sometidas a tratamiento alcalino, para comparar los resultados de las pruebas mecánicas en fibras tratadas y no tratadas.

## 2.1.2 Tratamiento alcalino

Con base en estudios anteriores (Gómez et al., 2012; Muñoz & Mina, 2014) se realizó un tratamiento alcalino a la fibra, con el fin de mejorar la adherencia en la interfaz matriz-refuerzo al momento de fabricar el compuesto epóxico/fique. Este tratamiento se llevó a cabo sumergiendo la fibra en una solución de hidróxido de sodio (NaOH), al 5% durante 30 minutos. Posteriormente, las fibras tratadas se lavaron cuidadosamente con agua de grifo durante 15 minutos, y fueron secadas a temperatura ambiente. Luego de tener las fibras secas, proceso que tardó hasta 48 horas, se prepararon las muestras para los ensayos de caracterización mecánica. Este tratamiento fue realizado en un cuarto con temperatura ambiente promedio de 18 °C.

## 2.1.3 Determinación del *System compliance*

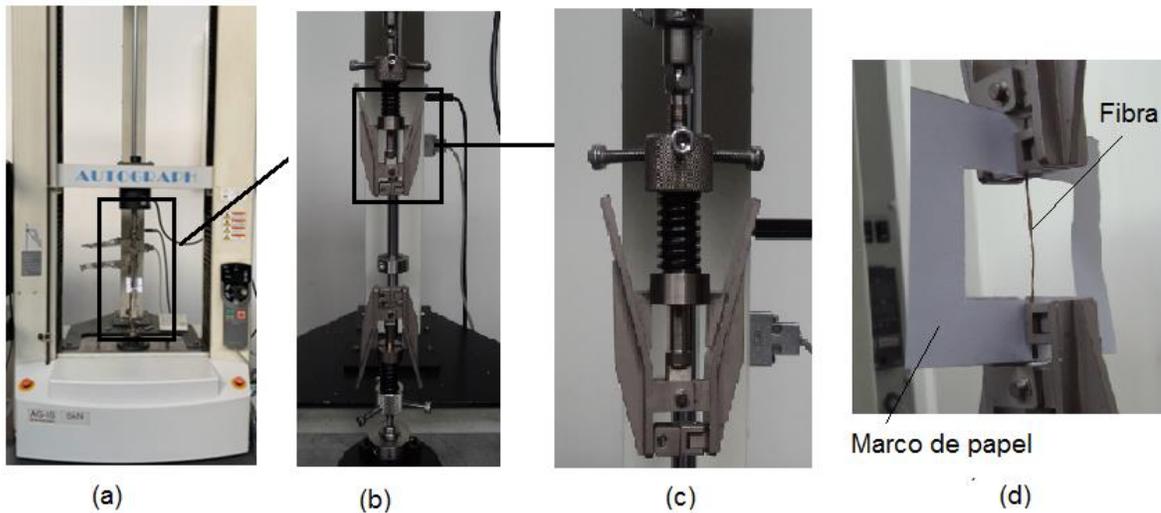
El *System compliance* debe ser determinado para realizar un ajuste a los datos obtenidos experimentalmente en los ensayos de tensión en fibras, pues el alargamiento o deformación que sufre la fibra no es el mismo desplazamiento registrado por el cabezal móvil de la máquina de ensayos. Para la determinación del *System compliance* se adoptó el procedimiento sugerido en el ASTM C1557-14 (ASTM, 2014). Todos los ensayos mecánicos fueron desarrollados en el laboratorio de ensayos mecánicos de la facultad de ingeniería, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, empleando una máquina Shimadzu Autograph serie AG-IS la cual se muestra en la Figura 2-2, con una celda de carga de 5kN a una velocidad de 5mm/s, de tal manera que la falla en las fibras se presentaba dentro de los primeros 30 segundos, siguiendo las recomendaciones del ASTM C1557-14. La temperatura a la cual se realizaron las pruebas de tensión en las fibras de fique estaba entre los 16 y 19°C con humedades relativas entre 42 y 45%.

Al someter las fibras a ensayos de tensión, estas deben ser puestas en marcos de papel, los cuales facilitan la colocación de las muestras en la máquina de ensayos y garantiza el correcto posicionamiento de la muestra, evitando desviaciones de la carga impuesta. La Figura 2-3 muestra el marco empleado, donde la distancia “D” indica la longitud de ensayo<sup>1</sup>. Las fibras de fique fueron fijadas al marco de papel por medio de pegamento de fuerte adherencia conocido comercialmente como “Super bonder”, el cual garantiza una buena fijación de la fibra al marco, para que, al momento de realizar las pruebas de carga la fibra no se desprende o se mueva de las mordazas. Luego del correcto posicionamiento del espécimen en las mordazas usadas para el ensayo, el marco de papel fue cuidadosamente cortado por la línea central. En la Figura 2-4 se presenta la fibra dispuesta en el marco mencionado y el montaje para realizar las pruebas de tensión de la fibra.

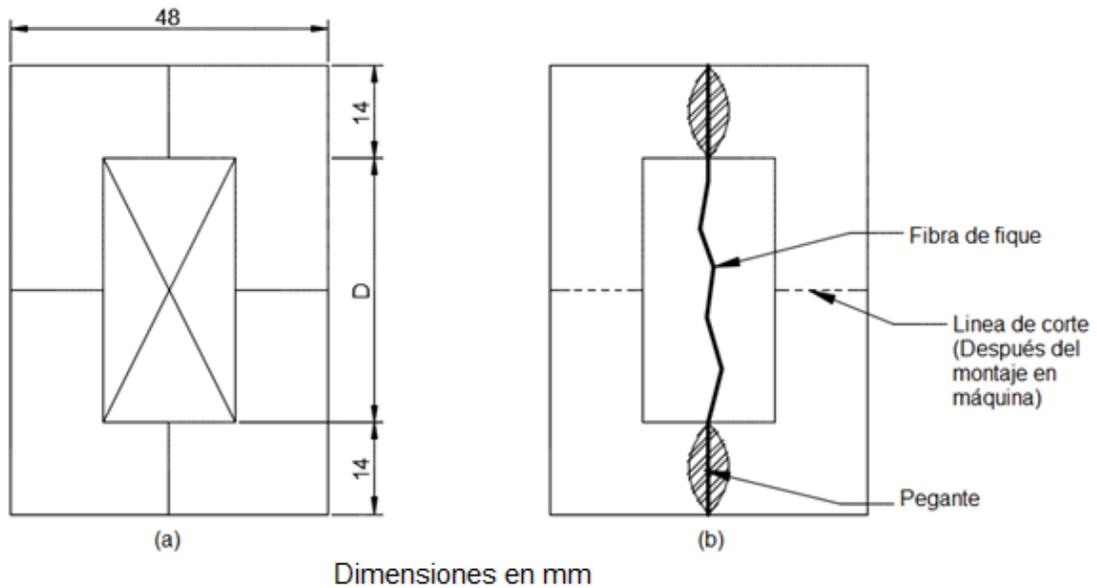
---

<sup>1</sup> Medida en mm.

**Figura 2-2:** Ensayo de tensión en fibras: (a) Máquina de ensayos; (b) sistema de fijación; (c) mordaza empleada; (d) montaje del espécimen para ensayo.



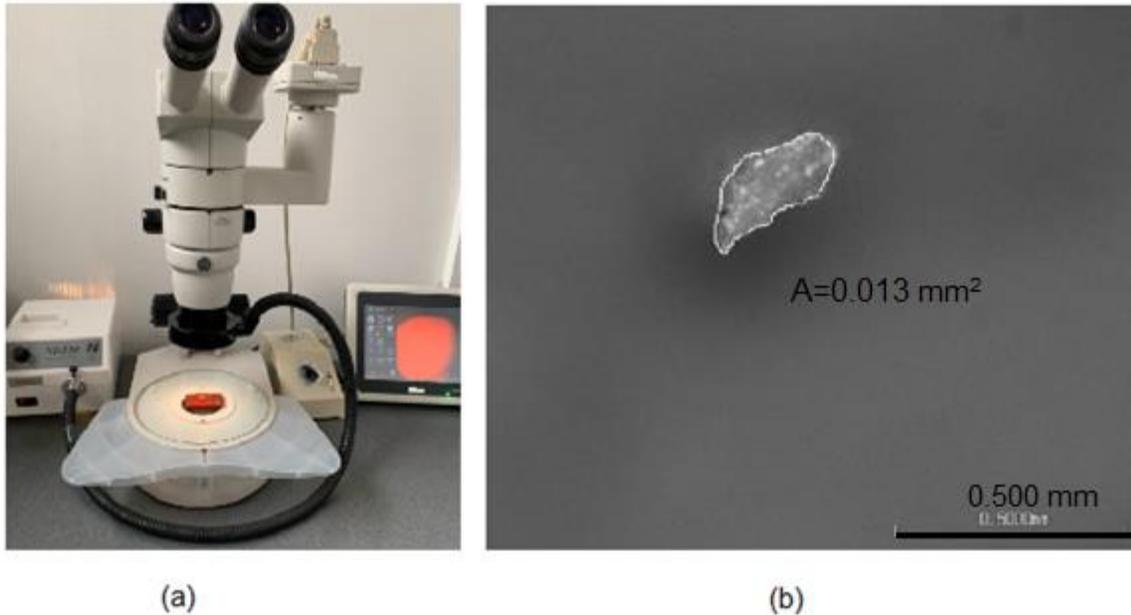
**Figura 2-3:** (a) Marco de papel empleado para ensayo a tensión de las fibras. (b) Disposición de la fibra en el rótulo.



Para calcular los esfuerzos a tensión resistidos por las fibras, se debe conocer el área de la sección transversal de estas. Para esta medición se empleó un estéreo microscopio Nikon SMZ1000, con el cual se obtiene una imagen a escala determinada, a través de la que es posible medir el área transversal de la fibra, empleando un programa procesador de imágenes, para este caso, el programa empleado fue Image-J. En la Figura 2-4 se presenta el estéreo-microscopio empleado y la imagen procesada en Image-J para la medición del área en la sección transversal de las fibras de fique. Este proceso de medición

se realizó a cada una de las muestras, en la sección transversal cercana a la zona de falla empleando un aumento de 4.5X.

**Figura 2-4:** (a) Estéreo- Microscopio empleado. (b) Imagen procesada para medir el área de la sección transversal de las fibras.



De acuerdo con el procedimiento establecido en la ASTM C1557-14, para la determinación del *System compliance* se deben ensayar fibras con diferente longitud de ensayo. Con base en esto, se ensayaron 30 fibras, ordenadas en 6 grupos conformados por 5 especímenes de igual longitud de ensayo; el primer grupo consta de 20 mm de longitud de ensayo, con incrementos de 10 mm por cada grupo. Estos ensayos fueron realizados con fibras sin tratamiento alcalino. En la Tabla 2-1 se muestra la nomenclatura empleada para la identificación de cada longitud de ensayo.

**Tabla 2-1:** Grupos de fibras definidos para ensayos.

Grupo	Longitud de ensayo "D" (mm)
D-20	20
D-30	30
D-40	40
D-50	50
D-60	60
D-70	70

Una vez ensayadas las 30 fibras, para cada ensayo se realizó la gráfica de fuerza ( $F$ ) versus desplazamiento del cabezal móvil ( $\Delta L$ ), con el fin de determinar la pendiente ( $m$ ) de la región lineal de la curva. Seguido a esto, y a partir de todos los datos obtenidos de las

gráficas anteriores, se elaboró la gráfica del inverso multiplicativo de la pendiente ( $m^{-1}$ ) versus la longitud inicial de la fibra ( $l_0$ ) dividida entre su área ( $A$ ) ( $m^{-1}$  vs  $l_0/A$ ), de la cual, mediante una regresión lineal, se obtiene una recta cuyo punto de intersección con el eje de las ordenadas corresponde al valor del *System compliance* ( $C_s$ ).

La relación que existe entre el desplazamiento del cabezal móvil de la máquina de ensayos y el *System compliance* se representa por medio de la ecuación 2-1, donde  $\Delta l$  es el alargamiento que sufre la fibra, debido a las fuerzas de tensión que actúan en ella.

$$\Delta L = \Delta l + (C_s)F \quad (2-1)$$

Al despejar  $\Delta l$  de la ecuación 2-1, se obtiene la ecuación 2-2, la cual es empleada para los cálculos de deformaciones de cada espécimen ensayado.

$$\Delta l = \Delta L - (C_s)F \quad (2-2)$$

La deformación unitaria<sup>2</sup>  $\varepsilon$  de la fibra se determinó por medio de la ecuación (2-3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2-3)$$

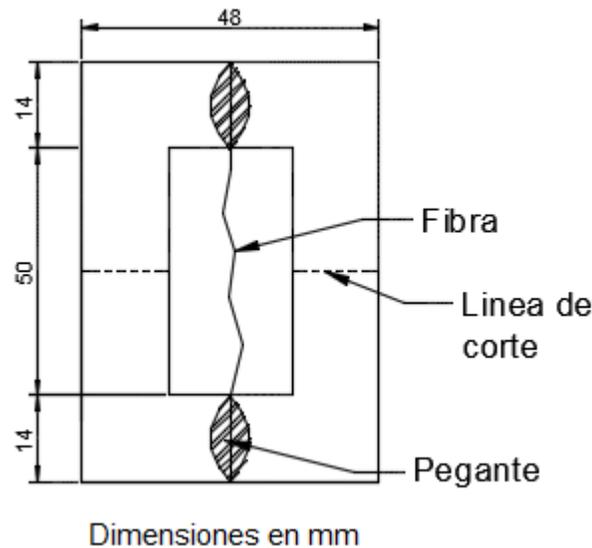
El módulo de elasticidad o módulo de Young se obtuvo a partir de la gráfica de esfuerzo contra deformación unitaria de las fibras, de tal manera que la pendiente de la región lineal esta gráfica corresponde al valor del módulo de elasticidad de la fibra ( $E_f$ ), la región lineal se presentó en el intervalo del 20 al 70% del esfuerzo de tensión.

### 2.1.4 Ensayos a tensión

Los ensayos a tensión se realizaron con el fin de caracterizar mecánicamente las fibras de fique, y fueron hechos sobre dos grupos de fibras, el primero de estos corresponde a fibras sin tratamiento alcalino, mientras que, el segundo grupo corresponde a fibras tratadas con NaOH. Para ambos grupos se ensayaron 10 muestras con una longitud de ensayo de 50 mm, la cual se definió con base en los resultados obtenidos del estudio del  $C_s$ , pues para esta longitud, la desviación estándar del esfuerzo y módulo de elasticidad era la más baja. En la Figura 2-5 se presenta el marco de papel empleado para los ensayos de tensión.

---

<sup>2</sup> La deformación unitaria se obtiene de dividir unidades de longitud (mm) sobre unidades de longitud (mm), de tal manera que se considera adimensional, sin embargo, algunos autores prefieren escribir las unidades mm/mm, m/m, entre otras

**Figura 2-5:** Marco de papel empleado para ensayos de tensión.

Para la obtención del esfuerzo a tensión, alargamiento o deformación, y módulo de elasticidad de las fibras de fique se aplicaron los conceptos clásicos de la resistencia de materiales, aplicado al comportamiento de los sólidos ante cargas axiales (Gere & Goodno, 2013). Estos conceptos también son adoptados por ASTM C1557-14, que como se mencionó anteriormente, fue la guía para los ensayos desarrollados.

El esfuerzo a tensión se determinó aplicando la siguiente ecuación (2-4):

$$\sigma_t = \frac{F_f}{Af} \quad (2-4)$$

donde:

$\sigma_t$ : esfuerzo de tensión, MPa.

$F_f$ : fuerza en la falla, N.

$Af$ : área transversal de la fibra en el plano de falla, mm<sup>2</sup>.

La deformación unitaria  $\varepsilon$  de la fibra se determinó por medio de la ecuación (2-5), en donde  $\Delta l$  se obtiene por medio de la ecuación 2-2, y 50 corresponde a la longitud de ensayo en mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{50} \quad (2-5)$$

El módulo de elasticidad se determinó empleando el mismo procedimiento descrito para la obtención del  $C_s$ .

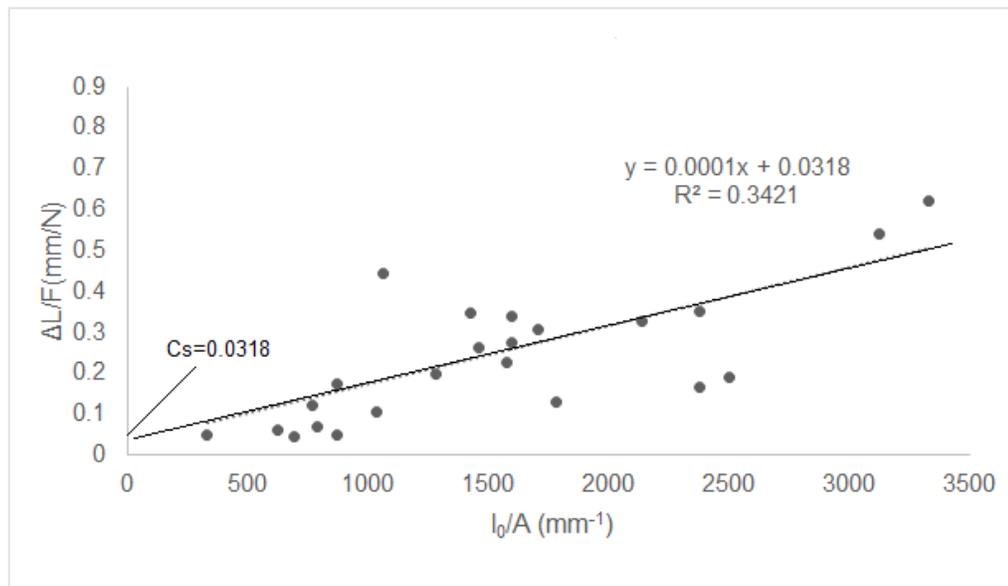
## 2.2 Resultados y discusión

Los resultados presentados en esta sección, no incluyen los valores atípicos que se identificaron empleando un diagrama de cajas (boxplot) (Devore, 2005) para cada conjunto de datos. Los diagramas de caja fueron elaborados con MATLAB 2016a (MathWorks, 2016). Las gráficas y el manejo de datos fueron realizados con la ayuda de Excel 2016 (Microsoft, 2016).

### 2.2.1 System compliance

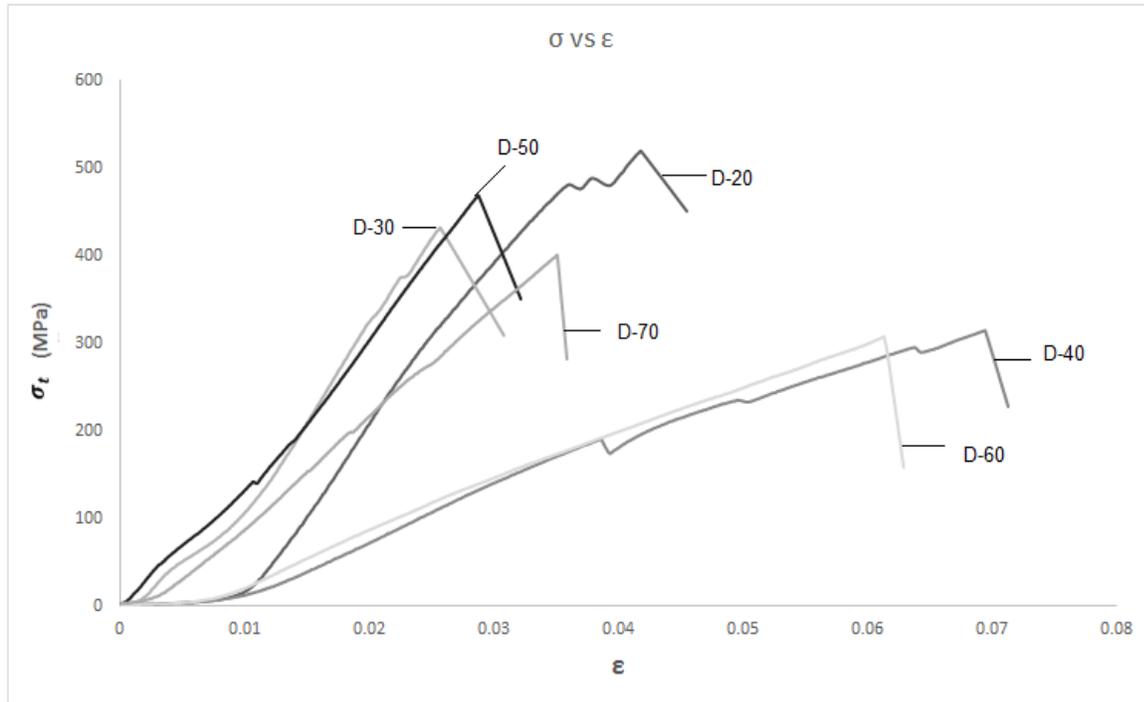
La Figura 2-6 muestra el resultado obtenido en la determinación del *System compliance*. Como se mencionó anteriormente, el valor de  $C_s = 0.038$  se obtiene definiendo el punto donde la curva definida por la regresión lineal se interseca con el eje de las ordenadas. Al emplear una regresión lineal de mínimos cuadrados en la nube de puntos, se obtiene la ecuación de la recta que define el  $C_s$ . El valor de  $R^2$  de la regresión fue de 0.34, el cual es bajo, debido a que, para longitudes de ensayo de 20 y 60 mm se presentaron variaciones en las mediciones de las áreas transversales que pueden estar asociadas las diferentes morfologías de los filamentos de la fibra de fique (Muñoz & Mina, 2014). Estudios relacionados con fibras de yute ensayadas a tensión (Alves, Castro, & Toledo, 2013) obtuvieron valores de  $R^2$  de 0.42, pues el área transversal de las fibras presentaba variaciones cuando se empleó una distancia de ensayo de 40 mm. Por otro lado, algunos investigadores obtuvieron valores de  $R^2$  de 0.90, al estudiar fibras de kenaf solicitadas a tensión, las cuales no presentaron variaciones representativas en sus áreas transversales (Mahjoub & Mohamad, 2014).

**Figura 2-6:** Determinación del *System compliance*  $C_s$ .



En la Figura 2-7 se presenta la curva de esfuerzo - deformación típica para cada grupo de ensayo. En la Tabla 2-2 se presentan los valores promedio de las propiedades mecánicas calculadas para cada una de las longitudes de ensayo.

**Figura 2-7:** Curva esfuerzo-deformación para fibras de fique empleadas para determinar el  $C_s$ .



**Tabla 2-2:** Valores promedios de las propiedades mecánicas de la fibra de fique obtenidos en la determinación del *System compliance*.

Grupo	Longitud de ensayo "D" (mm)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Deformación unitaria (%)
D-20	20	398.85	18.58	10.35
D-30	30	427.49	21.59	3.68
D-40	40	327.20	6.82	5.49
D-50	50	395.67	11.21	5.38
D-60	60	283.44	5.52	5.42
D-70	70	288.16	7.64	9.93

Como se observa en la Figura 2-7, en la mayoría de gráficas, se presentaron pequeños saltos o quiebres de la curva, lo que podría estar relacionado a la ruptura progresiva de las microfibras que conforman a la fibra de fique (Luna, 2020). Adicionalmente, se observa un comportamiento lineal elástico, con una falla frágil para todas las fibras ensayadas, similar

a los resultados registrados en la literatura (Mahjoub & Mohamad, 2014; Muñoz & Mina, 2014). Para las longitudes de ensayo de 20, 40, 60 y 70 mm, en los primeros segundos del ensayo se presentó un aumento rápido de la deformación unitaria sin que el esfuerzo presente mayores cambios. Esto puede ser consecuencia de un acomodamiento que sufre la fibra, pues al tener una forma irregular, no es completamente recta y al realizar un primer tensionamiento la fibra sufre un ligero estiramiento que hace que el espécimen quede completamente recto, momento en el cual empieza a resistir adecuadamente las cargas de tensión a las que está expuesta.

En la Tabla 2-2 se observa que, para las longitudes de ensayo de 20, 30, 40 y 50 mm los valores de resistencia a la tensión son similares. Sin embargo, para las longitudes de ensayo de 60 y 70 mm se evidencia que la resistencia a la tensión disminuyó considerablemente, lo que podría estar asociado a la presencia de defectos en las fibras, que, a medida que la longitud de estas es mayor, la probabilidad de encontrar estas irregularidades puede aumentar, generando una disminución en la resistencia (Castro et al., 2007; Teles et al., 2015). Por otro lado, para las longitudes de ensayo entre 30 y 60 mm los valores de deformación unitaria fueron similares, mientras que para las longitudes de 20 y 70 mm se registraron mayores valores de deformación. De acuerdo con la literatura (Alves et al., 2013; Mahjoub & Mohamad, 2014) cuando se emplean longitudes de ensayo cortas, la deformación en la falla puede aumentar, como ocurrió en las fibras con longitud de 20 mm, este fenómeno puede estar relacionado con el tamaño y la distribución de fallas o micro-defectos en el volumen de la fibra (Silva, Chawla, & Filho, 2008). Por otra parte, con las mediciones realizadas en las fibras de fique objeto de este estudio, no es posible determinar la causa del aumento de la deformación en las fibras con 70 mm de longitud de ensayo.

Se realizó un análisis estadístico para identificar si se presentaban diferencias significativas en las propiedades mecánicas de la fibra en función de la longitud de ensayo. En primer lugar, se empleó el test de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad de cada conjunto de datos (Devore, 2005; Isaza & Acevedo, 2016). Seguido a esto, se verificó la homocedastidad de los datos a través del test de Levene (Luna, 2020). Se aplicó un análisis ANOVA en los casos en los cuales los datos cumplían ambos criterios, el de normalidad y homocedastidad, en los casos donde no se cumplía alguno de los criterios, se empleó el test de Kruskal-Wallis (Ribot et al., 2011).

El test de Shapiro-Wilk analiza la normalidad o no normalidad de una distribución basado en los  $p - valores$ , suponiendo una distribución normal como hipótesis nula que es aceptada si  $p - valor > 0.05$ , en el caso donde no se cumpla esto, la prueba descarta la hipótesis nula e identifica la distribución como no normal.

La prueba de Levene evalúa la hipótesis nula de que las muestras  $J$  provienen de datos con la misma varianza (Spiegel, 1997). El test ANOVA es una prueba paramétrica empleada para comparar medias de más de dos niveles de un solo factor, evaluando la hipótesis de que la media de las muestras es igual; este análisis se basa en el supuesto de que el conjunto de datos cumple con los criterios de normalidad y homocedastidad. Por

otro lado, el test de Kruskal-Wallis es un método no paramétrico para evaluar la hipótesis nula de las medianas de las muestras son iguales. Para todas las pruebas empleadas (Shapiro Wilk, Levene, ANOVA y Kruskal-Wallis) se supone que la hipótesis nula es aceptada si  $p - valor > 0.05$ .

En la Tabla 2-3 se presentan los resultados <sup>3</sup> para los  $p - valores$  obtenidos para los test de Shapiro-Wilk (SW), Levene, ANOVA y Kruskal-Wallis (KW), aplicados a los datos de las propiedades mecánicas empleados para la determinación de *System compliance*. Como se puede ver, en todos los casos los conjuntos de datos se distribuyeron normalmente. Además, en el caso del esfuerzo a tensión y módulo de elasticidad se cumple la homocedasticidad, mientras que, para la deformación unitaria no.

**Tabla 2-3:**  $p - valores$  obtenidos del análisis estadístico de las propiedades mecánicas de la fibra de fique empleando diferentes longitudes de ensayo.

Grupo	Longitud de ensayo "D" (mm)	Esfuerzo de tensión			Módulo de elasticidad			Deformación unitaria		
		SW	Levene	ANOVA	SW	Levene	ANOVA	SW	Levene	KW
D-20	20	0.551			0.465			0.186		
D-30	30	0.078			0.328			0.642		
D-40	40	0.215	0.237	0.734	0.386	0.079	0.284	0.130	0.00004	0.462
D-50	50	0.446			0.159			0.872		
D-60	60	0.966			0.370			0.119		
D-70	70	0.259			0.795			0.081		

Con base en los resultados anteriores, se evidencia que no se presentan diferencias significativas en los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas estudiadas, lo cual podría ser a que todas las fibras ensayadas provienen del mismo costal (fique bordo de oro), y seguramente de la misma planta, lo cual hace que las propiedades de las fibras no varíen significativamente. En algunos estudios realizados en las fibras de fique (Castro et al., 2007; Muñoz et al., 2018) se presentaron variaciones significativas en estas propiedades debido a que se empleó fique proveniente de distintas fuentes y se utilizaron diferentes condiciones para los tratamientos sobre la superficie de la fibra de fique.

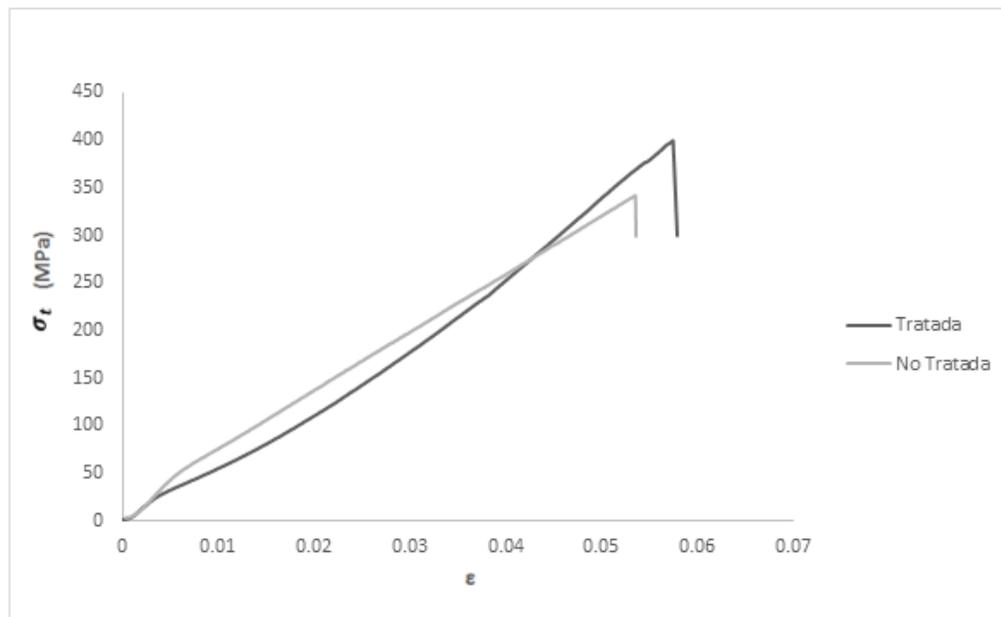
## 2.2.2 Caracterización mecánica de la fibra de fique

La caracterización mecánica de la fibra de fique se realizó sobre fibras sometidas al tratamiento alcalino y para fibras no tratadas, esto con el fin de comparar los resultados e identificar si se presentaban cambios significativos en las prestaciones mecánicas de la fibra, al ser sometidas a un tratamiento alcalino.

<sup>3</sup> Estos fueron obtenidos con la ayuda de rutinas preestablecidas programadas en MATLAB 2016a.

La Figura 2-8 muestra la curva de esfuerzo contra deformación para fibras sometidas al tratamiento alcalino y las fibras sin tratamiento. Se puede observar que las fibras presentan un comportamiento elástico lineal con una falla frágil, que se alcanza con una deformación unitaria de alrededor del 0.055, para ambos casos. Adicionalmente, se ve que para los primeros segundos del ensayo se presenta un acomodamiento de la fibra, que como se mencionó anteriormente, se origina por un primer tensionamiento de la muestra que hace que se estire completamente, adecuándose para resistir las cargas de tensión. La Tabla 2-4 y Tabla 2-5 presentan los resultados de las propiedades mecánicas para fibras tratadas (T) y no tratadas (NT) respectivamente.

**Figura 2-8:** Curva esfuerzo contra deformación de la fibra de fique, con y sin tratamiento alcalino.



**Tabla 2-4:** Propiedades mecánicas de la fibra de fique con tratamiento alcalino.

Muestra	Distancia de ensayo "D" (mm)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento en la rotura (%)
T-1	50	422.49	16.58	4.29
T-2	50	458.16	9.40	5.36
T-3	50	412.49	5.76	3.71
T-4	50	400.00	7.05	5.74
T-5	50	385.94	6.98	5.61
T-6	50	381.51	10.95	4.50
T-7	50	522.21	15.52	3.91
T-8	50	358.11	10.07	4.53
T-9	50	456.63	12.92	4.63
T-10	50	417.37	7.44	5.94
<b>Valor promedio</b>		<b>421.49</b>	<b>10.23</b>	<b>4.82</b>

**Tabla 2-5:** Propiedades mecánicas de la fibra de fique sin tratamiento alcalino.

Muestra	Distancia de ensayo "D" (mm)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento en la rotura (%)
NT-1	50	416.99	6.14	6.55
NT-2	50	307.81	7.53	4.17
NT-3	50	486.09	17.44	3.05
NT-4	50	468.30	16.82	2.88
NT-5	50	299.16	8.13	5.28
NT-6	50	183.69	6.10	3.78
NT-7	50	359.15	7.18	5.94
NT-8	50	409.74	8.15	5.83
NT-9	50	307.64	5.64	6.13
NT-10	50	157.00	0.54	19.48
<b>Valor promedio</b>		<b>339.56</b>	<b>8.37</b>	<b>6.31</b>

Al evaluar la influencia sobre las propiedades mecánicas del tratamiento alcalino empleado, fue posible identificar que en las fibras tratadas se presentó un aumento del 20% en el esfuerzo y un incremento del 22% en el módulo de elasticidad, mientras que la deformación unitaria se redujo en un 25%, con respecto a las fibras sin tratar. Este aparente aumento de rigidez de las fibras tratadas con NaOH podría ser ocasionado por los cambios de la proporción matriz-fibra (teniendo en cuenta que la fibra está compuesta de fibrillas de celulosa que refuerzan una matriz de hemicelulosa y lignina) que al ser expuesta al tratamiento sufre una pérdida de hemicelulosa y alguna parte de lignina (Muñoz et al., 2018). Por otro lado, el aumento en la resistencia a la tensión, podría estar ligado al cambio de orientación molecular de las cadenas de celulosa, ocasionadas por la interacción con el agente alcalino (Castro et al., 2007). Finalmente, se observó que la capacidad de deformación de la fibra se redujo al ser sometida al tratamiento alcalino.

Al realizar un análisis estadístico, empleando los test de Shapiro-Wilk, Levene y ANOVA mencionados anteriormente, se puede identificar que estadísticamente no existen diferencias significativas entre las propiedades mecánicas alcanzadas por la fibra sin tratamiento alcalino y las fibras que fueron tratadas con NaOH. En la Tabla 2-6 se muestran los resultados de los  $p$  – valores obtenidos del análisis estadístico para los dos grupos de fibras estudiadas.

**Tabla 2-6:** *p – valores* obtenidos del análisis estadístico de las propiedades mecánicas de la fibra de fique con y sin tratamiento alcalino.

Grupo	Esfuerzo de tensión			Módulo de elasticidad			Alargamiento en la rotura		
	SW	Levene	ANOVA	SW	Levene	ANOVA	SW	Levene	ANOVA
Tratada	0.827			0.714			0.832		
		0.246	0.724		0.589	0.376		0.353	0.658
No Tratada	0.706			0.265			0.991		

Al comparar los resultados anteriormente expuestos referentes a las propiedades mecánicas de la fibra de fique, con los resultados obtenidos de algunos estudios anteriores sobre la fibra de fique (Gómez et al., 2012; M. Hidalgo et al., 2012; Muñoz et al., 2018) (ver Tabla 1-6 del capítulo 1) se puede identificar que son muy similares, es decir, los valores para el esfuerzo a tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria o alargamiento en la rotura para fibra de fique están dentro del orden de 300 a 400 MPa, 8,0 a 10,0 GPa y 4 a 6 % respectivamente.

## 2.3 Conclusiones del estudio de la fibra de fique

Al determinar el *System compliance* para los respectivos ajustes del desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos se obtuvo un valor de  $C_s = 0.0318$ . Adicionalmente, es importante mencionar que la resistencia a la tensión disminuyó cuando se emplearon longitudes de ensayo de 60 y 70 mm. Por otro lado, se identificó que, estadísticamente no se presentan diferencias significativas en las propiedades mecánicas al variar la longitud de ensayo en las fibras de fique.

Al comparar las propiedades mecánicas de la fibra de fique sin tratamiento alcalino y la fibra sometida a este tratamiento se identificó que las fibras tratadas aumentaron la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad, mientras que su alargamiento en la rotura se redujo, respecto a las fibras sin tratamiento. La comparación de resultados también permitió identificar que estadísticamente no se presentaron diferencias significativas entre las propiedades mecánicas obtenidas para las fibras con y sin tratamiento alcalino.

El esfuerzo a la tensión resistido por la fibra de fique está entre los 300 y 400 MPa, el módulo de elasticidad o módulo de Young que pueden desarrollar está entre los 8 y 10 GPa mientras que el alargamiento en la rotura presenta valores dentro del 4 y 6%. Estos valores son similares a los reportados en la literatura.

## 3. Compuestos

Se denominan materiales compuestos a aquellos que están formados por dos o más materiales o fases, que actúan conjuntamente para obtener así una mayor eficiencia en su comportamiento mecánico (López M., 2012). En este capítulo se presenta el estudio de los materiales compuestos usados para el reforzamiento externo de vigas de concreto sometidas a flexión. Este apartado está dividido en dos partes: la primera de estas presenta la metodología y resultados obtenidos para la caracterización mecánica de la matriz epóxica, el tejido de refuerzo empleado y del compuesto fabricado (epóxico/fique). En la segunda parte del capítulo se expone la metodología llevada a cabo para reforzar externamente vigas de concreto sometidas a flexión, empleando el compuesto epóxico/fique y los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del estudio de los compuestos.

### 3.1 Compuesto epóxico/fique

Se denominó compuesto epóxico/fique al NFRP fabricado con una matriz epóxica reforzada con fibras fique.

#### 3.1.1 Materiales

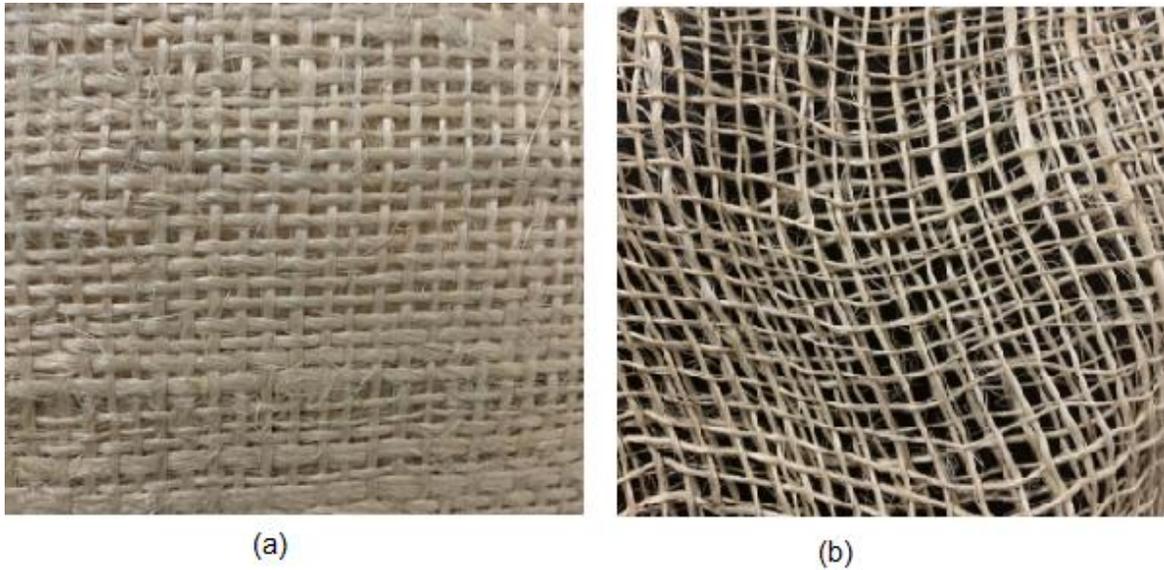
Para la elaboración del compuesto epóxico/fique se utilizó una matriz epóxica, que es empleada en la industria de la construcción, denominada Epotoc 1-1 de Toxement®. Como refuerzo del compuesto se empleó tejido hecho de fibra de fique, obtenido de costales o sacos, que son utilizados en el almacenamiento de productos agrícolas.

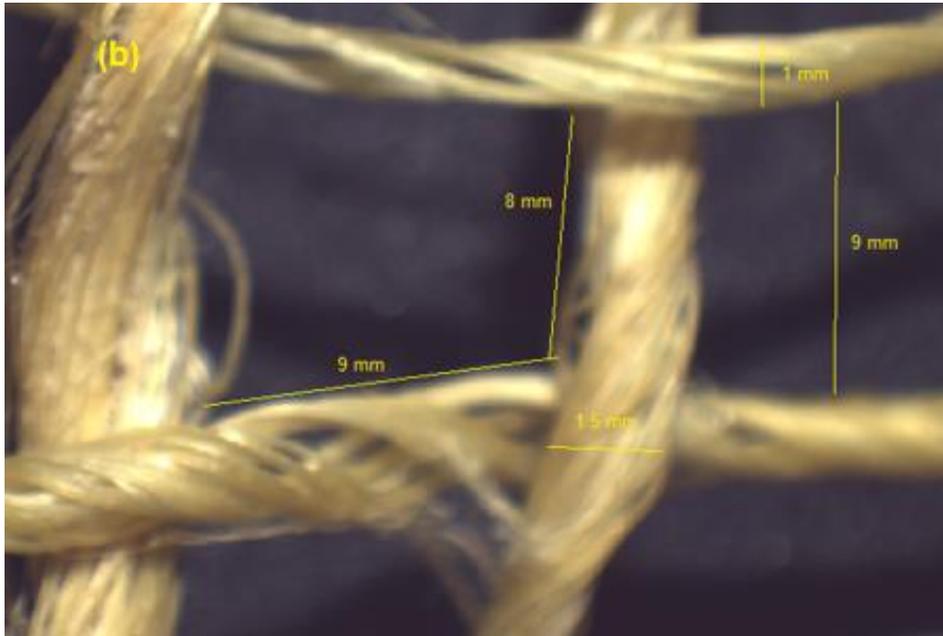
Se emplearon dos tipos de tejidos; el primero corresponde a un tejido denso, el cual contiene mayor cantidad de fique y los espacios entre cada hilada de fibras son reducidos; este tipo de tejido se denomina “denso” o “tupido”. El segundo tipo de tejido empleado es menos denso, el cual tiene menor cantidad de fique y los espacios entre hiladas de fibras son mayores; a este se conoce tradicionalmente como “ralo”. En la Figura 3-1 se muestran los dos tipos de tejidos empleados.

La caracterización de las fibras de fique que componen cada hilada de los tejidos corresponde a la mostrada en el Capítulo 2. Para los dos tipos de tejidos, se realizó una medida de los espaciamientos entre hiladas y de espesores de las mismas. Estas mediciones se realizaron empleando un estéreo microscopio Nikon con el cual se obtuvo una imagen usando un aumento de 4.5X, con la cual, a partir de análisis digital fue posible medir los parámetros mencionados, empleando el software Image J. La Tabla 3-1 muestra los resultados de las mediciones de las hiladas de los tejidos y sus espaciamientos. La Figura 3-2 presenta un ejemplo de las micrografías usadas para la medición de los parámetros mencionados para cada tipo de tejido.

**Tabla 3-1:** Espesor y separación de hiladas, de los tejidos de fique.

Tejido	Espesor hilada (mm)	Separación entre hiladas (mm)
Tupido	3	2.4 - 2.5
Ralo	1 - 1.5	8 - 9

**Figura 3-1:** Tejidos empleados como refuerzo del compuesto. (a) Tupido (denso) (b) Ralo (menos denso).**Figura 3-2:** Medición de espesor y espaciamentos entre hiladas. (a) Tupido (b) Ralo.

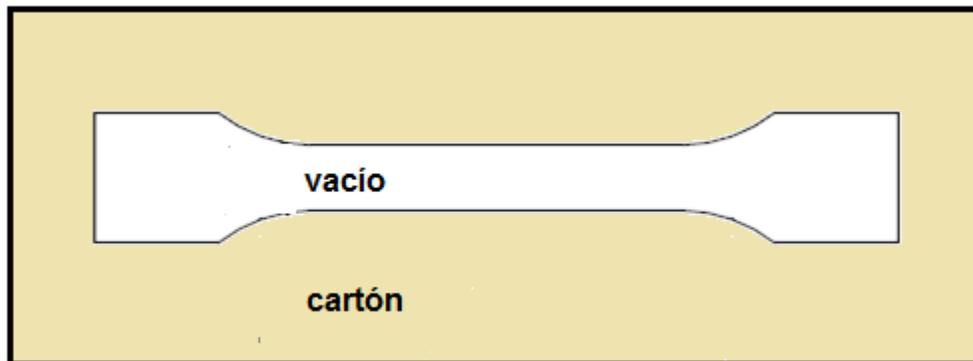


Para la fabricación de la matriz se adoptó el procedimiento establecido por el fabricante en la ficha técnica de Epotoc 1-1 de Toxement®. Esta matriz epóxica está conformada por dos componentes: A y B. El componente A corresponde a la resina epóxica de color transparente, mientras que el componente B, es el catalizador que regula el endurecimiento de la resina cuando esta está en contacto con el medio ambiente, y este le da el color característico (gris) cuando se mezclan. Ambas partes vienen empacadas por separado y se mezclan en un recipiente seco, con una proporción 1:1, revolviendo con una espátula durante 5 minutos hasta lograr uniformidad en la mezcla.

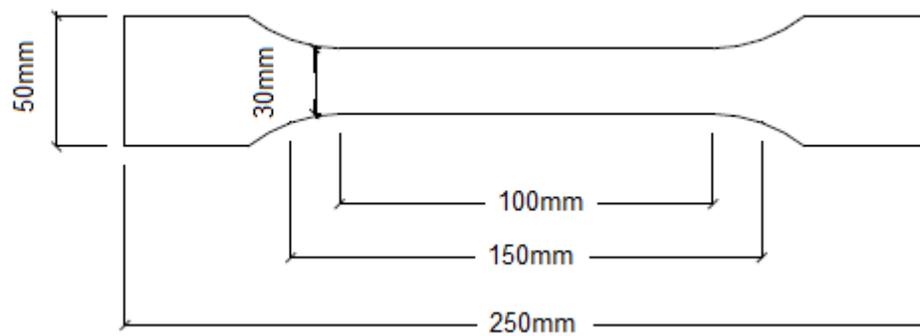
### 3.1.2 Fabricación de probetas de la matriz epóxica y del tejido de fique

Para poder caracterizar mecánicamente la matriz y el tejido empleados, se fabricaron unas probetas, las cuales fueron sometidas a ensayos de tensión. En primer lugar, se fabricaron cuatro probetas de la matriz. Para esto, se empleó un molde hecho en cartón, con un vacío con la forma de la probeta, debido a que la matriz epóxica antes de endurecer es fluida. El proceso de endurecimiento de las probetas se realizó a temperatura ambiente y pasadas 24 horas se retiraron de los moldes. En la Figura 3-3 se presenta un bosquejo del molde empleado. A estos especímenes se les dio una forma ahusada y se adoptaron las dimensiones sugeridas por ASTM D3039 (ASTM, 2013) con un espesor promedio de 5.5 mm. La Figura 3-4 muestra las dimensiones de las probetas de la matriz y en la Figura 3-5 se presenta un espécimen fabricado.

**Figura 3-3:** Bosquejo del molde de cartón empleado para la fabricación de las probetas de la matriz epóxica.



**Figura 3-4:** Dimensiones de las probetas para ensayos de tensión.

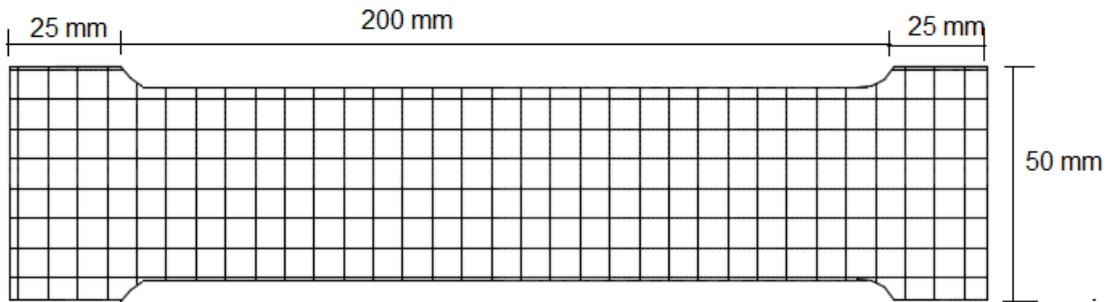


**Figura 3-5:** Probeta de matriz epóxica

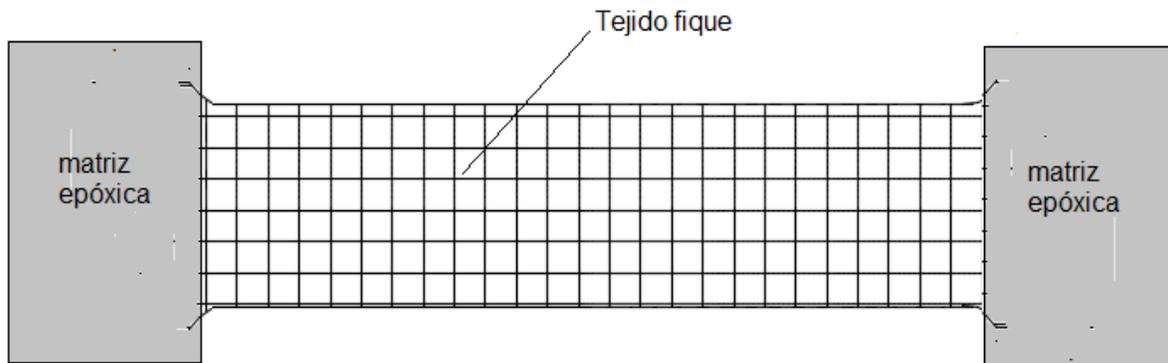


Para la fabricación de las probetas del tejido de fique, se recortaron tiras de los costales previamente sometidos al tratamiento alcalino descrito en el numeral 2.1.2 del capítulo 2. Se le dio una forma ahusada a estos especímenes, similar a la que se les dio a las probetas la matriz. Las dimensiones de los trozos cortados se presentan en la Figura 3-6. Una vez cortadas las tiras del tejido se les aplicó un poco de la matriz epóxica en los extremos, esto con el fin de generar unos puntos de agarre cuando se pongan en las mordazas de la máquina de ensayo a tensión, ya que, si las mordazas sostienen solo el tejido, se presenta un deslizamiento entre la probeta y los dientes de la mordaza. La Figura 3-7 presenta un bosquejo de la aplicación de la matriz sobre los extremos de los tejidos cortados; no se definieron dimensiones fijas para los extremos mezclados con la matriz, pero si se debe garantizar que tenga una dimensión mínima de 25 mm en el sentido largo y de 50 mm en el sentido corto. Este procedimiento se realizó para ambos tipos de tejido el tupido y el ralo.

**Figura 3-6:** Dimensiones de las probetas de tejido de fique.



**Figura 3-7:** Bosquejo del tejido de fique con matriz epóxica en los extremos.



### 3.1.3 Fabricación del compuesto epóxico/fique

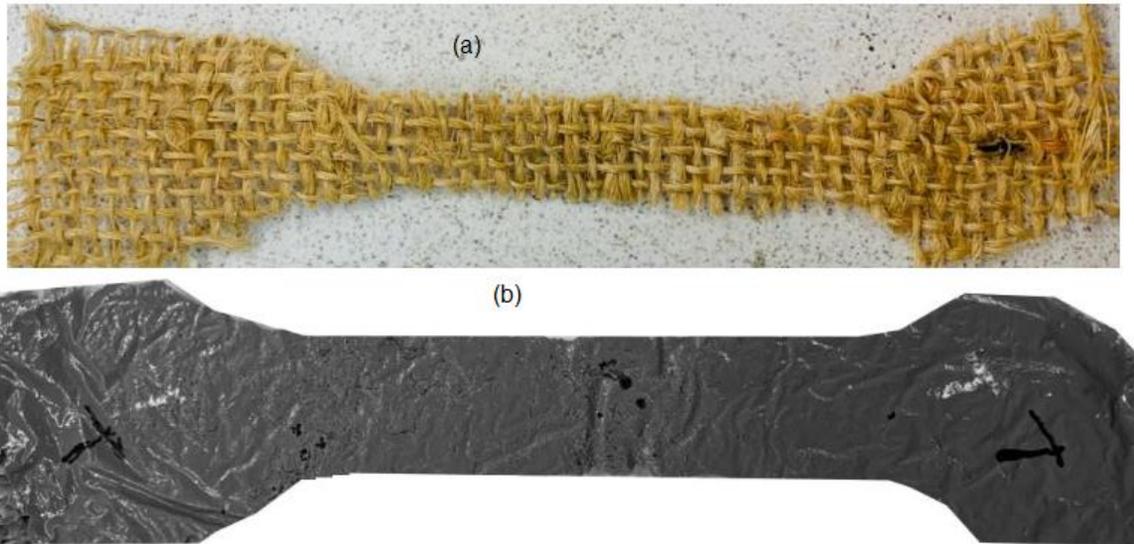
Como se expuso en los capítulos anteriores se debe mejorar la interfaz matriz – fibra. Para esto, se sometieron los tejidos de fique al mismo tratamiento alcalino empleado para las fibras de fique. Este tratamiento fue expuesto en el Capítulo 2. El compuesto fue elaborado con el tejido de fique sometido a tratamiento alcalino, empleando una solución de NaOH al 5% durante 30 minutos. Luego de ser secado a humedad ambiente, durante 48 horas, los tejidos fueron cortados en tiras con dimensiones promedio de 250 mm x 50 mm (largo x ancho), dejando en la zona central con un ancho de 30 mm (ver Figura 3-4). Se dio esta forma ahusada al tejido de fique para dar la forma de las probetas del compuesto, tal como lo sugiere ASTM D3039 (ASTM, 2013), ya que, una vez elaboradas estas probetas, era difícil realizar cortes para moldearlas. La Figura 3-8 muestra el tejido de fique cortado y la probeta del compuesto epóxico/fique.

Para la preparación de la resina epóxica del compuesto, se empleó el mismo procedimiento descrito en el numeral 3.1.1.

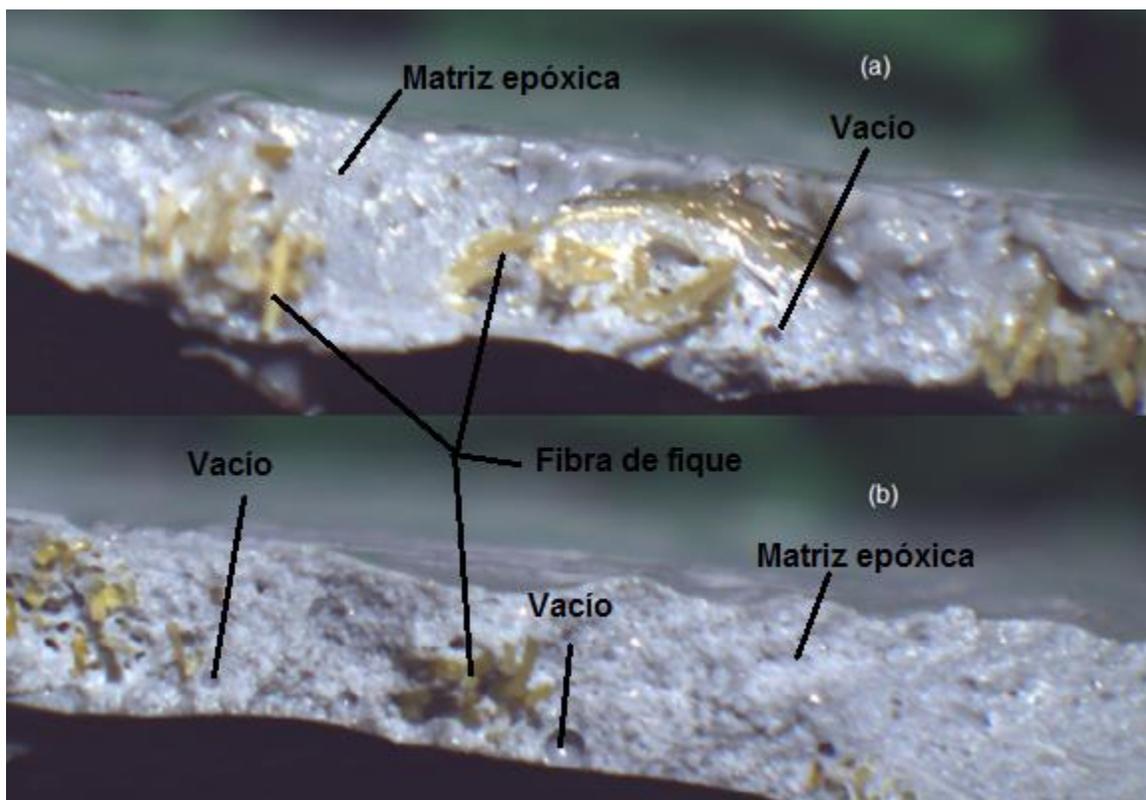
Luego de tener los dos tipos de tejidos cortados y la resina epóxica preparada se elaboraron las probetas de material compuesto. Para esto, se emplearon bandejas de aluminio que fueron recubiertas por una capa de vaselina, con el fin de facilitar el desmolde del material compuesto. Posteriormente, se dispusieron las tiras del tejido dentro de ellas y con una brocha se aplicó la resina epóxica. Para garantizar una penetración completa del epóxico entre las hiladas y las fibras del tejido se aplicaron 10 capas de epóxico, por ambas caras. Finalmente, se dejó secar el compuesto a humedad ambiente por 24 horas, tiempo en cual la matriz epóxica se seca y endurece.

Con el objetivo de controlar la calidad del proceso de fabricación del material compuesto, se tomaron micrografías de la sección transversal de algunas probetas para verificar que el compuesto no haya quedado con un alto contenido de vacíos o algunas fibras de fique quedaran sin recubrimiento de la matriz epóxica. Estas imágenes se tomaron empleando un estéreo microscopio Nikon, trabajando con un aumento de 4.5X. La Figura 3-9 muestra la sección transversal de algunas probetas.

**Figura 3-8:** (a) Tejido de fique cortado. (b) Probeta de compuesto epóxico/fique



**Figura 3-9:** Sección transversal compuesto epóxico/fique. (a) compuesto con tejido tupido. (b) compuesto con tejido raro.



Al observar las micrografías se identificó que el compuesto hecho con tejido menos denso aparentemente presentaba más vacíos que el compuesto hecho con tejido denso. Este aumento en la cantidad de vacíos puede estar relacionado al espaciamiento entre hiladas

del tejido, que, al ser mayor, permite una mayor acumulación de resina epóxica que al endurecerse almacene más aire, el cual genera los vacíos.

Se determinó el contenido de fibra o fracción en peso de las fibras en el compuesto, pesando las tiras de tejido de fique antes de ser impregnadas con la resina, luego, al ya tener las probetas del compuesto epóxico/fique, se pesó cada probeta, y se calculó el porcentaje al que equivale el peso de solo el tejido de fique, respecto al peso total de la probeta del compuesto. Cabe resaltar que los compuestos elaborados con el tejido tupido cuentan con una fracción en peso de fibras entre el 9.30 y 10 %, mientras que, los compuestos reforzados con el tejido ralo tienen una fracción en peso de fibras entre el 7.19 y 7.76 %. En la Tabla 3-2 se presenta la nomenclatura empleada para los especímenes y la fracción en peso de fibras (FP).

**Tabla 3-2:** Especímenes de ensayo compuesto epóxico/fique.

<b>Espécimen</b>	<b>Tipo de tejido</b>	<b>% FP Fibra</b>
D-1	Tupido	10.00
D-2	Tupido	9.97
D-3	Tupido	9.41
D-4	Tupido	9.52
D-5	Tupido	9.60
D-6	Tupido	9.80
D-7	Tupido	9.45
D-8	Tupido	9.97
D-9	Tupido	9.61
D-10	Tupido	9.88
MD-1	Ralo	7.19
MD-2	Ralo	7.27
MD-3	Ralo	7.76
MD-4	Ralo	7.30
MD-5	Ralo	7.41
MD-6	Ralo	7.77
MD-7	Ralo	7.22
MD-8	Ralo	7.34
MD-9	Ralo	7.47
MD-10	Ralo	7.92

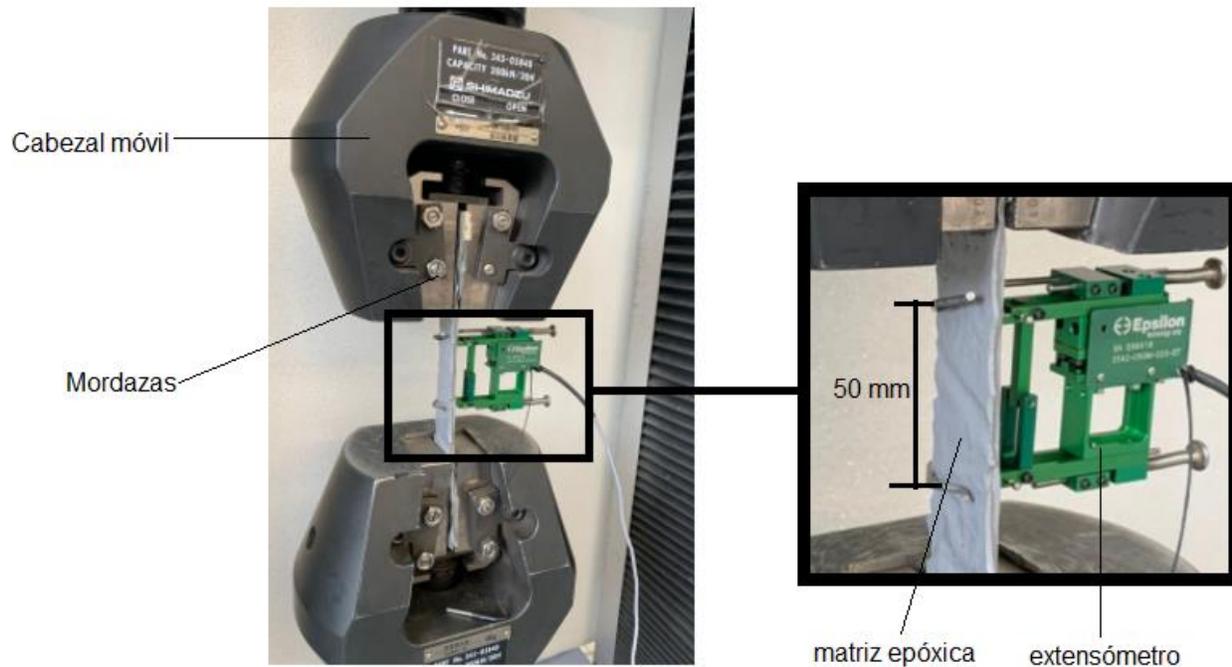
### 3.1.4 Ensayos a tensión en probetas de matriz epóxica

La caracterización mecánica de la matriz epóxica se realizó sometiendo las cuatro probetas fabricadas a fuerzas de tensión. Para esto, se adoptó el procedimiento sugerido en el ASTM D3039 (ASTM, 2013). Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, empleando una máquina de Shimadzu Autograph serie AG, con una celda de carga de 30 kN a una velocidad de 5 mm/s, a temperatura ambiente. En la Figura 3-10 se muestra el montaje de las probetas de la matriz en la máquina de ensayos.

La medición del área de la sección transversal ( $A_m$ ) de la matriz se realizó después de la falla de cada probeta, tomando tres mediciones del espesor ( $t$ ) y ancho ( $a$ ) cercanas al plano de falla y promediando estos valores, definiendo  $A_m$  como el producto entre estos dos. El alargamiento ( $\Delta l_m$ ) del espécimen se obtuvo directamente de las lecturas registradas por el extensómetro eléctrico mostrado en la Figura 3-10.

Para determinar el esfuerzo a tensión, la deformación unitaria y el módulo de elasticidad de la matriz se aplicaron los conceptos clásicos de la resistencia de materiales, aplicado al comportamiento de sólidos antes cargas axiales (Gere & Goodno, 2013)

**Figura 3-10:** Montaje probetas de matriz epóxica en máquina de ensayos



El esfuerzo a tensión se determinó aplicando la siguiente expresión (3-1):

$$\sigma_{tm} = \frac{F_f}{A_m} \quad (3-1)$$

donde:

$\sigma_{tm}$ : esfuerzo de tensión de la matriz, MPa.

$F_f$ : fuerza en la falla, N.

$A_m$ : área transversal de la matriz en el plano de falla, mm<sup>2</sup>.

La deformación unitaria  $\varepsilon$  de la probeta se determinó por medio de la ecuación (3-2), en donde  $\Delta l_m$  se obtiene directamente de las lecturas registradas por el extensómetro, y 50 corresponde a la longitud inicial en mm.

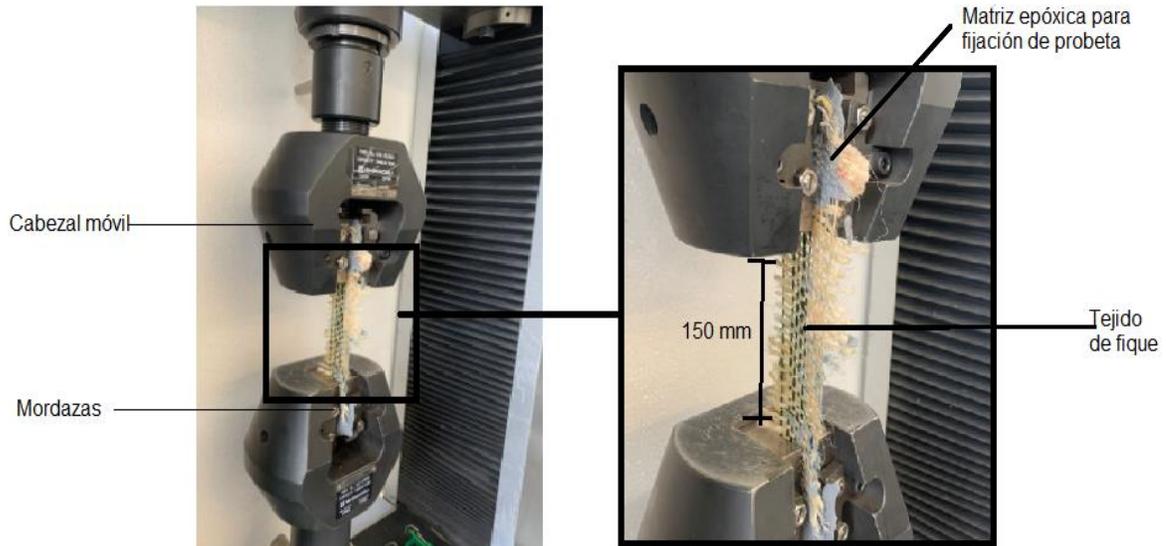
$$\varepsilon = \frac{\Delta l_m}{50} \quad (3-2)$$

La obtención del módulo de elasticidad o módulo de Young se realizó a partir de la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria de la matriz. Una vez se obtiene esta gráfica, se calcula la pendiente de la región lineal de la curva y este valor es el módulo de elasticidad de la matriz ( $E_m$ ). El comportamiento lineal de la gráfica de esfuerzo contra deformación se registró en los valores pertenecientes al intervalo entre 15 al 70% del esfuerzo de tensión máximo calculado.

### 3.1.5 Ensayos de tensión en probetas del tejido de fique

La caracterización mecánica de los tejidos de fique se realizó tanto en tejidos tupidos como en los tejidos ralos. Para esto, se sometieron 5 probetas de cada tejido a ensayos de tensión. Los ensayos fueron realizados bajo las mismas condiciones descritas para la matriz epóxica. Se tomó como guía el procedimiento recomendado en el ASTM D3039 (ASTM, 2013). En la Figura 3-11 muestra el montaje de las probetas de tejido en la máquina de ensayos.

**Figura 3-11:** Montaje probetas de tejido de fique en máquina de ensayos



La medición del área de la sección transversal ( $A_t$ ) del tejido se realizó después de la falla de cada probeta. Para esto se midió, con un calibrador, el espesor ( $t$ ) y ancho ( $a$ ) de cada hilada de fique que conforman el tejido, con el producto ( $t * a$ ) se obtuvo el área de cada

hilo, para así finalmente definir  $A_t$  como la sumatoria de las áreas de las hiladas del tejido, medida en  $\text{mm}^2$ . El alargamiento ( $\Delta l_t$ ) del espécimen se obtuvo directamente de las lecturas registradas por cabezal móvil de la máquina de ensayos, debido a que los extensómetros no podían ser fijados al tejido de fique y se deslizaban, tomando lecturas erradas. Para garantizar que no se presentara un deslizamiento entre la mordaza del cabezal y la probeta se aplicó un poco de matriz epóxica en los extremos de las probetas como lo ilustra la Figura 3-11, según se explicó en el numeral 3.1.2 del presente capítulo.

El esfuerzo a tensión se determinó aplicando la siguiente expresión (3-3):

$$\sigma_{tt} = \frac{F_f}{A_t} \quad (3-3)$$

donde:

$\sigma_{tt}$ : esfuerzo de tensión del tejido, MPa.

$F_f$ : fuerza en la falla, N.

$A_t$ : área transversal del tejido en el plano de falla,  $\text{mm}^2$ .

La deformación unitaria  $\varepsilon_t$  de la probeta de tejido de fique se determinó por medio de la ecuación (3-4), en donde  $\Delta l_t$  se obtiene directamente de las lecturas registradas por el desplazamiento del cabezal móvil de la máquina de ensayos, para el desplazamiento del cabezal y 150 corresponde a la longitud inicial en mm.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l_t}{150} \quad (3-4)$$

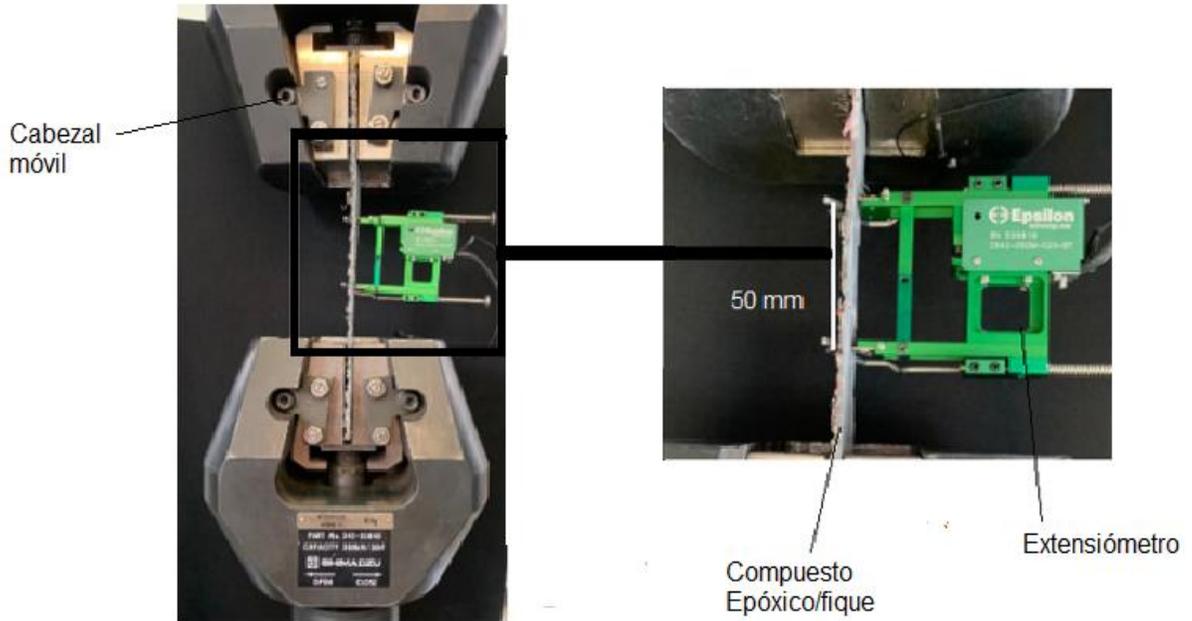
La obtención del módulo de elasticidad “aparente” se realizó a partir de la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria del tejido. Una vez se obtiene esta gráfica, se calcula la pendiente de la región lineal de la curva y este valor es el módulo de elasticidad aparente del tejido ( $E_t$ ). El comportamiento lineal de la gráfica de esfuerzo contra deformación se registró en los valores pertenecientes al intervalo entre 20 al 70% del esfuerzo de tensión máximo calculado.

### 3.1.6 Ensayos a tensión en probetas de compuesto epóxico/fique

Para caracterizar mecánicamente el compuesto epóxico/fique se tomaron 5 probetas para los dos tipos de compuesto (con tejido ralo y tupido) y se adoptó el procedimiento sugerido en el ASTM D3039 (ASTM, 2013). Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, empleando una máquina de Shimadzu Autograph serie AG, con una celda de carga de 30 kN a una velocidad de 5 mm/s. La temperatura a la cual se llevaron a cabo las

pruebas de tensión en el compuesto estaba entre los 16 y 19 °C con humedades relativas entre 42 y 45%. En la Figura 3-12 se muestra el montaje del compuesto en la máquina de ensayos.

**Figura 3-12:** Montaje del compuesto epóxico/fique en máquina de ensayos.



La medición del área de la sección transversal ( $A_c$ ) del compuesto se realizó después de la falla de cada probeta, tomando tres mediciones del espesor ( $t$ ) y ancho ( $a$ ) cercanas al plano de falla y promediando estos valores, definiendo  $A_c$  como el producto entre estos dos, medida en  $\text{mm}^2$ . El alargamiento ( $\Delta l_c$ ) del compuesto se obtuvo directamente de las lecturas registradas por el extensómetro eléctrico mostrado en la Figura 3-12.

El esfuerzo a tensión se determinó aplicando la siguiente expresión (3-5):

$$\sigma_{tc} = \frac{F_f}{A_c} \quad (3-5)$$

donde:

$\sigma_{tc}$ : esfuerzo de tensión del compuesto epóxico/fique, MPa.

$F_f$ : fuerza en la falla, N.

$A_c$ : área transversal del compuesto epóxico/fique en el plano de falla,  $\text{mm}^2$ .

La deformación unitaria  $\varepsilon_w$  del compuesto se determinó por medio de la ecuación (3-6), en donde  $\Delta l_c$  se obtiene directamente de las lecturas registradas por el extensómetro, y 50 corresponde a la longitud inicial en mm.

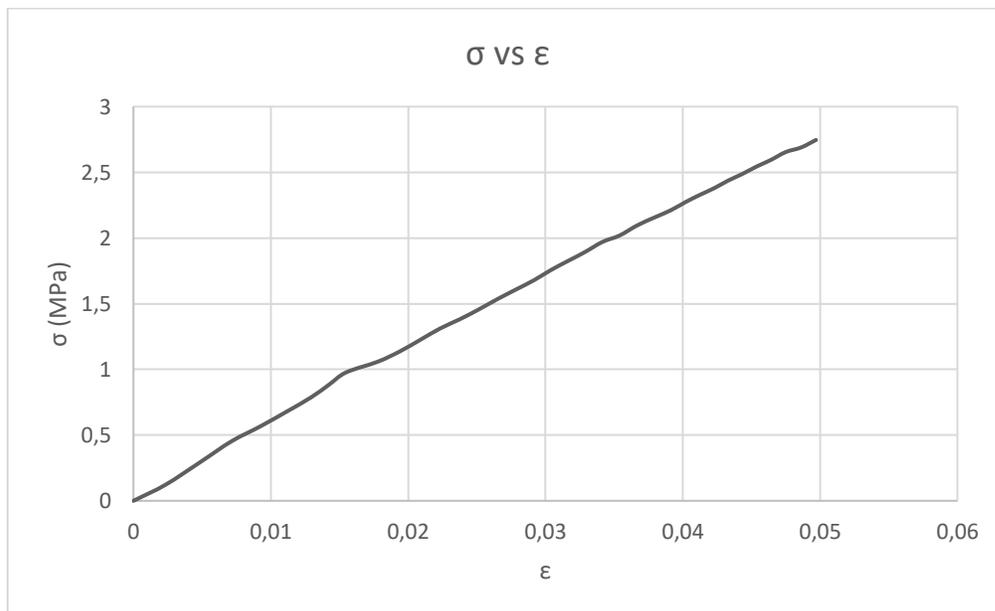
$$\varepsilon_w = \frac{\Delta l_c}{50} \quad (3-6)$$

El módulo de elasticidad o módulo de Young se obtuvo a partir de la gráfica de esfuerzo versus deformación unitaria del compuesto. Una vez se obtiene esta gráfica, se calcula la pendiente de la región lineal de la curva y este valor es el módulo de elasticidad del compuesto ( $E_c$ ). El comportamiento lineal de la gráfica de esfuerzo contra deformación se registró en los valores pertenecientes al intervalo entre 10 al 70% del esfuerzo de tensión máximo calculado.

### 3.1.7 Resultados y discusión

En la Figura 3-13 se presenta la curva típica esfuerzo contra deformación unitaria de la matriz epóxica. Se puede observar que la matriz presenta un comportamiento elástico lineal cuando es sometida a fuerzas de tensión. En la Tabla 3-4 se presenta los valores de esfuerzo de tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria para cada probeta ensayada. Finalmente, la Tabla 3-5 presenta los valores promedios para las propiedades mecánicas evaluadas en la matriz. Estos valores son similares a los registrados en la literatura (Hallonet et al., 2019; Wu, Li, & Sakuma, 2006) para matrices epóxicas usadas en fabricación de compuestos.

**Figura 3-13:** Curva esfuerzo contra deformación típica de la matriz epóxica.



**Tabla 3-3:** Propiedades mecánicas matriz epóxica

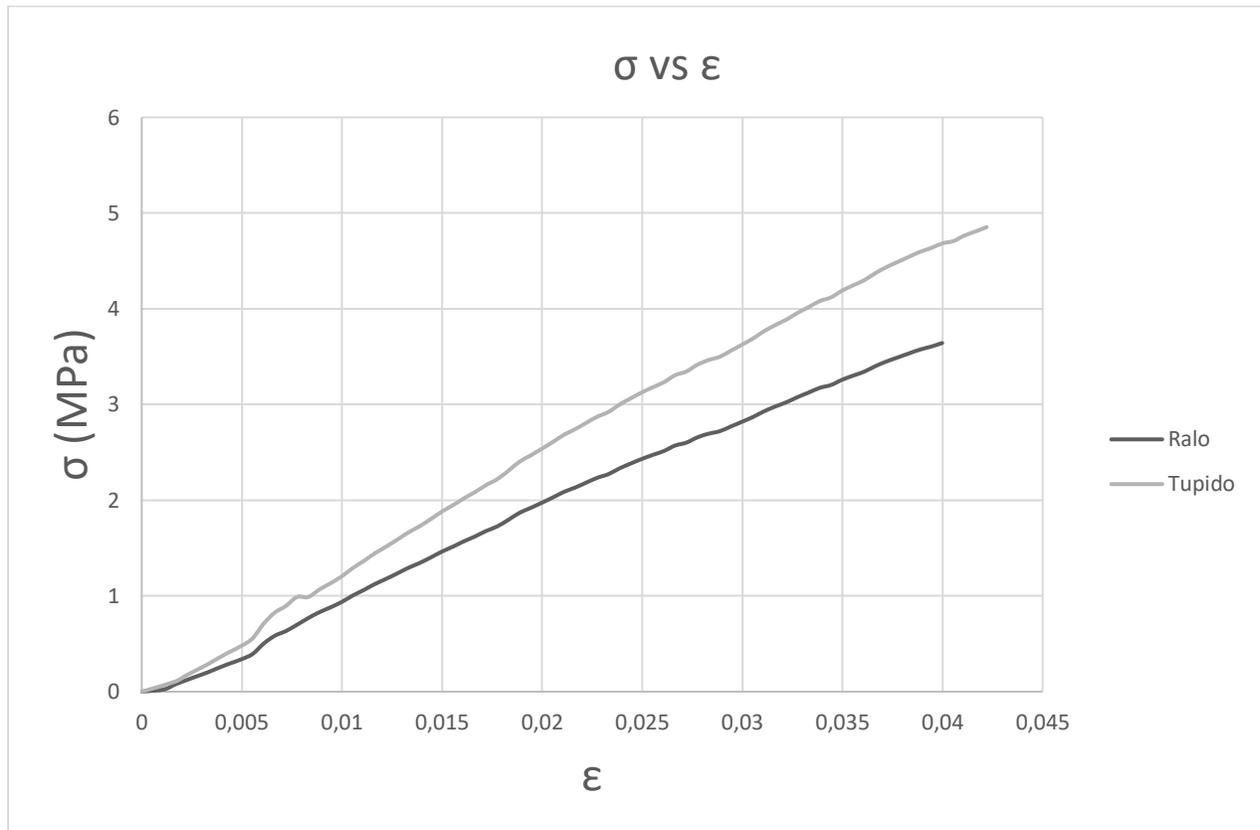
<b>Muestra</b>	<b>Esfuerzo de tensión</b>	<b>Módulo de elasticidad</b>	<b>Deformación unitaria</b>
	(MPa)	(MPa)	(%)
M-1	3.47	137.38	5.12
M-2	3.19	133.83	5.01
M-3	2.75	124.18	4.23
M-4	2.67	122.28	4.95

**Tabla 3-4:** Valores promedio de las propiedades mecánicas de la matriz

<b>Matriz</b>	<b>Esfuerzo de tensión promedio</b>	<b>C. V.</b>	<b>Módulo de elasticidad promedio</b>	<b>C. V.</b>	<b>Deformación unitaria promedio</b>	<b>C. V.</b>
	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(%)	(%)
Epóxica	3.02	12.53	129.42	5.66	4.83	8.38

En la Figura 3-14 se presenta la curva de esfuerzo versus deformación típica para el tejido de fique tupido y ralo. Se observa que ambos tejidos presentan un comportamiento elástico lineal y que el tejido tupido presenta una mayor resistencia a la tensión y debido a que hay mayor cantidad de fibras de fique que en el tejido ralo. Las Tablas 3-5 y 3-6 presenta los valores obtenidos de esfuerzo a tensión, módulo de elasticidad aparente y deformación unitaria para el tejido tupido y tejido ralo, respectivamente.

Por otro lado, la Tabla 3-7 se presentan los valores promedio para las propiedades mecánicas evaluadas y su respectivo coeficiente de variación (C.V.). Se evidencia que el tejido tupido resiste un 25% más que el tejido ralo cuando es sometido a fuerzas de tensión. El módulo de elasticidad aparente aumenta hasta un 17% si se emplea tejido tupido, así como la deformación unitaria alcanzada antes de la rotura. Esta mejora de las propiedades mecánicas del tejido está asociada a la cantidad de fibras de fique, pues al tener el tejido tupido más fibras por unidad de área, alcanza valores más altos de resistencia. Para el tejido ralo se presentan menores coeficientes de variación en sus propiedades mecánicas, lo cual podría relacionarse al contenido de fique, ya que, al contener menos cantidad de fibras de fique se reducen los factores que influyen en la dispersión de datos tales como micro-defectos en las fibras, contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, entre otros (Luna, 2020; Mohammed et al., 2015).

**Figura 3-14** Curva esfuerzo contra deformación típica del tejido de fique**Tabla 3-5:** Propiedades mecánicas del tejido de fique tupido

Muestra	Esfuerzo de tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deformación unitaria (%)
Tupido-1	4.00	119	4.22
Tupido-2	3.59	111.5	4.01
Tupido-3	4.05	99.89	3.65
Tupido-4	4.80	115.9	4.13
Tupido-5	4.93	118.67	4.20

**Tabla 3-6:** Propiedades mecánicas del tejido de fique ralo

Muestra	Esfuerzo de tensión	Módulo de elasticidad	Deformación unitaria
	(MPa)	(MPa)	(%)
Ralo-1	3.60	95.5	3.77
Ralo-2	3.77	97	3.86
Ralo-3	3.26	96.34	3.64
Ralo-4	3.20	93.7	3.90
Ralo-5	3.19	92.8	3.87

**Tabla 3-7:** Valores promedio de las propiedades mecánicas del tejido de fique.

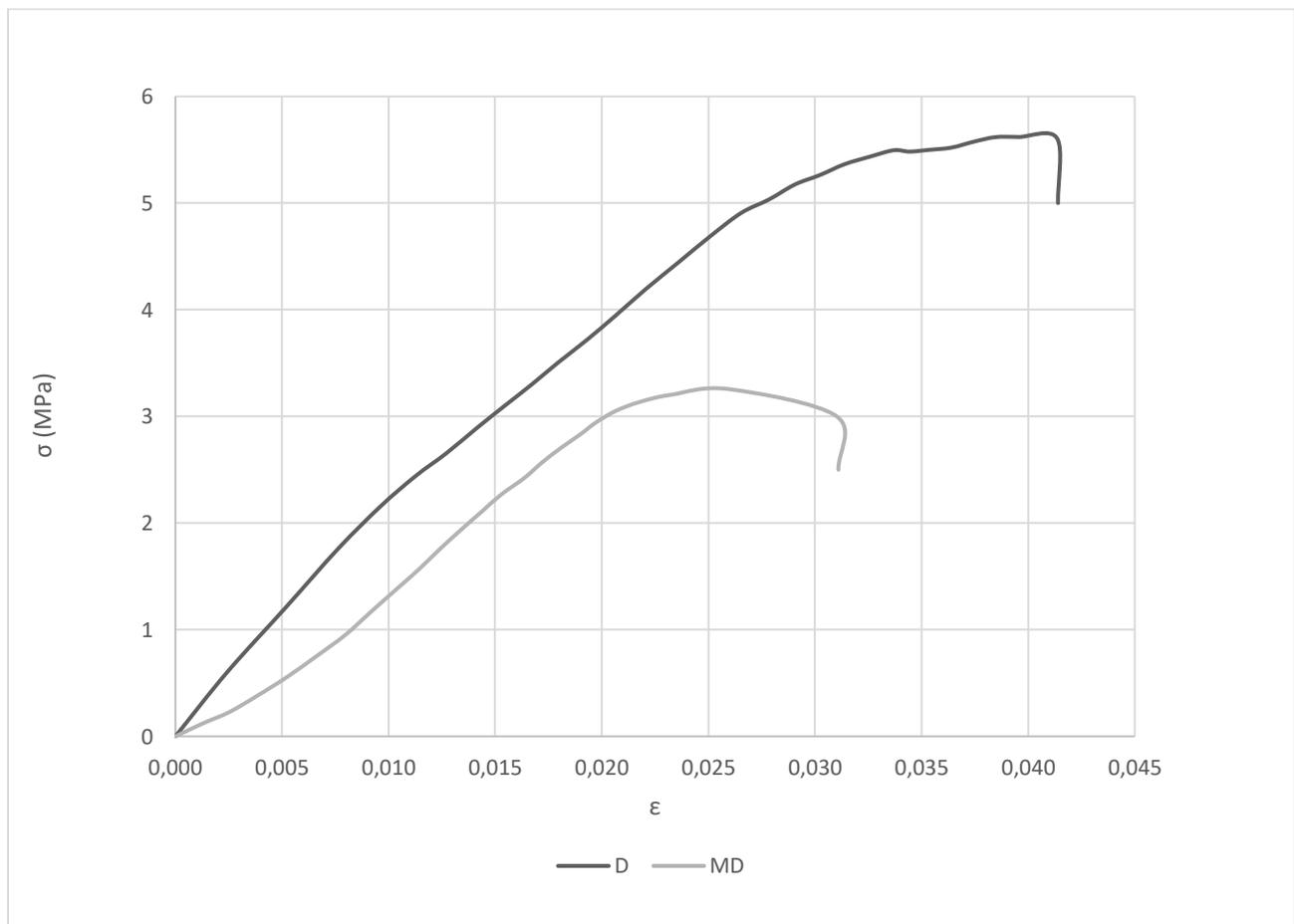
Tejido	Esfuerzo de tensión promedio	C. V.	Módulo de elasticidad aparente promedio	C. V.	Deformación unitaria promedio	C. V.
	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(%)	(%)
Tupido	4.27	13.33	112.99	7.01	4.04	5.79
Ralo	3.41	7.69	95.07	1.86	3.81	2.78

Si se comparan los valores de las propiedades mecánicas de los tejidos de fique expuestos en la Tabla 3-7 con los obtenidos en la caracterización mecánica de la fibra (ver Capítulo 2, Tabla 2-4) se puede identificar que, la resistencia de los tejidos es mucho más baja que la de las fibras aisladas. Este fenómeno podría estar relacionado al aumento de la cantidad de fibra que hay en los tejidos, pues al tener especímenes conformados por muchas más fibras aumenta la cantidad de micro-defectos por unidad ensayada, y al tener muchos micro-defectos disminuyen las propiedades mecánicas del tejido (Gómez et al., 2017; Luna, 2020; Mahjoub & Mohamad, 2014). Adicionalmente, cabe recordar que los tejidos de fique son obtenidos de procesos industriales (Echeverri et al., 2015) en los cuales el fique es sometido a tratamientos prolongados con sustancias químicas de pH variable, condiciones de intemperie, procesos de almacenamiento rustico, entre otros factores más, que pueden afectar la resistencia a la tensión.

La Figura 3-15 muestra la curva de esfuerzo contra deformación típica para el compuesto hecho con tejido tupido (D) y para el compuesto con tejido ralo (MD). Se puede observar que para los dos tipos de compuesto se presenta un comportamiento elástico lineal, con un aumento de la deformación unitaria sin incremento de resistencia en los últimos segundos antes de la falla, lo que podría estar asociado al alto contenido de matriz epóxica, la cual contribuye en el aumento de la deformación de los compuestos (Hallonet et al., 2019). También es evidente que, el compuesto con tejido tupido presenta mayor

resistencia y capacidad de deformación, pues posee una mayor cantidad de refuerzo. En la Tabla 3-8 y Tabla 3-9 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de los compuestos ensayados, y la Tabla 3-10 muestra los valores promedios de estas propiedades con su respectivo coeficiente de variación (C.V.).

**Figura 3-15:** Curva esfuerzo contra deformación típica del compuesto epóxico/ fique.



**Tabla 3-8:** Propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique empleando tejido tupido (denso).

<b>Muestra</b>	<b>Contenido de fique</b>	<b>Esfuerzo de tensión</b>	<b>Módulo de elasticidad</b>	<b>Deformación unitaria</b>
	(%)	(Mpa)	(Mpa)	(%)
D-1	10.00	6.62	115.35	4.66
D-2	9.97	5.04	180.42	4.01
D-3	9.41	5.07	120.63	6.50
D-4	9.52	5.62	178.92	4.30
D-5	9.60	3.05	148.83	5.49
D-6	9.80	5.90	125.35	4.98
D-7	9.45	4.76	180.42	4.03
D-8	9.97	3.36	115.61	4.34
D-9	9.61	6.37	143.14	4.20
D-10	9.88	3.48	148.24	4.76

**Tabla 3-9:** Propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique empleando tejido ralo (menos denso).

<b>Muestra</b>	<b>Contenido de fique</b>	<b>Esfuerzo de tensión</b>	<b>Módulo de elasticidad</b>	<b>Deformación unitaria</b>
	(%)	(Mpa)	(Mpa)	(%)
MD-1	7.19	4.15	163.25	4.23
MD-2	7.27	3.44	100.58	3.86
MD-3	7.76	3.85	155.69	3.10
MD-4	7.30	3.99	139.84	2.97
MD-5	7.41	3.70	140.84	3.20
MD-6	7.77	3.59	138.60	3.91
MD-7	7.22	3.82	140.67	4.30
MD-8	7.34	4.77	136.78	3.79
MD-9	7.47	3.63	131.23	3.88
MD-10	7.92	3.60	133.96	4.20

**Tabla 3-10:** Valores promedio de las propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique.

Compuesto	Esfuerzo de tensión promedio	<i>C. V.</i>	Módulo de elasticidad promedio	<i>C. V.</i>	Deformación unitaria promedio	<i>C. V.</i>
	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)	(%)	(%)
D	4.93	26.42	145.69	21.21	4.73	21.35
MD	3.85	7.11	138.14	17.51	3.74	14.57

Las Tablas 3-8 y 3-9 muestran que, en general, entre mayor sea el contenido de fibras de fique en el compuesto, aumenta la resistencia a la tensión de este. Al ver el comportamiento de las probetas del compuesto hecho con tejido tupido, se ve que para las muestras D-5, D-8 y D-10 se presentaron valores de resistencia bajos, respecto a las demás probetas, lo cual podría estar relacionado a la cantidad de vacíos que quedan en el compuesto, que, si aumenta, puede afectar la resistencia del compuesto.

Por otro lado, como era de esperarse, las propiedades mecánicas del compuesto reforzado con el tejido tupido son mayores a las del compuesto hecho con el tejido ralo, y que un aumento de entre el 2.5 y 3% del contenido de fibra representa incrementos en la resistencia a la tensión y alargamiento antes de la rotura de hasta el 25% y un 5% de aumento para el módulo de elasticidad. En la Tabla 3-10 se evidencia que para el compuesto hecho con tejido ralo (MD) el coeficiente de variación de las propiedades mecánicas es menor que el compuesto hecho con tejido tupido (D), lo que podría estar relacionado al contenido de fibra del compuesto, ya que, a menor contenido de fibra, los factores que influyen en la dispersión de resultados, se reducen (Mohammed et al., 2015).

Si se comparan los resultados obtenidos para los tejidos de fique y los compuestos epóxico/fique se evidencia un leve incremento, siendo mayor la resistencia del compuesto. El módulo de elasticidad aumentó significativamente en el compuesto, mientras que la deformación unitaria no presentó cambios representativos.

Al evaluar los resultados obtenidos de resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y deformación, para ambos compuestos, se obtuvieron valores similares a los encontrados en estudios anteriores (Hafizah et al., 2014; Tong et al., 2017) en los cuales empleaban fibras como kenaf y sisal, para fabricar materiales compuestos con matrices epóxicas.

### 3.2 Reforzamiento externo de vigas de concreto sometidas a flexión

Se fabricaron vigas de concreto, con 500 mm de luz, con el fin de evaluar su capacidad a flexión al ser reforzadas externamente, adhiriendo en la cara inferior de estas el compuesto

epóxico-fique, estudiado en el apartado anterior. Se denominó compuesto concreto/epóxico-fique a las vigas de concreto que fueron reforzadas externamente.

### 3.2.1 Materiales y elaboración del compuesto

Para elaborar las vigas de concreto se utilizó cemento de uso general y como agregado grueso se empleó grava de origen sedimentario de tamaño máximo nominal de 1/2". El agregado fino utilizado fue arena de río. El agua empleada en la mezcla de concreto fue obtenida de la red de suministro de agua potable de la Universidad Nacional de Colombia. En la Tabla 3-11 se presentan las propiedades de los materiales mencionados anteriormente. Además, de estos materiales, también se empleó la resina epóxica y el tejido de fique descritos en el numeral 3.1.1.

**Tabla 3-11:** Propiedades de los materiales empleados para la mezcla de concreto.

Material	Tamaño	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Grava	1/2 " (37 mm)	2,50
Arena de río	1,18 mm	2,30
Cemento uso general	0,5 µm	2,90

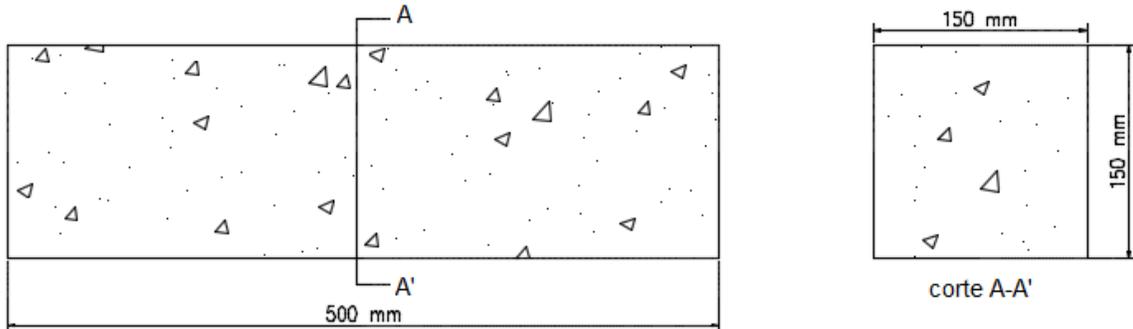
### 3.2.2 Fabricación del compuesto concreto/epóxico-fique

La fabricación del compuesto concreto/epóxico-fique (CEF) se llevó a cabo en dos etapas. La primera de ellas fue la elaboración de las vigas de concreto. La segunda etapa corresponde a la colocación del compuesto epóxico/fique (EF) en la cara inferior de las vigas de concreto.

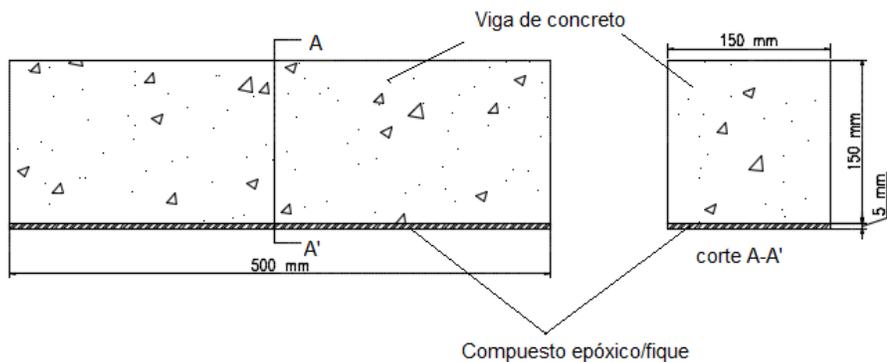
Para la fabricación de las vigas se emplearon dos tipos de concretos, uno de resistencia a la compresión de 24 MPa (3.500 psi) el cual es empleado frecuentemente en la industria de la construcción para la fabricación de elementos estructurales, el otro de resistencia a la compresión de 17 MPa (2.500 psi), con el cual se elaboran elementos no estructurales como dinteles, bordillos o columnetas de confinamiento de mampostería. En la Tabla 3-12 se presenta la dosificación de materiales empleada para la fabricación de las mezclas de concreto. Se fabricaron 6 vigas para cada tipo de concreto, las cuales fueron curadas durante 28 días sumergidas en una alberca con agua. La Figura 3-16 muestra las dimensiones de las vigas fabricadas.

**Tabla 3-12:** Dosificación de materiales para mezclas de concreto.

Resistencia	Materiales (por m <sup>3</sup> de concreto)			
	Cemento	Arena	Grava	Agua
Mpa (p.s.i.)	kg	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	L
17 (2.500)	300	0,56	0,84	180
24 (3.500)	420	0,67	0,67	250

**Figura 3-16:** Dimensiones viguetas de concreto fabricadas.

Una vez curadas las probetas de concreto, fueron puestas a secar a humedad ambiente durante 72 horas para poder adherir el EF en ellas. Se limpió previamente la superficie de la cara inferior sobre la que se adhirió el material de refuerzo. Adicionalmente, se verificó que no existiera presencia de agua o humedad en la cara de la viga, debido a que esto pudo afectar la adherencia de la resina epóxica al concreto. El compuesto EF fue adherido empleando una brocha con la cual se aplicó una primera capa de resina epóxica sobre el concreto de tal manera que toda la cara de la viga quedará impregnada de esta. Una vez puesta la primera capa de epóxico se puso el tejido de fique cuidadosamente, garantizando que este cubriera toda la cara inferior de la viga. Posteriormente y para garantizar una penetración completa del epóxico entre los hilos del tejido se aplicaron 10 capas de epóxico, similar al proceso de fabricación descrito en el numeral 3.1.1, obteniendo un espesor de 5 mm aproximadamente, y el contenido de fibra empleado fue de aproximadamente 9,5 y 7,5 % para vigas reforzadas con compuesto hecho con tejido tupido y ralo, respectivamente. En la Figura 3-17 se presenta la ubicación del compuesto epóxico/fique en las vigas de concreto.

**Figura 3-17:** Vigas reforzadas con el compuesto epóxico/fique. Compuesto Concreto/epóxico-fique.

Finalmente, al tener el NFRP adherido a las vigas de concreto, se dejaron a humedad ambiente por 24 horas, con el fin de que el compuesto epóxico/fique se secará correctamente y así obtuviera la rigidez esperada. Luego de esto, y al corroborar que el compuesto EF no presentaba zonas blandas, o con aparente estado semi-liquido se llevaron las probetas del compuesto CEF a los ensayos mecánicos. En la Figura 3-18 se presenta una probeta del compuesto concreto/epóxico-fique fabricada.

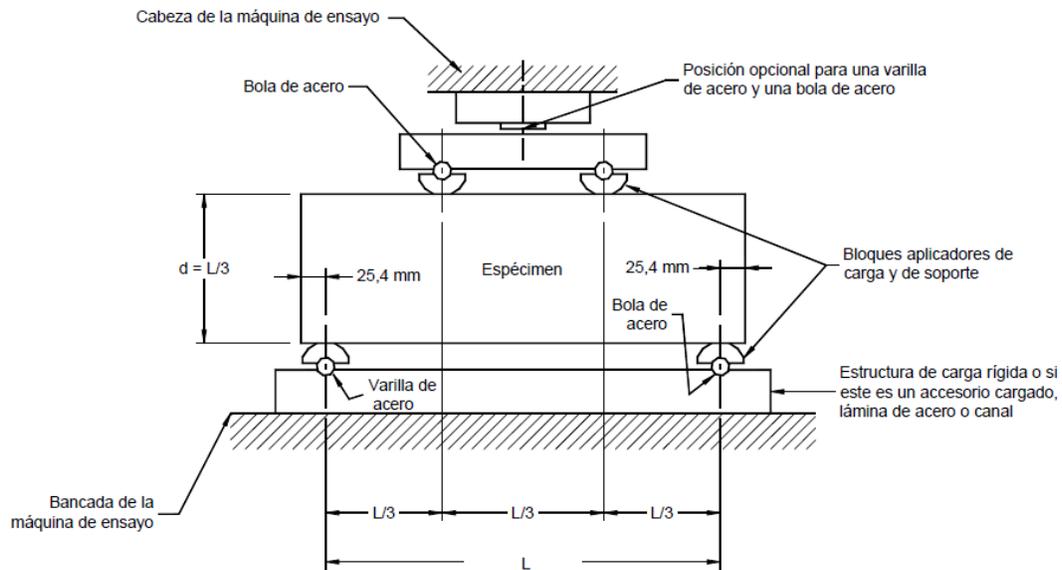
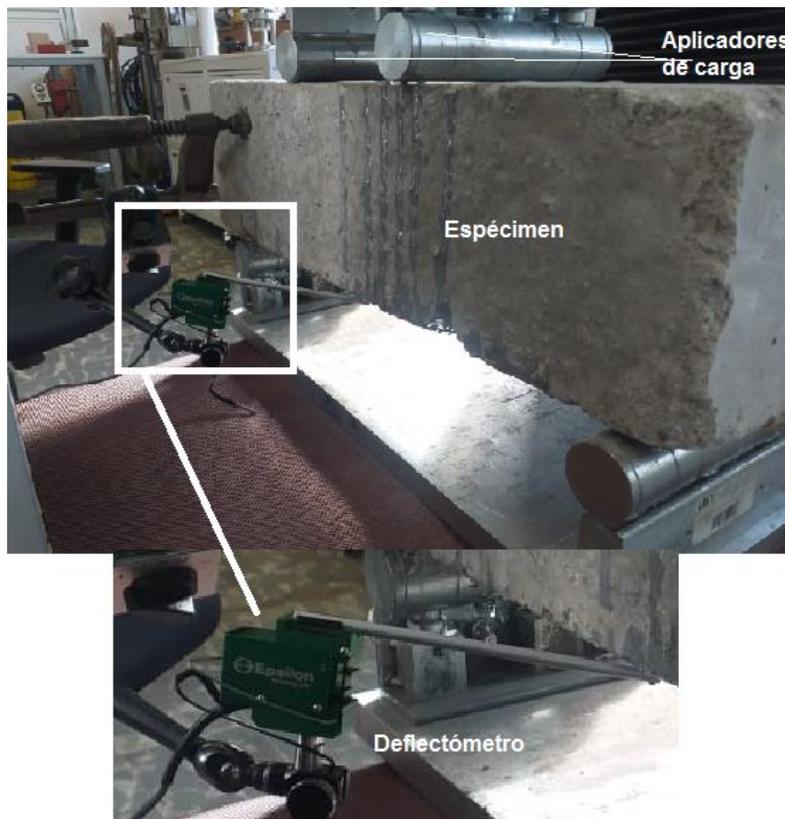
**Figura 3-18:** Probeta del compuesto concreto/epóxico-fique (CEF).



### 3.2.3 Ensayos a flexión en el compuesto concreto/epóxico-fique

Para llevar a cabo los ensayos a flexión sobre las probetas del compuesto concreto/epóxico-fique (CEF) se adoptó el procedimiento sugerido en el ASTM C78 (ASTM, 2002). El método de ensayo elegido fue el de viga simplemente apoyada de cuatro puntos, en el cual se somete la viga a dos cargas puntuales de igual magnitud, ubicada en los tercios de la luz, de tal manera que en el tercio medio el elemento experimenta flexión pura. A manera de control, y con el objetivo de poder hacer comparaciones en los resultados obtenidos, se ensayaron especímenes de concreto sin refuerzo inferior.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, empleando una máquina de Shimadzu Autograph serie AG, con una celda de carga de 30 kN a una velocidad de 5 mm/s. La temperatura a la cual se llevaron a cabo las pruebas de tensión en el compuesto estaba entre los 16 y 19 °C con humedades relativas entre 42 y 45%. En las figuras 3-19 y 3-20 se muestra el montaje de las probetas en la máquina de ensayos. La Tabla 3-13 muestra la nomenclatura empleada para nombrar las probetas de ensayo, donde VA corresponde a vigas hechas con concreto de alta resistencia (24 MPa) y VB corresponde a vigas hechas con concreto de baja resistencia (17MPa).

**Figura 3-19:** Esquema montaje para ensayo a flexión de vigas. Adaptado de ASTM C78.**Figura 3-20:** Montaje de probetas para ensayo a flexión.

**Tabla 3-13:** Nomenclatura de especímenes de ensayo.

Nombre	Tipo de Concreto	Compuesto Epóxico/fique
Testigo	17 o 24 MPa	--
VB-MD1	17 MPa	MD
VB-MD2	17 MPa	MD
VB-D1	17 MPa	D
VB-D2	17 MPa	D
VA-MD1	24 MPa	MD
VA-MD2	24 MPa	MD
VA-D1	24 MPa	D
VA-D2	24 MPa	D

Como se mencionó anteriormente, se fabricaron 6 vigas para ambos tipos de concreto. De estas 6, se llevó a la falla una probeta sin refuerzo para conocer la carga máxima resistida y así determinar el intervalo de carga para medir el módulo de elasticidad de las vigas. Este intervalo de carga fue desde 0 hasta 45% de la carga máxima antes de la falla, rango en el cual se garantiza un comportamiento lineal elástico (Gere & Goodno, 2013). Para medir la deflexión ( $\delta$ ) de la viga se instaló un deflectómetro en la cara inferior de la viga, como se ve en la Figura 3-20.

Con el objetivo de poder comparar los resultados de vigas reforzadas y no reforzadas, se seleccionó una probeta para cada grupo denominada testigo o espécimen de control, la cual no tenía refuerzo NFRP, y con la que se efectuó la comparación de resultados de vigas con y sin refuerzo. La carga máxima resistida por las vigas de obtuvo directamente de las lecturas de la máquina de ensayos.

La deflexión ( $\delta$ ) de una viga simplemente apoyada, cargada simétricamente en los tercios, se determina por medio de la ecuación<sup>4</sup> (3-7), en donde  $P$  es la carga aplicada<sup>5</sup> en los tercios medida en N,  $L$  es la luz entre apoyos medida en mm,  $E$  es el módulo de elasticidad medido en MPa e  $I$  es la inercia de la sección en mm<sup>4</sup>.

$$\delta = \frac{23PL^3}{648EI} \quad (3-7)$$

Con base en esto, se determinó el módulo de elasticidad de las vigas mediante la curva de carga vs deflexión ( $P$  vs  $\delta$ ), con la cual se define que la relación entre la carga y la

<sup>4</sup> La deducción de esta ecuación se presenta en el capítulo 4.

<sup>5</sup> La carga que aplica la máquina de ensayos es el doble de la carga aplicada en los tercios, es decir  $2P$ .

deflexión del elemento es proporcional. Esta proporcionalidad está definida por la pendiente ( $m$ ) de la gráfica, como se define en la ecuación (3-8):

$$P = m\delta \quad (3-8)$$

Igualando las ecuaciones (3-7) y (3-8) y despejando  $E$ , se obtiene la ecuación (3-9) con la cual se determinó el módulo de elasticidad de las vigas ensayadas.

$$E = \frac{23mL^3}{648I} \quad (3-9)$$

La resistencia a la flexión de las vigas ( $R$ ) se determinó aplicando la ecuación (3-10) (ASTM, 2002), donde  $P_c$  es la carga máxima registrada por la máquina de ensayos,  $b$  es el ancho promedio de la viga en mm, y  $d$  es la altura promedio del espécimen. Esta expresión solo es aplicable si la falla de la viga se produce en el tercio medio.

$$R = \frac{P_c L}{bd^2} \quad (3-10)$$

### 3.2.4 Resultados y discusión

Las probetas ensayadas presentaron una falla típica, la cual se presentó en el tercio central como se esperaba, pues al ser sometidas a flexión pura, los máximos esfuerzos a flexión se presenta en el centro de la luz (Gere & Goodno, 2013). La Figura 3-21 y 3-22 muestra la falla típica presentada en las vigas sin refuerzo y con refuerzo, respectivamente.

En la Figura 3-21 se ve la falla de las vigas no reforzadas, la cual es una falla frágil, que se produce en una fracción de segundo, cuando se supera la baja capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tensión, en este caso, esfuerzos de tensión generados por la flexión, o tensión indirecta como es denominada por algunos autores (Matallana, 2019). Al ver la Figura 3-21, se identifica el mismo patrón de falla, con la diferencia que el refuerzo retrasa la falla por varios segundos, pues este empieza a tomar los esfuerzos de tensión que se generan por la aplicación de carga.

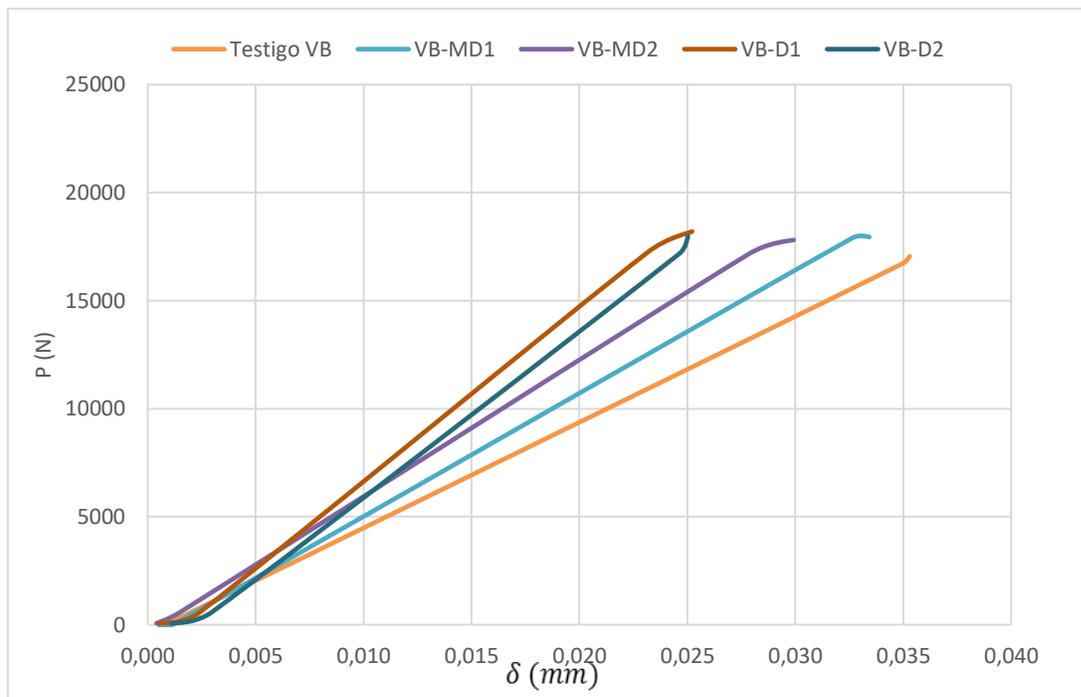
La Figura 3-23 y 3-24 muestra las curvas de carga contra deflexión para las vigas hechas con concreto de resistencia a la compresión de 17 MPa y 24 MPa, respectivamente, reforzadas los compuestos hechos con tejido tupido (D) y tejido ralo (MD). De igual manera, en las Tablas 3-14 y 3-15 se presentan los valores obtenidos de carga máxima, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión y deflexión obtenidas para las probetas ensayadas.

**Figura 3-21:** Falla típica vigas de concreto sin refuerzo



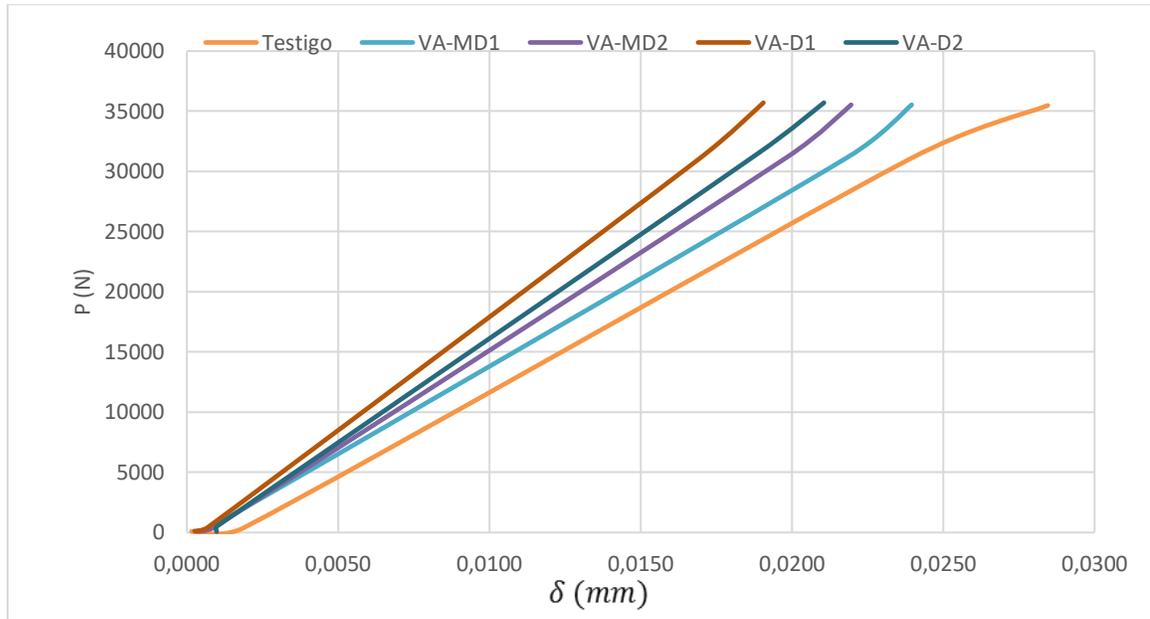
**Figura 3-22:** Secuencia de falla típica de las vigas del compuesto concreto/epóxico-fique.



**Figura 3-23:** Curva carga contra deflexión compuesto concreto/epóxico-fique. Concreto de 17 Mpa.**Tabla 3-14:** Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique fabricado con concreto de 17 MPa.

Viga	Carga Máxima (N)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deflexión (mm)
Testigo	16448.92	2.19	13782.75	0.035
VB-MD1	19689.65	2.63	14872.64	0.033
VB-MD2	18565.92	2.48	16786.93	0.030
VB-D1	18375.86	2.45	17242.33	0.025
VB-D2	19852.01	2.65	17486.90	0.026

**Figura 3-24:** Curva carga contra deflexión compuesto concreto/epóxico-fique. Concreto de 24 MPa.



**Tabla 3-15:** Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique fabricado con concreto de 24 MPa.

Viga	Carga Máxima (N)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deflexión (mm)
Testigo	32933.64	4.39	20439.72	0.028
VA-MD1	33953.59	4.53	21221.72	0.024
VA-MD2	34716.12	4.63	22149.38	0.022
VA-D1	35905.38	4.79	23215.05	0.019
VA-D2	39349.48	5.25	22985.05	0.021

Con base en las Figuras 3-23 y 3-24 se puede identificar un comportamiento similar para las vigas hechas con concretos de diferentes resistencias. Este comportamiento es lineal y elástico, y para ambos casos se presenta un aumento en la rigidez de las vigas reforzadas externamente en comparación con las vigas de control, pues se observa que las deflexiones en las vigas disminuyen cuando son reforzadas con el material compuesto, y la carga máxima resistida presenta un ligero aumento. Las vigas que fueron reforzadas con compuestos fabricados con tejido tupido (D) obtuvieron una mayor capacidad de carga y menores deflexiones que las vigas reforzadas con compuesto hecho con tejido ralo (MD), debido a que, como se expuso en el apartado anterior, los compuestos hechos con tejidos de fique tupido obtienen prestaciones mecánicas más altas que aquellos hechos con tejidos ralos, por lo tanto, aportan mayor rigidez a los elementos de concreto.

En las Tablas 3-14 y 3-15 se puede ver que la carga máxima y la resistencia a flexión aumentaron entre un 15 y 20% para las vigas fabricadas con concreto de 17 MPa, mientras que para las vigas hechas con concreto de 24 MPa el aumento fue del 5% para vigas reforzadas con tejido ralo y 10 % para las vigas reforzadas con tejido tupido. Las deflexiones para ambos tipos de vigas disminuyeron en comparación al espécimen de control. Para las vigas reforzadas con compuesto hecho con tejido tupido se presentó una disminución en la deflexión de hasta un 30% para vigas de concreto de 17 MPa y de un 20% para vigas de concreto de 24 MPa. Evidentemente, para ambos tipos de vigas y empleando los dos tipos de compuestos en el reforzamiento, se observó una mejora en las propiedades mecánicas de las vigas de concreto reforzadas externamente, este aumento de rigidez se debe a que una vez el concreto empieza a experimentar esfuerzos de tensión transmite estas solicitaciones al compuesto epóxico-fique que está adherido a la cara inferior de la viga y cuenta con capacidad de resistir fuerzas de tensión, en ese momento, empieza el trabajo del material compuesto concreto- epóxico/fique, en donde el concreto toma los esfuerzos de compresión y el epóxico/fique se encarga de resistir las tensiones, logrando así un aumento en la carga máxima resistida, mejoras en el módulo de elasticidad y una disminución en las deflexiones, además de controlar la falla frágil típica del concreto.

Al reforzar las vigas de concreto se observó que sus propiedades mecánicas mejoraron en comparación a las vigas no reforzadas, pues la carga máxima y resistencia a la flexión aumentaron, al igual que el módulo de elasticidad, mientras que la deflexión se redujo, lo que se asemeja a los resultados encontrados en estudios anteriores (Hafizah et al., 2014; Yan et al., 2015). El aumento en la resistencia de las vigas sometidas a flexión fue más alto para vigas hechas de concreto 17 MPa que para las vigas de concreto de 24 MPa, lo que podría estar relacionado a que entre más rígido sea un elemento de concreto, el material de refuerzo debe tener mayores prestaciones mecánicas, para que así sea efectivo el material compuesto (Sowndharya et al., 2019).

Al comparar la influencia de emplear tejido tupido o ralo en la fabricación del compuesto concreto/epóxico-fique se observó que el porcentaje de fibra empleado no influyó considerablemente en los resultados. Sin embargo, se debe aclarar, que esto puede estar relacionado a que la variación del contenido de fibra entre compuestos es de apenas el 3 %, si se comparan compuesto con variaciones de contenido de fibra significativas, los resultados pueden presentar variaciones altas (Pradeep et al., 2015).

### 3.3 Conclusiones del estudio de los compuestos

El compuesto epóxico/fique fabricado logró mayores valores de resistencia y módulo de elasticidad cuando se empleó un contenido de fibra de alrededor de 10%, comparado con el compuesto fabricado con 7% de fique. El primero de estos, hecho con tejido tupido (D) alcanzó valores de esfuerzo de tensión alrededor de 5 MPa, el módulo de elasticidad fue del orden de 148 MPa y deformación unitaria de hasta el 4,99 %. El segundo, hecho con tejido menos denso (MD), presentó valores de esfuerzo de tensión alrededor de 3,83 MPa,

el módulo de elasticidad fue del orden de 140 MPa y deformación unitaria de hasta el 3,0 %.

Al reforzar vigas de concreto con el compuesto epóxico/fique se observó un aumento en las propiedades mecánicas de los elementos, pues su capacidad de carga y resistencia a la flexión aumentaron alrededor de un 10% para el compuesto hecho con tejido menos denso, mientras que para las vigas reforzadas empleando tejido denso este aumento fue de aproximadamente el 20%. El módulo de elasticidad de las vigas reforzadas aumentó entre el 10 y 20%. Las deflexiones en las vigas reforzadas se redujeron en un 10% cuando se empleó tejido menos denso (MD), y un 20 % para este concreto, pero empleando tejido denso (D).

La matriz epóxica fabricada presentó un comportamiento elástico lineal al ser sometida a fuerzas de tensión, obteniendo un valor promedio de 3 MPa de resistencia y un módulo de elasticidad de 129 MPa, mientras que la deformación unitaria alcanzó valores de 4,83 %.

## 4. Comparación de resultados experimentales con el análisis teórico

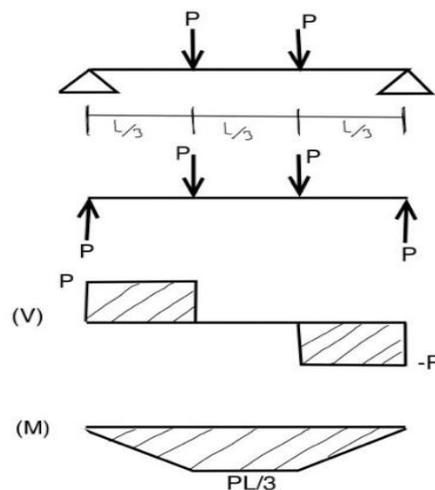
En este capítulo se presenta la comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente al estudiar el comportamiento de las vigas de concreto reforzadas externamente con el compuesto epóxico- fique, y los resultados calculados con base en el análisis teórico de vigas con secciones compuestas. Los resultados experimentales fueron expuestos en el Capítulo 3. Para el análisis teórico se emplearon los métodos de análisis clásicos referentes a esfuerzos en vigas, los cuales pueden ser consultados en los textos de mecánica de materiales (Gere & Goodno, 2013) y los procedimientos analíticos sugeridos en la literatura referente al comportamiento de compuestos FRP (Fiber Reinforced Polymer) al ser empleados como refuerzos en vigas (GangaRao, Taly, & Vijay, 2006).

Este capítulo está dividido en dos partes principales. En la primera de estas se presenta el desarrollo del análisis teórico, junto con las respectivas expresiones o ecuaciones que se dedujeron para el modelamiento teórico de las vigas. La segunda parte consta de la comparación de los resultados teóricos con los experimentales, junto con sus respectivas conclusiones.

### 4.1 Cálculo de deflexión

Para el cálculo de deflexión de la viga en estudio se empleó el Método de la doble integración, el cual puede ser estudiado en la literatura (Uribe, 2002). La Figura 4-1 se presenta el modelo teórico de la viga simplemente apoyada en estudio, junto con sus diagramas de cortante ( $V$ ) y momento flector ( $M$ ).

**Figura 4-1:** Modelo de la viga en estudio



La ecuación de singularidad que describe el comportamiento del momento flector al que la viga está solicitada se presenta en la ecuación 4-1. En donde  $M$  representa el valor del momento evaluado en un punto cualquiera de la viga,  $P$  es la carga a la que se somete el elemento y  $L$  es la luz total de la viga.

$$M(x) = -Px + P \left\langle x - \frac{L}{3} \right\rangle + P \left\langle x - \frac{2}{3}L \right\rangle \quad (4-1)$$

Para conocer la deflexión de una viga sometida a flexión se puede emplear la expresión 4-2, la cual es una ecuación diferencial de segundo orden, que al ser solucionada permite hallar este valor. Donde  $E$  representa el módulo de elasticidad de la viga,  $I$  es el momento de inercia de la sección y  $y$  es la deflexión de la viga en un punto determinado.

$$EI \frac{dy^2}{dx^2} = M(x) \quad (4-2)$$

Al igualar las ecuaciones 4-1 y 4-2 obtenemos la ecuación a solucionar:

$$EI \frac{dy^2}{dx^2} = -Px + P \left\langle x - \frac{L}{3} \right\rangle + P \left\langle x - \frac{2}{3}L \right\rangle$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{Px^2}{2} + \frac{P}{2} \left\langle x - \frac{L}{3} \right\rangle^2 + \frac{P}{2} \left\langle x - \frac{2}{3}L \right\rangle^2 + C1$$

$$EIy = -\frac{Px^3}{6} + \frac{P}{6} \left\langle x - \frac{L}{3} \right\rangle^3 + \frac{P}{6} \left\langle x - \frac{2}{3}L \right\rangle^3 + C1x + C2$$

Condiciones de contorno:

Cuando  $x = 0 \rightarrow y = 0, C2 = 0$

Cuando  $x = L \rightarrow y = 0$

$$0 = -\frac{PL^3}{6} + \frac{P}{6} \left\langle \frac{2}{3}L \right\rangle^3 + \frac{P}{6} \left\langle \frac{1}{3}L \right\rangle^3 + C1L$$

$$0 = -\frac{PL^3}{6} + \frac{8}{162}PL^3 + \frac{PL^3}{162} + C1L \rightarrow C1 = \frac{PL^2}{9}$$

$$EIy = -\frac{Px^3}{6} + \frac{P}{6} \left\langle x - \frac{L}{3} \right\rangle^3 + \frac{P}{6} \left\langle x - \frac{2}{3}L \right\rangle^3 + \frac{PL^2}{9}x \quad (4-3)$$

La ecuación 4-3 permite conocer la deflexión de la viga en cualquier punto. Ahora bien, la máxima deflexión se presenta cuando  $x = \frac{L}{2}$ , por lo tanto, al evaluar 4-3 en este valor obtenemos:

$$EIy\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{PL^3}{48} + \frac{PL^3}{1296} + \frac{PL^3}{18} = \frac{23PL^3}{648}$$

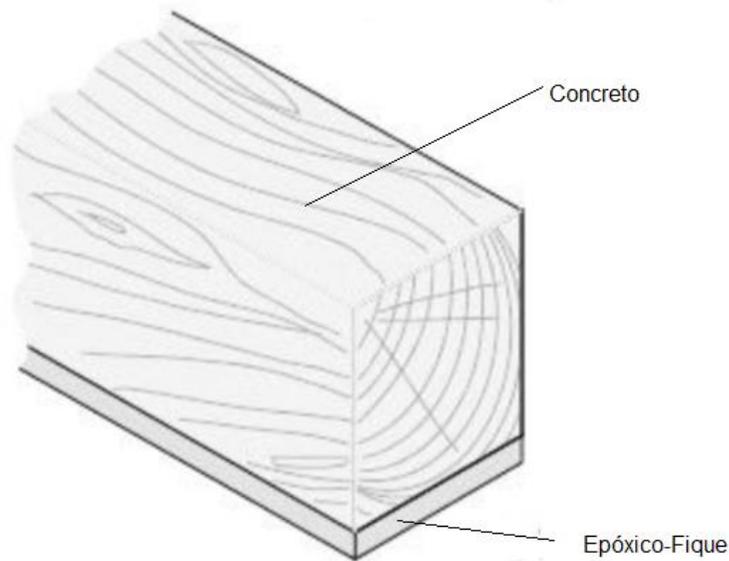
$$y = \frac{23PL^3}{648EI} \quad (4-4)$$

La ecuación 4-4 permite encontrar la deflexión máxima para una viga con carga simétrica en los tercios centrales, como la expuesta en la Figura 4-1.

## 4.2 Vigas compuestas

Se denominan vigas compuestas a aquellas que están fabricadas con más de un material (Gere & Goodno, 2013). El uso de este tipo de vigas es frecuente con el fin de mejorar las prestaciones mecánicas de los elementos estructurales. En este caso particular de estudio, las vigas compuestas están conformadas por dos materiales, el primero, es el concreto y el segundo el compuesto epóxico- fique. Como se describió en los apartados anteriores, el compuesto epóxico-fique se adhirió externamente a las vigas de concreto, en la cara inferior. La Figura 4-2 presenta la configuración de la viga compuesta estudiada.

**Figura 4-2:** Configuración viga compuesta concreto epóxico/fique. Adaptado de (Gere & Goodno, 2013)

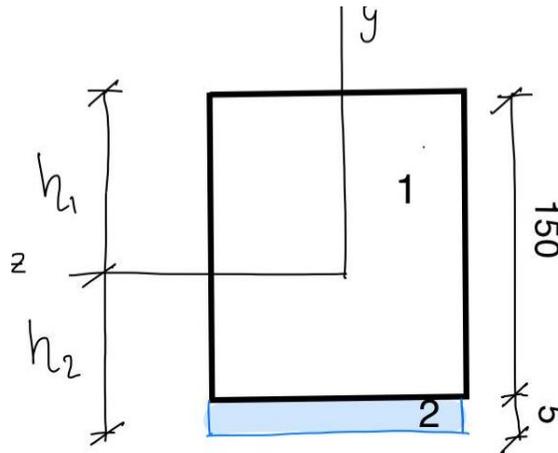


Para el análisis de estas vigas compuestas, se empleó el análisis directo de las deformaciones y esfuerzos.

### 4.2.1 Deformaciones y esfuerzos

Para evaluar el comportamiento de las deformaciones en vigas compuestas se parte del principio básico de que las secciones planas permanecen planas (Segura, 2011), este axioma aplica para las secciones sometidas a flexión pura, tal como se presenta en las vigas de estudio. La Figura 4-3 presenta un modelo de la sección transversal de las vigas de concreto (1) reforzadas externamente con el compuesto epóxico-fique (2), en donde  $h_1$  y  $h_2$  representan la distancia al eje neutro de la sección de la fibra más alejada de cada material respectivamente.

**Figura 4-3:** Sección transversal vigas compuestas. Dimensiones en mm.



Las deformaciones longitudinales  $\varepsilon_x$  de una viga compuesta varían linealmente desde la parte superior hasta la inferior de la viga y se puede expresar por medio de la Ecuación 4-5. Donde  $Y$  es la distancia al eje neutro,  $\rho$  el radio de curvatura y  $k$  es la curvatura.

$$\varepsilon_x = -\frac{Y}{\rho} = -kY \quad (4-5)$$

Al aplicar la Ley de Hooke en la ecuación 4-5 se puede expresar los esfuerzos normales a una distancia  $Y$  del eje neutro en función de la curvatura:

$$\sigma_{x1} = -E_1 kY$$

$$\sigma_{x2} = -E_2 kY$$

En donde  $\sigma_{x1}$  es el esfuerzo en el material 1 y  $\sigma_{x2}$  es el esfuerzo en el material 2, expresiones con las cuales se puede determinar la altura del eje neutro de la sección.

El eje neutro de una sección se encuentra cuando la fuerza axial resultante que actúa sobre la sección transversal es cero (Gere & Goodno, 2013), de tal manera que podemos expresar esta condición mediante la ecuación 4-6.

$$\int_1 \sigma_{x1} dA + \int_2 \sigma_{x2} dA = 0 \quad (4-6)$$

Al ser la curvatura constante en cualquier sección transversal dada, se puede despejar de la expresión, y por lo tanto la ecuación para ubicar el eje neutro de la sección compuesta es la expresión 4-7.

$$E_1 \int_1 Y dA + E_2 \int_2 Y dA = 0 \quad (4-7)$$

Los esfuerzos de flexión en la viga se obtienen por medio de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{x1} = -\frac{MYE_1}{E_1I_1 + E_2I_2} \quad (4-8)$$

$$\sigma_{x2} = -\frac{MYE_2}{E_1I_1 + E_2I_2} \quad (4-9)$$

Las ecuaciones 4-8 y 4-9 se conocen como las fórmulas de la flexión para vigas compuestas.

Para calcular el momento de inercia ( $I$ ) de la sección compuesta se empleó la Ecuación 4-10, la cual se fundamenta en el teorema de ejes paralelos (Gere & Goodno, 2013).

$$I = \frac{1}{3}b * h_1^3 + \frac{1}{3}b * h_2^3 \quad (4-10)$$

## 4.2.2 Análisis de vigas de concreto reforzadas con compuestos FRP

El modelo teórico empleado para idealizar la distribución de esfuerzos en la viga compuesta se basa en el equilibrio de fuerzas internas que se presenta en la sección, como se indica en la Figura 4-4. Para determinar una expresión que permita calcular el momento nominal que resiste una viga de concreto reforzada externamente con el compuesto epóxico-fique, se partió de las siguientes consideraciones:

1. Las secciones planas permanecen planas después de la aplicación de cargas.
2. Las deformaciones en el concreto y el compuesto son proporcionales a la distancia al eje neutro de la sección.
3. La deformación máxima del concreto  $\varepsilon_{cu}$  es 0.003.

4. La tensión que pueda presentarse en el concreto es despreciable.
5. Se define la siguiente nomenclatura:

$\varepsilon_c$ : deformación a compresión fibra extrema de concreto.

$\varepsilon_{ci}$ : deformación inicial a compresión fibra extrema de concreto.

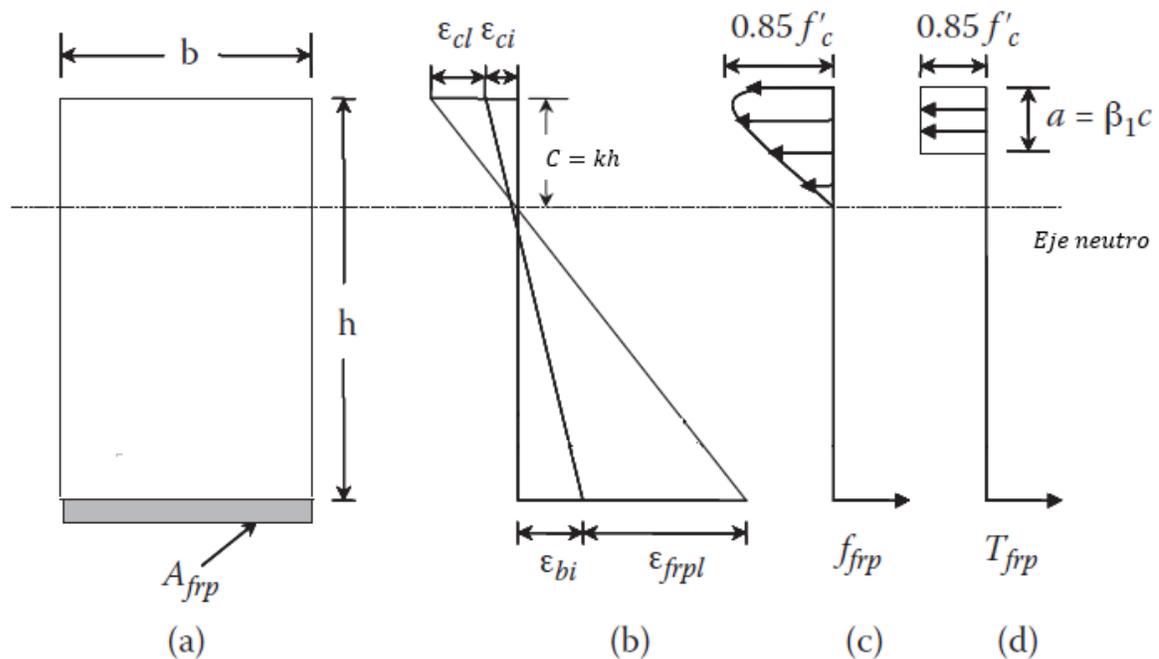
$\varepsilon_b$ : deformación de la fibra del compuesto.

$\varepsilon_{bi}$ : deformación inicial en la fibra del compuesto.

$\varepsilon_{cl}$ : deformación adicional luego de la carga en el concreto.

$\varepsilon_{frpl}$ : deformación adicional luego de la carga en el compuesto.

**Figura 4-4:** Diagrama de deformaciones y fuerzas internas de viga reforzada externamente con compuesto epóxico- fique. (a) sección transversal de la viga, (b) diagrama de deformaciones, (c) distribución parabólica de esfuerzos, (d) distribución de esfuerzos rectangulares equivalente.



Del diagrama de deformaciones obtenemos que:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_i + \varepsilon_{cl} \quad (4-11)$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{bi} + \varepsilon_{frpl} \quad (4-12)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{C} = \frac{\varepsilon_b}{h - C} = \frac{\varepsilon_{bi} + \varepsilon_{frpl}}{h - C} \quad (4-13)$$

Al hacer equilibrio de fuerzas se obtiene:

- Compresión en el concreto  $C_c$

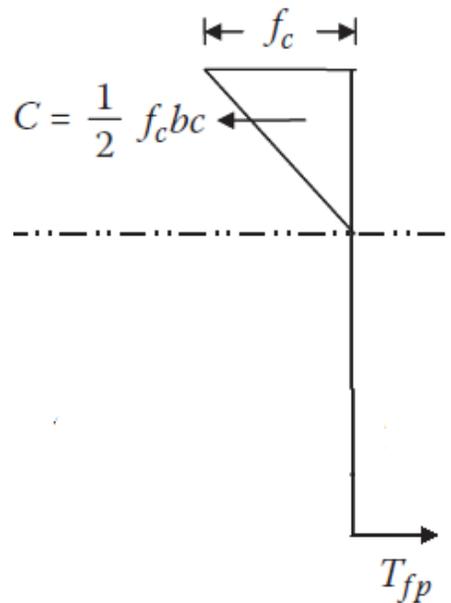
$$C_c = 0.85f'_c * a * b \quad (4-14)$$

- Tensión en FRP antes de la falla ( $\varepsilon_{frp} < \varepsilon_{frpu}$ ):

$$T_{frp} = A_{frp}f_{frp} = A_{frp}(E_{frp}\varepsilon_{frp}) \quad (4-15)$$

Después de la falla tenemos  $T_{frp} = 0$ , se presenta la distribución de fuerzas de la Figura 5-4.

**Figura 4-5:** Distribución de fuerzas internas cuando falla el compuesto



$$C = \frac{1}{2} f_c * b * c \quad (4-16)$$

Teniendo en cuenta la ley de Hooke:

$$f_f = E_f \varepsilon_f, f_c = E_c \varepsilon_c \quad (4-17)$$

$$T_{fp} = C$$

$$A_f f_f = \frac{bc}{2} f_c$$

$$A_f (E_f \varepsilon_f) = \frac{bc}{2} (E_c \varepsilon_c) \quad (4-18)$$

De la ecuación 4-13 obtenemos:

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_c (h - C)}{C}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \left( \frac{h}{C} - 1 \right) \quad (4-19)$$

Sustituyendo 4-19 en 4-18 y dividiendo entre  $\varepsilon_c$ :

$$A_f E_f \left( \frac{h - C}{C} \right) = \frac{bc}{2} E_c$$

$$A_f E_f (h - C) = \frac{bc^2}{2} E_c, \text{ como } n_f = \frac{E_f}{E_c}:$$

$$A_f n_f (h - C) = \frac{bc^2}{2} \quad (4-20)$$

Al dividir 4-20 entre  $bh$ , y definiendo  $\rho_f = \frac{A_f}{bh}$ , como la cuantía de refuerzo de compuesto:

$$\frac{2A_f}{bh} n_f (h - C) = \frac{C^2}{h}$$

$$2\rho_f n_f (h - C) = \frac{C^2}{h}$$

$$0 = \frac{C^2}{h} - 2\rho_f n_f (h - C)$$

$$C^2 + 2\rho_f n_f h C - 2\rho_f n_f h^2 = 0$$

$$C = \frac{-2\rho_f n_f h + \sqrt{4(\rho_f n_f h)^2 + 4(2\rho_f n_f h^2)}}{2}$$

La distancia  $C$ , al eje neutro de la sección se puede encontrar multiplicando la altura  $h$  por un factor  $k$  (Segura, 2011) de tal manera que:

$$C = kh \rightarrow k = \frac{C}{h}$$

$$k = \frac{-2\rho_f n_f h + \sqrt{4(\rho_f n_f h)^2 + 4(2\rho_f n_f h^2)}}{2h} \quad (4-21)$$

La expresión 4-21 permite hallar el factor  $k$ , con el cual es posible conocer la distancia  $C$  del eje neutro a las fibras extremas de la sección. Una vez determinada  $C$  se puede calcular el momento nominal de la sección.

El momento nominal  $M_n$  de la sección se obtiene partiendo del supuesto de que cuando el compuesto llega a la falla, la viga deja de resistir carga, de tal manera que las fuerzas internas producidas al interior de la viga se pueden representar mediante la Figura 4-6.

**Figura 4-6:** Distribución de fuerzas internas un instante antes de la falla del compuesto



Si  $\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{frpu}$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_{frpu} + \varepsilon_{bi}}{h - c}, \text{ como } C = \frac{a}{\beta_1}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_{frpu} + \varepsilon_{bi}}{\beta_1 - a}$$

Donde:

$$\beta_1 = 0.85 \text{ para } f'_c < 28 \text{ MPa o } \beta_1 = 0.85 - 0.05\left(\frac{f'_c - 28}{7}\right)$$

Al hacer el equilibrio de fuerzas internas de la sección tenemos que:

$$0.85 f'_c ab = A_{frp} (E_{frp} \varepsilon_{frpu})$$

$$a = \frac{A_{frp} (E_{frp} \varepsilon_{frpu})}{0.85 f'_c b}$$

Por lo tanto el par interno de la sección, producido por las tensiones y compresiones actuantes, es decir el momento nominal  $M_n$ , se define por la expresión 4-22.

$$M_n = A_{frp} (E_{frp} \varepsilon_{frpu}) \left( h - \frac{a}{2} \right) \quad (4-22)$$

Para el análisis teórico de las vigas compuestas se calculó el módulo de elasticidad del concreto en función del tipo de agregado empleado en la elaboración de la mezcla (Segura, 2011), que para este caso es un agregado de origen sedimentario. La Ecuación 4-23 permite determinar el módulo de elasticidad del concreto  $E_h$ .

$$E_h = 3600 \sqrt{f'_c} \quad (4-23)$$

### 4.3 Comparación de resultados experimentales con los teóricos

Para realizar la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente, con los obtenidos al aplicar las expresiones expuestas anteriormente, se presentan las tablas resumen de las propiedades mecánicas a estudiar, las cuales fueron explicadas con detalle en el capítulo 3. La Tabla 4-1 presenta las propiedades mecánicas de los compuestos epóxico-fique, donde D corresponde al compuesto hecho con tejido tupido y MD es el compuesto hecho con tejido ralo de fique, por su parte, las Tablas 4-2 y 4-3 presentan las propiedades mecánicas determinadas experimentalmente para las vigas reforzadas (ver

Tabla 3-10, 3-14 y 3-15, capítulo 3) externamente con el compuesto en mención, para concretos de resistencia 17 MPa y 24 MPa, respectivamente.

**Tabla 4-1:** Valores promedio de las propiedades mecánicas del compuesto epóxico/fique determinados experimentalmente

Tejido	Esfuerzo de tensión promedio (MPa)	Módulo de elasticidad promedio (MPa)	Deformación unitaria promedio (%)
D	4.93	145.69	4.73
MD	3.85	138.14	3.74

**Tabla 4-2:** Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 17 MPa determinadas experimentalmente.

f'c (MPa)	Viga	Carga Máxima (N)	Resistencia a flexión (MPa)	Momento máximo (N*m)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deflexión (mm)
17	VB-MD1	19689.65	2.63	1476.72	14872.64	0.033
17	VB-MD2	18565.92	2.48	1392.44	16786.93	0.030
17	VB-D1	18375.86	2.45	1378.19	17242.33	0.025
17	VB-D2	19852.01	2.65	1488.90	17486.90	0.025

**Tabla 4-3:** Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 24 MPa determinadas experimentalmente.

f'c (MPa)	Viga	Carga Máxima (N)	Resistencia a flexión (MPa)	Momento máximo (N*m)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deflexión (mm)
24	VA-MD1	33953.59	4.53	2546.52	21221.72	0.024
24	VA-MD2	34716.12	4.63	2603.71	22149.38	0.022
24	VA-D1	35905.38	4.79	2692.90	23215.05	0.019
24	VA-D2	39349.48	5.25	2951.21	22985.05	0.021

### 4.3.1 Resultados y discusión

A continuación, se presenta la aplicación de las ecuaciones expuestas en el apartado 4.2, con las cuales se obtuvieron los resultados teóricos.

Para la exposición del análisis teórico detallado se tomará como ejemplo la viga compuesta VB-D1.

- Módulos de elasticidad de los materiales

Partiendo de la ecuación 4-23 tenemos que para el concreto de 17 MPa el módulo de elasticidad teórico es:

$$E_1 = 3600\sqrt{f'_c} = 3600\sqrt{17} = 14.843 \text{ MPa}$$

El módulo de elasticidad del compuesto epóxico- fique es tomado de la Tabla 4-1.

$$E_2 = 146 \text{ MPa}$$

- Determinación del eje neutro

$$\int_1 y dA = \bar{y}_1 A_1 = (h_1 - 75)(150^2) = (h_1 - 75)(22500)$$

$$\int_2 y dA = \bar{y}_2 A_2 = -(155 - h_1)(150 * 5) = (h_1 - 155)(750)$$

Reemplazando en la Ecuación 4-7 las expresiones anteriores:

$$E_1 \int_1 Y dA + E_2 \int_2 Y dA = 0$$

$$E_1(h_1 - 75)(22500) + E_2(h_1 - 155)(750) = 0$$

$$14.843(h_1 - 75)(22500) + 146(h_1 - 155)(750) = 0$$

$$(14.843h_1 - 1.113.225)(22500) + (146h_1 - 22.630)(750) = 0$$

$$333.976.500h_1 - 2,50 * 10^{10} + 109.500h_1 - 16.972.500 = 0$$

$$334.077.000h_1 - 2,50 * 10^{10} = 0$$

$$h_1 = 74,88 \text{ mm}$$

$$h_2 = 155 - 74,88 \text{ mm}$$

$$h_2 = 80,12 \text{ mm}$$

- Momentos de inercia

Aplicando la Ecuación 4-10:

$$I = \frac{1}{3}b * h_1^3 + \frac{1}{3}b * h_2^3$$

$$I = \frac{1}{3}(150)(74,88^3) + \frac{1}{3}(150)(80,12^3)$$

$$I = 46.708.034 \text{ mm}^4$$

$$I_1 = \frac{1}{12}(150)(150^3) + (150^2)(h_1 - 75)^2$$

$$I_1 = 42.187.824 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = 4.472.096 \text{ mm}^4$$

- Esfuerzos de flexión

Los esfuerzos en los materiales 1 y 2 se determinan empleando las Ecuaciones 4-8 y 4-9, tomando como momentos máximos los valores expuestos en las Tablas 4-2 y 4-3.

El esfuerzo de tensión máximo en el concreto (material 1) se produce en el plano de contacto entre los dos materiales, donde  $Y = -(h_2 - 5) = -75,12$ .

$$\sigma_{x1} = -\frac{MYE_1}{E_1I_1 + E_2I_2} = -\frac{1.378.189(-75,12)(14.843)}{(14.843)(42.187.824) + (146)(4.472.096)} = 2,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x1} = 2,44 \text{ MPa}$$

La lámina de compuesto epóxico-fique (material 2) se ubica por debajo del eje neutro, por lo tanto, está completamente solicitada a tensión, por tal razón  $Y = -h_2$ .

$$\sigma_{x2} = -\frac{MYE_2}{E_1I_1 + E_2I_2} = -\frac{1.378.189(-80,12)(146)}{(14.843)(42.187.824) + (146)(4.472.096)} = 0,026 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x2} = 0,026 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de tensión indirecta producida por la flexión pura a la que está sometida la viga compuesta es de 2,47 MPa.

- Momento nominal

Empleando la Ecuación 4-22 se obtiene que:

$$Mn = A_{frp}(E_{frp}\varepsilon_{frpu})\left(h - \frac{a}{2}\right)$$

Los valores de  $E_{frp}$  y  $\varepsilon_{frpu}$  son obtenidos de la Tabla 4-1.

$$a = \frac{A_{frp}(E_{frp}\epsilon_{frpu})}{0.85f'_c b} = \frac{(1200)(146)(0,0473)}{0.85(17)(150)} = 3,823 \text{ mm}$$

$$Mn = 1200(146)(0,0473) \left(155 - \frac{3,823}{2}\right) \div 1000 = 1.268,64 \text{ N} * \text{m}$$

$$\mathbf{Mn = 1.268,64 \text{ N} * \text{m}}$$

- Deflexión teórica

Para el cálculo de la deflexión teórica se empleó la expresión 4-4.

$$y = \frac{23PL^3}{648EI} = \frac{23(18.375,86 * 0,50)(450^3)}{648(17242,33)(46.659.920)} = 0,037 \text{ mm}$$

$$\mathbf{y = 0,037 \text{ mm}}$$

El procedimiento de cálculo expuesto anteriormente, se repitió para cada uno de los especímenes de estudio. Las Tablas 4-4 y 4-5 presentan los resultados teóricos obtenidos para el compuesto hecho con concreto de resistencia a la compresión de 17 MPa (VB) y con concreto de 24 MPa (VA), respectivamente.

**Tabla 4-4:** Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 17 MPa determinadas teóricamente.

f'c (MPa)	Viga	Carga Máxima (N)	Esfuerzo teórico (MPa)	Momento nominal (N*m)	Deflexión teórica (mm)
17	VB-MD1	19689.65	2.64	1142.51	0.046
17	VB-MD2	18565.92	2.50	1142.51	0.038
17	VB-D1	18375.86	2.47	1268.64	0.037
17	VB-D2	19852.01	2.67	1268.64	0.039

**Tabla 4-5:** Propiedades mecánicas del compuesto concreto/epóxico-fique con concreto de 24 MPa determinadas teóricamente.

f'c (MPa)	Viga	Carga Máxima (N)	Esfuerzo teórico (MPa)	Momento nominal (N*m)	Deflexión Teórica (mm)
24	VA-MD1	33953.59	4.55	1432.01	0.033
24	VA-MD2	34716.12	4.66	1432.01	0.033
24	VA-D1	35905.38	4.81	1909.89	0.032
24	VA-D2	39349.48	5.27	1909.89	0.036

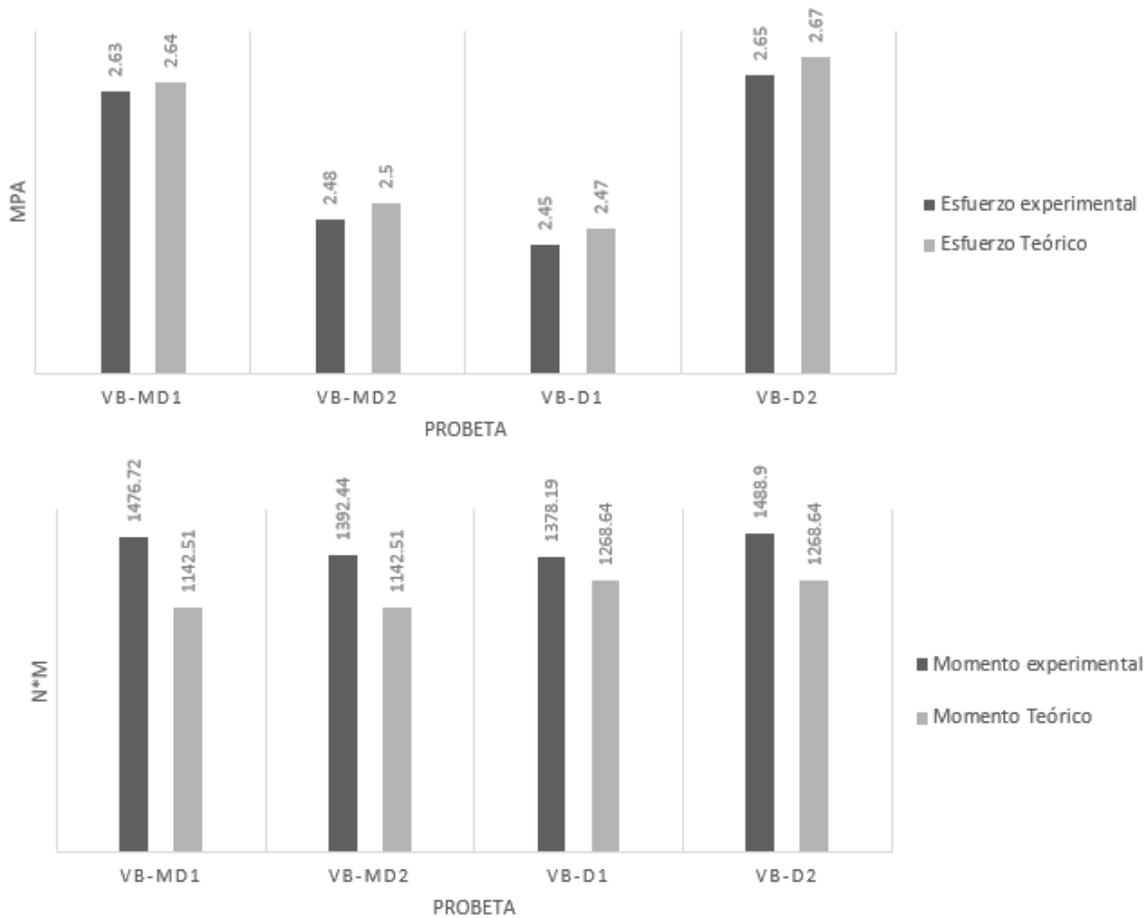
Las Tablas 4-6 y 4-7 presentan la comparación de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente y las calculadas teóricamente, para las vigas hechas con concreto de

baja y alta resistencia, respectivamente. Esta comparación se representa gráficamente en las Figuras 4-7 y 4-8.

**Tabla 4-6:** Comparación de propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente y analíticamente. Compuestos fabricados con concreto de 17 MPa.

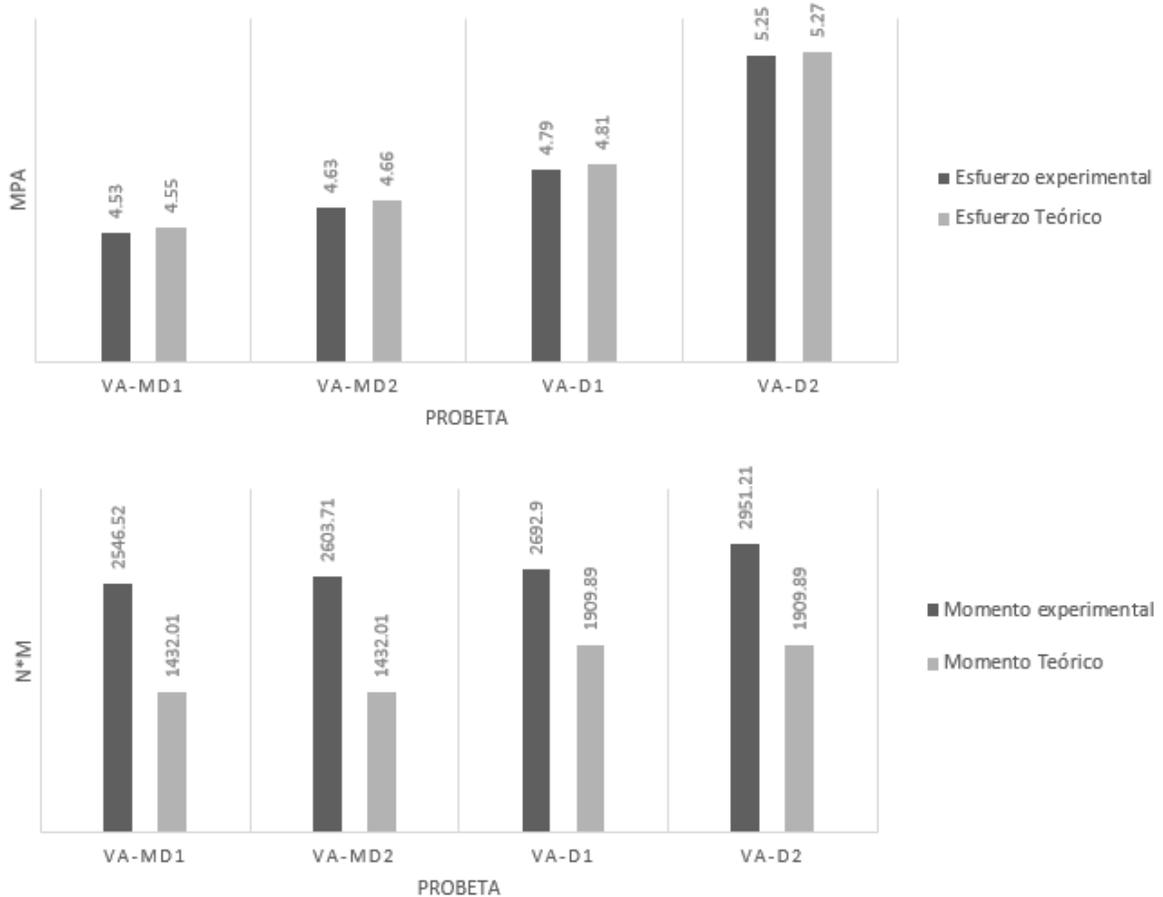
Especímen		Resultados experimentales			Resultados teóricos		
f'c (MPa)	Viga	Resistencia a flexión (MPa)	Momento máximo (N*m)	Deflexión (mm)	Esfuerzo a flexión en el compuesto (MPa)	Momento nominal (N*m)	Deflexión (mm)
17	VB-MD1	2.63	1476.72	0.033	2.64	1142.51	0.046
17	VB-MD2	2.48	1392.44	0.030	2.50	1142.51	0.038
17	VB-D1	2.45	1378.19	0.025	2.47	1268.64	0.037
17	VB-D2	2.65	1488.90	0.025	2.67	1268.64	0.037

**Figura 4-7:** Comparación de resultados teóricos y experimentales. Compuestos fabricados con concreto de 17 MPa



**Tabla 4-7:** Comparación de propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente y analíticamente. Compuestos fabricados con concreto de 24 MPa.

Espécimen	Resultados experimentales			Resultados teóricos		
Viga	Resistencia a flexión (Mpa)	Momento máximo (N*m)	Deflexión (mm)	Esfuerzo a flexión en el compuesto (Mpa)	Momento nominal (N*m)	Deflexión (mm)
VA-MD1	4.53	2546.52	0.024	4.55	1432.01	0.033
VA-MD2	4.63	2603.71	0.022	4.66	1432.01	0.033
VA-D1	4.79	2692.90	0.019	4.81	1909.89	0.032
VA-D2	5.25	2951.21	0.021	5.27	1909.89	0.036

**Figura 4-8:** Comparación de resultados teóricos y experimentales. Compuestos fabricados con concreto de 24 MPa

Al comparar el esfuerzo de ruptura (resistencia a la flexión) de las vigas hechas con concreto de 17 MPa (VB) con el esfuerzo a flexión calculado teóricamente se puede identificar que los valores encontrados en ambos casos son prácticamente iguales, sin importar si se empleó tejido ralo o tupido. Esto indica que, para la evaluación de esfuerzos actuantes en las vigas de concreto reforzadas externamente con el compuesto epóxico-

---

fique se pueden emplear los métodos tradicionales de análisis de vigas compuestas (Gere & Goodno, 2013).

Ahora bien, el momento nominal calculado analíticamente para las vigas VB-D (concreto de 17 MPa con tejido tupido) presenta una diferencia promedio del 12 % respecto al momento máximo resistido por las vigas en el laboratorio, sin embargo, para las vigas VB-MD (hechas con tejido ralo) esta diferencia es de un 25 % en promedio, lo cual podría deberse a qué, teóricamente se asume que el concreto no resiste esfuerzos de tensión (Segura, 2011) sin embargo, experimentalmente se identifica que el concreto sí resiste tensión hasta sobrepasar el esfuerzo de rotura, razón por la cual las lecturas experimentales son mayores a los resultados teóricos. Las deflexiones registradas experimentalmente para todas las vigas VB son menores a las deflexiones calculadas teóricamente, esto puede deberse a que en el laboratorio el deflectómetro se retira cuando se llega aproximadamente al 45% de la carga máxima que soporta un espécimen testigo, mientras que el análisis teórico de deflexiones supone que la máxima deformación se obtiene antes de la falla, es decir un instante antes de alcanzar la carga máxima resistida por el elemento, sin embargo, el comportamiento general es el mismo: se evidencia que para las vigas VB-D las deflexiones teóricas son menores que las deflexiones calculadas para las VG-MD, tal como sucede con los resultados obtenidos en laboratorio.

Al analizar las vigas hechas con concreto de 24 MPa (VA) se evidencia un comportamiento similar al descrito anteriormente. La comparación de esfuerzos experimentales y teóricos permite afianzar la idea de que la modelación y análisis teórico empleado es adecuado para el estudio de los esfuerzos actuantes en las vigas, pues en ambos casos se obtienen valores muy similares. Las diferencias entre el momento resistente experimental y el momento nominal aumentaron en las vigas VA, por ejemplo, las VA-D (reforzadas con tejido tupido) presentan una diferencia promedio del 45 % entre el momento máximo resistido y el nominal calculado, y en las vigas VA-MD la diferencia es en promedio del 70%. Este aumento en la diferencia de resultados en los momentos analizados puede estar asociado a que entre mayor sea la resistencia del concreto empleado, la altura del bloque de compresiones ( $a$ ) es menor, por lo tanto el momento nominal calculado con la Ecuación 4-22 disminuye y el mayor aporte a la resistencia del elemento estaría dado por el compuesto epóxico-fique, sin embargo, experimentalmente se evidencia que el concreto aporta gran resistencia a la flexión antes de llegar a la carga máxima. Las deflexiones calculadas teóricamente para las vigas VA, son mayores a las registradas en el laboratorio, debido a que el deflectómetro se retira antes de la falla, como se explicó anteriormente.

Por otro lado, las expresiones deducidas para el cálculo del momento nominal presentan una buena aproximación a los resultados teóricos para las vigas VB-D, pero para las demás vigas presentan diferencias considerables, en especial en las vigas VA. Estas variaciones pueden ser controladas con el uso de factores de reducción de resistencia, factores encontrados experimentalmente, o factores de ajuste en las ecuaciones, como se describe en la literatura (GangaRao et al., 2006).

Al evaluar el cambio o desplazamiento del eje neutro de las vigas compuestas, se puede observar que este no se desplaza significativamente respecto al eje centroidal de la sección, debido a que el material 2 (compuesto epóxico-fique) presenta un módulo de elasticidad mucho menor que el del material 1 (concreto) (Gere & Goodno, 2013; Segura, 2011).

#### **4.4 Conclusiones de la comparación de resultados experimentales con resultados teóricos**

Al comparar los resultados experimentales con los teóricos se concluye que las expresiones deducidas para el cálculo de esfuerzos por flexión en vigas son consistentes con los resultados obtenidos en el laboratorio para todas las vigas ensayadas, sin discriminar el tipo de tejido con el cual se fabricó el compuesto.

La comparación de los momentos máximos resistidos en el laboratorio con los momentos nominales calculados teóricamente, presentó una buena aproximación para algunas vigas, sin embargo, las vigas hechas con concreto de mayor resistencia presentaron variaciones mayores entre los resultados comparados.

Las deflexiones calculadas teóricamente fueron mayores en todos los casos a las registradas experimentalmente, sin embargo, el patrón de comportamiento se mantuvo, dando como resultado que las vigas reforzadas con compuesto fabricado con tejido ralo presentaban menos deflexiones ante sollicitaciones de flexión.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

En este apartado se presentan las conclusiones generales de la investigación realizada con el objetivo de evaluar la influencia de reforzar externamente vigas de concreto con un compuesto fabricado a base de una matriz epóxica y reforzado con fibras fique. A su vez, se presentan las conclusiones de la caracterización mecánica de la fibra de fique, la matriz epóxica utilizada y del compuesto epóxico/fique. Como parte final de este capítulo se exponen una serie de recomendaciones a tener en cuenta para futuras investigaciones relacionadas con materiales compuestos reforzados con fibras naturales.

### 5.1 Conclusiones

La caracterización mecánica de la fibra de fique determinó que al someter las fibras a un tratamiento alcalino empleando hidróxido de sodio (NaOH) al 5% de concentración, con un tiempo de 30 minutos, se logra una mejora en las propiedades mecánicas, si se compara con fibra de fique no tratada. Por ejemplo, se identificó que al usar este tratamiento sobre la fibra se presentó un aumento en la resistencia a la tensión de la fibra, mientras que el módulo de elasticidad incremento en un 22 % y la reducción en la deformación unitaria fue del 25 %. El esfuerzo a tensión en las fibras de fique fue de alrededor de 400 MPa, mientras que el módulo de elasticidad alcanzó valores de hasta 10 GPa, y el alargamiento en la rotura presentó valores entre el 4 y 6 %. Este aumento en la resistencia en la fibra tratadas puede estar ligado al cambio de orientación molecular de las cadenas de celulosa, ocasionadas por la interacción de hidróxido de sodio.

Al analizar las propiedades mecánicas del tejido de fique utilizado se evidenció que el tejido tupido presentó mejor rendimiento que el tejido ralo al ser sometido a fuerzas de tensión, debido a poseer mayor cantidad de fibras de fique por unidad de área. Al comparar las propiedades mecánicas del tejido de fique con las de la fibra de fique aislada se observó que la resistencia de los tejidos es mucho menor que la de la fibra aislada. Esto se puede relacionar a la cantidad de micro-defectos por unidad ensayada, que aumenta en los tejidos como se expuso en el Capítulo 3.

La matriz epóxica empleada en la fabricación del compuesto epóxico/fique presentó un comportamiento elástico lineal al ser sometida a cargas de tensión, obteniendo en promedio, una resistencia a la tensión de 3 MPa y un módulo de elasticidad de 129 MPa. La deformación unitaria alcanzó hasta un 4,8 %. También se evidenció que, esta matriz se adhiere muy bien a los elementos de concreto y a las fibras de fique.

El compuesto epóxico/fique (EF) se fabricó empleando dos contenidos de fibra. Para el primer grupo del compuesto se empleó un contenido de fibra del 10 % empleando tejido tupido (D) y para el segundo grupo un contenido de fibra del 7 % empleando tejido ralo (MD). El estudio de las propiedades mecánicas del compuesto EF determinó que entre

mayor sea el contenido de fibras de fique en el compuesto, sus prestaciones mecánicas mejoran. Por ejemplo, los EF que contenían 10 % de fibra de fique presentaron 25 % más de resistencia a la tensión y de alargamiento antes de la rotura, así mismo, presentaron un incremento del 5 % en el módulo de elasticidad, comparados con los EF que contenían 7 % de fibra de fique. Los EF fabricados con más porcentaje de fibra alcanzaron valores de resistencia a la tensión de 5 MPa, módulo de elasticidad de 148 MPa y deformación unitaria del 4,99 %. Por su parte, los EF con menor cantidad de fibra presentaron una resistencia a la tensión de 3,83 MPa, un módulo de elasticidad de alrededor de 136 MPa y deformaciones unitarias de hasta 3 %.

Al reforzar externamente vigas de concreto con el material epóxico/fique se observó una mejora en las propiedades mecánicas. Por ejemplo, para las vigas fabricadas con concreto de 17 MPa, la resistencia a la flexión aumentó entre un 15 y 20 % al emplear el refuerzo externo, mientras que para las vigas de concreto de 24 MPa este incremento en su resistencia fue de 10%. El módulo de elasticidad de las vigas reforzadas aumentó entre un 10 a 20%, mientras que las deflexiones se redujeron hasta en un 20%. Las vigas que presentaron mayor mejora en sus propiedades mecánicas fueron aquellas cuyo refuerzo fue hecho empleando tejido de fique tupido. Esto se debe a que, el epóxico/fique hecho con este tejido presentó mayor rendimiento ante fuerzas de tensión que el compuesto fabricado con tejido ralo. También se evidenció que, la mejora en las propiedades mecánicas fue más alta para las vigas hechas con concreto de 17 MPa que para las vigas de concreto de 24 MPa, lo cual se puede asociar a que, entre más rígido sea un elemento de concreto, el refuerzo que se emplee debe tener mayores prestaciones mecánicas, para lograr mayor eficiencia del elemento reforzado.

Al comparar los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos en laboratorio y aplicando los principios fundamentales de la resistencia de materiales, respectivamente, se obtuvo una buena aproximación en los modelos teóricos planteados para describir o estudiar el comportamiento de vigas compuestas, como se denominó en esta investigación: compuesto concreto epóxico/fique (CEF). Para el análisis de los esfuerzos normales presentados en las vigas compuestas, el modelo teórico propuesto describe eficiente el comportamiento de los esfuerzos ante las cargas impuestas, lo cual se evidenció para los dos grupos de compuesto (concreto de 17 MPa y de 24 MPa). No existe variación en los resultados experimentales comparados con los resultados teóricos. Sin embargo, en el modelo teórico propuesto para la evaluación de los momentos nominales de las vigas compuestas se presentan ciertas diferencias con los resultados experimentales. Estas diferencias no fueron discretizadas o controladas ya que, no se manejaron factores de reducción de resistencia de los materiales o factores de ajustes experimentales, como se suele hacer en la determinación de expresiones que permitan estudiar secciones compuestas, pues el autor considera que este alcance se debe dar en investigaciones enfocadas al diseño de materiales compuestos.

## 5.2 Recomendaciones

Las fibras naturales tienen un gran potencial para ser empleadas en las aplicaciones de la ingeniería estructural. Sin embargo, aún falta mucho por desarrollar en el estudio de estas fibras, por tal razón se recomienda desde la academia, promover el interés por ahondar en este tema. Realizando investigaciones con distintos tipos de fibras naturales, cambiando la matriz empleada, proponiendo otros tipos de refuerzos en elementos estructurales empleando NFRP, entre otros.

En esta investigación se emplearon vigas de concreto de sección cuadrada. Para ampliar el estudio de vigas de concreto reforzadas externamente, sometidas a flexión, es conveniente realizar estudios para vigas con diferentes relaciones de ancho- altura, longitud- altura, entre otros. Adicionalmente, para extender el estudio de vigas compuestas, empleando FRP, se pueden hacer ensayo a cortante, para evaluar el comportamiento de vigas reforzadas ante estas solicitaciones.

## 6. Referencias

- Al-mahaidi, R. K. (2018). *Rehabilitation of Concrete Structures With Fiber -Reinforced Polymer*. 4(9), 420.
- Aladdin, M., Alaa, M., & Ezzat, A. (2018). Performance of sustainable natural yarn reinforced polymer bars for constructions applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 158, 359–368.
- Alam, M., Hassan, A., & Muda, Z. (2015). Development od Kenaf fibre Reinforced Polymer Laminate for Shear Strengthening or Reinforcel Concrete Beam. *Material and Structures*, 49.
- Alberto Pérez Gracia, L. (n.d.). *Artículo de Monografía para optar al título de Ingeniero Mecánico Universidad Autónoma Del Caribe. Barranquilla, 2014 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE FIBRA DE FIQUE Y FIBRAS SINTÉTICAS*. Retrieved from [www.uac.edu.co](http://www.uac.edu.co)
- Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabbar, M., Hussain, T., Militky, J., & Baheti, V. (2018, May 1). Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—A review. *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 47, pp. 2153–2183. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>
- Alves, M., Castro, T., & Toledo, R. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>
- ASTM. (2002). *ASTM C 78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)*. 1–10.
- ASTM. (2013). *Astm D3039/D3039M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standards*, 1–13. <https://doi.org/10.1520/D3039>
- ASTM. (2014). *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. Astm C1557-14*, 1–10. <https://doi.org/10.1520/C1557-14.2>
- Brent, A. (2006). *Plastic: materials and processing. Upper Saddle River*.
- Castro, C., Palencia, A., Gutiérrez, I., Vargas, G., & Gañán, P. (2007). Determination of optimal alkaline treatment conditions for fique fiber bundles as reinforcement of composites materials. *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 30(2), 136–142.
- Charlet, K., Eve, S., Jernot, J. P., Gomina, M., & Breard, J. (2009). Tensile deformation of a flax fiber. *Procedia Engineering*, 1(1), 233–236. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2009.06.055>
- Cuéllar, A., & Muñoz, I. (2010). Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *DYNA (Colombia)*, 77(162), 138–142.

- Devore, J. (2005). *Probabilidad y Estadística Para Ingeniería y Ciencias* (6th ed.). México D.F.: Thomson.
- Echeverri, D., Franco, L., & Velásquez, M. (2015). *Fique en Colombia*. Retrieved from <https://doi.org/10.22430/9789588743820>
- Estrada, M. (2010). *Extraccion y caracterizacion mecanica de las fibras de bambu ( Guadua angustifolia ) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos .* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3984.3046>
- Faruk, O., Bledzki, K., Fink, P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fiber: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 11.
- Gañán, P., & Mondragón, I. (2014). Influence of Compatibilizacion Treatments on the Mechanical Properties of Fique Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *International Journal of Polymer Science*, 53.
- GangaRao, H. V. S., Taly, N., & Vijay, P. V. (2006). Reinforced Concrete Design with FRP Composites. In *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. <https://doi.org/10.1201/9781420020199>
- Gere, J., & Goodno, B. (2013). *Mecánica De Materiales* (8th ed.). México D.F.: CENGAGE Learning.
- Gómez, Alvarez, V., Rojo, P., & Vázquez, A. (2012). Fique fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application. *Fibers and Polymers*, 13(5), 632–640. <https://doi.org/10.1007/s12221-012-0632-8>
- Gómez, S., Ramón, B., & Guzman, R. (2017). *Revista UIS Ingenierías* (Vol. 17).
- Hafizah, N. A. K., Bhutta, M. A. R., Jamaludin, M. Y., Warid, M. H., Ismail, M., Rahman, M. S., ... Azman, M. (2014). Kenaf fiber reinforced polymer composites for strengthening RC beams. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(6), 167–177. <https://doi.org/10.3151/jact.12.167>
- Hallonet, A., Ferrier, E., & Michel, L. (2019). Durability and tensile characterization of wet lay-up flax/epoxy composites used for external strengthening of RC Structures. *Construction and Building Materials*, 205, 679–698.
- Hidalgo, M. A., Muñoz, M. F., & Quintana, K. J. (2011). Desempeño mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con agro fibras continuas de fique. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 31(2), 187–194.
- Hidalgo, M., Muñoz, M., & Quintana, K. (2012). Análisis mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1), 89–95.
- Isaza, L., & Acevedo, E. (2016). Comparación de Pruebas de Normalidad. *XXI Simposio Internacional de Estadísticas 2015*, 77(Zimmerman 2011), 8–11. Retrieved from [http://simposioestadistica.unal.edu.co/fileadmin/content/eventos/simposioestadistica/documentos/memorias/Memorias\\_2016/Posters/16.\\_Pruebas\\_Normalidad\\_Cortes\\_Rave\\_\\_\\_Hernandez.pdf](http://simposioestadistica.unal.edu.co/fileadmin/content/eventos/simposioestadistica/documentos/memorias/Memorias_2016/Posters/16._Pruebas_Normalidad_Cortes_Rave___Hernandez.pdf)

- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- Ku, H., Wang, H., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42, 856–873.
- Liu, D., Song, J., Anderson, D., & Chang, P. (2012). Bamboo Fiber and its Reinforced Composites: Structure and Properties. *Cellulose*, 19.
- López M., J. (2012). *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono*.
- Luna, P. (2020). *Mechanical behavior of a composite material using a polyester matrix reinforced with Guadua angustifolia bamboo fibers*.
- Luna, P., Mariño, A., Lizarazo, J., & Beltrán, O. (2017). Dry etching plasma applied to fique fibers: Influence on their mechanical properties and surface appearance. *Procedia Engineering*, 200, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.021>
- Machado, L., & Dos Santos, J. (2017). Novel fibre metal laminate sandwich composite with sisal woven core. *Industrial Crops and Products*, 99.
- Mahjoub, R., & Mohamad, J. (2014). Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Construction and Building Materials*, 55, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.036>
- Martínez, L. (2010). *Innumerables usos del Fique*. FEDEFIQUE.
- Matallana, R. (2019). *El Concreto fundamentos y nuevas tecnologías* (1st ed.). Medellín: Constructora Conconcreto.
- MathWorks. (2016). *MatLab 2016a*. Natick, Massachusetts: The Math Works Inc.
- Menna, C., Asprone, D., Durante, M., Zinno, A., Balsamo, A., & Prota, A. (2015). Structural behaviour of masonry panels strengthened with an innovative hemp fibre composite grid. *Construction and Building Materials*, 100, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.051>
- Mera, J., & García, E. (2013). Fabricación de papel artesanal a partir de Fique como fuente de fibra alternativa. *Investigación, Tecnología y Ciencia*, 15, 31–35.
- Microsoft. (2016). *Excel 2016*. US.
- Mohammed, L., Ansari, M. N. M., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>
- Muñoz, M., Hidalgo, M., & Mina, J. (2018). Effect of content and surface modification of fique fibers on the properties of a low-density polyethylene (LDPE)-Al/fique composite. *Polymers*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/polym10101050>

- Muñoz, M., & Mina, J. (2014). Fique Fiber an alternative for reinforced pastics. Influence of surface modification. In *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 12).
- Pinzón Galvis, S. (2013). *Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique*. Retrieved from [www.veoverde.com/2009/07/fi](http://www.veoverde.com/2009/07/fi)
- Pradeep, P., Raja, J., Ramachandran, M., & Retnam, S. (2015). Mechanical Characterization of jute fiber over glass and carbon fiber reinforced polymer composites. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(11), 10392–10396.
- Raju, B., Hiremath, S. R., & Roy Mahapatra, D. (2018, November 15). A review of micromechanics based models for effective elastic properties of reinforced polymer matrix composites. *Composite Structures*, Vol. 204, pp. 607–619. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.125>
- Ramón Valencia, F., Lopez-Arraiza, A., Múgica, J. I., Aurrekoetxea, J., Suarez, J. C., & Ramón-Valencia, B. (2015). Influence of seawater immersion in low energy impact behavior of a novel colombian fique fiber reinforced bio-resin laminate. *DYNA*, 82(194), 170–177. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n194.48622>
- Ribot, N. M. H., Ahmad, Z., Mustaffa, N. K., & Alam, S. (2011). Mechanical propertise of Kenaf fiber composite using co-Cured in-line fiber joint. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, ISSN, 3(4), 975–5462.
- Segura, J. (2011). *Estructuras de concreto I*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Segurado, J. (2004). *Micromecánica computacional de materiales compuestos reforzados con partículas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sen, T., & Jagannatha, H. N. (2011). Application of Sisal, Bamboo, Coir and Jute Natural. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. *International Journal of Innovation, Maagement and Technology*, 2(3), 186–191.
- Sen, T., & Reddy, H. (2013). Strengthening of RC Beams in Flexure Using Natural Jute Fibre Textile Reinforced Composite System and its Comparative Study with CFRP and GFRP Strengthening System. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2, 41–55.
- Sen, Tara, & Reddy, H. N. J. (2013). Pretreatment of woven jute FRP composite and its use in strengthening of reinforced concrete beams in flexure. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/128158>
- Silva, F. de A., Chawla, N., & Filho, R. D. de T. (2008). Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, 68(15–16), 3438–3443. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.001>
- Sowndharya, D., Kathirvel, M., & Yuvaraj, K. (2019). *Strengthening of RC Beam using Numerous Natural Fibre Laminates - a Review*. (September).
- Spiegel, M. (1997). *Estadística* (2nd ed.). Madrid: Mc Graw Hill.

- Sreekumar, P. (2008). Matrices for natural-fiber reinforced composites. *Woodhead Publishing in Materials*, 2.
- Teles, M. C. A., Altoé, G. R., Netto, P. A., Colorado, H., Margem, F. M., & Monteiro, S. N. (2015). Figue fiber tensile elastic modulus dependence with diameter using the weibull statistical analysis. *Materials Research*, 18, 193–199. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.364514>
- Ticoalu, A., Aravinthan, T., & Cardona, F. (1997). Gathering in Chicago. *Editor and Publisher*, 130(17), 13-X1.
- Tong, F. S., Chin, S. C., Doh, S. I., & Gimbun, J. (2017). Natural Fiber Composites as Potential External Strengthening Material – A Review. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(2). <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i2/110368>
- Tudjono, S., Lie, H. A., & Hidayat, B. A. (2015). An experimental study to the influence of fiber reinforced polymer (FRP) confinement on beams subjected to bending and shear. *Procedia Engineering*, 125, 1070–1075. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.164>
- Uribe, J. (2002). *Análisis de estructuras*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Wu, Z., Li, W., & Sakuma, N. (2006). Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members. *Composite Structures*, 72(3), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.12.002>
- Wullin, Q., Endo, T., & Hirotsu, T. (2010). Structure and properties of composites of highly crystalline cellulose with polypropylene: Effects of polypropylene molecular weight. *Materials Research*, 5.
- Yan, L., Su, S., & Chouw, N. (2015). Microstructure, flexural properties and durability of coir fibre reinforced concrete beams externally strengthened with flax FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 80, 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.011>
- Zakikhani, P., Zahari, R., & Sultan, M. (2014). Bamboo Fibre Extraction and Reinforced Polymer Composite Material. *International Journal of Chemical, Nuclear, Materials Ans Metallurgical Engineering*, 8.



