

Respuesta a Compresión del Concreto Simple Reforzado Externamente con Mallas de Fibra de

Fique

Presentado por

Valeria Laverde Sarmiento

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería de Materiales

Director

José Miguel Benjumea Royero

Dr. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector

Mauricio Rincón Ortiz

Dr. en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Maestría en Ingeniería de Materiales

Bucaramanga, 2023

## **Dedicatoria**

*A mí, como muestra de que  
sin importar los obstáculos, con disciplina  
y esfuerzo todo se puede lograr*

### **Agradecimientos**

A Dios, por darme el obsequio de la vida y la salud con la que cada día pude levantarme con todas mis capacidades a dar cada uno de los pasos que permitieron llegar hasta aquí.

A mi Padre y Adiel, por su apoyo y confianza incondicional, por sentirse orgullosos de cada pequeño logro de sus hijas, motivándonos siempre a llegar cada vez más lejos.

A Dani, por ser esa voz de aliento y serenidad, mostrándome todos los días las capacidades que tengo para dar lo mejor de mí.

Al Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT), al Grupo de Investigación en Materiales de Construcción y Estructuras (INME) y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, con aquellos profesores, técnicos, secretarías y compañeros que me brindaron su apoyo en determinados momentos para poder llevar a cabo esta investigación.

Por último, pero no menos importante a mis directores de proyecto, gracias por guiarme en este arduo proceso. Gracias por sus enseñanzas, su compromiso y constante empeño en que lográramos un buen proyecto.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	14
1. Fundamentación Teórica y Antecedentes.....	16
1.1 Refuerzo Externo de Columnas Usando Fibras.....	16
1.2 Fibra Vegetal de Fique.....	20
1.3 Tratamientos Aplicados a Fibras Vegetales.....	25
1.4 Correlación de Imágenes Digitales - DIC.....	29
2. Objetivos.....	32
2.1 Objetivo General.....	32
2.2 Objetivos Específicos.....	32
3. Metodología Experimental.....	33
3.1 Materiales.....	33
3.1.1 Mallas de Fibra de Fique.....	33
3.1.2 Malla de Fibra de Carbono.....	34
3.2 Aplicación de Tratamientos.....	35
3.3 Caracterización de las Mallas de Fique.....	36
3.3.1 Evaluación Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	36
3.3.2 Evaluación Mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	38
3.3.3 Caracterización Mecánica en Tracción.....	39
3.4 Elaboración de Probetas Cilíndricas de Concreto.....	42
3.5 Reforzamiento Externo de las Probetas Concreto.....	44

3.6 Ensayos a Compresión de las Probetas de Concreto.....	45
4. Resultados y Discusión.....	46
4.1 Caracterización Física y Química de las Mallas de Fique.....	46
4.2 Caracterización Mecánica a Tracción de las Mallas de Fique.....	54
4.3 Caracterización Mecánica a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo .....	74
4.3.1 Ensayos a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo hasta el 40 % del Esfuerzo Máximo .....	75
4.3.2 Ensayos a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo hasta el Esfuerzo Máximo.....	79
4.3.3 Modo de Falla a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo .....	87
5. Conclusiones.....	91
6. Recomendaciones.....	93
Referencias Bibliográficas.....	94
Apéndices .....	109

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características de la fibra de fique .....	24
Tabla 2. Matriz de las mallas utilizadas en la investigación .....	39
Tabla 3. Matriz de probetas para ensayos a compresión.....	42
Tabla 4. Caracterización del agregado fino y grueso .....	43
Tabla 5. Diseño de mezcla para el concreto .....	43
Tabla 6. Área de fibras de fique calculada mediante Matlab .....	54
Tabla 7. Datos promedio de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas de fique.....	55
Tabla 8. Módulo de elasticidad promedio de las mallas de fique.....	57
Tabla 9. Efecto de los tratamientos sobre el comportamiento a tracción de mallas de fique.....	72
Tabla 10. Propiedades a tracción de malla de fibra de carbono .....	74
Tabla 11. Resultados promedio de ensayos a compresión de cilindros de concreto ensayados hasta el 40% del esfuerzo máximo .....	76
Tabla 12. Respuesta promedio a la compresión axial de cilindros de concreto con y sin refuerzo externo de mallas de fique.....	80
Tabla 13. Respuesta promedio a compresión hasta el esfuerzo máximo de cilindros de concreto sin refuerzo y con refuerzo de mallas M2A y MC .....	86
Tabla 14. Respuesta promedio a compresión hasta el 40% del esfuerzo máximo de cilindros de concreto sin refuerzo y con refuerzo de mallas M2A y MC .....	87

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Efecto del reforzamiento externo con FFRP en probetas cilíndricas de concreto .....	17
Figura 2. Modo de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas de lino .....	20
Figura 3. Comparación entre el consumo de agua, huella de carbono, precio y resistencia a la tensión de fibras vegetales y sintéticas.....	22
Figura 4. Estructura de las fibras vegetales .....	26
Figura 5. Esquema de las imágenes deformadas y no deformadas obtenidas con DIC para correlación y determinación de los campos de desplazamiento .....	31
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología experimental del proyecto de investigación .....	33
Figura 7. Malla de fique sencilla (M1) y doble (M2) y malla de fibra de carbono (MC).....	34
Figura 8. Medida cualitativa del pH durante el lavado del tratamiento alcalino .....	35
Figura 9. Aplicación del tratamiento de hornificación a mallas de fibra de fique.....	36
Figura 10. Proceso de preparación de probetas transversales para ensayo de SEM.....	37
Figura 11. Micrografía de una fibra procesada en Matlab para el cálculo del área transversal ....	38
Figura 12. Montaje DIC para ensayos de tracción.....	41
Figura 13. Preparación de probetas cilíndricas de concreto .....	44
Figura 14. Compresómetro – expansómetro utilizado para determinar las deformaciones unitarias axiales y transversales de cilindros de concreto con y sin refuerzo externo de mallas de fique ...	46
Figura 15. Espectros FTIR de fibras de fique M1, M1A y M1H .....	47
Figura 16. Micrografías de la sección longitudinal de las fibras de fique.....	50

Figura 17. Micrografías de la sección transversal de las fibras de fique .....	52
Figura 18. Configuración de patrón discreto de puntos para análisis en GOM Correlate .....	55
Figura 19. Regiones de una curva típica de esfuerzo-deformación de fibras vegetales .....	57
Figura 20. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique .....	59
Figura 21. Diagrama de caja de los datos de deformación unitaria última de cada tipo de malla de fique.....	60
Figura 22. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique con lectura de la MTS .....	62
Figura 23. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique con lectura de laser ..	63
Figura 24. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique con DIC .....	64
Figura 25. Comparación de entramado de mallas M1 y M2 .....	66
Figura 26. Efecto de los tratamientos sobre la respuesta a tracción de mallas de fique sencillas .	68
Figura 27. Efecto de contracción de mallas de fique por aplicación de tratamientos.....	69
Figura 28. Efecto de los tratamientos sobre la respuesta a tracción de mallas de fique dobles ....	70
Figura 29. Efecto del entramado y los tratamientos aplicados sobre los parámetros mecánicos a tracción de las mallas de fique.....	71
Figura 30. Respuesta a compresión hasta el 40% del esfuerzo de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas de fique.....	78
Figura 31. Efecto del uso de mallas de fique sobre la respuesta máxima a la compresión axial de cilindros de concreto reforzados externamente .....	81
Figura 32. Relación entre la presión de confinamiento (ff) y resistencia a la compresión (fcc) en cilindros de concreto reforzados con mallas de fique .....	84

Figura 33. Modos de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas de fique .....	88
Figura 34. Modo de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas MC .....	90

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Código de Matlab utilizado para calcular mediante microfías el área de fibras de fique .....	109
Apéndice B. Distribución de datos del número de fibras en un hilo de fique .....	110
Apéndice C. Distribución de datos del área de fibras M1, M1A y M1H.....	111
Apéndice D. Información de probetas de malla de fique sometidas a tracción.....	112
Apéndice E. Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M1 .....	114
Apéndice F. Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M2 .....	115
Apéndice G. Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M1A .....	116
Apéndice H. Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M2A .....	117
Apéndice I. Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M1H .....	118
Apéndice J. Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M2H .....	119
Apéndice K. Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M1 .....	120
Apéndice L. Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M2.....	121
Apéndice M. Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M1A.....	122

Apéndice N. Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M2A .....	123
Apéndice O. Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M1H .....	124
Apéndice P. Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M2H .....	125
Apéndice Q. Curvas de esfuerzo ( $f_{co}$ ) – deformación unitaria axial ( $\epsilon_v$ ) y transversal ( $\epsilon_h$ ) realizadas en tres ciclos de carga y descarga, utilizadas para el cálculo del coeficiente de Poisson .....	126
Apéndice R. Resultados de ensayos a compresión de probetas de concreto con y sin refuerzo externo ensayadas hasta el 40% del esfuerzo .....	130
Apéndice S. Resultados de cilindros de concreto con y sin refuerzo externo de mallas de fique ensayados hasta el esfuerzo máximo de compresión .....	131

## Resumen

**Título:** Respuesta a Compresión del Concreto Simple Reforzado Externamente con Mallas de Fibra de Fique\*

**Autor:** Valeria Laverde Sarmiento\*\*

**Palabras Clave:** refuerzo externo, cilindros de concreto, mallas de fique, respuesta a compresión, respuesta a tracción y tratamientos.

**Descripción:** La creciente necesidad de implementar materiales con menores efectos ambientales en el ámbito de la construcción ha impulsado el estudio de fibras vegetales como material de refuerzo en diversos compuestos de matriz cementosa, dando provecho a su alta disponibilidad, bajo costo, emisiones neutras de CO<sub>2</sub>, peso ligero y desempeño mecánico. Entre los compuestos y enfoques en los cuales se ha venido estudiando la alternativa de utilizar fibras vegetales, se encuentra el reforzamiento externo de columnas de concreto, que actualmente son reforzados mediante mallas sintéticas. Considerando lo anterior, en esta investigación se estudiaron mallas de fibras de fique con diferente entramado (doble y sencillo) y tratamiento (alcalinización y hornificación), evaluando el efecto de los tratamientos sobre la superficie, grupos funcionales y respuesta mecánica de las mallas mediante técnicas de FTIR, SEM y ensayos de tracción. Posteriormente, las mallas tratadas y no tratadas se dispusieron como refuerzo externo de cilindros de concreto para determinar su efecto sobre las propiedades mecánicas a compresión y modo de falla de los cilindros. Los resultados permitieron concluir que los tratamientos afectaron el área transversal de las fibras, grupos funcionales y las propiedades a tracción de las mallas, mostrando una mejora en mayor medida en la resistencia y rigidez de las mallas dobles y alcalinizadas (M2A) en comparación con las otras mallas. Esta mejor respuesta a tracción se reflejó en un mejor efecto de confinamiento de las mallas sobre los cilindros de concreto, por lo cual, los cilindros C-M2A presentaron un mejor desempeño a compresión con un modo de falla más progresivo y un índice de ductilidad tres veces mayor que el del cilindro de concreto sin refuerzo.

---

\* Tesis de Maestría

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director José Miguel Benjumea Royero. Codirector Mauricio Rincón Ortiz

### Abstract

**Title:** Response to Compression of Plain Concrete Externally Reinforced with Fique Fiber Fabrics\*

**Author(s):** Valeria Laverde Sarmiento\*\*

**Key Words:** external reinforcement, concrete cylinders, fique fabrics, compression response, tensile response, and treatments.

**Description:** The growing need to implement materials with fewer environmental effects in the construction industry has promoted the study of vegetable fibers as reinforcing material in various cementitious matrix composites. The use of these fibers takes advantage of their high availability, low cost, neutral CO<sub>2</sub> emissions, lightness, and mechanical performance. External reinforcement of concrete columns with vegetable fibers is one of alternatives being studied with the aim of replacing the currently used synthetic fabrics. In this research, fique fiber fabrics of different weaves (single and double) and treatments (alkalinization and hornification) were used to assess the effect of the treatments on the morphology, functional groups, and tensile behavior of the fabrics by means of FTIR, SEM and tensile tests. Subsequently, treated and untreated fabrics were used as external reinforcement of concrete cylinders to determine their effect on the compressive properties and failure mode of the cylinders. The results showed that the treatments modified the cross-sectional area of the fibers and the tensile properties of the fabrics, showing a greater improvement in the strength and stiffness of the double-weave and alkalized fabrics (M2A) in comparison with the other fabrics. This better response under tension resulted in a higher confinement pressure of the fabrics on the concrete cylinders, therefore, C-M2A cylinders had the best compressive performance with a more progressive failure mode and an index of ductility three times greater than that of the unreinforced concrete cylinder.

---

\* Master's Thesis

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director José Miguel Benjumea Royero. Codirector Mauricio Rincón Ortiz

## Introducción

Las columnas de concreto son elementos estructurales esenciales para el soporte de sistemas de infraestructura civil, dado que cumplen la función de transmitir las cargas de la estructura a la cimentación y, en el caso de los puentes, proveer ductilidad de deformación bajo la acción combinada de cargas gravitacionales y laterales. La falla de estos elementos ocasionada por deterioro, ataques ambientales, sobrecargas, acciones sísmicas, entre otros factores, puede causar el colapso parcial o total del sistema estructural. Por lo anterior, se han venido implementando diferentes métodos para su reforzamiento. Entre estos, el revestimiento con camisas de acero es uno de los métodos convencionales más utilizado; no obstante, es susceptible a la corrosión y cuenta con una moderada relación resistencia/peso del encamisado (Mahal et al., 2013). Por otra parte, los métodos de reforzamiento externo con polímeros reforzados con tejidos de fibras sintéticas (p. ej. fibras de vidrio, aramida y carbono) o FFRP (Fabric Fiber Reinforced Polymer, por sus siglas en inglés) han tenido auge debido a la mejora que estos ofrecen en la respuesta a compresión de los elementos reforzados. Esta configuración de refuerzo con tejidos de fibras adheridos externamente al elemento estructural incrementa la capacidad de deformación de las columnas sometidas a carga axial (Triantafillou et al., 2006). Cuando la columna alcanza un alto nivel de esta carga, el tejido de fibra entra en función ejerciendo presión lateral de confinamiento en la columna, evitando la expansión y deformación lateral excesiva. De esta forma, el refuerzo con FFRP de fibras sintéticas además de proveer compuestos con durabilidad y corrosividad nula, incrementa la capacidad de carga axial y ductilidad de los elementos reforzados (Hacha et al., 2010).

Pese a las buenas propiedades mecánicas que brinda el refuerzo con FFRP, los tejidos sintéticos tienen un costo elevado, requieren de altas cantidades de energía para su procesamiento y no son biodegradables. Esta situación se ha venido solventando en múltiples industrias mediante el uso de fibras vegetales para el refuerzo de materiales compuestos, dando provecho a su alta disponibilidad, renovabilidad, bajo costo, emisiones neutras de CO<sub>2</sub>, peso ligero y desempeño mecánico moderado a alto (Hidalgo & Correa, 2018; Salit et al., 2015). Adicionalmente, debido a la biodegradabilidad que presentan estas fibras vegetales, se han estudiado diferentes tratamientos como la alcalización, silanización y hornificación para mejorar su durabilidad, propiedades mecánicas y estabilidad térmica (Castro et al., 2007; Ferreira et al., 2017; Laverde et al., 2022). Estos tratamientos mejoran las propiedades a tracción de las fibras y el comportamiento mecánico a compresión de los compuestos, dado que favorecen la formación de una textura rugosa en la superficie de la fibra que promueve la creación de sitios de anclaje mecánico, aumentando la unión fibra-matriz y la transferencia de tensiones en el compuesto reforzado (Borsoi et al., 2019; Godara & Mukesh, 2019).

Entre las fibras vegetales cultivadas en Colombia, la fibra de fique es una de las más abundantes (Muñoz et al., 2014) y tiene una producción de aproximadamente 4191 ton/año en el departamento de Santander (Minagricultura, 2021). Esta fibra presenta alta resistencia a tracción y ductilidad, junto con una rigidez axial moderada (P. Gañán & Mondragon, 2003; Monteiro et al., 2018; Ramirez et al., 2019), convirtiéndola en una alternativa potencial de refuerzo de elementos estructurales de concreto. Teniendo en cuenta las propiedades del fique y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (ONU, 2018), específicamente el objetivo nueve que busca desarrollar infraestructuras sostenibles, resilientes y de calidad, para apoyar el

desarrollo económico y el bienestar humano, en esta investigación se propone estudiar el uso de mallas de fique con diferentes entramados y tratamientos como material de refuerzo externo en elementos cilíndricos de concreto simple, determinando experimentalmente su efecto sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto.

## 1. Fundamentación Teórica y Antecedentes

### 1.1 Refuerzo Externo de Columnas Usando Fibras

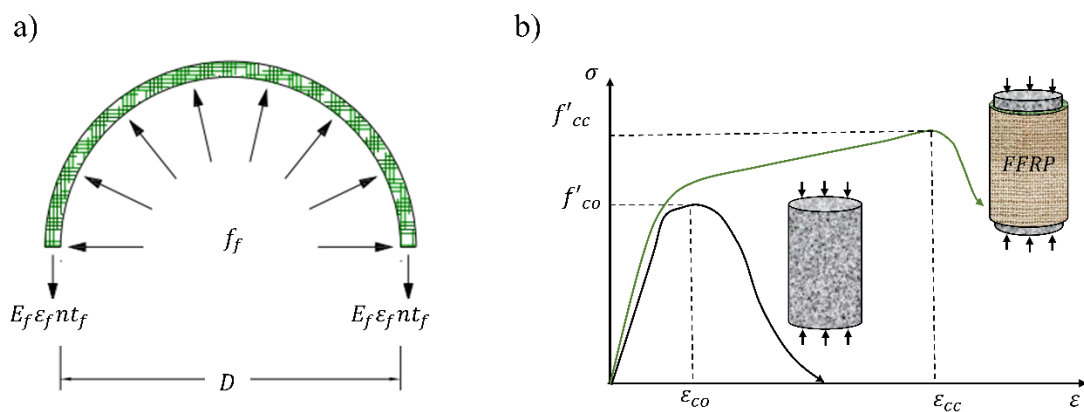
En general, la efectividad del refuerzo externo con FFRP (Fabric Fiber Reinforced Polymer) en columnas aumenta con el nivel de carga axial de compresión aplicada, puesto que la expansión lateral asociada a niveles bajos de compresión no es significativa. Sin embargo, cuando la columna alcanza niveles altos de carga axial (50% a 70% de la resistencia máxima del concreto,  $f'_{co}$ ), la expansión lateral crece considerablemente y activa el trabajo a tensión del refuerzo externo, el cual genera presión lateral de confinamiento en la columna (Fig. 1a). Esta presión depende del espesor ( $t_f$ ), número de capas ( $n$ ), módulo de elasticidad ( $E_f$ ) y deformación unitaria axial máxima ( $\varepsilon_f$ ) del refuerzo o malla. Si hay una adherencia suficiente entre el concreto y la malla la presión lateral de confinamiento ( $ff$ ) en un elemento circular de diámetro  $D$  se estima como:

$$ff = 2n t_f E_f \varepsilon_f / D \quad (1)$$

La presión lateral de confinamiento ejercida por la malla de refuerzo aumenta la ductilidad y resistencia axial máxima de la columna (Fig. 1b), lo cual se traduce en una mayor capacidad de deformación del elemento reforzado ante cargas axiales o laterales. Por lo tanto, resulta importante caracterizar el comportamiento mecánico a tracción de la malla que se desee usar como refuerzo.

### Figura 1

*Efecto del reforzamiento externo con FFRP en probetas cilíndricas de concreto*



*Nota.* a) Presión de confinamiento lateral, Adaptado de “FRP Confinement Free-Body Diagram” (p.16), por J.G. Lyon (2009), California Polytechnic State University, b) cambio en la ley constitutiva para cargas axiales con refuerzo.

Entre las fibras vegetales más estudiadas para refuerzos con FFRP de elementos de concreto se encuentran las de lino, yute y cáñamo, donde los diferentes autores reportan que el refuerzo externo con mallas de estas fibras mejora notablemente la resistencia máxima y la ductilidad a compresión de los cilindros de concreto (Ghalieh et al., 2017; Ghorbel et al., 2021;

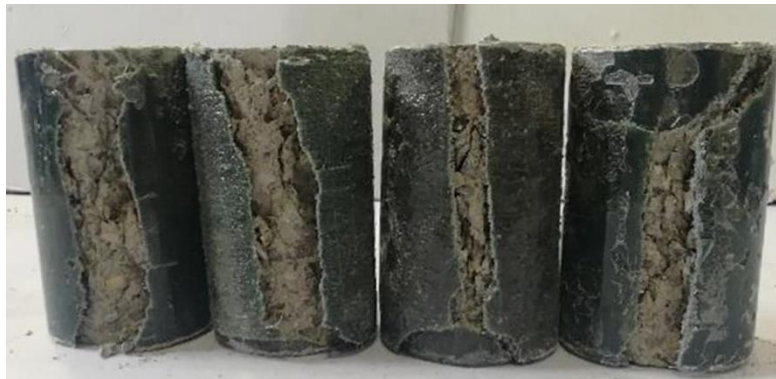
Jirawattanasomkul et al., 2020; Madhavi et al., 2020; Tan et al., 2017). Basándose en el modelo de resistencia de elementos confinados propuesto por Richart et al. (1928), Libo Yan (2016) propuso una ecuación para predecir la resistencia a la compresión última de cilindros de concreto reforzados externamente con 2, 4 y 6 capas de FFRP de fibra de lino. Para ello, se basó en los resultados de las pruebas a compresión del concreto simple ( $f_{co}$ ) y reforzado externamente ( $f_{cc}$ ). La comparación de los resultados de los ensayos de compresión demostró que el aumento del número de capas de FFRP mejoró el comportamiento a compresión de los cilindros, obteniendo un incremento en la capacidad de deformación máxima (aumentó de 0.22% a 1.74%) y en la resistencia a la compresión (aumentó de 21.2 a 49.6 MPa) al utilizar seis capas de FFRP de lino respecto a las probetas no reforzadas. A partir de los resultados experimentales, el autor relacionó las resistencias máximas a la compresión ( $f_{co}$  y  $f_{cc}$ ) con la presión lateral de confinamiento ( $f_f$ ) de acuerdo con la ecuación:  $f_{cc}/f_{co} = 1 + 1.82 f_f / f_{co}$ , la cual arrojó diferencias menores a 2.5% entre la resistencia máxima a la compresión experimental y la calculada.

Investigaciones como las de Jirawattanasomkul et al. (2019, 2020, 2021) y Padanattil et al. (2019) se han centrado en la influencia del número de capas del refuerzo de malla sobre la respuesta a compresión de columnas de concreto. Los resultados de estos trabajos mostraron una mejora del 31%, 57% y 82% en la resistencia a compresión y un aumento de la capacidad de deformación unitaria axial con una relación de confinamiento ( $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ ) de 4.22, 5.62, y 6.60 con 1, 2 y 3 capas de FFRP de sisal respectivamente. Este incremento de la capacidad de deformación unitaria axial es evidenciado de igual forma en el índice de ductilidad de energía, que relacionan con la capacidad del cilindro de concreto reforzado de absorber energía y deformarse antes de

fallar. Por lo cual, el uso de 1, 2 y 3 capas del refuerzo resultaron en índices de ductilidad que fueron 5, 11 y 17 veces mayores respectivamente, que el del concreto sin refuerzo. Este aumento de la resistencia a la compresión, ductilidad y capacidad de deformación axial y transversal del concreto obtenido con el uso de refuerzos FRP se refleja en el modo de falla de los compuestos, puesto que, generalmente bajo esfuerzos de compresión la superficie de los cilindros de concreto simple se daña gradualmente por la formación de grietas que van creciendo hasta generar una falla frágil y abrupta. Mientras que, en los cilindros de concreto reforzados con FRP, la malla permite un modo de falla con mayor ductilidad, en el cual se alcanzan mayores deformaciones unitarias (transversales y axiales) debido a la presión de confinamiento. Este confinamiento restringe la propagación de grietas en el núcleo de la probeta hasta que se alcanza el esfuerzo máximo a tracción de la malla en el cual se rompen, generando el fallo del cilindro (Yang et al., 2022). Por ejemplo, en los resultados de Bai et al. (2021) del modo de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados con FRP de lino (mostrados en la Figura 2), se observa la fractura longitudinal del refuerzo ocasionada por la deformación lateral del concreto, la cual tensiona la malla hasta su esfuerzo máximo de tracción. No obstante, la forma agrietada que tenían los cilindros de concreto en el interior indica que, a pesar de la fractura interna del concreto, el refuerzo mantuvo unida la estructura permitiendo que la probeta tuviera una mayor capacidad de deformación y ductilidad.

**Figura 2**

*Modo de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas de lino*



*Nota.* Tomado de “Failure mode after static compression test” (p.6), por Bai et al. 2021, Composite Structures.

**1.2 Fibra Vegetal de Fique**

El fique es una fibra vegetal nativa de Colombia proveniente de las plantas del género *Furcraea*, cuyo cultivo se ha expandido en gran parte de la región andina de América del Sur. Para el 2021, la producción aproximada en el departamento de Santander fue de 4191 ton/año, contando con la mayor cantidad de cultivos en los municipios de Mogotes y San Joaquín (Hidalgo & Correa, 2018; Minagricultura, 2021). Esta fibra ha sido una parte esencial en la economía de Colombia, generando un promedio de 11200 empleos anuales, tanto en las zonas rurales donde su cultivo requiere de un alto contenido de mano de obra y a nivel urbano en talleres de fabricación de costales, bolsos, calzado, entre otros (Muñoz et al., 2014; Pimiento & Vega, 2004).

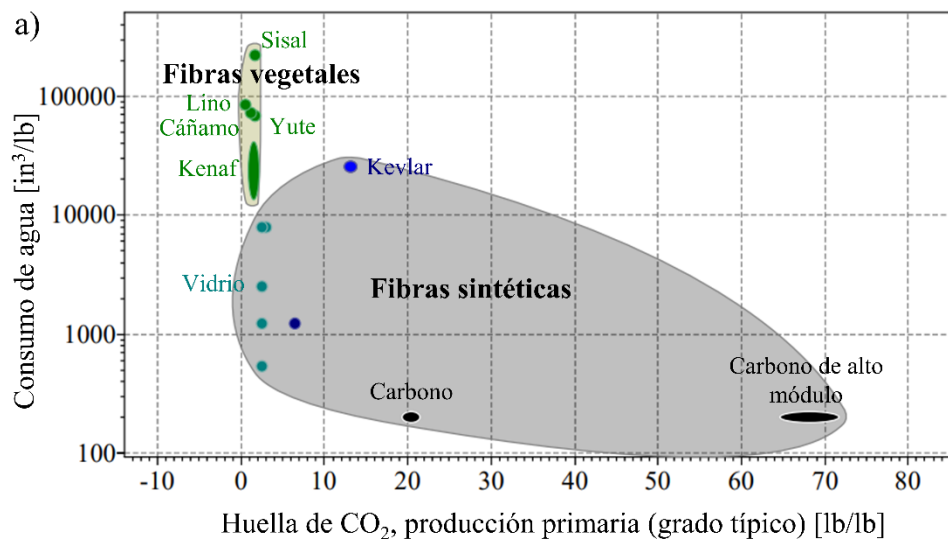
El estudio de fibras vegetales como el fique en aplicaciones industriales se ha fomentado debido a las ventajas ambientales y económicas que presentan frente a las fibras sintéticas de alto

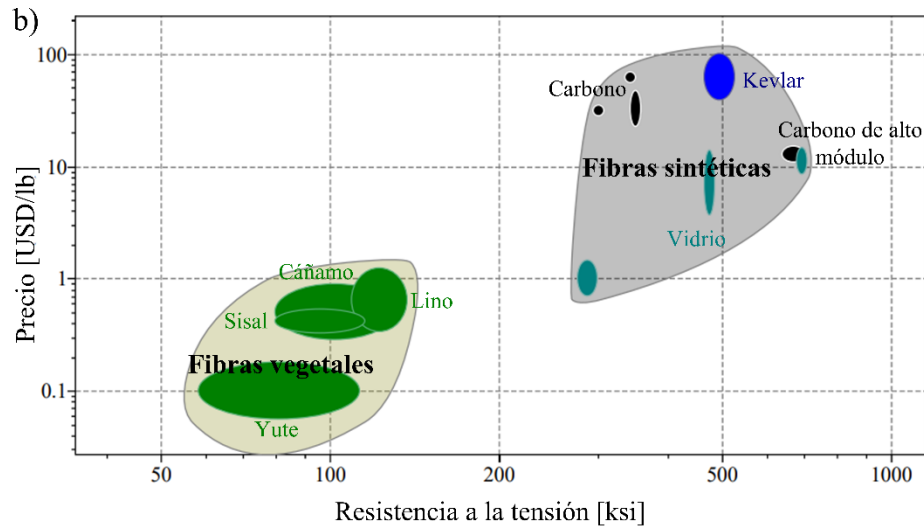
módulo como; su alta disponibilidad, biodegradabilidad, bajo costo, reciclabilidad, emisiones neutras de CO<sub>2</sub> y peso ligero. La Figura 3a muestra una comparación realizada mediante el software Ansys Granta EduPak (Ansys, 2023) del consumo de agua y huella de carbono de fibras vegetales y sintéticas. A pesar de que en la base de datos del programa no estaba la fibra de fique, en la comparación se incluyeron otras fibras vegetales como el sisal, lino, yute y cáñamo que presentan características similares a la fibra de fique (Laverde et al. 2022). En la Figura 3a se observa el alto consumo de agua que se requiere durante la producción primaria de las fibras vegetales generada principalmente en los procesos de cosecha de las plantas y lavado de las fibras (Porrás Guarguati et al., 2019). Mientras que, las fibras de carbono de alto módulo utilizadas como refuerzo en elementos estructurales de concreto (p. ej. vigas y columnas) tienen un consumo mínimo de agua durante su procesamiento. No obstante, las fibras de carbono generan una mayor emisión de gases de efecto invernadero en comparación con las fibras vegetales como se refleja en su alta huella de CO<sub>2</sub>. Esto es debido a la variedad de procesos mecánicos y químicos (p. ej. polimerización, estabilización, carbonización) mediante los cuales se producen las fibras de carbono (Villaverde, 2021). Adicionalmente, la Figura 3b muestra la comparación entre la resistencia a la tensión y el precio por libra de las fibras, en esta se observa que las fibras vegetales resultan siendo más económicas que las fibras sintéticas a pesar del alto consumo de agua que tienen para su producción. Por otra parte, aunque en términos de propiedades mecánicas el comportamiento a tracción de las fibras sintéticas es superior al de las fibras vegetales, para determinadas aplicaciones la resistencia y el bajo costo de las fibras vegetales las hace adecuadas para ser utilizadas como material de refuerzo. Por ejemplo, Agopyan et al. (2005) utilizaron fibras de coco para fabricar paneles de mampostería utilizados en la construcción de viviendas

asequibles, demostrando que el uso de las fibras permitió que los paneles tuvieran una resistencia a la compresión de 6.5 MPa, siendo un valor aceptable para este tipo de elementos. Así mismo, Delvasto et al. (2010) reforzaron láminas onduladas de techo con fibras de fique mediante un proceso de fabricación al vacío, las cuales fueron utilizadas en la construcción de viviendas de bajo costo en áreas rurales de la región del Valle del Cauca, Colombia.

### Figura 3

*Comparación entre el consumo de agua, huella de carbono, precio y resistencia a la tensión de algunas fibras vegetales y sintéticas*





*Nota.* Gráficos obtenidos a partir del software Ansys Granta EduPak.

Las fibras de fique se caracterizan por su alta capacidad de deformación, resistencia a la tracción y rigidez axial moderada (Tabla 1) (P. Gañán & Mondragon, 2003; Monteiro et al., 2018; Ramirez et al., 2019). Estas propiedades mecánicas las ha llevado a ser estudiadas como material de refuerzo en compuestos de matriz cementosa (Castellanos et al., 2012; Herrera et al., 2020; Monteiro et al., 2018; Tonoli et al., 2011). Para las aplicaciones de este tipo de fibras vegetales como refuerzo externo en forma de malla es importante estudiar variables como el entramado de las mallas. Esta variable se puede caracterizar mediante la relación urdimbre/trama en un decímetro cuadrado ( $\text{dm}^2$ ) de la malla, siendo la urdimbre el número de hilos en el sentido largo de la tela y la trama el número de hilos en el sentido transversal. Camargo et al. (2017) evaluaron la resistencia a tracción de cuatro tipos de entramado (12/14, 20/14, 24/24 y 20/36) de mallas de fique con hilo de densidad 1400 m/kg y resistencia promedio a la tracción de 212 MPa. La resistencia máxima a tracción de cada malla fue 24.75, 30.09, 44.45 y 51.57 MPa respectivamente, mostrando una disminución significativa entre la resistencia del hilo y las mallas. Dicha diferencia

fue atribuida al comportamiento de las mallas, dado que fallaban por el hilo más débil disminuyendo el área de la sección transversal y la resistencia mecánica. Adicionalmente, se observó que la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad aumentaron a medida que se incrementó el número de hilos en el entramado (malla más tupida), llegando hasta una diferencia de 208% y 202% en el esfuerzo a tracción y rigidez respectivamente, entre la malla con menor y mayor entramado. Así mismo, con el fin de seleccionar la malla con mayor resistencia a tracción para reforzar viguetas de concreto ensayadas a flexión, Puentes Rojas et al. (2018) estudiaron diferentes entramados de mallas de fique de 33, 20 y 12 hilos/dm<sup>2</sup> con separación entre hilos de 3, 5 y 8 mm respectivamente. Las viguetas fueron reforzadas externamente colocando una capa de la malla en la superficie de cada una de las caras y fijándolas con dos capas de mortero. Los resultados de los ensayos a tracción de las mallas mostraron que la malla más tupida (33 hilos/dm<sup>2</sup>) presentó un aumento del 59%, 39% y 90% en la resistencia a tracción, deformación unitaria y módulo de elasticidad con respecto a la menos tupida. Al ser utilizada como refuerzo externo, esta malla confirió un incremento del 226% en la resistencia a flexión de la vigueta reforzada frente a la vigueta sin reforzar.

**Tabla 1**

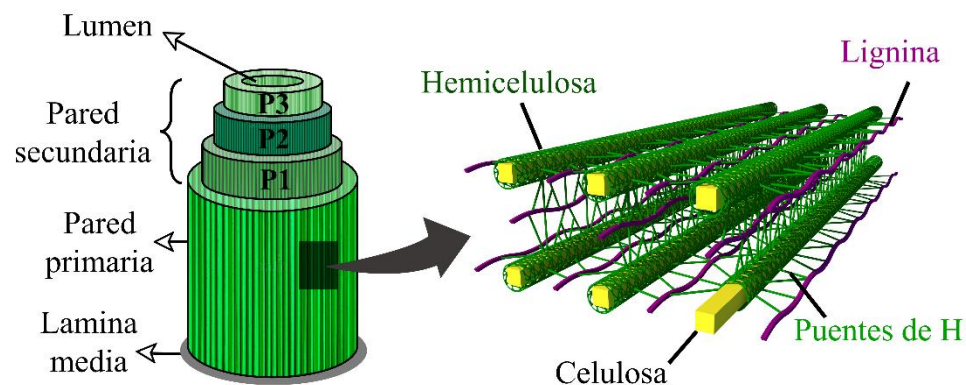
*Características de la fibra de fique*

Característica	Fique	Referencia
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0.7 – 1.4	(Laverde et al., 2022)
Humedad [%]	8 – 12	
Esfuerzo [MPa]	133 – 424	
Módulo de elasticidad [GPa]	5.7 – 24	

Deformación unitaria última [%]	4 – 9.8	(Delvasto et al., 2010;
Hemicelulosa [%]	17-26	Herrera et al., 2020)
Lignina [%]	10-21	
Celulosa [%]	53-70	
Diámetro equivalente [ $\mu\text{m}$ ]	78 – 96	(Diaz Ramirez et al., 2019)

### 1.3 Tratamientos Aplicados a Fibras Vegetales

Las fibras vegetales tienen una estructura organizada en capas que recubren una cavidad interna llamada lumen. Estas paredes o capas están compuestas por fibrillas de celulosa unidas mediante puentes de hidrógeno en una matriz de lignina y hemicelulosa. Rodeando la fibra está la lámina media altamente lignificada y rígida y la pared primaria y secundaria, la cual a su vez se divide en pared secundaria exterior (P1), principal (P2) e interna (P3) (Fig. 4) (Benin et al., 2020; Godara & Mukesh, 2019; Pereira et al., 2015). Cada una de las paredes tiene su propia composición química, siendo las fibrillas de celulosa el principal componente en la pared secundaria al presentar una relación directamente proporcional con el módulo de Young y la resistencia a la tracción de las fibras (John & Thomas, 2008).

**Figura 4***Estructura de las fibras vegetales*

*Nota.* Adaptado de “Schematic representation of plant fiber structure” (p.10), por Pereira et al., 2015, Polimeros, 25(1).

La composición porcentual de cada componente de la fibra varía según el proceso de extracción, cosecha y edad de la fibra, e influyen directamente en sus propiedades mecánicas. La hemicelulosa fomenta la biodegradación, absorción de humedad y degradación térmica de la fibra; la lignina es la responsable de la rigidez y degradación ultravioleta; mientras que la pectina y sustancias cerosas recubren los grupos funcionales reactivos de la fibra, dificultando su interacción con la matriz (Ali et al., 2018; Faruk et al., 2012a). Debido a la influencia que tiene la composición sobre las propiedades de la fibra y la alta tendencia a la biodegradación que presentan las fibras vegetales, se han estudiado diferentes tratamientos de silano, acetilación, plasma, alcalino, hornificación, entre otros, que han permitido mejorar su durabilidad, propiedades mecánicas y estabilidad térmica (Castro et al., 2007; Ferreira et al., 2017). Entre estos tratamientos se destaca

la alcalinización y hornificación en fibras vegetales que son utilizadas en compuestos cementosos (Laverde et al., 2022).

El tratamiento alcalino es una de las alternativas más utilizadas por su bajo costo en comparación con otros tratamientos (Gómez & Vázquez, 2012). En este proceso se alteran las estructuras de red de enlace de hidrógeno de la fibra debido a la reacción dada con una solución de hidróxido de sodio (NaOH):  $\text{Fibra - OH} + \text{NaOH} \rightarrow \text{Fibra - O - Na} + \text{H}_2\text{O}$ . En esta reacción se induce la ionización de los grupos hidroxilo en alcóxidos, proceso que facilita la exposición de grupos reactivos  $\text{OH}^-$  en la superficie de la fibra y disminuye su carácter hidrofílico (Faruk et al., 2012a; Xue & Tabil, 2007). Simultáneamente, el tratamiento degrada de forma selectiva cierta cantidad de lignina, pectina, hemicelulosa y materiales cerosos que cubren las microfibrillas de celulosa y a su vez la superficie de la pared celular de la fibra, generando así un aumento de la región interfibrilar. Esto produce una textura rugosa sobre la superficie que promueve un anclaje mecánico con la matriz del compuesto, junto con un aumento en el número de sitios de reacción por la mayor cantidad de celulosa expuesta en la superficie de la fibra (Jähn et al., 2002). Por lo cual, la alcalinización aumenta la unión fibra-matriz, mejorando la transferencia de tensiones y homogeneidad en la interfaz de los compuestos reforzados (Borsoi et al., 2019; Godara & Mukesh, 2019).

Entre las concentraciones de hidróxido de sodio más utilizadas en tratamientos alcalinos se ha demostrado que cuando se utiliza NaOH entre el 2-5% en peso, se obtiene una mayor resistencia a tracción de las fibras vegetales (Herrera, 2020; Liu et al., 2018; Muñoz et al., 2014; Van de Weyenberg et al., 2003; Yan et al., 2012). Obi Reddy et al. (2013) estudiaron el tratamiento de

alcalinización con 5% en peso de NaOH en fibras de Borassus mediante técnicas microscópicas, a partir de las cuales concluyeron que dicho tratamiento promovía la disolución de la hemicelulosa en la fibra, lo cual aumentó la región interfibrilar y la rugosidad superficial, permitiendo así distinguir claramente las fibrillas en la superficie de la fibra. De igual forma, en el trabajo de Herrera et al. (2020) se utilizó una concentración del 3% NaOH sobre fibras de fique, encontrando que las fibras tratadas presentaban mayor rugosidad superficial y aumentaron la resistencia última y de deformación unitaria máxima en un 233% y 57% respectivamente. Este resultado fue relacionado con la remoción parcial de hemicelulosa y lignina, que genera una mejor reorganización y alineación de las fibrillas de celulosa en la dirección de la carga de tracción.

Otro método utilizado para mejorar las propiedades mecánicas y disminuir el carácter hidrofílico de las fibras vegetales es la hornificación. Este tratamiento se basa en ciclos de humectación y secado que generan fuertes enlaces interfaciales de hidrógeno en la celulosa, induciendo una contracción de la pared celular de las fibras que reduce su capacidad de hinchamiento y absorción de humedad. Este efecto permite obtener fibras con menor degradación y mayor estabilidad dimensional, mejorando la interacción fibra-matriz dentro de los compuestos (Claramunt et al., 2010; Ferreira et al., 2015). A pesar de no ser un tratamiento aplicado comúnmente en fibras de fique, ha sido empleado como alternativa para mejorar el comportamiento de fibras vegetales embebidas en matrices cementosas (Claramunt et al., 2011; Ferreira et al., 2012; Santos & Lima, 2015). Los ciclos de humectación y secado utilizados varían de 1 a 10 generalmente, siendo estos un parámetro de interés sobre la respuesta mecánica a tracción de las fibras. Por ejemplo, Claramunt et al. (2010) estudiaron la aplicación de 1 a 4 ciclos en fibras kraft, las cuales exhibieron un incremento en la temperatura de degradación térmica de la fibra con

el aumento del número de ciclos de hornificación, y una disminución en el porcentaje de retención de agua al contraer las fibras, lo cual mejoró la estabilidad dimensional dentro de la matriz de cemento. Por otra parte, Ferreira et al. (2017) estudiaron la aplicación de 5 y 10 ciclos de hornificación sobre fibras de sisal que serían utilizadas como refuerzo interno en compuestos de concreto. La aplicación de cinco ciclos promovió un mejor desempeño mecánico de las fibras vegetales, atribuido a la formación de fuertes enlaces entre las microfibrillas, que mejoró 36% y 10% la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, y aumentó la deformación unitaria máxima en 33% respecto a la malla sin tratamiento. Este mejor comportamiento mecánico y rugosidad de las mallas conferido por el tratamiento mejoró la unión fibra-matriz dentro del compuesto, resultando en un aumento del 31% en la fuerza de adhesión. Adicionalmente, los autores destacan que la aplicación de 10 ciclos resultaba excesiva, pues esta inducía un daño en la estructura de la fibra y disminuía su unión con la matriz cementosa.

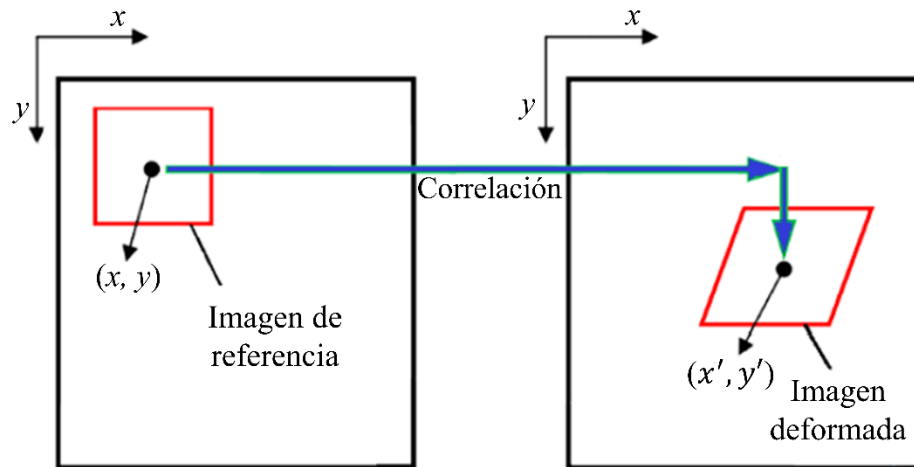
#### **1.4 Correlación de Imágenes Digitales - DIC**

La caracterización mecánica a tracción es fundamental en el estudio de diversas mallas como reforzamiento externo, dado que permite determinar la respuesta mecánica que tendrá el elemento reforzado. Esta caracterización es realizada en equipos de tracción directa, mediante los cuales se obtienen valores tensión axial con el desplazamiento vertical del cabezal de la máquina. Sin embargo, como estos valores son un promedio del desplazamiento que se genera a lo largo de la probeta, se suele utilizar extensómetros para registrar el desplazamiento relativo de la zona central de las probetas, permitiendo obtener un conocimiento más cercano del comportamiento del material.

Adicional a estos equipos utilizados para estimar las propiedades mecánicas a tracción de los materiales, existe la correlación de imágenes digitales (DIC por las siglas Digital Image Correlation). Esta es una técnica óptica de campo completo en la cual se capturan imágenes de la probeta a una determinada frecuencia de muestreo durante el ensayo a tracción en una región de interés (ROI), permitiendo calcular los desplazamientos y deformaciones del material (López Alba et al., 2012). Para delimitar la ROI se utilizan diferentes tipos de patrones sobre la superficie, como el patrón discreto (puntos organizados y separados a una distancia equivalente), patrón estocástico (puntos distribuidos aleatoriamente), o patrón natural (la superficie del material funciona como patrón). La identificación de estos patrones es realizada mediante algoritmos de correlación que identifican los desplazamientos relativos de cada punto a partir de su posición en coordenadas espaciales  $(x', y')$  posterior a la deformación, con respecto a las coordenadas iniciales  $(x, y)$  de la imagen de referencia (Fig. 5). Esto puede ser realizado en diversos softwares como GOM Correlate, Ncorr, VIC-2D y ARAMIS (Castillo González et al., 2020; Cerbu et al., 2018; Tekieli et al., 2017; Zheng et al., 2017).

**Figura 5**

Esquema de las imágenes deformadas y no deformadas obtenidas con DIC para correlación y determinación de los campos de desplazamiento



*Nota.* Adaptado de “Ejemplo de un subconjunto de una imagen antes y después de la deformación” (p.27), por Castillo et al. (2020), Aibi, 8 (3).

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Determinar el efecto sobre la resistencia y deformación última a compresión de elementos cilíndricos de concreto, producido por la implementación de mallas de fibra de fique tratadas y no tratadas superficialmente como refuerzo externo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Evaluar el cambio en las propiedades mecánicas de tracción y la morfología de mallas de fibra de fique producido por la aplicación de tratamientos superficiales de alcalinización y hornificación.

Determinar el efecto de los tratamientos de alcalinización y hornificación aplicados a las mallas de fibra de fique sobre la resistencia y deformación última a compresión de elementos cilíndricos de concreto reforzados externamente con mallas de fique.

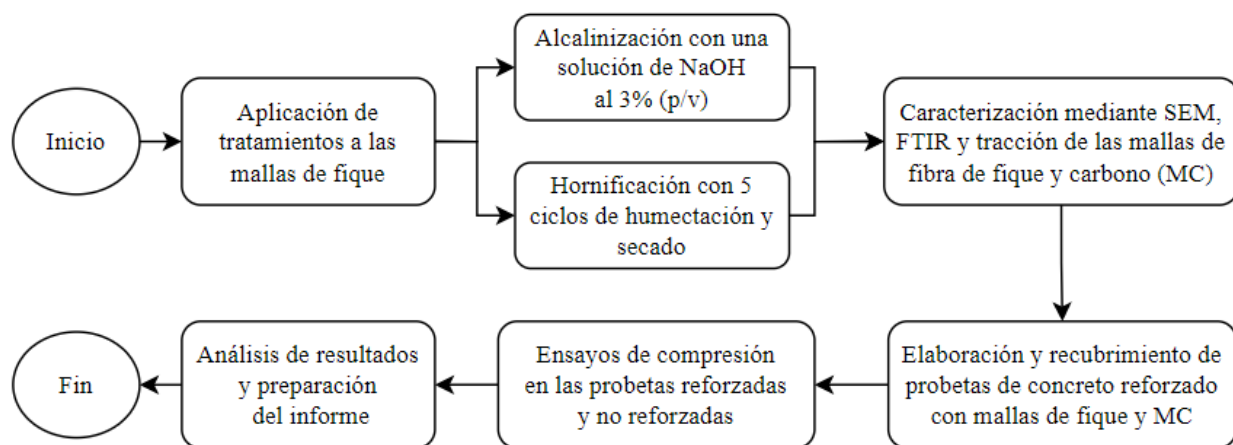
Evaluar el efecto del entramado de las mallas de fibra de fique sobre la resistencia y deformación última a compresión de los elementos cilíndricos de concreto reforzados externamente con las diferentes mallas.

### 3. Metodología Experimental

El proyecto se desarrolló siguiendo la metodología mostrada en la Figura 6, detallada continuación.

**Figura 6**

*Diagrama de flujo de la metodología experimental del proyecto de investigación*



### 3.1 Materiales

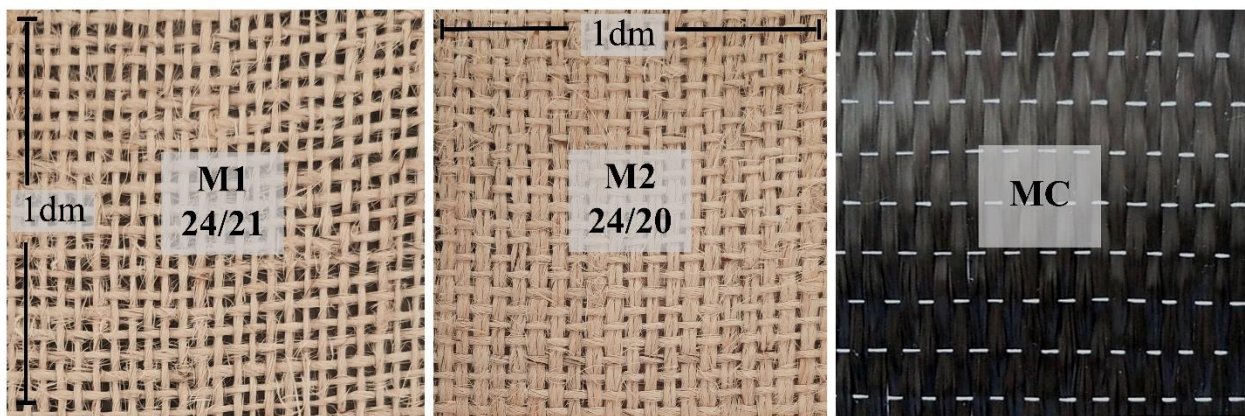
#### 3.1.1 Mallas de Fibra de Fique

Se utilizaron dos tipos de malla de fibra de fique con diferente entramado (relación urdimbre/trama = número de hilos en el sentido largo de la tela/ número de hilos en sentido transversal) confeccionadas por la empresa Coohilados del Fonce SA ubicada en San Gil, Santander. Cada tipo de malla fue fabricada con hilo de densidad lineal de 1050 m/kg (828 tex),

utilizando una configuración 24/21 de trama sencilla (M1) y otra 24/20 de trama doble (M2) (Fig. 7).

### Figura 7

*Malla de fique sencilla (M1) y doble (M2) y malla de fibra de carbono (MC)*



#### 3.1.2 Malla de Fibra de Carbono

Con el fin de comparar las propiedades de las mallas de fique y contar con una malla de referencia utilizada en estructuras civiles, se adquirió una malla sintética comercial (SikaWrap 300 C) con tejido unidireccional de fibra de carbono (MC), compuesta por 99% de hilos de carbono en la dirección de la trama y 1% de hilos termoplásticos en la urdimbre (Fig. 7). La malla es fabricada por la empresa Sika Colombia S.A.S. para el refuerzo de estructuras de hormigón armado, mampostería, ladrillo, entre otros. Esta malla es utilizada para incrementar la resistencia de las estructuras, como la capacidad de servicio portante a flexión y cortante de vigas, o la resistencia, capacidad de carga y ductilidad de pilares.

### 3.2 Aplicación de Tratamientos

La aplicación del tratamiento alcalino sobre las mallas de fique fue basada en los procesos utilizados por Fonseca et al. (2019) y Herrera et al. (2020). El tratamiento consistió en sumergir y mantener las mallas durante 10 minutos a temperatura ambiente, en una solución acuosa de NaOH al 3% (p/v) con una relación 20:1 (p/p) de solución: fibras. Posteriormente, las mallas fueron retiradas para ser lavadas con agua destilada hasta que la solución de lavado restante tuviese un pH neutro. El pH se determinó de manera cualitativa por el método colorimétrico de tirillas de papel de pH (Fig. 8). Finalmente, las mallas fueron secadas a temperatura ambiente durante 72h.

#### Figura 8

*Medición cualitativa del pH durante el lavado del tratamiento alcalino*



El tratamiento de hornificación aplicado a las mallas de fique fue de cinco ciclos, siguiendo la metodología utilizada por Ferreira et al. (2014, 2016, 2017). En cada ciclo se realizó una humectación inicial donde se mantenían las mallas en un recipiente con agua destilada durante 3h

a temperatura ambiente. Posteriormente, las mallas fueron retiradas y secadas en horno a 80 °C durante 16 h, dejando enfriar el horno hasta temperatura ambiente con el fin de evitar un posible choque térmico al sacar las mallas y repetir los 4 ciclos restantes (Fig. 9).

### Figura 9

*Aplicación del tratamiento de hornificación a mallas de fibra de fique*



## 3.3 Caracterización de las Mallas de Fique

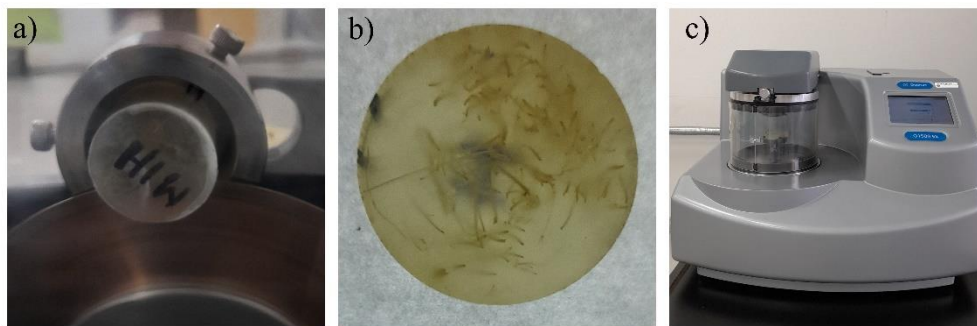
### 3.3.1 Evaluación Mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Con el fin de observar el efecto de los tratamientos sobre la superficie de las fibras de fique se tomaron micrografías mediante la técnica de SEM (Scanning Electron Microscope) con un microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG (Field Emission Gun). Para poder observar la superficie longitudinal, las fibras se cortaron y dispusieron sobre cintas de carbono con un recubrimiento de oro. Mientras que, para las tomas transversales las fibras fueron encapsuladas en una probeta con resina epóxica y pasadas por una cortadora de precisión IsoMet 1000 con disco

de diamante, para finalmente ser pulidas hasta una lija de grano 1200 y recubiertas con oro (Fig. 10). Las condiciones de observación utilizadas durante los ensayos fueron: alto vacío, voltaje de aceleración 30 kV y detectores de electrones secundarios (SE) y retrodispersados (BSE).

### Figura 10

*Preparación de probetas transversales para ensayo de SEM*



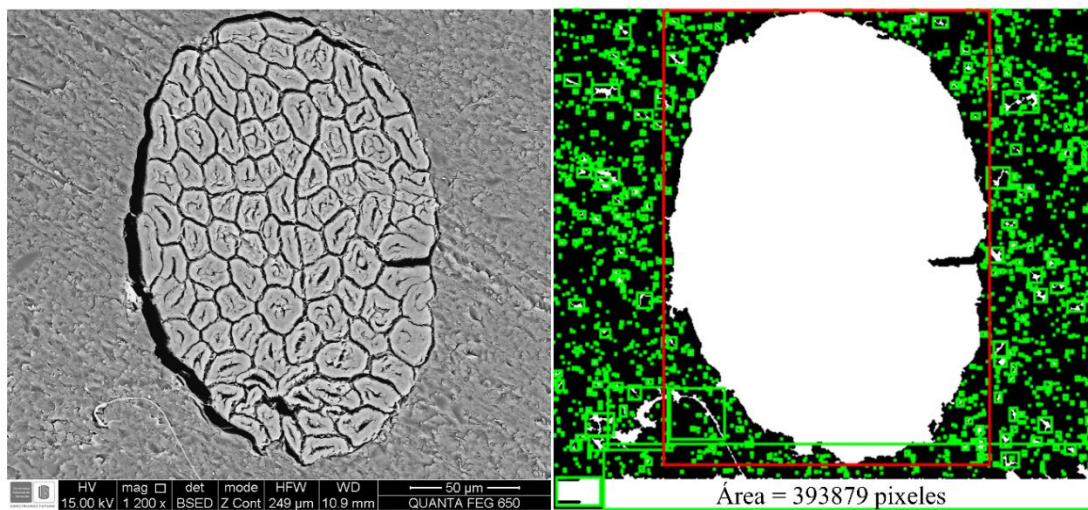
*Nota.* a) Corte de probetas de resina epóxica con fibras embebidas, b) probeta pulida y c) recubrimiento con oro de probetas.

Se tomaron un total de 60 micrografías del corte transversal por cada tipo de malla de fique con el fin de determinar el área transversal de las fibras. Las fibras usadas para los cortes y la ubicación de estos fueron seleccionados aleatoriamente. Las micrografías fueron procesadas mediante un algoritmo de Matlab (The MathWorks Inc., 2020) con el cual inicialmente se convierte la micrografía a una imagen binaria y se delimita el área de la fibra llenando los vacíos interiores (Fig. 11). Posteriormente, mediante la función “regionprops” se calcula el número de píxeles que conforman el área y se convierte a  $\mu\text{m}^2$ , determinando el área del píxel con la escala en  $\mu\text{m}$  de cada micrografía (el código completo se encuentra en el Apéndice A). Con los datos

obtenidos de Matlab se realizó un análisis de frecuencia, para determinar el valor promedio de la sección transversal de las fibras. Adicionalmente, mediante un conteo de 355 hilos, se determinó el número promedio de fibras que conforman un hilo, y así obtener el área total del hilo de fique a partir del área promedio de la fibra.

### Figura 11

*Micrografía de una fibra procesada en Matlab para el cálculo del área transversal*



### 3.3.2 Evaluación Mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Para identificar los grupos funcionales presentes en las mallas de fibra fique y el efecto de la aplicación de los tratamientos sobre estos, se realizaron ensayos de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por las siglas Fourier-Transform Infrared Spectroscopy). Para ello, se cortaron hilos de cada tipo de malla y se evaluaron en un equipo is50 FT-IR Nicolet Thermo Scientific. Los datos se adquirieron mediante celda ATR (reflexión total atenuada) en el rango de  $4000-400\text{ cm}^{-1}$ , con 32 scans, resolución de 4 y velocidad óptica de  $0.4747\text{ cm/s}$ .

### 3.3.3 Caracterización Mecánica en Tracción

Se realizó una caracterización mecánica a cada tipo de malla mostrada en la Tabla 2, con la finalidad de determinar sus principales propiedades como módulo de elasticidad, esfuerzo y deformación unitaria última. El enfoque de la caracterización mecánica de las mallas fue desde el esfuerzo cero hasta el esfuerzo último; es decir, no se analizó la respuesta posterior al esfuerzo máximo. Esto se hizo debido a que cuando la malla se utiliza como refuerzo externo de elementos sometidos a compresión axial, a medida que el elemento se expande lateralmente se genera tensión en la malla que aumenta gradualmente. Cuando la malla alcanza su esfuerzo máximo a tracción, también se alcanza el esfuerzo máximo a compresión del elemento reforzado y falla. Por lo cual, la efectividad de la malla como confinamiento externo de las probetas de concreto se pierde posterior al esfuerzo máximo de tracción de estas.

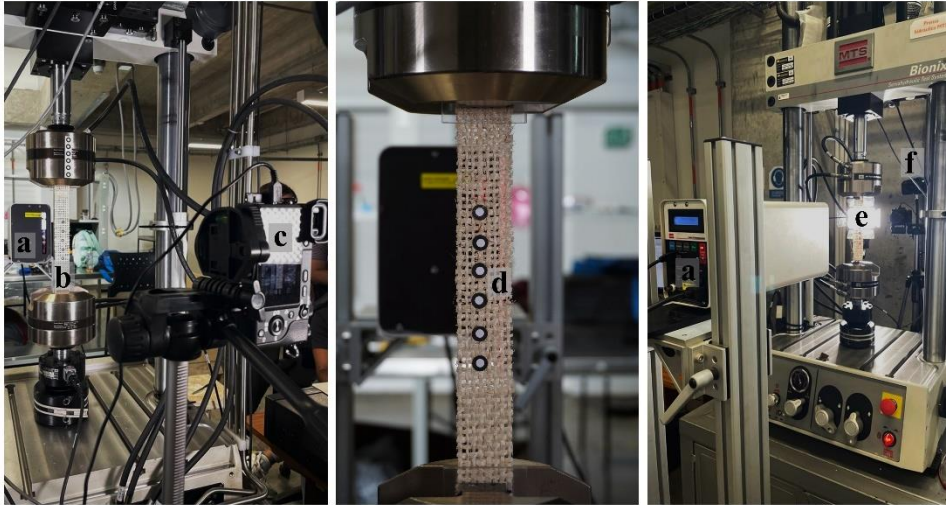
**Tabla 2**

*Matriz de las mallas utilizadas en la investigación*

Nombre	Tipo de Malla
M1	Malla de fique sencilla
M1A	Malla de fique sencilla alcalinizada
M1H	Malla de fique sencilla hornificada
M2	Malla de fique doble
M2A	Malla de fique doble alcalinizada
M2H	Malla de fique doble hornificada
MC	Malla de fibra de carbono

La caracterización se realizó por medio de ensayos de tracción en una maquina MTS Bionix Servohidráulico modelo 370 con capacidad de carga de 25 kN. Estos ensayos fueron realizados a una velocidad de 5 mm/min bajo la norma ISO 13934-1:2013, en la cual se especifica una dimensión de probeta de 200 x 50 mm y se sugiere el uso de acrílicos en la zona de contacto malla-mordazas para mejorar el agarre y evitar el deslizamiento de la malla (UNE-EN ISO, 2013). Teniendo en cuenta que las propiedades de las fibras vegetales varían según la cosecha, edad de la fibra y el proceso de extracción, se realizaron diez ensayos por cada tipo de malla. Esto con el fin de contar con mínimo cinco ensayos normales según indica la norma, en la cual se define como ensayo normal a las probetas que no sufren rotura en las mordazas (rotura a menos de 5 mm de las mordazas).

De manera complementaria a los datos de fuerza y deformación axial que se obtienen de la máquina de tracción, se utilizó un extensómetro láser MTS LX para registrar datos adicionales de desplazamiento relativo. Este desplazamiento fue tomado de la región central de la malla de fique acotando la longitud calibre mediante dos cintas reflectivas. Adicionalmente, se utilizó la técnica de correlación de imágenes digitales (DIC) con el montaje mostrado en la Figura 12. Para la ROI se utilizó un patrón discreto de seis puntos de referencia negros con centro blanco (10 y 5 mm de diámetro exterior e interior respectivamente), dispuestos en la parte central de la probeta y espaciados por tres hilos de por medio.

**Figura 12***Montaje DIC para ensayos de tracción*

*Nota.* a) Extensómetro láser, b) probeta de malla de fique, c) cámara digital, d) patrón discreto de puntos, e) luces led y f) cámara digital para el desplazamiento del cabezal de la MTS.

La adquisición de las imágenes se realizó a una velocidad de 1 cuadrado por segundo (fps) a una distancia de separación de la cámara (SOD) de 0.60 m. El cálculo de los desplazamientos verticales de cada uno de los puntos de referencia fue realizado en el software GOM Correlate (versión 2019). Los parámetros empleados para la identificación de cada punto de referencia fueron con el método de ajuste de valor de gris, con residual máximo de 1, radio mínimo de 1 px, contraste de elipse mínimo de 100 valores de gris y componente de punto de superficie deformante.

### 3.4 Elaboración de Probetas Cilíndricas de Concreto

Se elaboraron cinco probetas cilíndricas (moldes de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura) de concreto por cada tipo de variable, obteniendo un total de 40 probetas según la nomenclatura mostrada en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Matriz de probetas para ensayos a compresión*

Probeta	Tipo de Malla
C	Concreto sin refuerzo
C-M1	Concreto reforzado con malla M1
C-M1A	Concreto reforzado con malla M1A
C-M1H	Concreto reforzado con malla M1H
C-M2	Concreto reforzado con malla M2
C-M2A	Concreto reforzado con malla M2A
C-M2H	Concreto reforzado con malla M2H
C-MC	Concreto reforzado con malla MC

Las probetas de concreto fueron fabricadas con cemento Portland Tipo I de la empresa Argos S.A., con gravedad específica de 3030 kg/m<sup>3</sup> y agregados finos y gruesos caracterizados mediante las normas NTC 77, 92, 127, 176 y 237 (ICONTEC, 2020) (Tabla 4). El diseño de la mezcla se realizó siguiendo el método ACI 211.1 (ACI, 2002), con asentamiento objetivo de 3 cm en estado fresco y resistencia a la compresión objetivo de 21 MPa a los 28 días, obteniendo la dosificación listada en la Tabla 5.

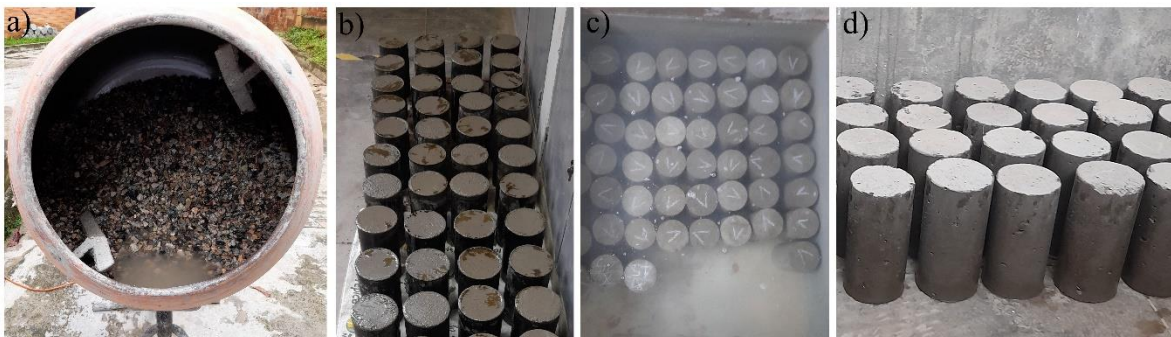
**Tabla 4***Caracterización del agregado fino y grueso*

Agregado	Fino	Grueso
Gravedad específica [kg/m <sup>3</sup> ]	2600	2650
Absorción [%]	0.62	0.95
Módulo de finura	3.7	-
Peso unitario compactado [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1512
Tamaño máximo nominal	-	3/4

**Tabla 5***Diseño de mezcla para el concreto*

Material	Peso [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento	400
Agua	200
Aire	0
Agregado grueso	906
Agregado fino	845

La mezcla se preparó de manera manual con ayuda de una mezcladora y se fundió en recipientes cilíndricos de 100 x 200 mm (4" x 8") manteniéndola allí durante dos días. Posteriormente, las probetas fueron desencofradas y curadas por 28 días mediante inmersión controlada en agua saturada de cal (Fig. 13). Durante los días 7, 14 y 28 de curado, se realizó un seguimiento en el cual se emplearon tres probetas no reforzadas para determinar la resistencia a compresión y verificar si se logró el objetivo de la mezcla diseñada.

**Figura 13***Preparación de probetas cilíndricas de concreto*

*Nota.* a) Mezcla del concreto, b) fundición, c) desencofrado e inmersión en agua saturada de cal y e) probetas después de 28 días de curado.

**3.5 Reforzamiento Externo de las Probetas Concreto**

Luego de verificar la resistencia objetivo a los 28 días del concreto, las probetas fueron retiradas de la pileta para realizar el reforzamiento externo con cada tipo de malla usando un adhesivo de resina epóxica Sikadur 301 de alto módulo y resistente a la humedad de la empresa Sika Colombia S.A.S. Para ello, se realizó el proceso de colocación manual utilizado convencionalmente en este tipo de ensayos (Ghalieh et al., 2017; Yan, 2016), junto con las instrucciones dadas por el proveedor de la resina. De esta forma, se preparó la superficie del concreto verificando que el sustrato estuviese sano, limpio y libre de humedad, para posteriormente preparar e impregnar la resina con una brocha en el área lateral externa del cilindro. Luego se colocó la malla y se traslapó 16 cm, longitud utilizada en este tipo de refuerzos (Ghalieh et al., 2017; Jirawattanasomkul et al., 2019). Por último, se agregó una capa adicional de resina sobre la

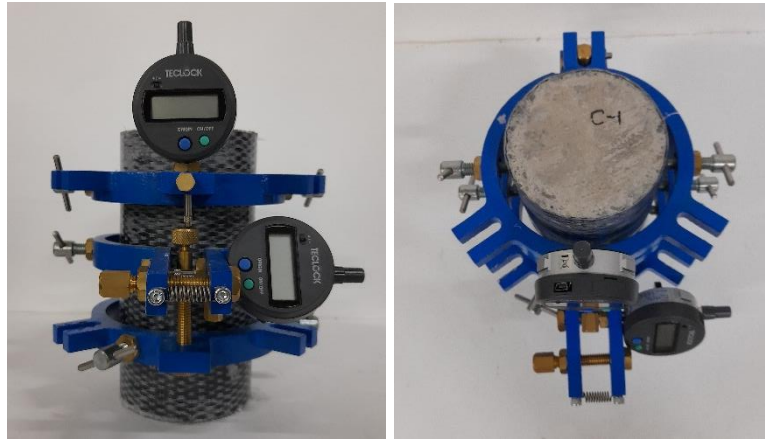
superficie lateral del elemento reforzado, dejándolo curar durante siete días según las especificaciones de la resina para garantizar la adherencia suficiente entre la malla y el concreto.

### **3.6 Ensayos a Compresión de las Probetas de Concreto**

Los ensayos de compresión en las probetas de concreto reforzadas y no reforzadas se realizaron siguiendo la norma ASTM C39-20 (ASTM, 2020) a una tasa de 0.20 MPa/s (equivalente a 0.10 mm/s), en la máquina hidráulica Universal de Ensayos Mecánicos MTS 810 (Material Test System) con celda de carga de 50 ton. Adicional a las lecturas de fuerza a compresión y deformación axial a compresión obtenidas de las probetas ensayadas hasta el esfuerzo máximo, se utilizó un compresómetro-expansómetro con comparadores digitales (Fig. 14) para medir el módulo de elasticidad y relación de Poisson de los cilindros de concreto en la región lineal – elástica (0 a 40% del esfuerzo máximo calculado). Para el cálculo de las deformaciones unitarias se determinó el dato promedio del diámetro externo y la distancia vertical entre los anillos superiores e inferiores del compresómetro (para los promedios se tomaron tres datos diferentes) de cada probeta.

**Figura 14**

*Compresómetro – expansómetro utilizado para determinar las deformaciones unitarias axiales y transversales de cilindros de concreto con y sin refuerzo externo*

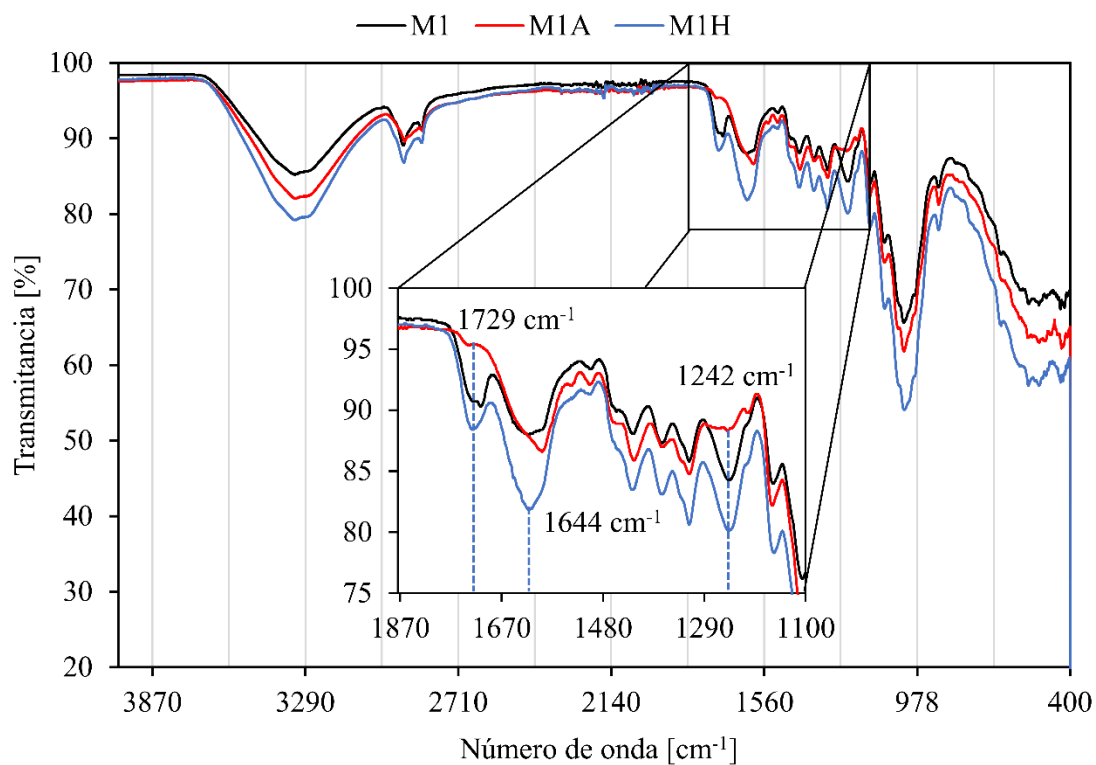
**4. Resultados y Discusión****4.1 Caracterización Física y Química de las Mallas de Fique**

Los espectros infrarrojos de las fibras M1, M1A y M1H se muestran en la Figura 15, en la cual se logra observar las bandas características de las fibras de fique. Las bandas con longitud de onda a  $3334$  y  $2919\text{ cm}^{-1}$  corresponden a los modos de vibración de la tensión OH y C-H de la celulosa y hemicelulosa respectivamente. Las vibraciones a  $1729$  y  $1644\text{ cm}^{-1}$  están relacionadas con la presencia de hemicelulosa producida por la tensión C=O y humedad por la flexión de los grupos O-H (Ferreira et al., 2017). Las bandas a  $1595$  y  $1503\text{ cm}^{-1}$  corresponden a la tensión simétrica C=C del anillo aromático de la lignina, junto la banda  $1242\text{ cm}^{-1}$  atribuida a los enlaces

-CH<sub>3</sub>, C-H y C-O presentes en la lignina (Muñoz et al., 2014). Las bandas con longitudes de onda iguales a 1026, 1433 y 1382 cm<sup>-1</sup> se relacionan con la celulosa producida por la tensión C-O y la deformación asimétrica y simétrica de -CH respectivamente. Así mismo, se encuentra el estiramiento asimétrico del enlace β-glucosa característicos de la celulosa en la banda a 900 cm<sup>-1</sup> (Obi Reddy et al., 2013).

### Figura 15

*Espectros FTIR de fibras de fique M1, M1A y M1H*



Al comparar los espectros infrarrojos de las muestras de fibras de mallas M1 y M1A (Fig. 15) no se aprecian cambios significativos entre estos, a excepción de la desaparición de las vibraciones a 1242 y 1729 cm<sup>-1</sup> en la malla M1A, relacionadas con la lignina y hemicelulosa de

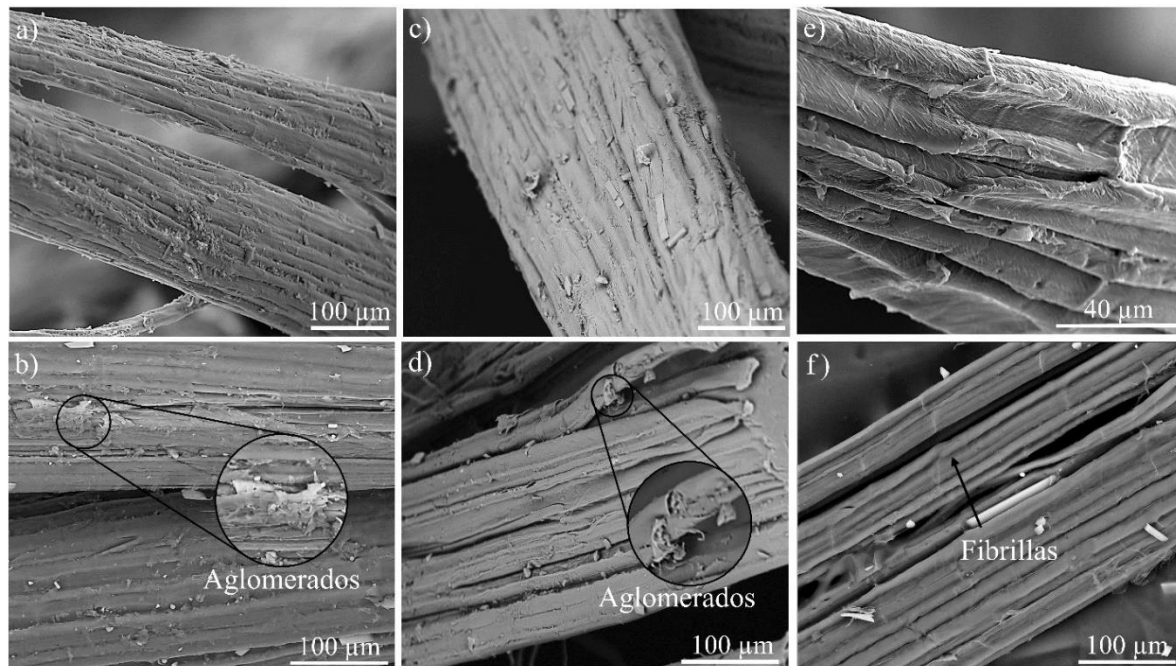
las fibras. Las bandas de celulosa se mantienen constantes debido a que la celulosa está formada por regiones cristalinas y amorfas bien estructuradas, unidas por fuertes enlaces que la hacen más resistentes a la degradación química y biológica (Azevedo, 2015). Por otra parte, la lignina y hemicelulosa cuentan con regiones amorfas unidas por cadenas más cortas y ramificadas, haciéndolas más susceptibles a la hidrólisis química (Alves, 2011). Es por ello que cuando el tratamiento alcalino altera la estructura de red y enlaces de hidrógeno de la fibra, se destruye el acoplamiento de componentes como la hemicelulosa y lignina, generando una fibrilación que mejora la unión entre las cadenas de celulosa volviendo más resistente y cristalina a la fibra (Castro et al., 2007).

En el espectro de la fibra hornificada de la malla M1H también mostrado en la Fig.15, se evidencia un aumento de intensidad del pico a  $1644\text{ cm}^{-1}$  en comparación con el espectro de la fibra de la malla M1, relacionado con la formación de puentes de hidrógeno. Estos nuevos puentes de H son formados durante el proceso de humectación, en el cual, los enlaces de H presentes en las paredes de la fibra se rompen liberando grupos -OH que posteriormente forman enlaces de H con  $\text{H}_2\text{O}$ , los cuales requieren mayor energía para romperse (Zugenmaier, 2010). Por lo tanto, durante los ciclos del tratamiento se van formando más enlaces de H que inducen una modificación estructural de las paredes e hinchamiento de la fibra (Ferreira et al., 2015). Adicionalmente, durante la eliminación de agua en el proceso de secado las cadenas de celulosa se ordenan y estrechan generando un mayor empaquetamiento de las fibras y reducción del lumen (Fernandes Diniz et al., 2004).

En complemento a los resultados de FTIR, en las micrografías de la sección longitudinal de las fibras M1, M1A y M1H de la Fig.16, se puede observar que en las fibras M1 (Fig. 16a,b) y M1H (Fig. 16c,d) se encuentra una gran cantidad de aglomerados distribuidos sobre toda la superficie de las fibrillas . Por el contrario, en las fibras M1A (Fig. 16e,f) la superficie se ve más limpia y con la morfología fibrilar característica de estas fibras más definida. Este efecto concuerda con los resultados reportados en otros trabajos (Castro et al., 2007; Piedad Gañán & Mondragon, 2002) como el de Yasmina et al. (2020), en el cual aplicaron un tratamiento de alcalinización con 4% NaOH sobre fibras de yute, indicando que las fibras alcalinizadas mostraron una superficie más limpia y rugosa en comparación con las fibras sin tratar. Por lo cual, se infiere que el tratamiento alcalino al afectar la estructura de red por la remoción parcial de ciertos componentes que recubren la fibra, genera un efecto de limpieza y rugosidad al dejar más expuestas las fibrillas sobre la superficie (Faruk et al., 2012b; Piedad Gañán & Mondragon, 2005; Obi Reddy et al., 2013; Xue & Tabil, 2007)

**Figura 16**

*Micrografías de la sección longitudinal de las fibras de fique*



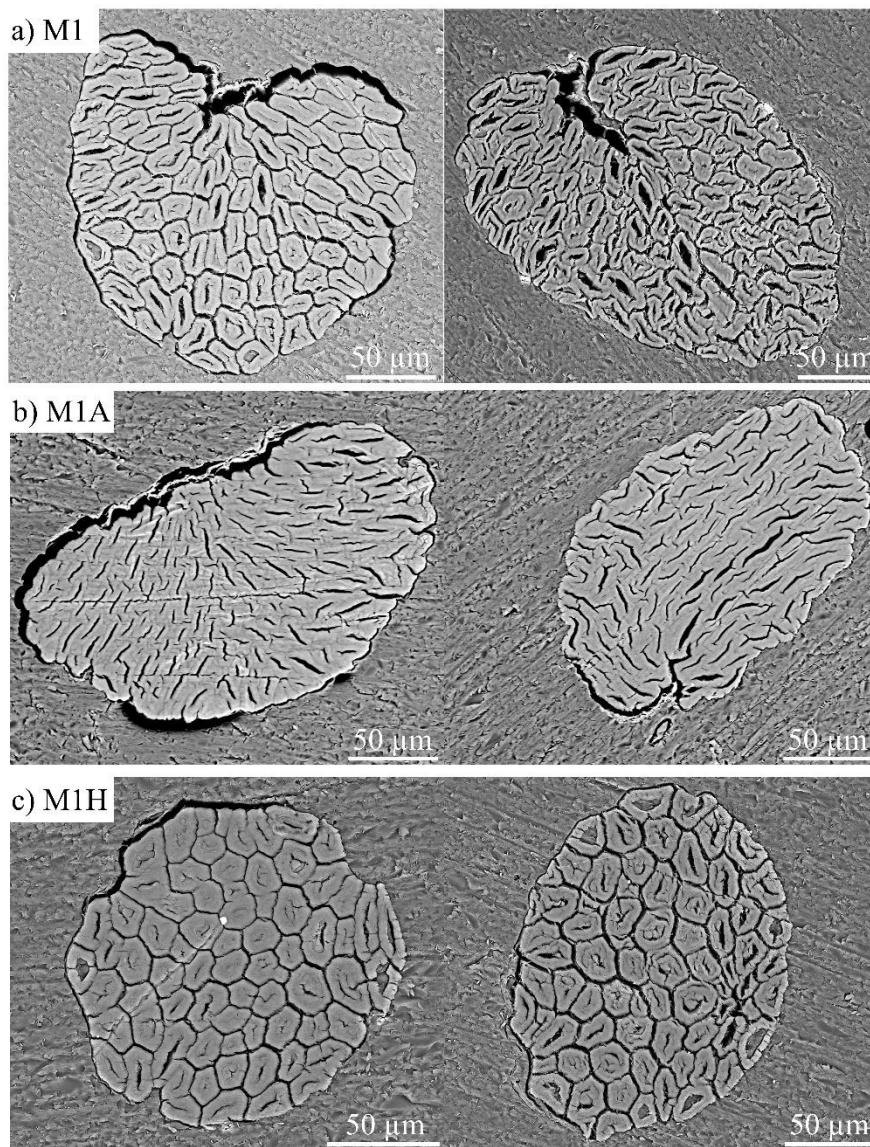
*Nota.* Fibras a,b) M1, c,d) M1H, y e,f) M1A.

La Figura 17 muestra las micrografías de la sección transversal de algunas fibras de las mallas M1, M1A y M1H. En esta se observa la variedad de formas que presentan las fibras de fique que dependen directamente de la parte de la hoja de donde son extraídas. Andrade Silva (2008) denomina las formas más comunes que presentan las fibras vegetales como: estructural, arco, xilema y circular. En esta investigación se pudo observar la forma estructural que parece una herradura (Fig. 17a), la forma de arco (Fig. 17b) y la forma circular (Fig. 17c). Notando que, a pesar de que la forma de la fibra no depende ni varía según los tratamientos aplicados, en la Figura 17 si se observa un cambio significativo en las paredes y lumen de las fibras M1H y M1A en comparación con las fibras sin tratar. Las micrografías de la fibra M1 muestran claramente la

estructura característica de las fibras, en la cual se observa el lumen formado entre las paredes separadas por una lámina media. En las fibras M1A se logra ver que una vez se realiza la alcalinización, es tan fuerte el tratamiento que el efecto de empaquetamiento generado por las cadenas de celulosa contrae la fibra al punto de disminuir notablemente el tamaño del lumen en comparación con las fibras M1. Por otra parte, en las fibras hornificadas (M1H) se observa un crecimiento del espesor de las paredes atribuido al hinchamiento generado durante los ciclos de humectación, lo cual a su vez compacta la fibra y disminuye de igual forma el tamaño del lumen.

**Figura 17**

*Micrografías de la sección transversal de las fibras de fique*



El análisis de frecuencia del área de las fibras obtenida mediante Matlab y el conteo de fibras por cada hilo que compone la malla es mostrado en los Apéndices B y C respectivamente. Con los valores promedio calculados se realizó un análisis cuantitativo del efecto que tienen los

tratamientos sobre el área transversal de las fibras. Teniendo en cuenta que el conteo de fibras por hilo arrojó un valor promedio de  $46 \pm 8$  fibras por hilo, se calcularon los promedios de área y diámetro aparente, junto con la desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV) mostrados en la Tabla 6. El diámetro aparente fue calculado a partir del valor del área, asumiendo que la fibra tenía una sección circular. En la tabla se observa una reducción del 49% y 23% del área con la aplicación de los tratamientos de alcalinización y hornificación respectivamente. Esta reducción es también mostrada en el trabajo de Muñoz et al. (2014), en el cual utilizaron un tratamiento de alcalinización con 2% NaOH sobre fibras de fique, reportando que el tratamiento disminuyó un 33% el área de la fibra con respecto a la fibra sin tratar. Lo anterior confirma el análisis cualitativo previo de los resultados de las técnicas de caracterización FTIR y SEM, en las cuales se observó que el uso de los tratamientos genera un hinchamiento de las paredes y a su vez compactación de las fibras. Adicionalmente, los resultados del área y diámetro listados en la Tabla 6 son comparables a los de las fibras de fique de 21 tex (densidad lineal textil) estudiadas por Herrera et al. (2020), quien reportó un diámetro promedio de  $81.53 \pm 23 \mu\text{m}$  (CV= 28.21%), y a los resultados encontrados por Isaza (2015), quien estimó el área promedio en  $14192.75 \pm 10093 \mu\text{m}^2$  de una fibra de fique de 20 tex (CV=71.11%). El coeficiente de variación (CV) y desviación estándar relativamente altos encontrados en esta y otras investigaciones como las nombradas previamente, se tiende a relacionar con la naturaleza heterogénea que tienen las fibras vegetales. Si bien las propiedades y características de las fibras varían por factores como el tipo de cosecha, Delvasto et al. (2010) explica que en una misma fibra se pueden presentar variaciones de tamaño debido a la forma física que se requiere a lo largo de las hojas de la planta para soportar su propio peso.

**Tabla 6***Área y diámetro aparente de fibras e hilo de fique calculada mediante Matlab*

Malla	Fibra				Hilo	
	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	SD [ $\mu\text{m}^2$ ]	CV [%]	Diámetro [ $\mu\text{m}$ ]	Área [ $\text{mm}^2$ ]	Diámetro [mm]
M1	22546.76	$\pm 10854$	48.12	84.72	1.04	0.58
M1A	11499.49	$\pm 4976$	43.27	60.50	0.53	0.41
M1H	17353.94	$\pm 6456$	37.20	74.32	0.79	0.50

*Nota.* SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación.

#### 4.2 Caracterización Mecánica a Tracción de las Mallas de Fique

Para el análisis de la respuesta a tracción de cada tipo de malla mostrado en el Apéndice D se determinó el esfuerzo normal ( $\sigma$ ) mediante la Ecuación 2 y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) con la Ecuación 3. Los datos de esfuerzo máximo y deformación unitaria última promedio se muestran en la Tabla 7. La deformación unitaria última fue calculada a partir del desplazamiento del cabezal de la MTS ( $\epsilon$  MTS), del extensómetro laser ( $\epsilon$  laser) y de los desplazamientos relativos promedio calculado mediante GOM Correlate ( $\epsilon$  DIC) entre los puntos de inspección 1-6 ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$ ,  $\epsilon_4$  y  $\epsilon_5$ ) (Fig. 18).

$$\sigma = P/(A * H) \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

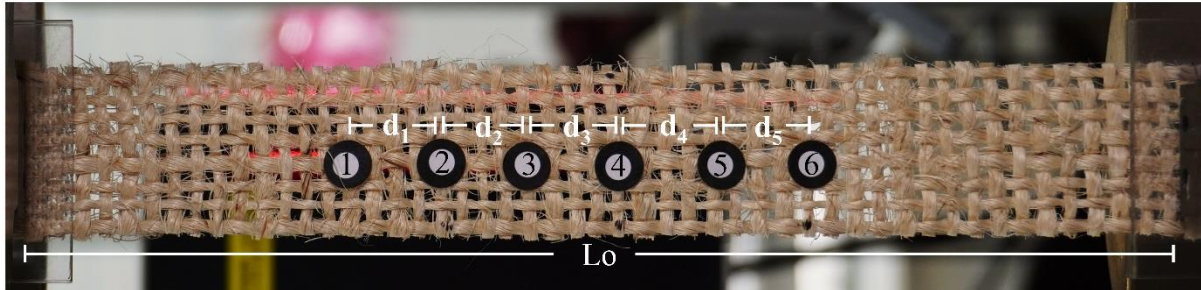
Siendo, P = carga [N], A= área del hilo [ $\text{mm}^2$ ], y H= número de hilos en la dirección de la carga (trama).

$$\epsilon = \Delta L / L_0 * 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Siendo,  $\Delta L$  = desplazamiento,  $L_0$  = longitud inicial calibrada.

**Figura 18**

*Configuración de patrón discreto de puntos para análisis en GOM Correlate*



**Tabla 7**

*Datos promedio de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas de fique*

Malla	M1	M2	M1A	M2A	M1H	M2H
$\sigma_{\max}$ [MPa]	152.47	156.29	225.31	225.68	158.09	171.26
SD	15.99	19.40	13.80	16.21	8.86	15.04
CV [%]	10.49	12.41	6.12	7.18	5.60	8.78
$\varepsilon$ MTS [mm/mm*100]	5.43	6.70	8.38	6.66	8.75	7.32
SD	0.30	0.38	0.87	0.44	0.90	0.95
CV [%]	5.52	5.67	10.38	6.61	10.29	12.98
$\varepsilon$ laser [mm/mm*100]	5.44	6.24	8.38	6.66	8.75	7.33
SD	0.52	0.31	0.87	0.44	0.90	0.95
CV [%]	9.56	4.97	10.38	6.61	10.29	12.96
$\varepsilon$ DIC [mm/mm*100]	5.57	5.91	8.55	6.32	9.00	7.26
SD	0.40	0.47	1.08	0.53	0.79	1.01
CV [%]	7.18	7.95	12.63	8.39	8.78	13.91

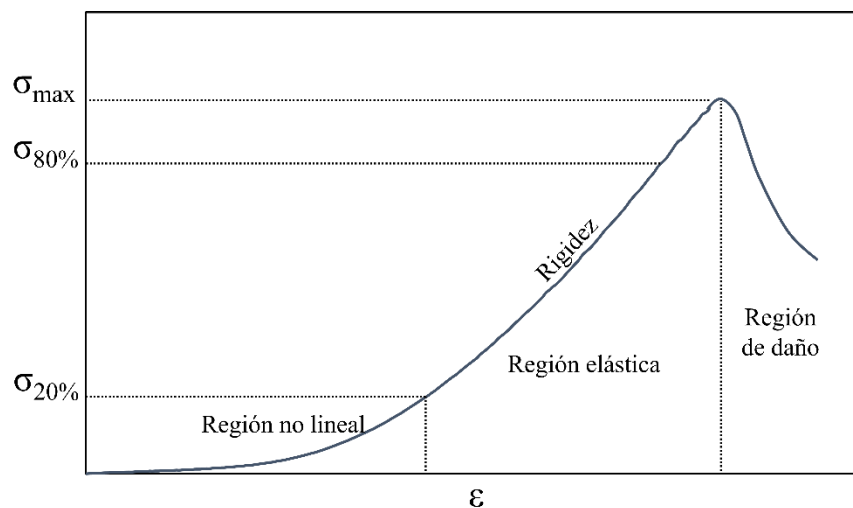
*Nota.* Los datos individuales de esfuerzo y deformación unitaria última de cada tipo de malla se encuentran en los Apéndices E-J.

El módulo de elasticidad promedio ( $E$ ) de las fibras se calculó a partir de la pendiente de la curva correspondiente a los datos entre el 20 y 80% del esfuerzo máximo y es mostrado en la Tabla 8. El rango de datos para calcular el módulo de elasticidad fue elegido debido a que la parte inicial (0-20%) de la curva esfuerzo-deformación no presentaba un comportamiento lineal, lo cual es atribuido a que la probeta se compone por hilos independientes que permiten un aumento uniforme de la carga solo después de que se logra la tensión de todos los hilos. Adicionalmente, Alves Fidelis et al. (2013) encontraron una respuesta similar en los resultados de ensayos de tracción de fibras de sisal, coco y piasava, indicando que esta región no lineal tiende a presentarse en niveles de tensión inferiores a 100 MPa y que es debido a un colapso de las paredes celulares primarias débiles y la delaminación entre las células de fibra. Jichong Wang et al. (2022) dividen este comportamiento de la curva esfuerzo - deformación de fibras vegetales en tres regiones (Fig. 19): la región inicial nombrada por algunos autores como “crimp región”, donde los hilos presentan un comportamiento no lineal debido al ordenamiento gradual de las fibras en la dirección de la carga; región elástica, donde se genera un comportamiento lineal y cuya pendiente representa la rigidez real del hilo; y la región de daño, en la cual la resistencia disminuye con el fallo gradual de cada una de las fibras hasta llegar a la rotura total de la probeta.

**Tabla 8***Módulo de elasticidad promedio de las mallas de fique*

Eprom [GPa]	M1	M2	M1A	M2A	M1H	M2H
E MTS	3.38	3.58	4.33	4.92	3.86	4.14
SD	0.28	0.32	0.39	0.26	0.26	0.41
CV [%]	8.28	8.94	9.01	5.28	6.74	9.90
E laser	3.40	4.14	4.46	5.02	4.04	4.38
SD	0.30	0.57	0.57	0.30	0.34	0.35
CV [%]	8.82	13.77	12.78	5.98	8.42	7.99
E DIC	3.05	4.13	4.28	5.16	3.68	4.18
SD	0.34	0.33	0.43	0.43	0.28	0.18
CV [%]	11.15	7.99	10.05	8.33	7.61	4.31

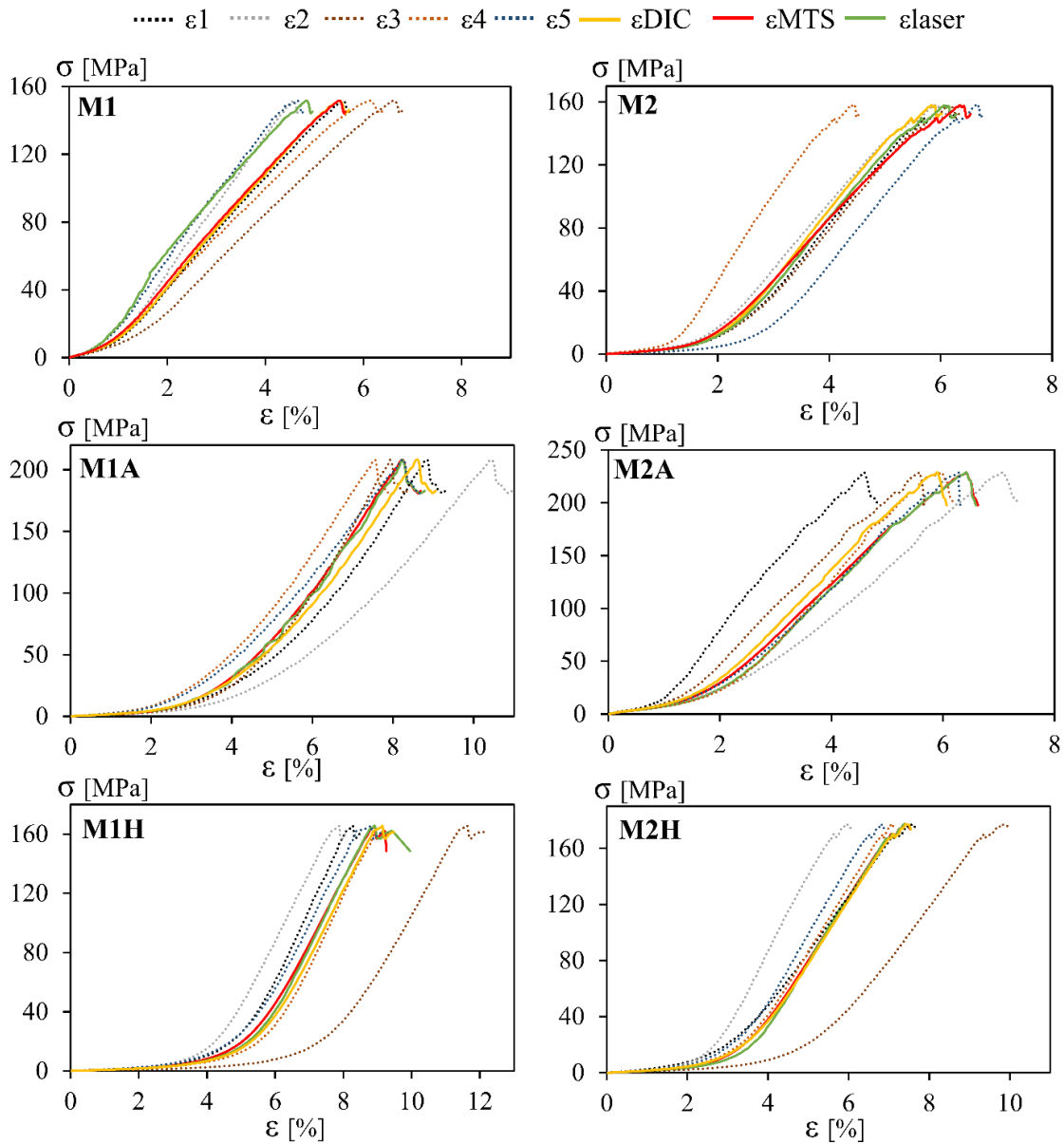
*Nota.* Los datos individuales de módulo de elasticidad de cada tipo de malla se encuentran en los Apéndices K-P.

**Figura 19***Regiones de una curva típica de esfuerzo-deformación de fibras vegetales*

En la Figura 20 se encuentran las curvas promedio de esfuerzo – deformación unitaria obtenidas mediante los resultados de la MTS, el extensómetro laser y DIC para cada tipo de malla. En estas se puede observar cómo las curvas obtenidas a partir de los desplazamientos relativos entre los puntos 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 y 5-6 del patrón discreto utilizados con DIC tienen una deformación diferente ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$ ,  $\epsilon_4$  y  $\epsilon_5$  respectivamente). Sin embargo, al calcular la curva promedio de los datos ( $\epsilon$  DIC) esta se equilibra con todas las deformaciones, llegando a resultados semejantes entre la deformación determinada a partir de la MTS, del extensómetro laser y de DIC. Además, en la Figura 21 en la cual se comparan los diagramas de caja del valor de deformación unitaria última obtenido con cada método de adquisición, se observa también esta semejanza entre los resultados obtenidos con los tres métodos, aunque existe mayor correlación de los resultados promedio entre la MTS y el láser.

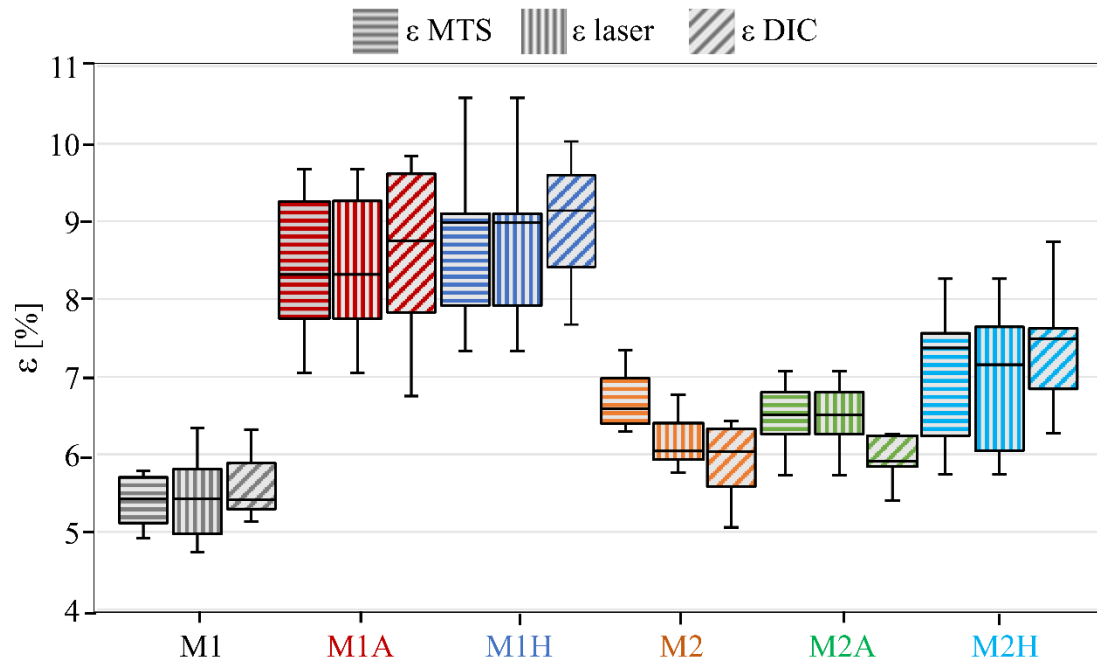
**Figura 20**

*Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique*



**Figura 21**

*Diagrama de caja de los datos de deformación unitaria última de cada tipo de malla de fique*

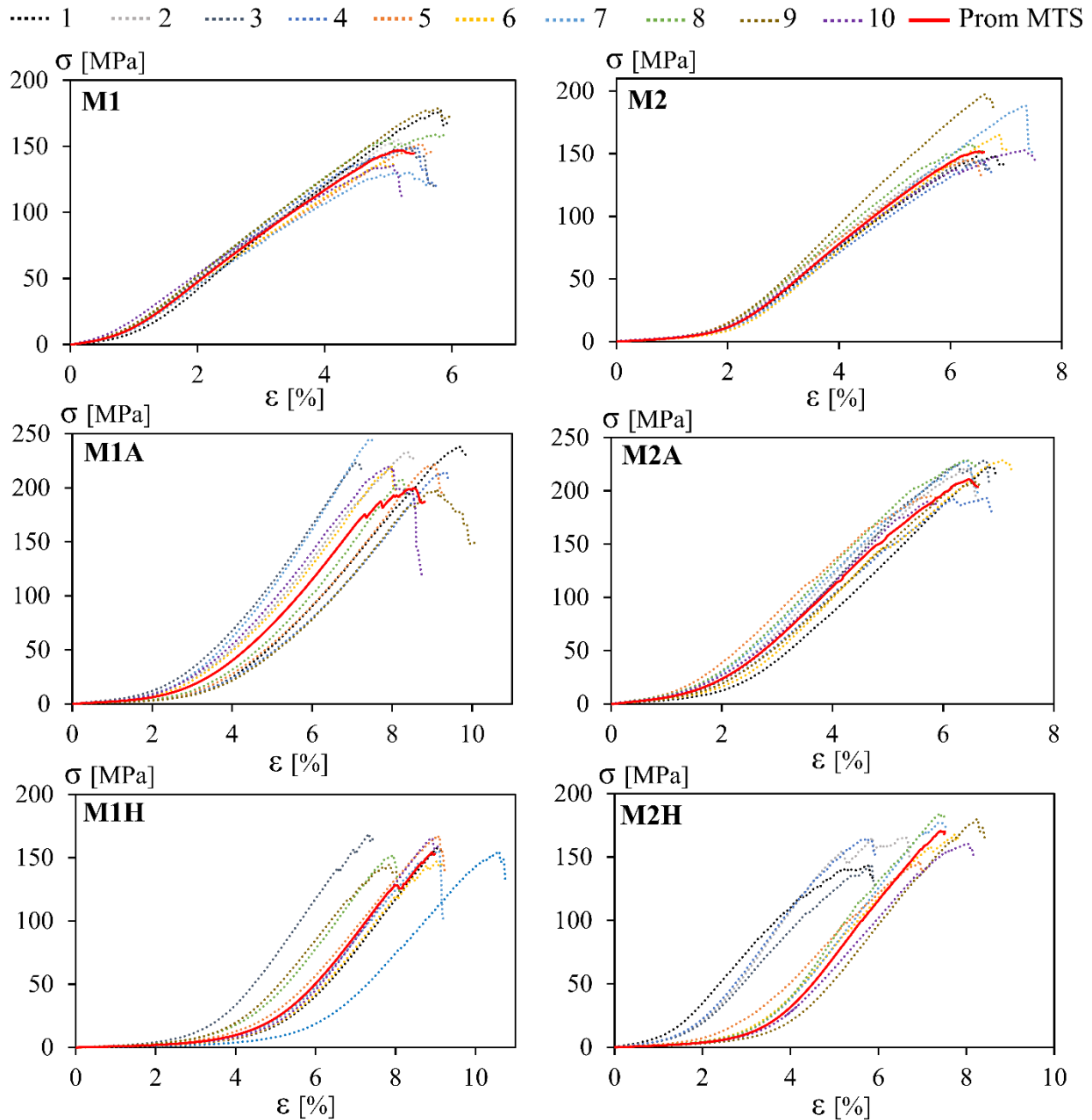


En la Figura 21 se observa el comportamiento estadísticamente heterogéneo que caracteriza a las fibras vegetales mostrando una desviación estándar considerable entre las diez probetas ensayadas de cada una de las mallas. Esto también se evidencia en las Figuras 22 a 24, en las cuales se muestran las curvas esfuerzo – deformación unitaria obtenida con los tres métodos de adquisición (MTS, láser y DIC respectivamente) para cada tipo de malla. En estas tres últimas figuras, al igual que en la Figura 21, se observa que las mallas alcalinizadas y hornificadas son las que presenta mayor grado de desviación estándar entre los resultados, mostrando una influencia de los tratamientos sobre la dispersión de los datos. Por otra parte, al comparar las curvas de cada método de lectura, se destaca que con la MTS se logra una adquisición de datos con menor ruido.

Esto es debido a que el extensómetro laser y la técnica DIC dependen de la lectura del desplazamiento de un punto de referencia; el láser depende de dos cintas reflectivas dispuestas sobre la probeta, y DIC depende de los puntos discretos pegados de igual forma sobre la malla. A medida que se genera la tensión durante el ensayo de tracción, los hilos de la trama de la malla se deforman y en algunos casos la cinta o los puntos del patrón chocan con los hilos de la urdimbre afectando el desplazamiento del punto de referencia y por ende su correcta lectura. Este efecto se logra evidenciar en la curva obtenida con los datos del láser de la probeta M2H-6 (Fig. 23), donde en cierto punto del ensayo la cinta reflectiva se desubicó indicando una disminución de la deformación. A diferencia de los resultados de deformación de M2H-6 calculados con la MTS y DIC (Figs. 22 y 24) que si muestran una deformación continua de la probeta.

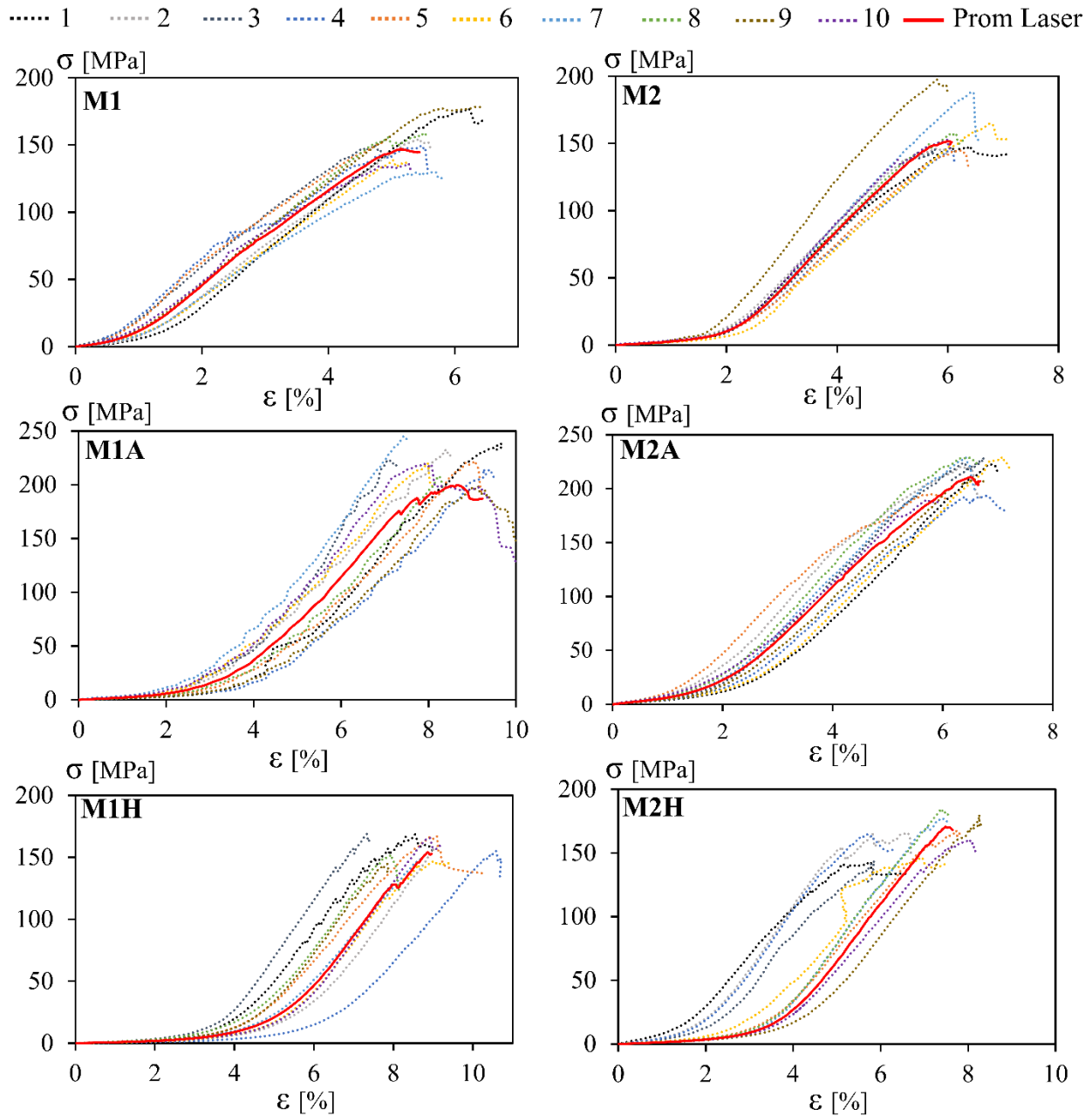
**Figura 22**

*Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique con lectura de la MTS*



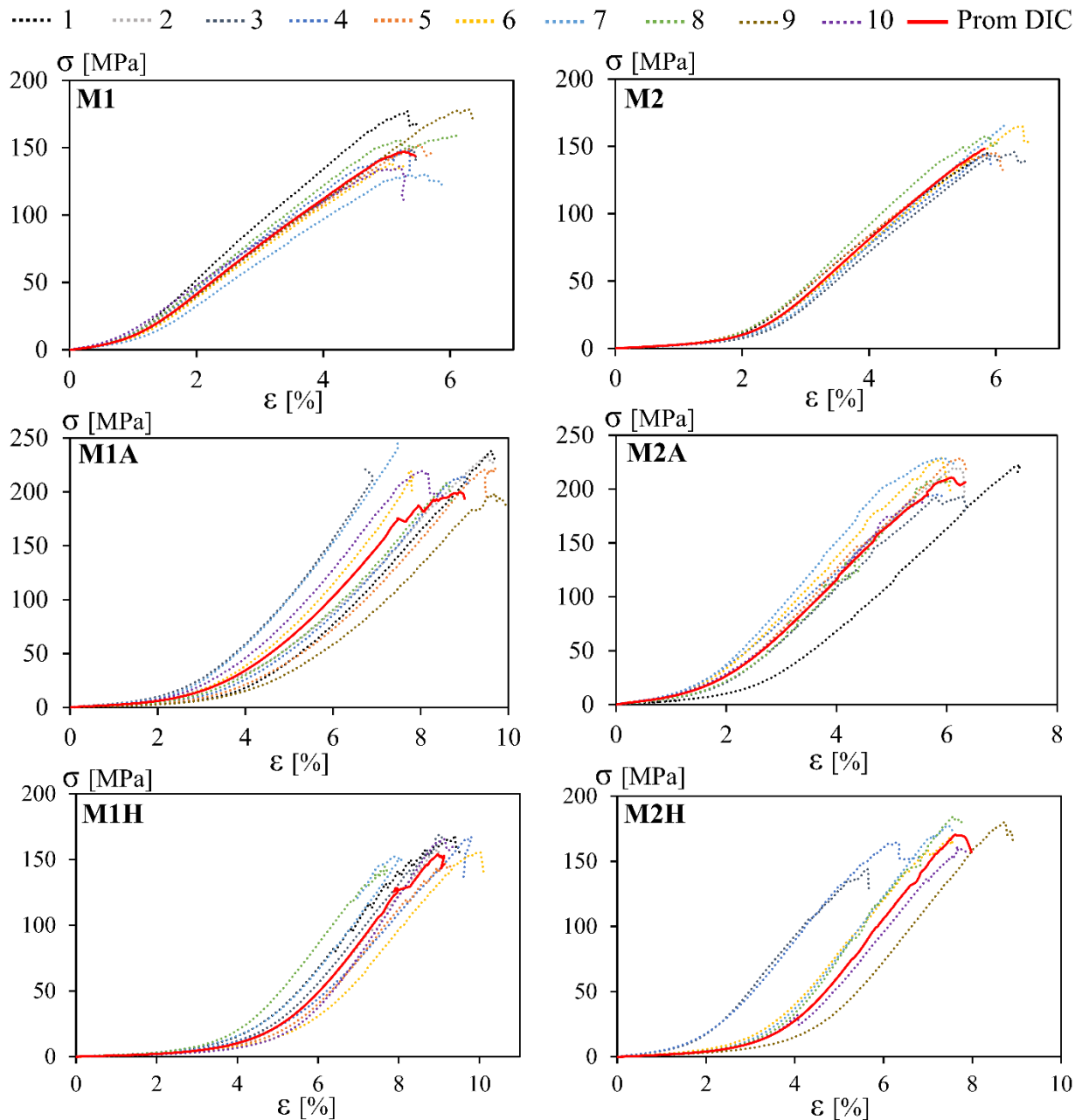
**Figura 23**

*Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique con lectura de laser*



**Figura 24**

*Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de mallas de fique con DIC*



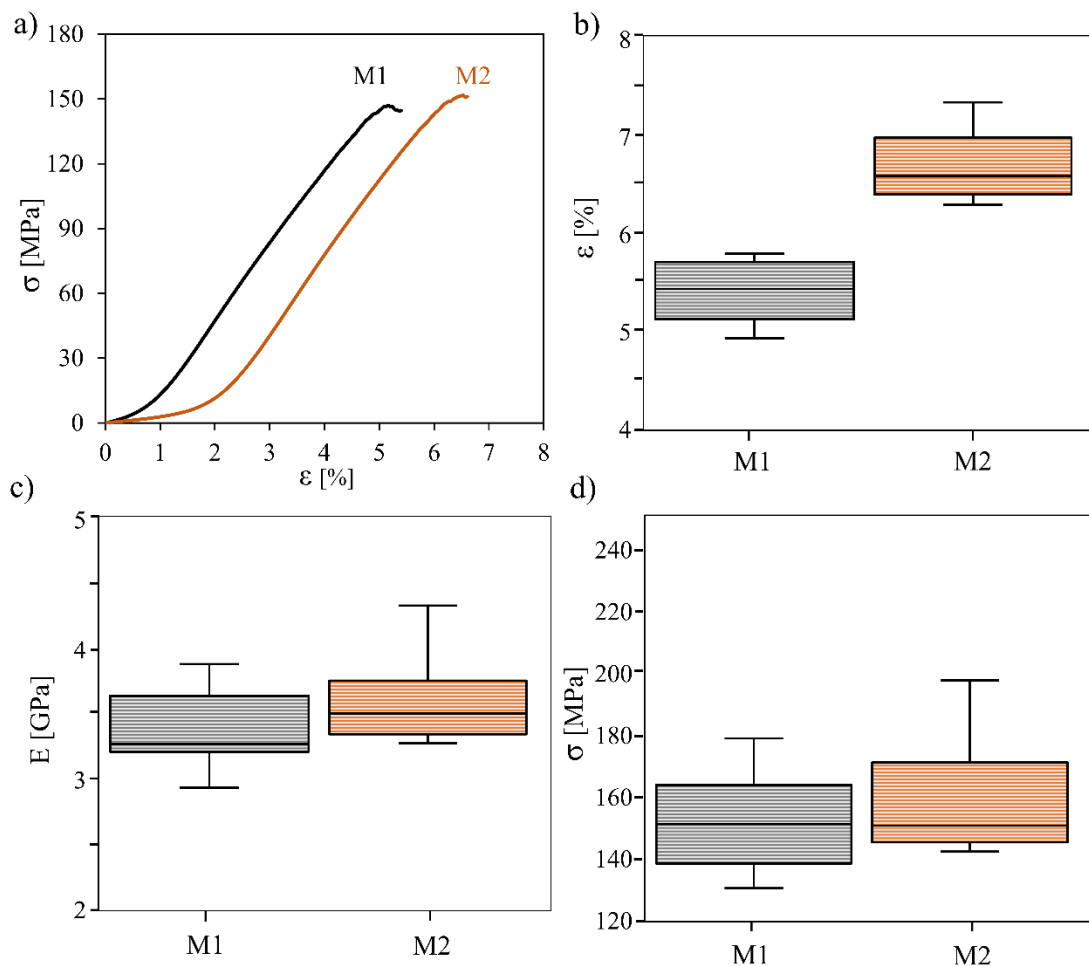
Con el fin de caracterizar de manera general el efecto de la variación del entramado y la aplicación de los tratamientos sobre las mallas de fique, los análisis que se realizan a continuación se hacen usando los datos promedio de esfuerzo máximo, deformación unitaria máxima y módulo de elasticidad obtenidos con la lectura de la MTS. Adicionalmente se utilizarán las curvas promedio de esfuerzo – deformación unitaria para explicar la tendencia central de las diez curvas de cada tipo de malla.

La Figura 25 muestra la comparación de la respuesta a tracción de las mallas sin tratamientos sencillas y dobles, en las cuales se observa un ligero incremento (2.5%) en la resistencia máxima a tracción de la malla M2 con respecto a la malla M1. Durante los ensayos de tracción la malla M2 resistió una carga máxima promedio de 1964.58 N, siendo 56% mayor que la carga máxima soportada por la malla M1 (1257.30 N). Sin embargo, teniendo en cuenta que el esfuerzo depende del área transversal de la probeta y que las mallas M2 tenían mayor área al estar compuestas por el doble de hilos en el sentido de la trama, el esfuerzo máximo promedio calculado es ligeramente mayor que el de las mallas M1. Un resultado similar fue reportado en el estudio de Puentes Rojas et al. (2018) para dos mallas de fique con 20 y 12 hilos en el sentido de la trama. En ese trabajo, las mallas con 20 hilos exhibieron un carga máxima y esfuerzo 55% y 28% mayor respectivamente, en comparación a la malla de 12 hilos. El mayor aumento de la carga respecto al esfuerzo es debido a que la probeta al tener más hilos resiste más carga, sin embargo, los ocho hilos de diferencia representan mayor área transversal, lo cual disminuye el resultado del esfuerzo calculado de la probeta. En la Figura 25a también se observa que la malla M2 presenta una mayor deformación máxima y región no lineal respecto a M1, lo cual se infiere que está relacionado con que la malla M2 al tener mayor cantidad de hilos requiere de mayor tiempo para alinear estas fibras

en la dirección de la carga. No obstante, como se evidencia en la Tabla 8 y en la Figura 25c, la malla M2 a pesar de no mostrar una diferencia considerable en la resistencia, si presenta un aumento del 6% en el módulo de elasticidad respecto a la malla M1.

**Figura 25**

*Comparación de entramado de mallas M1 y M2*

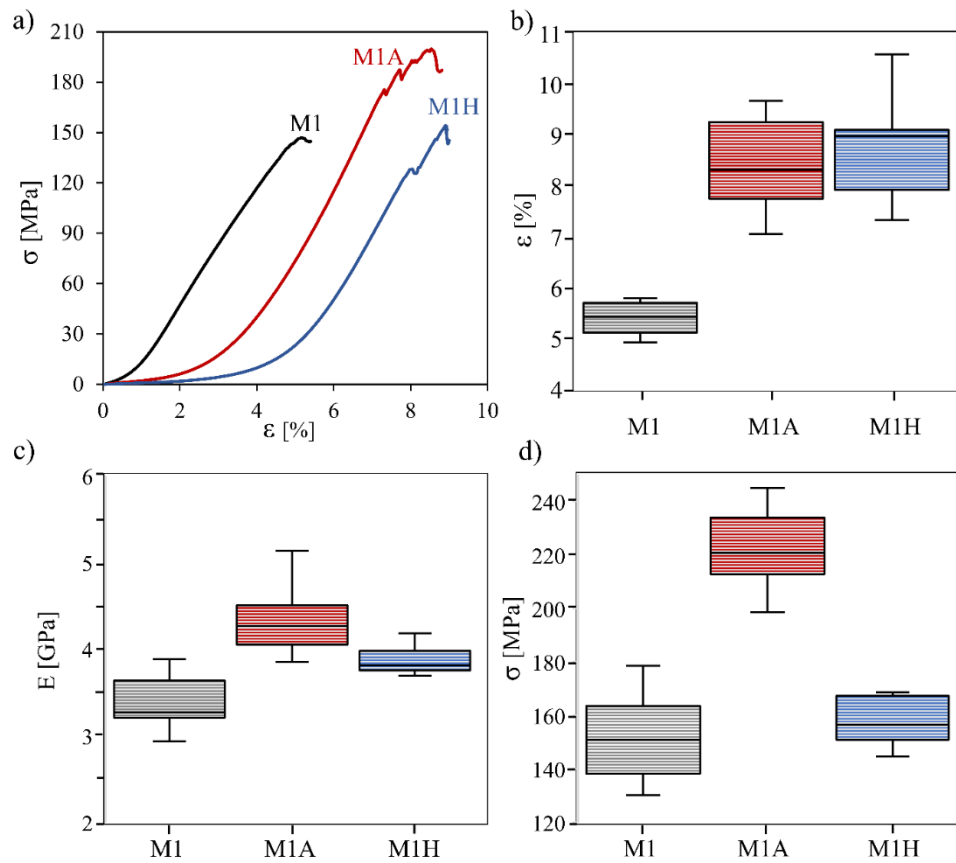


*Nota.* a) Curvas promedio esfuerzo – deformación unitaria, diagramas de caja de datos de b) deformación unitaria máxima, c) módulo de elasticidad y d) esfuerzo máximo de mallas M1 y M2.

En la Figura 26 se compara la respuesta a tracción de las mallas sencillas sin tratamiento y con la alcalinización y hornificación. En la figura se evidencia que la aplicación de ambos tratamientos genera un aumento notable de la zona no lineal de las mallas. Este comportamiento es atribuido al efecto de contracción que generan los tratamientos en las fibras mostrado en los análisis de los resultados de SEM. Una vez se realizaron los tratamientos y las mallas iban a ser cortadas para hacer las probetas de los ensayos de tracción, se observó una contracción notable de las mallas (Fig. 27). Por lo cual, mientras las probetas M1 quedaban con 57 hilos en la dirección de la urdimbre, las probetas M1A y M1H al contraerse por los tratamientos quedaban con 60 y 62 hilos respectivamente para alcanzar la longitud de 270 mm de la probeta indicada por la norma (ISO 13934-1:2013). Sin embargo, esta longitud contraída era nuevamente estirada durante los ensayos de tracción, generando un aumento del desplazamiento de la probeta y a su vez de la zona no lineal. Pese al aumento, una vez se lograba la tensión uniforme de toda la probeta y comenzaba la zona lineal elástica, las mallas alcanzaban una mayor resistencia y rigidez que las mallas sin tratar. Las mallas alcalinizadas exhibieron un aumento del 48% en la resistencia máxima y del 28% en la rigidez con respecto a las mallas M1. Por otra parte, en las mallas hornificadas a pesar del efecto de contracción que tuvieron las fibras por la formación de enlaces de H, la mejora de la resistencia fue menor que la de M1A. Dado que el tratamiento de hornificación no elimina ningún compuesto que genere que se rigidice la fibra, por lo cual, las mallas M1H tuvieron un aumento en la resistencia máxima de tan solo 4% y de la rigidez 14% frente a M1. No obstante, se puede indicar que el uso de ambos tratamientos mejora la resistencia y rigidez a tracción de las mallas de fique, a pesar de que inducen una mayor deformación unitaria de la malla por el desplazamiento adicional generado por la contracción de las fibras.

**Figura 26**

*Efecto de los tratamientos sobre la respuesta a tracción de mallas de fique sencillas*



*Nota.* a) Curvas promedio esfuerzo – deformación unitaria, diagramas de caja de datos de b) deformación unitaria máxima, c) módulo de elasticidad y d) esfuerzo máximo de mallas M1, M1A y M1H.

**Figura 27**

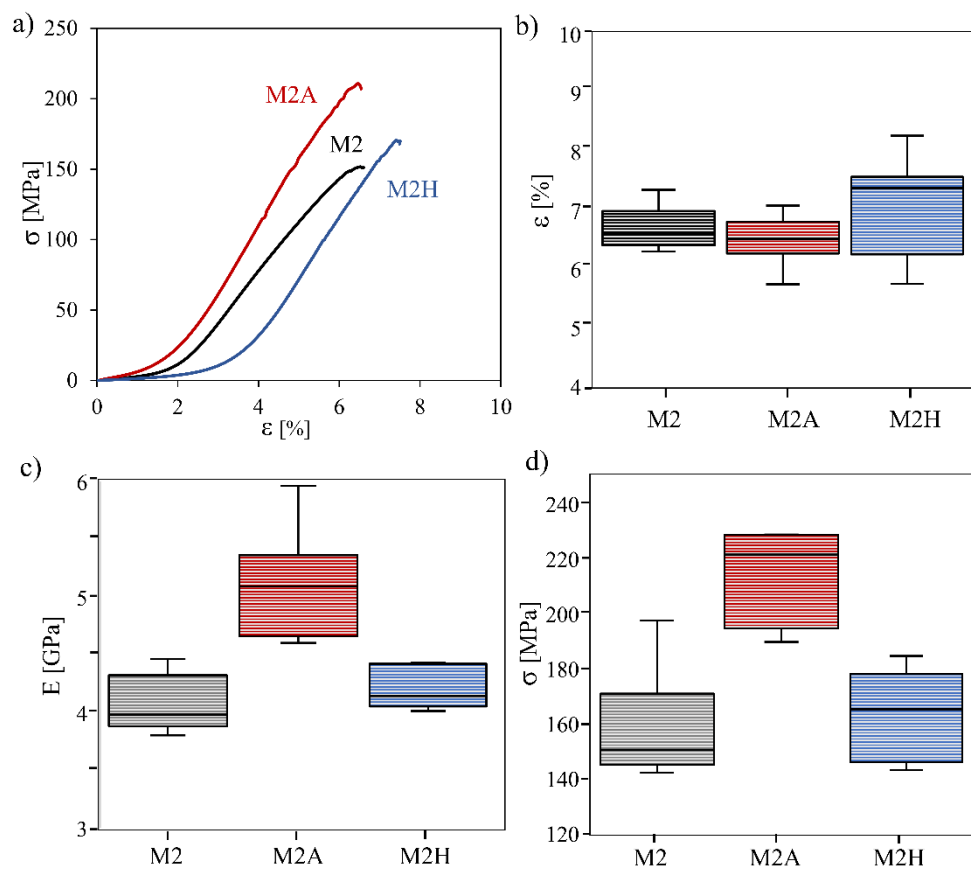
*Efecto de contracción de mallas de fique por aplicación de tratamientos*



La Figura 28 muestra la respuesta a tracción de las mallas dobles sin tratamiento, alcalinizadas y hornificadas. En esta figura se observa un comportamiento similar a las mallas M1 con la aplicación de los tratamientos. Las mallas alcalinizadas presentaron una mejor respuesta a tracción, con un aumento de 44% en la resistencia máxima y 37% en la rigidez respecto a M2. Con la hornificación se logró una mejora del 10% y 16% en la resistencia máxima y rigidez a tracción en comparación a M2. Este mejor comportamiento de las mallas alcalinizadas (M1A y M2A) es debido a los efectos discutidos en el análisis de los resultados de las técnicas de SEM y FTIR. En el cual, se muestra que al tratar químicamente las fibras con hidróxido de sodio se remueve ciertas cantidades de lignina y hemicelulosa dejando más expuestas y unidas las cadenas de celulosa, teniendo como consecuencia el aumento de la resistencia de la fibra.

**Figura 28**

*Efecto de los tratamientos sobre la respuesta a tracción de mallas de fique dobles*



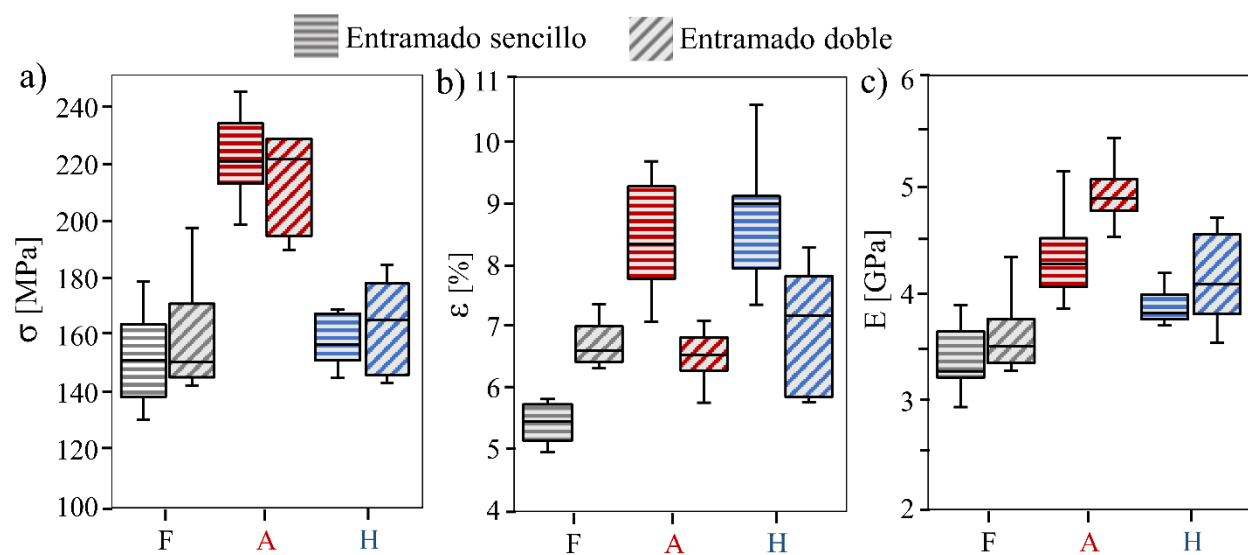
*Nota.* a) Curvas promedio esfuerzo – deformación unitaria, diagramas de caja de datos de b) deformación unitaria máxima, c) módulo de elasticidad y d) esfuerzo máximo de mallas M2, M2A y M2H.

La comparación de cada tipo de malla según el entramado se presenta la Figura 29. En esta se observa que utilizar un entramado doble en las mallas no genera un efecto notable sobre la resistencia máxima a tracción de las mallas como se discutió anteriormente (Fig.29a). Sin embargo, al aplicar los tratamientos de alcalinización y hornificación en las mallas si se presenta

un efecto positivo al utilizar un entramado doble. En la Figura 29b se observa que al comparar las mallas sencillas y dobles tanto alcalinizadas como hornificadas, la configuración de tejido con entramado doble ayudó a disminuir el efecto de deformación que generan los tratamientos por la contracción de las fibras, obteniendo que las mallas M2A y M2H tuvieron una deformación unitaria que fue 26% y 16% menor que M1A y M1H respectivamente. Así mismo, en la Figura 29c se observa que los tratamientos aumentan la rigidez de las mallas, sin embargo, el hecho de utilizar un entramado doble permite un incremento de esta propiedad en mayor medida. Por lo cual, las mallas dobles M2A y M2H presentaron un módulo de elasticidad 14% y 7% mayor respecto a las mallas sencillas M1A y M1H.

**Figura 29**

*Efecto del entramado y los tratamientos aplicados sobre los parámetros mecánicos a tracción de las mallas de fique*



*Nota.* Diagramas de caja de datos promedio de a) esfuerzo máximo, b) deformación unitaria máxima y c) módulo de elasticidad de mallas de fique con entramado sencillo y doble sin tratamiento (F), alcalinizadas (A) y hornificadas (H).

En resumen, la Tabla 9 muestra el efecto de cada tratamiento sobre las propiedades a tracción de las mallas sencillas y dobles, siendo notable que una de las propiedades más afectadas con los tratamientos es la deformación unitaria. Sin embargo, el uso de mallas con configuración de entramado doble ayuda a reducir esta deformación. Adicionalmente, la resistencia y rigidez a la tracción mejoran con el uso de ambos tratamientos, siendo la alcalinización el tratamiento que tiene efectos más significativos sobre la superficie y respuesta mecánica a la tracción de las mallas de fique. Esto se comprueba mediante un análisis de varianza (ANOVA) de las resistencias a tracción de las mallas M2 y M2A para un nivel de confianza del 95%, en el que se obtuvo un valor-P de 1.64E-06 (mucho menor que  $\alpha = 0.05$ ), indicando que el tratamiento le confiere una resistencia estadísticamente significativa a la malla de fique M2.

**Tabla 9**

*Efecto de los tratamientos sobre el comportamiento a tracción de mallas de fique*

Malla	$\sigma_{\max}$ promedio		$\epsilon$ promedio		$E$ promedio	
	[MPa]	Diferencia [%]	[%]	Diferencia [%]	[GPa]	Diferencia [%]
M1	152.47	-	5.43	-	3.38	-
M1A	225.31	+ 48 %	8.38	+ 54 %	4.33	+ 28 %
M1H	158.09	+ 4 %	8.75	+ 61 %	3.86	+ 14 %
M2	156.29	-	6.70	-	3.58	-
M2A	225.68	+ 44 %	6.66	- 0.6 %	4.92	+ 37 %

---

M2H	171.26	+ 10 %	7.32	+ 9 %	4.14	+ 16 %
-----	--------	--------	------	-------	------	--------

---

Con el fin de comparar el refuerzo externo del concreto con mallas de fique y con una malla comercial utilizada como refuerzo de estructuras de concreto, se caracterizó mecánicamente a tracción una malla de fibra de carbono (MC) para analizar posteriormente su efecto sobre las propiedades a compresión de los cilindros de concreto reforzados. Los resultados de las propiedades de tracción se muestran en la Tabla 10, en la cual, se observa las propiedades de alto módulo y resistencia que caracteriza este tipo de mallas sintéticas. Comparando estos resultados contra los de la malla M2A, que fue la malla con mejor respuesta a tracción entre las mallas de fique ensayadas, la malla MC presenta una resistencia máxima 1.72 veces mayor y un módulo de elasticidad nueve veces mayor que las mallas M2A. Así mismo, la malla MC obtuvo una deformación unitaria máxima cinco veces menor que las mallas de fique. Estas diferencias en las propiedades a tracción se deben a que la malla de carbono es un material de alto desempeño mecánico fabricado con fines de refuerzo estructural. Adicionalmente, son mallas unidireccionales con el 99% de las fibras dispuestas sobre la dirección de la carga, que les permite tener una resistencia a la tracción superior a las mallas de fique bidireccionales utilizadas en esta investigación. No obstante, a pesar de que la malla MC dobla la resistencia a la tracción de la malla M2A, desde un punto de vista económico la primera cuesta hasta 26 veces más que una malla de fique. Por ejemplo, una malla de fibra de carbono de dimensiones 1 x 0.5 m tiene un costo aproximado de \$108.000 pesos colombianos (COP), mientras que la misma cantidad de malla de fique cuesta aproximadamente \$3.950 COP. Por lo cual, en términos de costo/beneficio, la

resistencia a la tracción que presentan las mallas de fique las convierte en una opción favorable como material de refuerzo.

**Tabla 10**

*Propiedades a tracción de malla de fibra de carbono*

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ [%]	E [GPa]
MC-1	391.02	1.12	46.92
MC-2	403.59	1.29	42.76
MC-3	398.75	1.16	45.04
Promedio aritmético	397.79	1.19	44.91
SD	5.17	0.07	1.70
CV [%]	0.01	0.06	0.04

### 4.3 Caracterización Mecánica a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo

El análisis de la respuesta mecánica a compresión de los cilindros de concreto con y sin refuerzo externo se presenta en tres partes. En la primera se analizan las deformaciones unitarias axiales y transversales de los cilindros que resultaron de los ensayos hasta aproximadamente el 40% del esfuerzo máximo calculado con los ensayos preliminares de cada probeta, y que fueron medidas con el compresómetro-expansómetro. Los ensayos se ejecutaron hasta ese porcentaje de esfuerzo máximo debido a que en las recomendaciones del equipo se sugiere no llegar hasta el esfuerzo máximo, para evitar que la falla abrupta del cilindro dañe los anillos y diales del

compresómetro. Además, dicho esfuerzo es menor al esfuerzo límite elástico de concretos convencionales (45% a 50% del esfuerzo máximo), por lo tanto, los resultados permiten caracterizar la respuesta de las probetas en el rango elástico. En la segunda parte se analiza la respuesta a compresión de las probetas con y sin refuerzo ensayadas sin compresómetro hasta el esfuerzo máximo. Y en la última, se analiza el modo de falla de cada una de las probetas.

#### ***4.3.1 Ensayos a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo hasta el 40 % del Esfuerzo Máximo***

La Tabla 11 muestra los resultados promedio de deformación unitaria axial ( $\varepsilon_v$ ) y transversal ( $\varepsilon_h$ ) máxima registrada durante los ensayos, coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y módulo de elasticidad (E) de los cilindros de concreto con (cc) y sin refuerzo (co) externo de mallas de fique ensayados hasta el 40% de esfuerzo. El coeficiente de Poisson fue obtenido de la pendiente de la curva de deformaciones unitarias  $\varepsilon_h$  vs.  $\varepsilon_v$  como las mostradas en el Apéndice Q, cuyo resultado indica la relación entre la deformación transversal respecto a la deformación axial. Por ejemplo, el coeficiente de Poisson promedio para el cilindro de concreto sin refuerzo (PC) fue igual a 0.164. Este valor indica que la probeta PC se deformó aproximadamente un 16% transversalmente con respecto a lo que se deformó axialmente. Por lo tanto, entre menor es el coeficiente  $\nu$ , mayor es el efecto de confinamiento dado por el tejido, el cual restringe la expansión lateral de los cilindros de concreto y disminuye la deformación transversal ( $\varepsilon_h$ ). No obstante, cabe resaltar que los valores de 0.030 – 0.066 del coeficiente de Poisson obtenido de las probetas reforzadas con las mallas tratadas están alejados del rango típico para concretos convencionales sin refuerzo (0.1 a 0.2). Lo cual, a pesar de que indique que para bajos niveles de carga las mallas muestran un grado de

refuerzo importante, no necesariamente refleja la respuesta de deformación a través de toda la probeta. Esto se debe a que, por ejemplo, las deformaciones transversales calculadas con los datos del compresómetro se miden en un único eje, sobre el cual por medio de dos tornillos en contacto con la superficie del cilindro se ajustaba el anillo central donde se encontraba el dial que registraba los datos de desplazamiento transversal. Por lo tanto, puede que las deformaciones en otros ejes de la probeta sean diferentes. A pesar de esto, los valores de  $\nu$  obtenidos dan una idea general del grado de confinamiento de cada uno de los refuerzos utilizados.

**Tabla 11**

*Resultados promedio de ensayos a compresión de cilindros de concreto ensayados hasta el 40% del esfuerzo máximo*

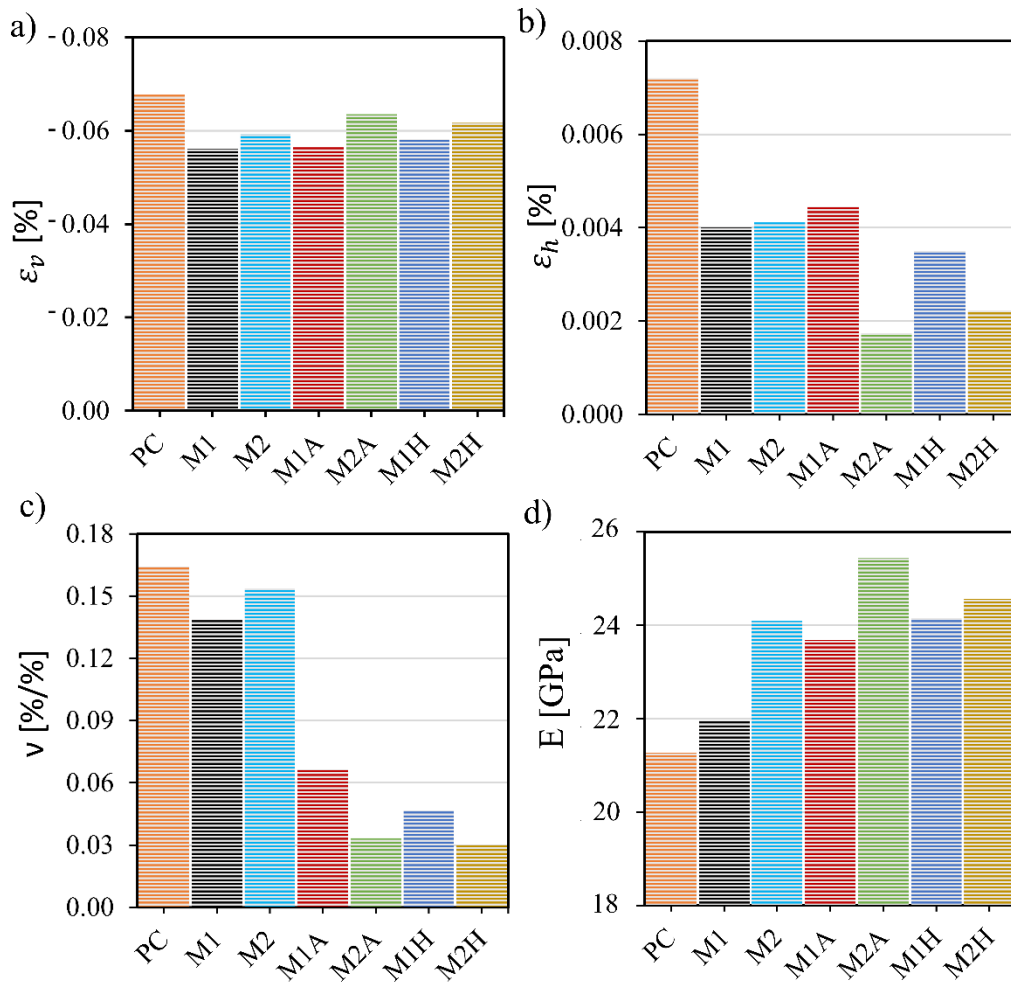
Probeta	$\varepsilon_v$ [%]	$\frac{\varepsilon_{v\ cc}}{\varepsilon_{v\ co}}$	$\varepsilon_h$ [%]	$\frac{\varepsilon_{h\ cc}}{\varepsilon_{h\ co}}$	$\nu$	E [GPa]	Diferencia $\pm E$ [%]
PC	-0.068	-	0.007	-	0.164	21.27	-
C-M1	-0.056	0.82	0.004	0.57	0.139	21.96	+ 3 %
C-M2	-0.059	0.87	0.004	0.57	0.154	24.10	+ 13 %
C-M1A	-0.056	0.82	0.004	0.57	0.066	23.69	+ 11 %
C-M2A	-0.064	0.94	0.002	0.29	0.033	25.25	+ 20 %
C-M1H	-0.058	0.85	0.003	0.43	0.047	24.15	+ 13 %
C-M2H	-0.062	0.91	0.002	0.29	0.030	24.57	+ 16 %

*Nota.* Los datos individuales de cada probeta se encuentran en el Apéndice R. La diferencia  $\pm E$  [%] fue calculada respecto a la probeta sin refuerzo PC.

La Figura 30 resume de manera gráfica los resultados de la Tabla 11 mostrando el efecto del refuerzo con mallas de fique sobre las deformaciones unitarias (axial y transversal), coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad de los cilindros reforzados. En esta se observa que en general las probetas reforzadas con todos los tipos de malla presentaron una menor deformación unitaria axial ( $\varepsilon_v$ ) y transversal ( $\varepsilon_h$ ) máxima con respecto a la probeta sin refuerzo (PC), entre las cuales se muestra una diferencia más pronunciada en los resultados de las deformaciones transversales de la Figura 30b. En esta figura se observa que las mallas de entramado doble y con tratamientos (M2A y M2H) controlan en mayor medida la expansión lateral del cilindro puesto que presentaron menores deformaciones unitarias transversales ( $\varepsilon_h$ ). Este resultado se evidencia también en los datos del coeficiente  $\nu$  calculados para cada probeta (Fig. 30c), en los cuales las mallas tratadas dobles y sencillas presentan una disminución considerable de este coeficiente en los cilindros reforzados, destacándose de igual forma las mallas con entramado doble. Dado que, mientras las probetas PC se deformaron aproximadamente 16% transversalmente con respecto a la longitud axial, las probetas reforzadas con mallas dobles y tratadas se deformaron apenas un 3%, siendo una deformación aproximadamente cinco veces menor que la del cilindro sin refuerzo. Un efecto similar se muestra en el módulo de elasticidad obtenido de la pendiente de la curva esfuerzo – deformación unitaria axial de los cilindros de concreto con y sin refuerzo mostrado en la Figura 30d. En esta figura, se observa que las mallas que presentaron mayor rigidez en el análisis de tracción son las que a su vez confieren mayor rigidez al concreto.

**Figura 30**

*Parámetros de respuesta a compresión hasta el 40% del esfuerzo de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas de fique*



*Nota.* Deformación unitaria última a) axial y b) transversal, c) coeficiente de Poisson y d) módulo de elasticidad a compresión.

#### ***4.3.2 Ensayos a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo hasta el Esfuerzo Máximo***

La Tabla 12 resume la respuesta a compresión de los cilindros de concreto con (*cc*) y sin refuerzo (*co*) obtenida de los ensayados hasta el esfuerzo máximo (los datos individuales se encuentran en el Apéndice S). La efectividad del refuerzo se refleja en la tabla mediante la relación entre el esfuerzo máximo de la probeta con refuerzo (*f<sub>cc</sub>*) y sin refuerzo (*f<sub>co</sub>*), en la cual se observa que el uso de todos los tipos de refuerzos aumentó la resistencia a la compresión respecto al concreto sin refuerzo, obteniendo valores de *f<sub>cc</sub>/f<sub>co</sub>* entre 1.05 y 1.19. Estos resultados son semejantes a los reportados en otros trabajos con cilindros de concreto reforzados externamente con otras mallas de fibras vegetales como el sisal [*f<sub>cc</sub>/f<sub>co</sub>* entre 1.31 - 1.86 (Padanattil et al., 2019)], cáñamo [*f<sub>cc</sub>/f<sub>co</sub>* entre 1.09 - 1.22 (Ghalieh et al., 2017)] y lino [*f<sub>cc</sub>/f<sub>co</sub>* entre 1.30 - 2.34 (Yan, 2016)]. Los autores de estos trabajos muestran un aumento gradual en la efectividad del refuerzo al utilizar mayor número de capas del tejido. En este trabajo, a pesar de que no se varió el número de capas, se usaron otras variables como el tipo de entramado y el tratamiento aplicado, que de igual forma mostraron tener un efecto positivo sobre la efectividad del refuerzo como elemento de confinamiento externo. En complemento a la Tabla 12, la Figura 31 permite visualizar de mejor manera el efecto de estas variables sobre las propiedades a compresión de los elementos reforzados. En esa figura se observa que, cuando se utilizó una configuración de tejido con entramado doble mejoró en mayor medida la efectividad del refuerzo respecto a los cilindros reforzados con tejidos sencillos (Fig. 31a). Adicionalmente, el uso del tratamiento alcalino promovió un mayor aumento en la resistencia a la compresión de los cilindros reforzados con estas mallas, respecto a los reforzados con mallas hornificadas y sin tratamiento. Por lo cual, la probeta

C-M2A al ser la que presenta la sinergia de ambas variables (malla con entramado doble y alcalinizada) fue la que logró mayor efectividad de reforzamiento.

**Tabla 12**

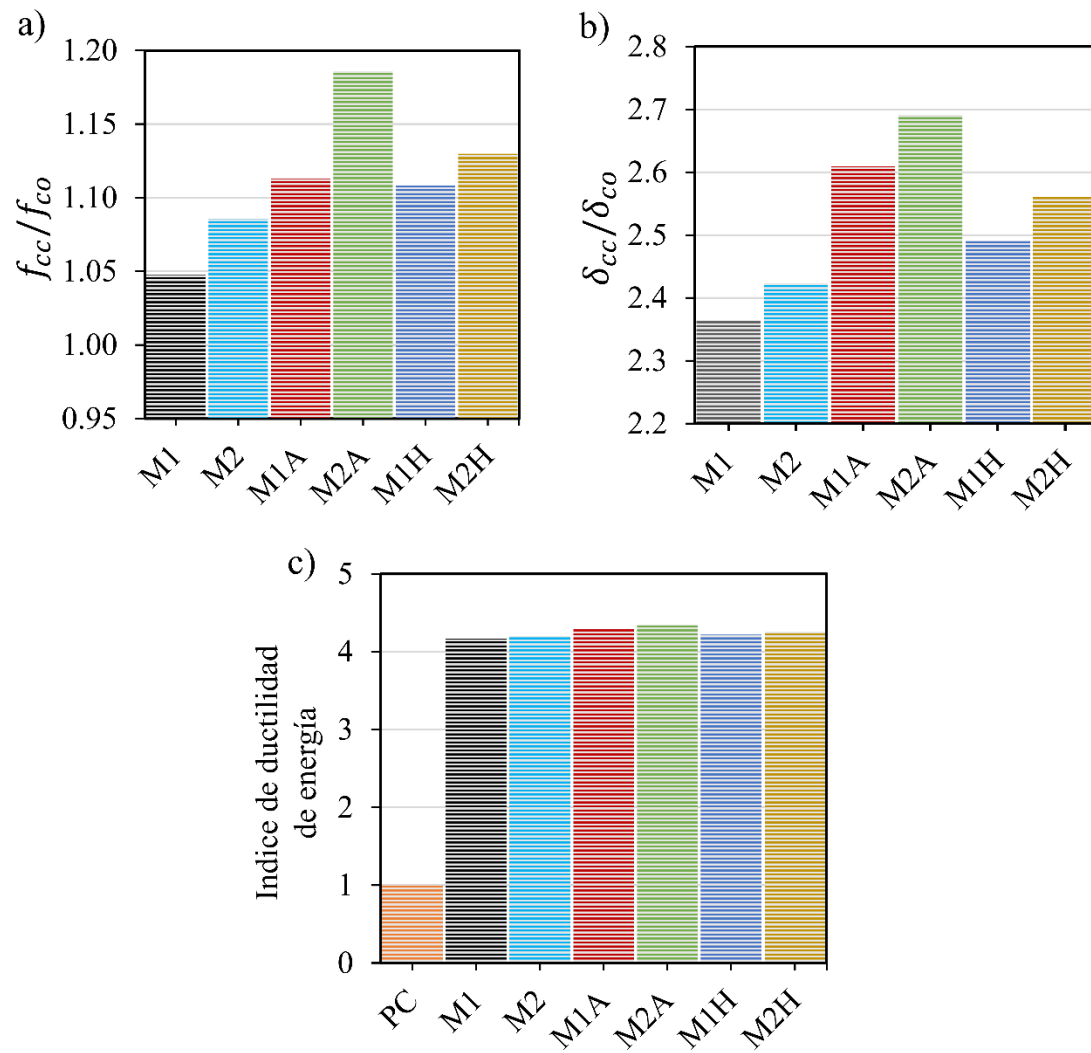
*Respuesta promedio a la compresión axial de cilindros de concreto con y sin refuerzo externo de mallas de fique*

Probeta	$f_{cc}$ o $f_{co}$ [MPa]	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\delta_{cc}$ o $\delta_{co}$ [mm]	$\frac{\delta_{cc}}{\delta_{co}}$	$ff$ [MPa]	Energía absorbida [N-m]	Índice de ductilidad de energía
PC	28.85	-	6.01	-	-	550.66	-
C-M1	30.23	1.05	14.20	2.36	1.99	2295.69	4.17
C-M2	31.33	1.09	14.55	2.42	2.15	2315.41	4.20
C-M1A	32.12	1.11	15.68	2.61	2.28	2365.53	4.30
C-M2A	34.21	1.19	16.17	2.69	2.44	2395.92	4.35
C-M1H	31.98	1.11	14.97	2.49	2.24	2322.98	4.22
C-M2H	32.60	1.13	15.39	2.56	2.32	2344.73	4.26

*Nota.*  $f_{cc}$  o  $f_{co}$  = resistencia máxima a la compresión,  $f_{cc}/f_{co}$  = efectividad del refuerzo,  $\delta_{cc}$  o  $\delta_{co}$  = desplazamiento axial obtenido de la MTS,  $\delta_{cc}/\delta_{co}$  = relación de desplazamiento y  $ff$  = presión lateral de confinamiento de la malla.

**Figura 31**

*Efecto del uso de mallas de fique sobre la respuesta máxima a la compresión axial de cilindros de concreto reforzados externamente*



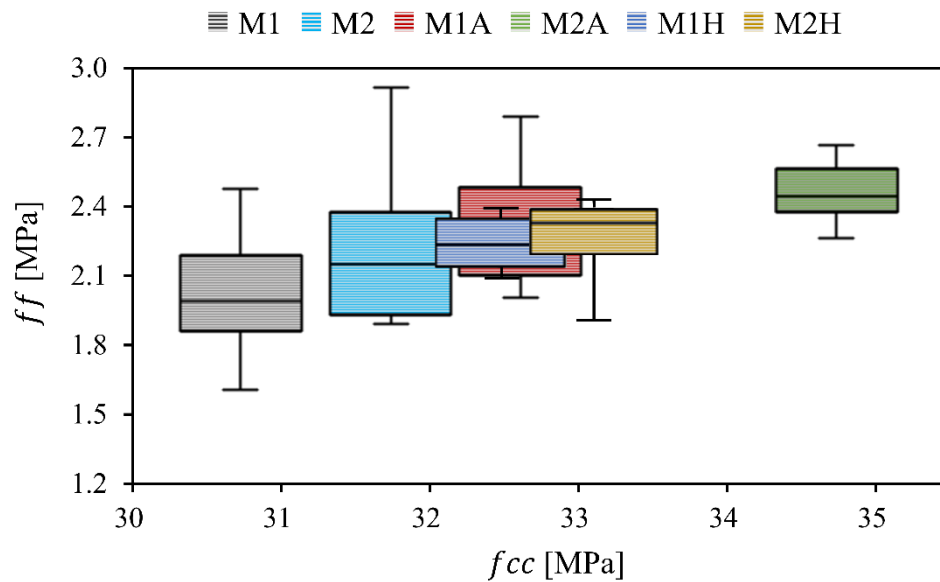
*Nota.* a) Efectividad del refuerzo, b) relación del cambio de desplazamiento último y c) índice de ductilidad de energía.

En la Figura 31 b y c se muestra la relación del desplazamiento axial en el punto último ( $\delta_{cc}/\delta_{co}$ ) obtenido de la MTS y el índice de ductilidad de energía del concreto reforzado respectivamente. La ductilidad de energía fue calculada como el área bajo la curva carga – desplazamiento, estimando así la energía absorbida por el cilindro durante el ensayo, la cual se relaciona con la capacidad de la probeta de deformarse antes de fallar. En general los cilindros reforzados tuvieron un índice de ductilidad semejante con un aumento considerable en la capacidad de absorción de energía respecto a la probeta PC, obteniendo un índice de ductilidad hasta tres veces mayor que el del concreto sin refuerzo (PC). Adicionalmente, en las Figuras 31 b y c se observa que los cilindros reforzados con mallas alcalinizadas presentaron mayores desplazamientos últimos e índice de ductilidad respecto a la probeta PC. Esta respuesta a compresión está relacionada directamente con las propiedades del refuerzo, puesto que la presión de confinamiento ( $f_f = 2n t_f E_f \epsilon_f / D$ ) que ejerce la malla sobre el área lateral externa del cilindro depende del espesor ( $t_f$ ), módulo de elasticidad ( $E_f$ ) y deformación unitaria máxima ( $\epsilon_f$ ) de las mallas. Por lo tanto, entre mejor sean las propiedades a tracción de la malla utilizada como refuerzo, mejor será el efecto de confinamiento. Debido a que, cuando el cilindro de concreto alcanza altos niveles de carga de compresión este comienza a expandirse lateralmente activando la presión de confinamiento al tensionar la malla. Y dependiendo de la resistencia a la tracción con la cual cuente la malla se ejercerá cierto grado confinamiento sobre el concreto, hasta el punto en el cual la malla llega a su esfuerzo máximo de tracción generando la falla del cilindro. Teniendo esto en cuenta, se estimó la presión de confinamiento ( $f_f$ ) con los datos de  $E_f$  y  $\epsilon_f$  en el rango lineal elástico de la curva esfuerzo – deformación unitaria a tracción de las mallas, omitiendo la deformación que mostraron las mallas en la zona no lineal, causada por el estiramiento inicial que

se generaba por el efecto de contracción de los tratamientos y el ordenamiento gradual de las fibras en la dirección de la carga. En la Figura 32 se presenta la relación entre la  $ff$  estimada de las mallas de fique y el  $f_{cc}$  del concreto reforzado. En esta se observa una relación directa entre el aumento de la resistencia a la compresión del concreto reforzado y la presión de confinamiento de cada malla, mostrando que las mallas que presentaron mejores propiedades a tracción como lo fueron las mallas con entramado doble, son las que alcanzan una mejor presión de confinamiento. Adicionalmente, para una columna de concreto convencional que esté sometida a demandas típicas de fuerza axial (por ejemplo, la fuerza axial es menor a  $0.1 * f_{cc} * A_g$ , donde  $A_g$  es el área bruta de la columna), en la práctica la presión de confinamiento mínima debido al acero de refuerzo lateral o a un refuerzo externo con mallas inorgánicas debería estar cercana a 2 MPa. Por lo tanto, las  $ff$  calculadas de las mallas de fique al estar en el rango de 1.99 – 2.44 proveen una presión de confinamiento aceptable para este tipo de elementos. Es probable que el uso de más capas de malla mejore la presión de confinamiento obtenida en este trabajo, lo cual la apartaría del valor mínimo esperado en la práctica. Ahora bien, entre las mallas estudiadas se destacan las mallas dobles alcalinizadas (M2A), las cuales presentaron los valores más altos de rigidez ( $E_f$ ), resultando en una presión de confinamiento de 2.44 MPa que provee una mayor resistencia a la compresión en los cilindros reforzados con respecto a las demás mallas de fique.

**Figura 32**

*Relación entre la presión de confinamiento ( $ff$ ) y resistencia a la compresión ( $f_{cc}$ ) en cilindros de concreto reforzados con mallas de fique*



Por lo anterior, se constata que el refuerzo externo de cilindros de concreto con mallas de fique tratadas y de entramado doble mejora las propiedades a compresión del concreto. Se destaca el uso del tratamiento alcalino, dado que permite obtener mallas con mejor resistencia a la tracción, lo cual, a su vez induce una mayor presión de confinamiento que mejora la resistencia a la compresión del cilindro y restringe su deformación lateral. El uso de este refuerzo (M2A) resultó en un aumento del 19% en el esfuerzo máximo a compresión ( $f_{cc}$ ) con una relación de deformación de 2.69 de la probeta C-M2A con respecto al concreto sin refuerzo, siendo resultados similares a lo obtenido en otros trabajos. Por ejemplo, Wahab et al. (2019) evaluaron el refuerzo externo de cilindros de concreto con diferentes capas de mallas de yute, indicando un aumento del 23% en el esfuerzo máximo a compresión y una relación de deformación de 2.2 al utilizar dos

capas del refuerzo, con respecto a la probeta de control. De igual forma, Jirawattanasomkul et al. (2020) utilizó mallas de yute para reforzar cilindros de concreto sometidos a compresión, obteniendo una mejora del 21% en el esfuerzo máximo frente a la probeta sin refuerzo.

Con el fin de contrastar la respuesta a compresión del cilindro reforzado con mallas de fique y la malla de carbono (MC), en las Tablas 13 y 14 se compara las propiedades a compresión del cilindro sin refuerzo (PC), el cilindro C-M2A (que fue el que presentó mejores propiedades entre los distintos refuerzos de fique) y el cilindro reforzado con la malla MC. En general, en ambas tablas se observa una mejor respuesta a compresión en los cilindros reforzados con MC respecto al refuerzo con la malla M2A. Teniendo en cuenta la influencia de la presión de confinamiento ( $f_f$ ) de las mallas discutida previamente, las mallas MC al tener propiedades a tracción superiores que las de las mallas de fique, la respuesta a compresión de los cilindros reforzados con MC es mejor que la de C-M2A. El refuerzo con estas mallas sintéticas confirió al cilindro de concreto un esfuerzo máximo a compresión que es 45% mayor que el refuerzo con las mallas M2A, absorbiendo más energía hasta la fractura y por ende soportando mayores deformaciones axiales y transversales. No obstante, a pesar de que el cilindro reforzado con las mallas M2A no alcanzó esfuerzos tan altos como las probetas C-MC, para esfuerzos menores a 34 MPa donde C-M2A falla, las probetas reforzadas con la malla M2A presentaron un comportamiento comparable al refuerzo con MC. Como se muestra en la Tabla 13, para un esfuerzo igual a 34 MPa, la probeta C-M2A muestra valores de desplazamiento semejantes a C-MC, más un ligero incremento de 316 N-m de absorción de energía respecto a C-MC. De igual forma, los resultados del módulo de elasticidad (E) de la Tabla 14 muestran una mayor rigidez de

C-M2A respecto a C-MC, debido a que la probeta C-MC tuvo mayores deformaciones axiales resultando en un menor valor de la pendiente de la curva esfuerzo – deformación unitaria axial. Lo anterior, sugiere que a pesar de que C-M2A no alcanza los altos valores de deformación y esfuerzo a compresión de la probeta C-MC, en el rango previo al fallo de C-M2A el cilindro muestra un comportamiento más rígido que C-MC. Un resultado similar es mostrado en el trabajo de Ghorbel et al. (2021), en el cual comparan al respuesta de cilindros de concreto reforzados con mallas de fibra de lino y malla sintética fibras de carbono. En los resultados observaron que, con respecto a la probeta reforzada con la malla de lino, la probeta con refuerzo de malla de carbono obtuvo deformaciones axiales 1.3 mayores y el doble de resistencia a la compresión. Sin embargo, la probeta reforzada con la malla de lino mostró un comportamiento más rígido que la probeta reforzada con la malla de carbono en el rango de deformación previo a su falla.

**Tabla 13**

*Respuesta promedio a compresión hasta el esfuerzo máximo de cilindros de concreto sin refuerzo y con refuerzo de mallas M2A y MC*

Probeta	$f_{cc}$ o $f_{co}$ [MPa]	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\delta_{cc}$ o $\delta_{co}$ [mm]	$\frac{\delta_{cc}}{\delta_{co}}$	$f_f$ [MPa]	Energía absorbida [N-m]	Índice de ductilidad de energía
PC	28.85	-	6.01	-	-	550.66	-
C-M2A	34.21	1.19	16.17	2.69	2.44	2395.92	4.35
C-MC	49.77	1.72	20.79	3.46	2.47	4599.11	8.35
C-MC*	34.07	-	17.18	-	-	2079.96	-

*Nota.* C-MC\* muestra los resultados promedio de la probeta C-MC para un esfuerzo cercano a 34

MPa

**Tabla 14**

*Respuesta promedio a compresión hasta el 40% del esfuerzo máximo de cilindros de concreto sin refuerzo y con refuerzo de mallas M2A y MC*

Probeta	$\varepsilon_v$ [%]	$\frac{\varepsilon_v cc}{\varepsilon_v co}$	$\varepsilon_h$ [%]	$\frac{\varepsilon_h cc}{\varepsilon_h co}$	$\nu$	$\nu$ [%]	E [GPa]	Diferencia $\pm E$ [%]
PC	-0.068	-	0.007	-	0.164	16 %	21.27	-
C-M2A	-0.064	0.94	0.002	0.29	0.033	3 %	25.25	19 %
C-MC	-0.117	1.72	0.004	0.57	0.037	4 %	20.74	-3 %

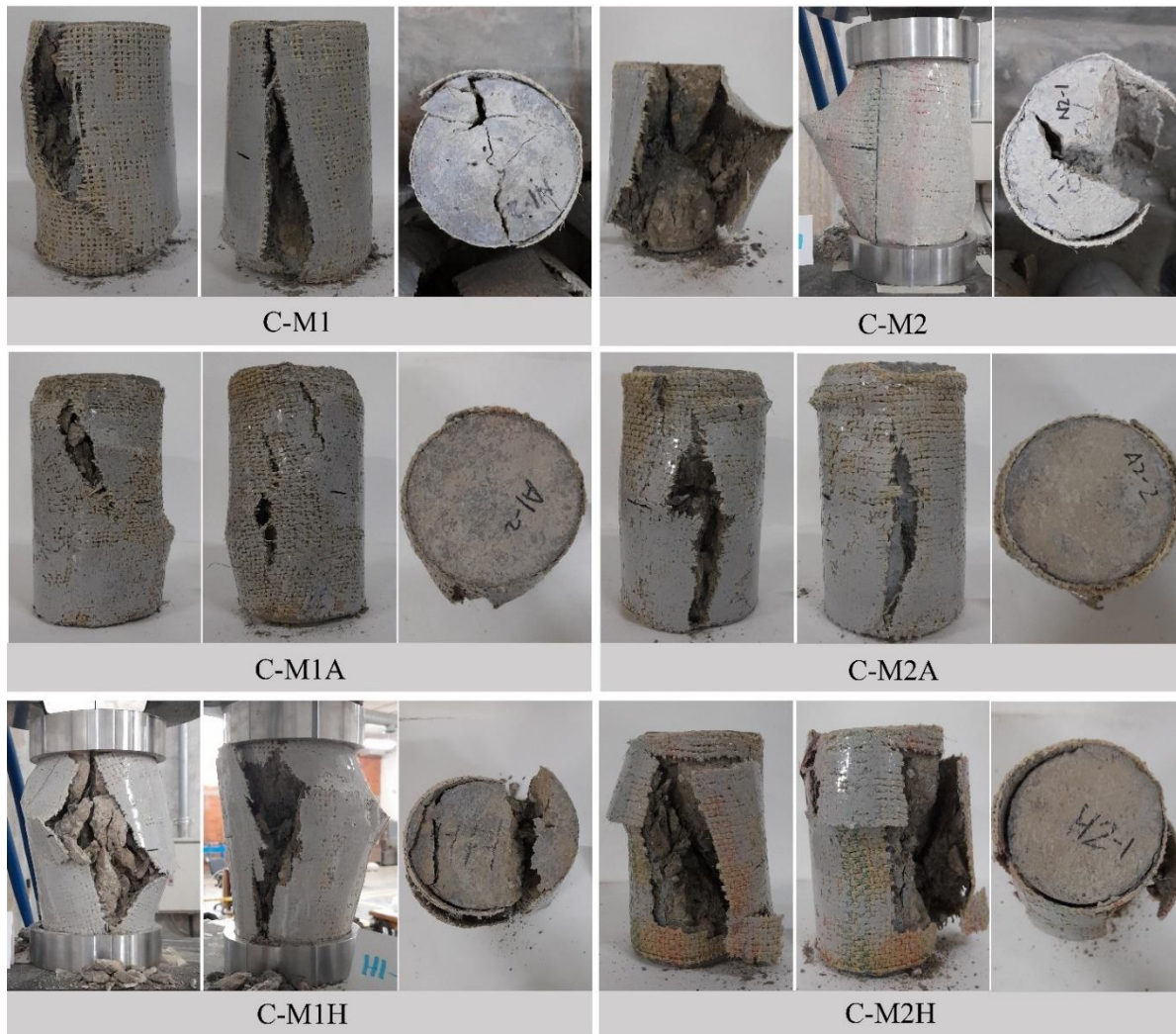
*Nota.* La diferencia  $\pm E$  [%] fue calculada respecto a la probeta sin refuerzo PC

#### ***4.3.3 Modo de Falla a Compresión de Cilindros de Concreto con y sin Refuerzo Externo***

La Figura 33 muestra el modo de falla a compresión de las probetas de concreto reforzadas con cada uno de los tipos de las mallas de fique. En general, los cilindros reforzados fallaron de manera súbita con la ruptura de las mallas generando un fuerte ruido, acompañado de la disminución instantánea de la resistencia a la compresión de las probetas. La mayoría de los refuerzos presentaron una tendencia a fallar en la zona donde no se encontraba el traslape de la malla, con una ruptura longitudinal que se extendía paralela a la dirección de la carga axial de compresión desde el extremo superior al inferior de la probeta. Este tipo de falla es característico en los cilindros de concreto reforzados externamente con mallas bidireccionales de fibras vegetales como lo reportan otros autores (Bai et al., 2021; Jirawattanasomkul et al., 2021; Wahab et al., 2019) en los cuales, la ruptura de la malla es causada por la deformación lateral del cilindro de concreto generada durante la compresión, que produce un efecto de estiramiento en las mallas llevándolas hasta su máxima resistencia a la tensión donde fallan.

**Figura 33**

*Modos de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas de fique*



A pesar de la tendencia general que se presentó en el tipo de falla de las probetas, la Figura 33 muestra unas ligeras diferencias del modo de falla entre los distintos refuerzos utilizados. En las probetas sin tratamiento C-M1 y C-M2 se puede observar la ruptura longitudinal de la malla mencionada previamente, denotando en la imagen de la parte superior de la probeta que, pese a la

ruptura del refuerzo la malla no se desprendió totalmente del concreto ni hubo un deslizamiento de la malla como se ha presentado en otros trabajos. Por ejemplo, Jirawattanasomkul et al. (2019) reforzaron externamente cilindros de concreto con mallas de yute, indicando que se generó un deslizamiento de la malla debido a que la longitud de traslape de 150 mm era inadecuada para ese tipo de fibras. Sin embargo, en este estudio la resina y longitud de traslape de 160 mm permitió obtener una adherencia interfacial efectiva que evitó el deslizamiento del refuerzo. Por otra parte, en los cilindros con el refuerzo de mallas alcalinizadas C-M1A y C-M2A se presentó un mejor modo de falla respecto a las probetas sin tratamiento. En estos, la grieta de la malla no se propagó por toda la longitud axial de la probeta y mantuvo unida la estructura interna del concreto. Esta respuesta puede ser un resultado del mejor comportamiento a tracción obtenido con el tratamiento de alcalinización, el cual les confiere a las mallas mayor resistencia y rigidez axial. Adicionalmente, en la vista superior de los cilindros de las probetas C-M1A y C-M2A se muestra una mejor adherencia interfacial, dado que, la malla permaneció adherida a la superficie del concreto aún después de ocasionarse la falla de la probeta. En cambio, los cilindros reforzados con las mallas hornificadas no mostraron un nivel de adherencia comparable al de las mallas alcalinizadas, presentando mayor desprendimiento de la malla. Además, en el caso de la probeta C-M2H, la ruptura del refuerzo fue longitudinal y transversal, demostrando un comportamiento más frágil que las otras mallas

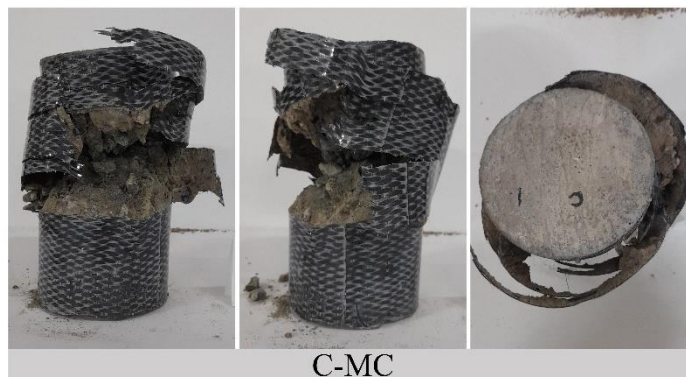
Así mismo, en la Figura 33 se observa que los cilindros reforzados con mallas de entramado doble exhibieron una ruptura más explosiva en comparación con los cilindros reforzados con mallas sencillas. No obstante, el concreto se encontraba fracturado dentro de las probetas con todos los tipos de refuerzos, principalmente con un tipo de falla cónico con grietas grandes y verticales.

Esto indica que en todos los casos el refuerzo permitió obtener una falla más progresiva y con mayor ductilidad en el cilindro reforzado, a pesar del agrietamiento interno que tuvo el concreto por el esfuerzo de compresión.

Al comparar estos resultados con las probetas reforzadas con la malla MC, pese a que en los análisis previos se obtuvo una respuesta superior a compresión en comparación con el refuerzo de mallas de fique, estas probetas también presentaron una falla súbita y explosiva por la ruptura del refuerzo. Sin embargo, como se muestra en la Figura 34, la malla MC se fracturó en forma de anillos perpendiculares a la dirección axial de la carga, debido a la forma unidireccional de la malla que cuando está sometida a una fuerte deformación resulta fallando por los hilos termoplásticos que unen la trama. Adicionalmente, al igual que las probetas reforzadas con las mallas de fique, las probetas C-MC presentan una falla progresiva a pesar de que el concreto se fracturó dentro de la probeta.

### Figura 34

*Modo de falla a compresión de cilindros de concreto reforzados externamente con mallas MC*



## 5. Conclusiones

A partir de los análisis realizados a los resultados experimentales obtenidos durante la investigación, se presentan las siguientes conclusiones:

En general, la aplicación de tratamientos de alcalinización y hornificación aumentó la resistencia máxima a la tracción, deformación unitaria máxima y módulo de elasticidad de las mallas de fibra de fique. El tratamiento alcalino removió ciertos componentes de lignina y hemicelulosa, dejando más expuestas y unidas las cadenas de celulosa en la fibra. Esto generó un aumento promedio en la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad del 48% y 28%, respectivamente en las mallas de entramado sencillo alcalinizadas (M1A), respecto a las mallas sencillas y sin tratar (M1), aunque la deformación unitaria aumentó en un 54%. Por otra parte, con el tratamiento de hornificación se formaron enlaces fuertes de H que indujeron un mayor empaquetamiento de las cadenas de celulosa de la fibra, permitiendo que la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y deformación unitaria máxima de las mallas sencillas hornificadas (M1H) fuera 4%, 14% y 61% mayor respectivamente, frente a las mallas M1.

El uso de mallas con entramado doble permitió reducir la deformación generada por la aplicación de los tratamientos, obteniendo mallas con mayor rigidez respecto a las mallas sencillas. Por lo cual, las mallas de entramado doble alcalinizadas (M2A), que contaban con la sinergia del efecto del tratamiento alcalino y el entramado doble, lograron las mejores propiedades a tracción entre las mallas de fique estudiadas, con un aumento del 74% en la resistencia máxima y del 46% en la rigidez con respecto a la malla sencilla y sin tratamientos.

Los tratamientos de alcalinización y hornificación utilizados en las mallas de fique aumentaron la resistencia a la compresión, capacidad de deformación e índice de ductilidad de energía de los cilindros de concreto reforzados externamente con estas, respecto a los cilindros reforzados con las mallas sin tratar. Esto obedeció a la mejora en las propiedades a tracción como módulo de elasticidad y deformación unitaria máxima que obtuvieron las mallas tratadas, las cuales influyeron directamente sobre la presión de confinamiento ejercida por estas sobre el cilindro de concreto. Como resultado, las mallas tratadas confirieron mejores niveles de confinamiento, controlando en mayor medida la expansión lateral del cilindro. Entre las mallas con entramado sencillo estudiadas se destacaron las alcalinizadas, debido a que presentaron mayor resistencia a la tracción y resultaron en presiones de confinamiento 15% mayor respecto a la provista por M1.

El uso de mallas con entramado doble y tratadas mejoró en mayor medida la respuesta a compresión de los cilindros reforzados respecto a las demás probetas, dado que las mallas dobles y tratadas fueron las que presentaron mejor respuesta a tracción y por ende una mayor presión de confinamiento. Las probetas de concreto reforzadas con las mallas M2A tuvieron el mejor desempeño a compresión, exhibiendo una relación de desplazamiento axial frente a la probeta sin refuerzo de 2.69 y un índice de ductilidad de energía tres veces mayor frente al concreto sin refuerzo. Adicionalmente, estas probetas presentaron el mejor modo de falla a compresión debido a que no mostraron una ruptura completa de la malla a comparación de los demás refuerzos y tuvieron un modo de falla más progresivo y con mayor ductilidad, a pesar del agrietamiento interno que presentó el concreto por el esfuerzo de compresión.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda en futuros trabajos tener en cuenta las siguientes sugerencias para complementar las investigaciones y avances actuales:

Determinar el efecto en la respuesta a compresión de los cilindros de concreto reforzados, variando el número de capas del refuerzo de mallas de fique. Con esto se buscaría mejorar en mayor medida la resistencia máxima a la compresión, ductilidad y capacidad de deformación lateral del concreto.

Evaluar la variación de los parámetros de los tratamientos utilizados, como el porcentaje p/V de hidróxido de sodio y método de lavado de las mallas en el tratamiento de alcalinización, y el número de ciclos de humectación y secado utilizados en el tratamiento de hornificación sobre las propiedades a tracción de las mallas de fique.

Estudiar la aplicación de otros tratamientos (p. ej. silanización, plasma, agentes de acoplamiento, acetilación) en las mallas de fique y su efecto sobre las propiedades a tracción de las mallas y el desempeño mecánico a compresión de los cilindros de concreto reforzados con estas.

Determinar el efecto que tiene la durabilidad de las fibras a largo plazo, sobre la respuesta a tracción de las mallas tratadas y en las propiedades a compresión de los cilindros reforzados externamente con estas mallas.

### Referencias Bibliográficas

- ACI. (2002). Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo. *American Concrete Institute*, 1–61.
- Agopyan, V., Savastano, H., John, V. M., & Cincotto, M. A. (2005). Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004>
- Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabbar, M., Hussain, T., Militky, J., & Baheti, V. (2018). Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—A review. *Journal of Industrial Textiles*, 47(8), 2153–2183. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>
- Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. D. F. M., De Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (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>
- Alves, R. E. (2011). *Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução*. 115. <https://doi.org/http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-11082011-143629/pt-br.php>
- Ansys. (2023). *Ansys Granta EduPack*. <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>

- ASTM. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. *Annual Book of ASTM Standards, C*, 1–7. <https://doi.org/10.1520/C0039>
- Azevedo, V. Q. (2015). Caracterização e rendimento de hidrólise e fermentação de biomassa de arundo , palha e casca de arroz. *Universidade Federal De Pelotas Centro De Engenharias Curso De Engenharia Ambiental E Sanitária*, 49. <https://wp.ufpel.edu.br/esa/files/2015/12/TCC-Vitória-Azevedo.pdf>
- Bai, Y. lei, Yan, Z. W., Jia, J. F., Ozbakkaloglu, T., & Liu, Y. (2021). Dynamic compressive behavior of concrete confined with unidirectional natural flax FRP based on SHPB tests. *Composite Structures*, 259(September), 113233. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113233>
- Balaguru, P., Giancaspro, J., & Nanni, A. (2009). FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures : a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. *New York by Taylor & Francis*. <https://www.afzir.com/knowledge/wp-content/uploads/2018/08/P.-Balaguru-FRP-Composites-for-Reinforced-and-Prestressed-Concrete-Structures-2009.pdf>
- Benin, S. R., Bright, R., Bright, R., & Moses, A. J. (2020). A review on mechanical characterization of polymer matrix composites & its effects reinforced with various natural fibres. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.259>
- Borsoi, C., Menin, C., Lavoratti, A., & Zattera, A. J. (2019). Grape stalk fibers as reinforcing filler for polymer composites with a polystyrene matrix. *Journal of Applied Polymer Science*,

136(18), 1–10. <https://doi.org/10.1002/app.47427>

Camargo Mendez, M. A., Garcia Alfonso, D. F., Cruz Hernandez, R. A., (2017). *Material compuesto de matriz polimerica reforzado con fibras naturales para la fabricación de tenso-estructuras*. Tesis de Pregrado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander.

[http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa\\_detalle\\_matbib.jsp?parametros=179539%7C%7C1%7C3](http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=179539%7C%7C1%7C3)

Castellanos, L. J., Blanco Tirado, C., Hinestroza, J. P., & Combariza, M. Y. (2012). In situ synthesis of gold nanoparticles using fique natural fibers as template. *Cellulose*, 19(6), 1933–1943. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9763-8>

Castillo González, I. M., Peñaranda Domínguez, A. E., & Diaz Rodríguez, J. G. (2020). Implementación de la Técnica de Correlación de Imágenes Digitales con Software Libre. *Aibi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 8(3), 25–32. <https://doi.org/10.15649/2346030x.875>

Castro, C., Palencia, A., Vargas, G., & Plastics, M. (2007). Determination of optimal alkaline treatment conditions for fique fiber bundles as reinforcement of composites materials. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 1–8. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702007000200004](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000200004)

Cerbu, C., Xu, D., Wang, H., & Roşca, I. C. (2018). The use of Digital Image Correlation in determining the mechanical properties of materials. *IOP Conference Series: Materials*

*Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/399/1/012007>

Claramunt, J., Ardanuy, M., García Hortal, J. A., & Filho, R. D. T. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003>

Claramunt, J., Ardanuy, M., & García, J. A. (2010). Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.057>

de Andrade Silva, F., 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>

Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010>

Diaz Ramirez, G. A., Sanchez, H. G., & Cruz, R. A. (2019). Correlation between cross sectional area and torsion degree of fique yarns by image analysis system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1247(1), 0–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012030>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012a). Biocomposites reinforced with natural

fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.  
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012b). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.  
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Fernandes Diniz, J. M. B., Gil, M. H., & Castro, J. A. A. M. (2004). Hornification - Its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Science and Technology*, 37(6), 489–494.  
<https://doi.org/10.1007/s00226-003-0216-2>

Ferreira, S. R., de Andrade Silva, F., Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2017). Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. *Construction and Building Materials*, 139, 551–561.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>

Ferreira, S. R., de Andrade Silva, F., Roberto, P., Lima, L., Dias, R., & Filho, T. (2015). Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber – matrix bond in cement based systems. *Construction and Building Materials*, 101, 730–740.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120>

Ferreira, S. R., Lima, P. R. L., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2012). Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. *Revista Materia*, 17(2), 1024–1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>

Ferreira, S. R., Lima, P. R. L., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2014). Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites. *Key Engineering Materials*, 600, 421–432. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.421>

Ferreira, S. R., Toledo Filho, R. D., & de Andrade Silva, F. (2016). Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites. *ResearchGate*, August 2016, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25020.49284>

Fonseca, C. S., Silva, M. F., Mendes, R. F., Hein, P. R. G., Zangiaco, A. L., Savastano, H., & Tonoli, G. H. D. (2019). Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 211, 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.236>

Gañán, P., & Mondragon, I. (2003). Thermal and degradation behavior of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 73(3), 783–795. <https://doi.org/10.1023/A:1025830430267>

Gañán, P., & Mondragon, I. (2002). Surface modification of fique fibers. Effects on their physico-mechanical properties. *Polymer Composites*, 23(3), 383–394. <https://doi.org/10.1002/pc.10440>

Gañán, P., & Mondragon, I. (2005). Effect of fiber treatments on mechanical behavior of short fique fiber-reinforced polyacetal composites. *Journal of Composite Materials*, 39(7), 633–

646. <https://doi.org/10.1177/0021998305047268>

Ghalieh, L., Awwad, E., Saad, G., & Mabsout, M. (2017). Concrete columns wrapped with hemp fiber reinforced polymer – An experimental study. *Procedia Engineering*, 200, 440–447. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.062>

Ghorbel, E., Limaiem, M., & Wardeh, G. (2021). Mechanical performance of bio-based FRP-confined recycled aggregate concrete under uniaxial compression. *Materials*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ma14071778>

Godara, S. S., & Mukesh. (2019). Effect of chemical modification of fiber surface on natural fiber composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3428–3434. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.270>

Gómez, C., & Vázquez, A. (2012). Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3120–3130. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.027>

Hacha, R., Green, M. F., & Wight, G. R. (2010). Effect of severe environmental exposures on CFRP wrapped concrete columns. *Journal of Composites for Construction*, 14(1), 83–93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000074)

Herrera, J., Zapata, L. E., Cruz, R. A. (2020). *Desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para el empleo de estructuras en ambiente agresivo*. Tesis Doctoral, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Industrial de

Santander. [https://uids-primo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1gjmsqs/uids\\_bucaramanga189545](https://uids-primo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1gjmsqs/uids_bucaramanga189545)

Hidalgo, M. A., & Correa, J. P. (2018). Mechanical and thermal properties of biocomposites from nonwoven industrial Fique fiber mats with epoxy resin and linear low density polyethylene. *Results in Physics*, 8, 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.025>

ICONTEC. (2020). *e-collection. Normas Tecnicas Colombianas.* <https://ecollection.icontec.org/colecaogrid.aspx>

Isaza Ruiz, M. (2015). Caracterización mecánica y morfológica de fibras de fique con potencial uso acústico. *VII Congreso Internacional de Materiales*, 7.

Jähn, A., Schröder, M. W., Fütting, M., Schenzel, K., & Diepenbrock, W. (2002). Characterization of alkali treated flax fibres by means of FT Raman spectroscopy and environmental scanning electron microscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 58(10), 2271–2279. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(01\)00697-7](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(01)00697-7)

Jirawattanasomkul, T., Likitlersuang, S., Wuttiwannasak, N., Ueda, T., Zhang, D., & Voravutvityaruk, T. (2020). Effects of heat treatment on mechanical properties of jute fiber–reinforced polymer composites for concrete confinement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003456](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003456)

Jirawattanasomkul, T., Minakawa, H., Likitlersuang, S., Ueda, T., Dai, J. G., Wuttiwannasak, N., & Kongwang, N. (2021). Use of water hyacinth waste to produce fibre-reinforced polymer

composites for concrete confinement: Mechanical performance and environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126041. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126041>

Jirawattanasomkul, T., Ueda, T., Likitlersuang, S., Zhang, D., Hanwiboonwat, N., Wuttiwannasak, N., & Horsangchai, K. (2019). Effect of natural fibre reinforced polymers on confined compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.217>

John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>

Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340(July 2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>

Liu, Y., Ma, Y., Yu, J., Zhuang, J., Wu, S., & Tong, J. (2018). Development and characterization of alkali treated abaca fiber reinforced friction composites. *Composite Interfaces*, 26(1), 67–82. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1472456>

López Alba, E., López García, R., Dorado, R., & Díaz, F. A. (2012). Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. *Asociación Española de Ingeniería Mecánica XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 8. <http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/11-09.pdf>

- Madhavi, K., Harshith, V. V., Gangadhar, M., Chethan Kumar, V., & Raghavendra, T. (2020). External strengthening of concrete with natural and synthetic fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2803–2809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.737>
- Mahal, M., Blanksvärd, T., & Täljsten, B. (2013). Examination at a Material and Structural Level of the Fatigue Life of Beams Strengthened with Mineral or Epoxy Bonded FRPs: The State of the Art. *Advances in Structural Engineering*, 16(7), 1311–1327. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.7.1311>
- Minagricultura. (2021). Evaluaciones Agropecuarias. Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. *Agronet Minagricultura y Desarrollo Rural*. <http://www.agronet.gov.co/>
- Monteiro, S. N., de Assis, F. S., Ferreira, C. L., Simonassi, N. T., Weber, R. P., Oliveira, M. S., Colorado, H. A., & Pereira, A. C. (2018). Fique fabric: A promising reinforcement for polymer composites. *Polymers*, 10(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/polym10030246>
- Muñoz, M., Hidalgo, M., & Mina, J. (2014). Fibras de Fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. *Rev. Bio. Agro*, 12(2), 60–70.
- Obi Reddy, K., Uma Maheswari, C., Shukla, M., Song, J. I., & Varada Rajulu, A. (2013). Tensile and structural characterization of alkali treated Borassus fruit fine fibers. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 433–438. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.075>
- ONU. (2018). La Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. In *Revista de Derecho*

*Ambiental* (Issue 10). <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2018.52077>

Padanattil, A., Lakshmanan, M., Jayanarayanan, K., & Mini, K. M. (2019). Strengthening of Plain Concrete Cylinders with Natural FRP Composite Systems. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 43(3), 381–389. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0197-x>

Pereira, P. H., Freitas Rosa, M., Cioffi, M. O., Carvalho B., K. C., Milanese, A. C., Voorwald, H., & Mulinari, D. R. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites: A review. *Polimeros*, 25(1), 9–22. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>

Pimiento, A., & Vega, J. (2004). El cultivo de Fique en el Departamento de Santander. *Banco de La Republica Colombia*, 7. [https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/2004\\_julio.pdf](https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/2004_julio.pdf)

Porras Guarguati, J. D., Ariza Pelaéz, H., & Muñoz Torres, L. M. (2019). Cartilla técnica del cultivo de Fique. *Minagricultura*, 38. [https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Normatividad/2019-06-30\\_Cartilla\\_Técnica\\_del\\_Cultivo\\_del\\_Fique.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Normatividad/2019-06-30_Cartilla_Técnica_del_Cultivo_del_Fique.pdf)

Puentes Rojas, Á. F., Soto Ortégón, J. A., Cruz Hernandez, R. A., Diaz Ramirez, G. A., (2018). *Material compuesto base mortero y malla de fique como refuerzo de vigas de concreto*. Tesis de Pregrado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. [http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa\\_detalle\\_matbib.jsp?parametros=185411%7C%7C1%7C7](http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=185411%7C%7C1%7C7)

- Ramirez, G. A., Sanchez, H. G., & Cruz, R. A. (2019). Correlation between cross sectional area and torsion degree of fique yarns by image analysis system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1247(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012030>
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A., & Brown, R. L. (1928). A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. *Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, IL*, 185, 104. <https://www.ideals.illinois.edu/items/5277>
- Salit, M. S., Jawaid, M., Yusoff, N. Bin, & Hoque, M. E. (2015). Introduction to Manufacturing of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, 1–383. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8>
- Santos, R. D. J., & Lima, P. R. L. (2015). Effect of treatment of sisal fiber on morphology, mechanical properties and fiber-cement bond strength. *Key Engineering Materials*, 634, 410–420. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.410>
- Tan, H., Yan, L., Huang, L., Wang, Y., Li, H., & Chen, J. (2017). Behavior of sisal fiber concrete cylinders externally wrapped with jute FRP. *Polymer Composites*, 38(9), 1910–1917. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.23761>
- Tekieli, M., De Santis, S., De Felipe, G., Kwiecien, A., & Roscini, F. (2017). Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing. *Composite Structures*, 160, 670–688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.096>
- Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Savastano, H., Delvasto, S., Mejía De Gutiérrez, R., & Lopez De

- Murphy, M. D. M. (2011). Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013>
- Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., & Laourdekis, T. (2006). Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI Structural Journal*, 103(1), 28–37. <https://doi.org/10.14359/15083>
- UNE-EN ISO. (2013). ISO 13934-1:2013 Textiles - Propiedades de los tejidos frente a la tracción Parte 1: Determinación de la fuerza máxima y del alargamiento a la fuerza máxima por el método de la tira. *AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación*, 6, 18.
- Van de Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., & Verpoest, I. (2003). Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1241–1246. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00093-9)
- Villaverde, R. S. de. (2021). *La fibra de carbono: Más allá del refuerzo estructural*. *Plan 2014*, 60. <http://hdl.handle.net/2117/343558>
- Wahab, N., Srinophakun, P., Hussain, Q., & Chaimahawan, P. (2019). Performance of concrete confined with a jute-polyester hybrid fiber reinforced polymer composite: A novel strengthening technique. *Fibers*, 7(8). <https://doi.org/10.3390/fib7080072>
- Wang, J., Zhou, H., Liu, Z., Peng, X., & Zhou, H. (2022). Statistical modelling of tensile properties

- of natural fiber yarns considering probability distributions of fiber crimping and effective yarn elastic modulus. *Composites Science and Technology*, 218(July 2021), 109142. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109142>
- Xue, L., & Tabil, L. G. (2007). *Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites : A review*. 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- Yan, L. (2016). Plain concrete cylinders and beams externally strengthened with natural flax fabric reinforced epoxy composites. *Materials and Structures*, 49(6), 2083–2095. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0635-1>
- Yan, L., Chouw, N., & Yuan, X. (2012). *Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment*. <https://doi.org/10.1177/0731684412439494>
- Yang, L., Wang, H., & Gao, S. (2022). Study on Axial Compression Behavior of Concrete Short Columns Confined by Flax/Glass Fiber Hybrid-Reinforced Epoxy Resin Composites. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030517>
- Yasmina, E.-D., Lamdour, N., Cherradi, T., Rotaru, A., Barbuta, M., & Mihai, P. (2020). Effect of alkali treatment of Jute fibers on the compressive strength of normal-strength concrete members strengthened with JFRP composites. *Journal of Applied Science and Engineering*, 23(4), 677–685. [https://doi.org/10.6180/jase.202012\\_23\(4\).0012](https://doi.org/10.6180/jase.202012_23(4).0012)
- Zheng, Y., Sun, Y., Li, J., Limin, L., Chen, L., Liu, J., & Tian, S. (2017). Tensile response of

carbon-aramid hybrid 3D braided composites. *Materials and Design*, 116, 246–252.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.082>

Zugenmaier, P. (2010). Crystalline Cellulose and Derivatives. *Springer*, 1, 285.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-73934-0>

## Apéndices

### Apéndice A. Código de Matlab utilizado para calcular mediante micrografías el área transversal

de fibras de fique

```
clear
clc

I=imread('nombre de la micrografía.tif');
imshow(I)
[~,threshold] = edge(I,'sobel');
fudgeFactor = 0.5;
BWs = edge(I,'sobel',threshold * fudgeFactor);
imshow(BWs)
title('Binary Gradient Mask')
se90 = strel('line',3,90);
se0 = strel('line',3,0);
BWsdil = imdilate(BWs,[se90 se0]);
imshow(BWsdil)
title('Dilated Gradient Mask');
BWdfill = imfill(BWsdil,'holes');
imshow(BWdfill)
title('Binary Image with Filled Holes')
BWnobord = imclearborder(BWdfill,4);
imshow(BWnobord)
title('Cleared Border Image');

%%Imagen refinada y binarizada BWfinal
seD = strel('diamond',1);
BWfinal = imerode(BWnobord,seD);
BWfinal = imerode(BWfinal,seD);
imshow(BWfinal)
title('Segmented Image')

%%Etiqueta de elementos conectados
[L Ne]=bwlabel(BWfinal)

%%Calculo de propiedades de los objetos conectados
propied=regionprops(L);
hold on

%% Graficar las 'cajas' de frontera de los objetos conectados
```

```

for n=1:size(propied,1)
    rectangle('Position',propied(n).BoundingBox,'EdgeColor','g','LineWidth',2)
end
pause (3)

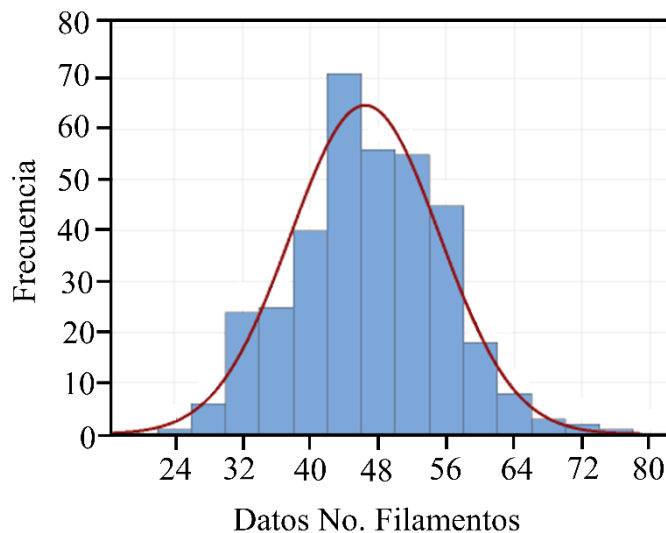
%% Buscar áreas menores a 2000
s=find([propied.Area]>2000);

%% Marcar áreas menores a 2000
for n=1:size(s,2)
    rectangle('Position',propied(s(n)).BoundingBox,'EdgeColor','r','LineWidth',2)
end
pause (2)

%% Valor del área
x=s(1);
propied(x,1)

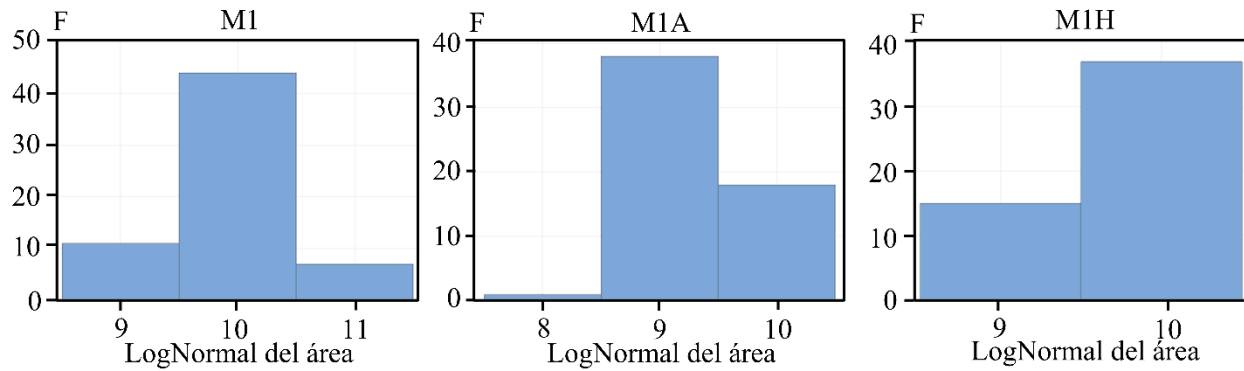
```

### Apéndice B. Distribución de datos del número de fibras en un hilo de fique



Dato	Valor
Tamaño de la muestra	355
Valor mínimo	25
Valor máximo	75
Moda	45
Media aritmética	46.44
Mediana	46
SD	8.73

*Nota.* El cálculo de los datos de media, mediana y desviación estándar obtenidos del conteo de los 355 hilos se realizó teniendo en cuenta que los datos presentaron un comportamiento tipo distribución normal.

**Apéndice C.** Distribución de datos del área de fibras M1, M1A y M1H

Hilo	Tamaño muestra	Valor mínimo [ $\mu\text{m}^2$ ]	Valor máximo [ $\mu\text{m}^2$ ]	Moda [ $\mu\text{m}^2$ ]	Media aritmética [ $\mu\text{m}^2$ ]	Mediana [ $\mu\text{m}^2$ ]	SD [ $\mu\text{m}^2$ ]
M1	60	8971.43	43343.66	20315.29	22418.39	22546.76	10854.08
M1A	60	4458.67	21181.46	10553.73	11470.24	11499.49	4976.21
M1H	60	7267.78	29256.99	16265.74	17286.10	17353.94	6456.45

*Nota.* F: Frecuencia. El análisis de los datos de área obtenidos mediante Matlab se realizó teniendo en cuenta que los datos mostraron una distribución logarítmica normal.

**Apéndice D.** Información de probetas de malla de fique sometidas a tracción

Malla	No. Hilos en la trama	Área transversal [mm <sup>2</sup> ]	Longitud libre [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	d4 [mm]	d5 [mm]
M1-1	8	8.29	210	17.32	20.24	19.71	19.6	18.18
M1-2	8	8.29	210	19.38	17.33	20.27	20.01	20.19
M1-3	8	8.29	210	21.73	19.09	19.81	19.39	19.29
M1-4	8	8.29	210	18.1	19.7	20.6	19.78	18.06
M1-5	8	8.29	210	19.8	20.23	18.22	19.8	19.33
M1-6	8	8.29	210	19.82	18.97	20.04	19.17	19.7
M1-7	8	8.29	214	19.59	17.77	20.28	20.25	21.29
M1-8	8	8.29	214	13.73	18.82	20.8	19.53	18.89
M1-9	8	8.29	214	17.74	21.74	17.78	19.78	19.67
M1-10	8	8.29	214	19.23	19.07	20.23	19.48	18.34
M2-1	14	14.52	216	17.09	16.57	16.98	16.4	16.9
M2-2	12	12.44	216	16.5	16.75	16.82	17.32	17.01
M2-3	14	14.52	216	16.23	17.74	17.15	16.53	17.13
M2-4	14	14.52	216	17.31	17.63	18.72	15.84	17.51
M2-5	14	14.52	216	16.21	17.09	16.74	17.68	15.98
M2-6	12	12.44	216	15.31	17.31	17.09	16.47	16.79
M2-7	14	14.52	216	16.49	16.18	17.03	17.24	16.17
M2-8	12	12.44	219	16.32	16.28	17.27	16.49	16.31
M2-9	12	12.44	218	17.31	16.48	16.28	17.01	16.76
M2-10	14	14.52	218	15.67	17.24	15.7	17.02	16.58
M1A-1	8	4.23	212	16.24	14.65	18.73	15.81	17.3
M1A-2	8	4.23	214	17.19	16.41	16.82	19.19	14.49
M1A-3	8	4.23	215	18.72	16.26	17.09	17.78	15.43
M1A-4	8	4.23	210	16.67	18.07	15.67	16.93	18.07
M1A-5	8	4.23	216	15.5	19.6	14.84	16.91	16.93
M1A-6	8	4.23	216	16.79	17.83	16.26	16.99	16.57
M1A-7	8	4.23	218	17.8	17.69	19.29	18.78	14.63

M1A-8	8	4.23	216	16.91	14.93	17.68	17.9	15.31
M1A-9	8	4.23	213	17.48	15.97	17.43	16.53	16.06
M1A-10	8	4.23	213	17.81	17.03	17.54	17.09	16.29
M2A-1	14	7.41	211	16.4	14.81	16.91	17.93	15.17
M2A-2	14	7.41	210	17.84	15.18	16.05	15.39	17.7
M2A-3	14	7.41	209	15.19	16.89	16.39	17.6	16.61
M2A-4	14	7.41	212	17.18	14.28	19.51	16.28	17
M2A-5	14	7.41	213	17.66	17.27	13.33	19.27	16.66
M2A-6	14	7.41	210	16.59	17.02	15.39	17.31	16.696
M2A-7	14	7.41	213	14.5	18.59	17.03	15.87	18.8
M2A-8	14	7.41	212	18.07	17.31	17.18	16.36	16.44
M2A-9	14	7.41	211	16.75	17.44	16.99	18.38	15.63
M2A-10	14	7.41	208	14.84	16.28	17.25	15.97	16.13
M1H-1	8	6.38	220	17.18	17.06	15.6	16.5	16.88
M1H-2	8	6.38	221	14.83	16.19	16.95	18.17	17.72
M1H-3	8	6.38	223	16.2	15.02	18.48	16.75	18.12
M1H-4	8	6.38	221	17.43	15.49	15.95	18.76	16.51
M1H-5	8	6.38	221	18.11	15.74	16.26	18.79	17.06
M1H-6	8	6.38	228	15.36	17.01	15.59	18.06	16.97
M1H-7	8	6.38	230	16.05	17.37	15.28	18.69	16.55
M1H-8	8	6.38	225	16.89	17.56	16.48	17.47	16.43
M1H-9	8	6.38	225	16.91	17.48	16.62	16.89	18.49
M1H-10	8	6.38	223	17.69	17.24	15.94	15.84	18.24
M2H-1	14	11.17	219	15.2	16.64	18.48	13.69	19.18
M2H-2	14	11.17	219	16.29	17.11	14.83	16.17	17.23
M2H-3	14	11.17	221	16.58	17.48	16.55	17.67	16.88
M2H-4	14	11.17	219	16.39	17.53	15.89	16.42	15.08
M2H-5	14	11.17	217	15.58	17.18	17.57	17.08	14.82
M2H-6	14	11.17	217	16.49	15.31	17.1	16.65	16.58
M2H-7	14	11.17	215	15.9	16.83	15.71	18.11	15.27
M2H-8	14	11.17	215	18.68	17.23	15.89	15.63	16.63

M2H-9	14	11.17	218	17.23	15.3	17.09	15.19	16.76
M2H-10	14	11.17	222	16.99	15.98	16.31	16.68	17.11

**Apéndice E.** Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M1

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformación unitaria [mm/mm * 100 %]							
		$\epsilon$ MTS	$\epsilon$ laser	$\epsilon 1$	$\epsilon 2$	$\epsilon 3$	$\epsilon 4$	$\epsilon 5$	$\epsilon$ DIC
M1-1	176.93	5.79	6.16	5.25	5.39	5.05	5.70	5.26	5.33
M1-2	154.69	5.13	5.40	-	-	-	-	-	-
M1-3	149.97	5.33	4.74	4.87	5.30	5.97	5.72	5.20	5.41
M1-4	149.36	5.40	5.45	5.35	5.54	5.80	5.29	4.70	5.34
M1-5	151.56	5.48	4.81	5.60	4.59	6.64	6.17	4.66	5.53
M1-6	138.69	4.92	5.03	4.77	4.93	5.11	5.68	5.14	5.13
M1-7	130.02	5.45	5.69	6.02	6.11	5.95	5.85	4.42	5.67
M1-8	158.93	5.68	5.50	4.31	7.00	5.99	6.83	6.38	6.10
M1-9	178.51	5.77	6.34	6.43	6.20	6.86	6.14	5.95	6.32
M1-10	136.08	5.07	5.27	4.54	5.53	5.83	4.89	5.53	5.26
M1- Curva	146.98	5.42	5.13	-	-	-	-	-	5.26
promedio									
Promedio aritmético	152.47	5.43	5.44	-	-	-	-	-	5.57
SD	15.99	0.30	0.52	-	-	-	-	-	0.40

*Nota.* Los datos de  $\epsilon 1$ -  $\epsilon 5$  en los cuales no se observa resultado es debido a que no se logró captar correctamente los puntos del patrón de la probeta con el programa GOM Correlate y por ende no se obtuvo resultados de desplazamiento.

**Apéndice F.** Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M2

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformación unitaria [mm/mm * 100 %]							
		$\epsilon$ MTS	$\epsilon$ laser	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon$ DIC
M2-1	147.82	6.82	6.39	-	6.85	5.85	6.91	5.69	5.06
M2-2	141.88	6.29	5.97	-	-	-	-	-	-
M2-3	145.82	6.55	5.76	-	6.02	6.74	6.16	6.37	6.33
M2-4	144.58	6.55	6.02	5.95	5.98	6.07	6.74	5.64	6.07
M2-5	144.96	6.41	6.25	-	6.28	5.41	6.23	6.20	6.03
M2-6	164.87	6.86	6.77	6.85	-	6.80	6.12	5.95	6.43
M2-7	188.13	7.33	6.43	5.57	5.53	6.32	4.02	6.44	5.58
M2-8	157.87	6.35	6.06	6.13	5.95	6.21	4.43	6.66	5.88
M2-9	197.34	6.62	5.81	-	-	-	-	-	-
M2-10	152.72	7.34	5.98	-	-	-	-	-	-
M2- Curva promedio	151.69	6.11	5.99	-	-	-	-	-	5.92
Promedio aritmético	156.29	6.70	6.24	-	-	-	-	-	5.91
SD	19.40	0.38	0.31	-	-	-	-	-	0.47

**Apéndice G.** Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas

M1A

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformación unitaria [mm/mm * 100 %]							
		$\epsilon$ MTS	$\epsilon$ laser	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon$ DIC
M1A-1	238.02	9.67	9.67	6.83	10.91	9.86	9.28	11.25	9.63
M1A-2	232.61	8.41	8.41	8.44	8.59	8.38	7.56	14.80	9.55
M1A-3	223.05	7.05	7.05	6.89	5.25	7.89	6.54	7.17	6.75
M1A-4	214.29	9.25	9.25	8.51	8.61	9.56	10.18	7.69	8.91
M1A-5	221.84	9.06	9.06	11.96	7.74	11.24	8.66	8.97	9.71
M1A-6	219.53	7.99	7.99	7.92	8.27	7.61	7.07	8.00	7.77
M1A-7	245.03	7.42	7.42	7.01	8.82	5.18	6.28	10.08	7.47
M1A-8	208.09	8.22	8.22	8.82	10.42	7.91	7.54	8.24	8.58
M1A-9	198.56	9.28	9.30	11.52	10.00	7.09	7.76	12.82	9.84
M1A-10	219.52	7.86	7.86	7.20	8.88	8.59	7.81	7.50	8.00
M1A-Cruva	199.74	8.49	8.61	-	-	-	-	-	8.89
promedio									
Promedio aritmético	225.31	8.38	8.38	-	-	-	-	-	8.55
SD	13.80	0.87	0.87	-	-	-	-	-	1.08

**Apéndice H.** Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas

M2A

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformación unitaria [mm/mm * 100 %]							
		$\epsilon$ MTS	$\epsilon$ laser	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon$ DIC
M2A-1	222.40	6.88	6.88	7.68	8.37	7.51	7.52	5.60	7.34
M2A-2	220.30	6.44	6.44	5.67	6.77	6.46	6.62	5.54	6.21
M2A-3	228.22	6.74	6.74	-	-	-	-	-	-
M2A-4	193.11	6.77	6.77	5.31	8.68	5.35	5.74	6.21	6.26
M2A-5	195.00	5.76	5.76	7.78	4.45	3.98	6.41	6.41	5.81
M2A-6	228.61	7.07	7.07	6.68	5.99	4.41	6.93	7.08	6.22
M2A-7	228.58	6.42	6.42	4.59	7.08	5.58	5.98	6.29	5.90
M2A-8	228.50	6.45	6.45	4.90	5.93	4.69	7.54	6.50	5.91
M2A-9	209.25	6.56	6.56	2.59	10.97	3.94	6.64	5.20	5.87
M2A-10	189.54	5.73	5.73	5.05	5.74	6.17	6.84	3.19	5.40
M2A-Curva	223.49	6.98	6.96	-	-	-	-	-	6.77
promedio									
Promedio aritmético	225.68	6.66	6.66	-	-	-	-	-	6.32
SD	16.21	0.44	0.44	-	-	-	-	-	0.53

**Apéndice I.** Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M1H

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformación unitaria [mm/mm * 100 %]							
		$\epsilon$ MTS	$\epsilon$ laser	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon$ DIC
M1H-1	168.26	8.56	8.56	10.16	10.28	8.61	10.89	6.99	9.39
M1H-2	157.78	9.06	9.06	8.72	9.81	8.42	11.45	6.38	8.96
M1H-3	168.67	7.33	7.33	5.35	13.81	6.50	8.22	11.05	8.99
M1H-4	154.98	10.59	10.59	-	-	-	-	-	-
M1H-5	166.91	9.10	9.10	9.27	10.62	11.16	8.29	9.68	9.80
M1H-6	146.97	9.04	9.04	10.23	7.48	7.53	12.23	8.34	9.16
M1H-7	155.13	9.10	9.10	11.02	9.63	9.25	10.68	9.58	10.03
M1H-8	152.15	7.94	7.94	6.30	7.00	10.26	8.69	7.05	7.86
M1H-9	144.61	7.85	7.85	6.47	8.44	8.86	7.14	7.41	7.67
M1H-10	165.44	8.92	8.92	8.28	7.88	11.63	9.12	8.81	9.14
M1H-Curva promedio	154.13	8.87	8.82	-	-	-	-	-	8.97
Promedio aritmético	158.09	8.75	8.75	-	-	-	-	-	9.00
SD	8.86	0.90	0.90	-	-	-	-	-	0.79

**Apéndice J.** Datos de esfuerzo y deformación unitaria última de ensayos a tracción de mallas M2H

Malla	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformación unitaria [mm/mm * 100 %]							
		$\epsilon$ MTS	$\epsilon$ laser	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon$ DIC
M2H-1	142.82	5.74	5.74	-	-	-	-	-	-
M2H-2	165.58	6.63	6.63	-	-	-	-	-	-
M2H-3	143.67	5.85	5.85	11.44	0.36	6.33	4.08	6.02	5.64
M2H-4	164.49	5.75	5.75	7.05	5.05	5.32	5.79	8.14	6.27
M2H-5	146.42	6.94	6.94	-	-	-	-	-	-
M2H-6	167.66	7.72	7.72	8.21	8.62	7.02	7.33	6.25	7.49
M2H-7	177.26	7.37	7.37	7.52	5.94	9.78	7.06	6.78	7.41
M2H-8	184.42	7.40	7.40	6.92	7.88	7.58	6.87	8.66	7.58
M2H-9	179.75	8.26	8.26	-62.34	9.88	7.92	8.90	0.00	8.74
M2H-10	160.45	8.04	8.04	8.25	7.68	6.29	9.53	7.12	7.66
M2H-Curva promedio	170.45	7.37	7.45	-	-	-	-	-	7.62
Promedio aritmético	171.26	7.32	7.33	-	-	-	-	-	7.26
SD	15.04	0.95	0.95	-	-	-	-	-	1.01

**Apéndice K.** Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M1

Malla	E [GPa]							
	E MTS	E laser	E1	E2	E3	E4	E5	E DIC
M1-1	3.88	3.89	4.46	4.14	4.20	3.69	4.25	4.13
M1-2	3.63	3.60	-	-	-	-	-	-
M1-3	3.23	3.53	3.56	3.29	3.39	3.09	3.55	3.37
M1-4	3.65	2.94	3.94	3.66	3.51	3.42	3.82	3.66
M1-5	3.27	3.56	3.27	4.05	2.85	2.93	3.91	3.33
M1-6	3.26	3.42	3.43	3.43	3.44	3.15	3.05	3.29
M1-7	3.21	3.09	2.97	3.19	3.07	3.07	4.02	3.22
M1-8	3.19	3.44	4.39	2.48	3.30	2.66	3.15	3.09
M1-9	3.53	3.47	3.11	3.51	3.23	3.47	3.63	3.38
M1-10	2.93	3.00	3.30	2.84	2.69	3.33	2.83	2.98
M1-Curva	3.52	3.55	-	-	-	-	-	3.55
promedio								
Promedio aritmético	3.38	3.40	-	-	-	-	-	3.05
SD	0.28	0.30	-	-	-	-	-	0.34

**Apéndice L.** Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M2

Malla	E [GPa]							
	E MTS	E laser	E1	E2	E3	E4	E5	E DIC
M2-1	3.36	3.68	4.32	3.64	3.97	3.23	4.03	3.80
M2-2	3.66	4.26	-	-	-	-	-	-
M2-3	3.38	4.20	4.33	4.32	3.65	4.02	3.73	3.99
M2-4	3.28	3.64	4.11	4.07	3.74	3.56	4.00	3.88
M2-5	3.38	3.38	3.82	3.69	4.48	3.67	3.86	3.89
M2-6	3.62	3.62	3.83	4.30	3.74	4.01	4.07	3.98
M2-7	3.74	4.57	3.95	4.78	3.60	5.24	4.43	4.32
M2-8	3.79	4.30	4.34	4.15	4.26	5.39	4.37	4.46
M2-9	4.33	5.25	-	-	-	-	-	-
M2-10	3.27	4.46	-	-	-	-	-	-
M2- Curva promedio	3.60	4.23	-	-	-	-	-	4.13
Promedio aritmético	3.58	4.14	-	-	-	-	-	4.13
SD	0.32	0.57	-	-	-	-	-	0.33

**Apéndice M.** Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M1A

Malla	E [GPa]							
	E MTS	E laser	E1	E2	E3	E4	E5	E DIC
M1A-1	4.18	4.61	4.76	3.97	3.82	4.46	4.48	4.27
M1A-2	4.43	4.31	4.36	4.23	4.47	4.91	2.72	3.97
M1A-3	4.73	5.71	4.56	6.51	4.23	4.40	5.21	4.87
M1A-4	3.85	3.88	4.19	4.51	3.73	3.32	5.03	4.07
M1A-5	4.11	4.01	3.82	4.33	3.68	4.10	4.22	4.02
M1A-6	4.29	4.24	4.41	4.23	4.26	4.65	4.79	4.46
M1A-7	5.13	5.00	5.38	4.74	7.04	5.83	3.41	4.98
M1A-8	4.24	4.21	3.98	3.31	4.87	4.26	3.78	3.97
M1A-9	3.87	3.88	3.20	3.80	4.71	4.28	2.88	3.66
M1A-10	4.43	4.71	4.55	4.73	4.28	4.65	4.46	4.53
M1A-Curva	4.11	4.23	-	-	-	-	-	4.04
promedio								
Promedio aritmético	4.33	4.46	-	-	-	-	-	4.28
SD	0.39	0.57	-	-	-	-	-	0.43

**Apéndice N.** Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M2A

Malla	E [GPa]							
	E MTS	E laser	E1	E2	E3	E4	E5	E DIC
M2A-1	4.90	5.17	5.13	3.76	4.82	4.74	5.54	4.72
M2A-2	5.01	5.12	5.49	4.99	4.68	4.99	6.30	5.23
M2A-3	5.44	5.38	-	-	-	-	-	-
M2A-4	4.52	4.67	5.68	3.40	4.80	7.17	5.20	4.95
M2A-5	4.81	4.85	3.76	5.37	6.07	4.18	4.29	4.60
M2A-6	4.68	4.79	4.82	5.78	5.82	4.90	4.94	5.22
M2A-7	4.97	5.30	6.36	4.57	5.39	6.23	5.24	5.49
M2A-8	5.19	5.45	6.58	5.96	13.03	3.32	7.05	5.96
M2A-9	4.79	4.76	0.10	0.05	0.86	0.59	0.91	0.98
M2A-10	4.85	4.69	5.02	4.42	5.26	3.62	10.80	5.09
M2A- Curva	4.77	4.76	-	-	-	-	-	5.12
promedio								
Promedio aritmético	4.92	5.02	-	-	-	-	-	5.16
SD	0.26	0.30	-	-	-	-	-	0.43

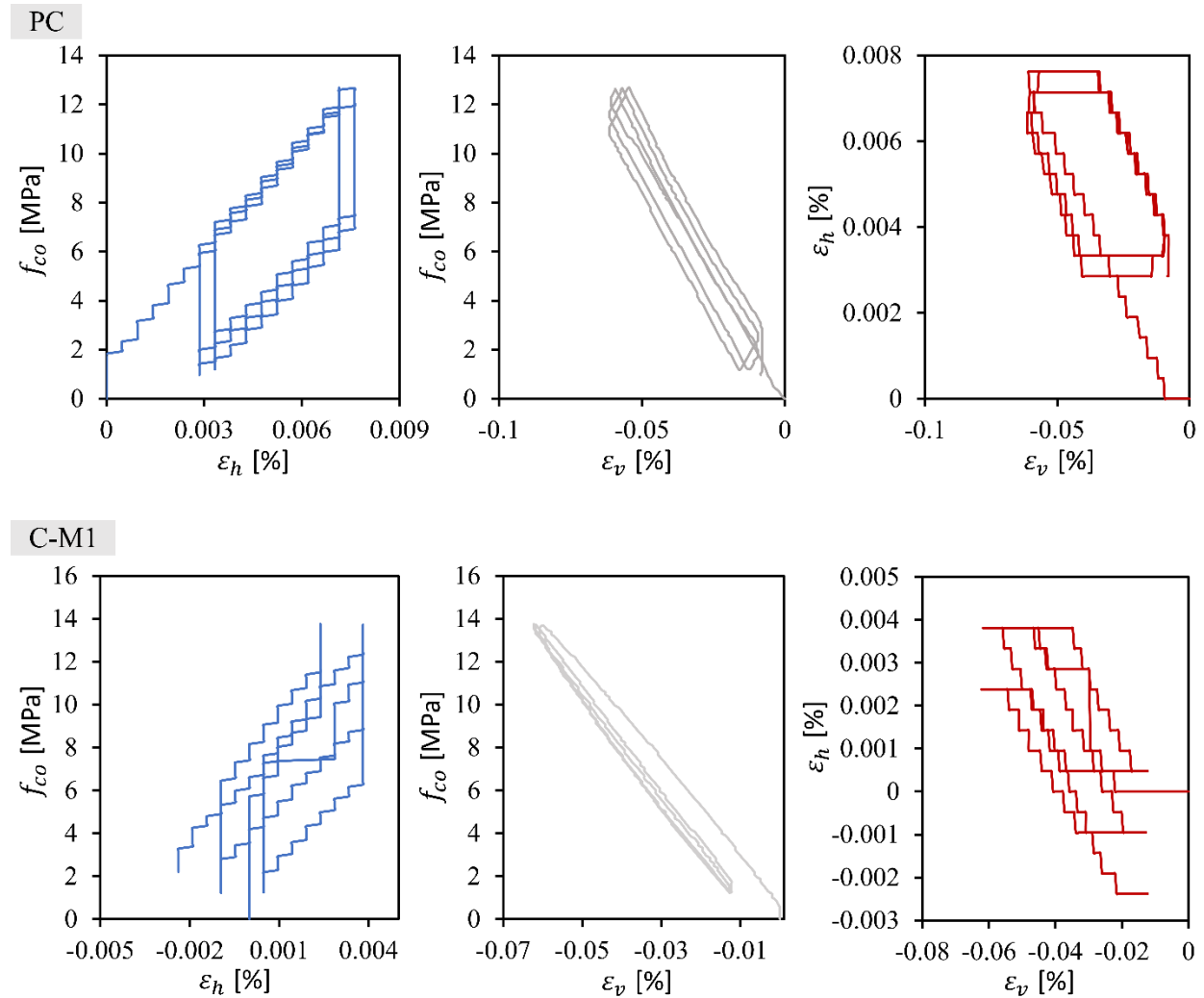
**Apéndice O.** Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M1H

Malla	E [GPa]							
	E MTS	E laser	E1	E2	E3	E4	E5	E DIC
M1H-1	3.90	4.01	3.58	3.31	4.45	2.94	4.18	3.61
M1H-2	3.83	4.05	3.58	3.71	3.93	2.95	3.94	3.58
M1H-3	4.33	4.58	5.36	2.42	5.12	3.84	3.39	3.70
M1H-4	3.39	3.49	-	-	-	-	-	-
M1H-5	3.69	3.76	3.81	2.85	3.09	3.51	3.28	3.28
M1H-6	3.77	4.09	3.22	4.72	4.20	3.01	3.34	3.59
M1H-7	3.77	3.66	3.72	3.76	3.37	3.12	3.83	3.54
M1H-8	3.91	4.05	4.22	3.86	3.15	3.07	4.90	3.72
M1H-9	3.79	4.18	3.95	3.86	3.32	3.65	4.39	3.81
M1H-10	4.18	4.49	4.66	4.45	3.77	4.65	4.24	4.33
M1H-Curva	3.81	4.03	-	-	-	-	-	3.73
promedio								
Promedio aritmético	3.86	4.04	-	-	-	-	-	3.68
SD	0.26	0.34	-	-	-	-	-	0.28

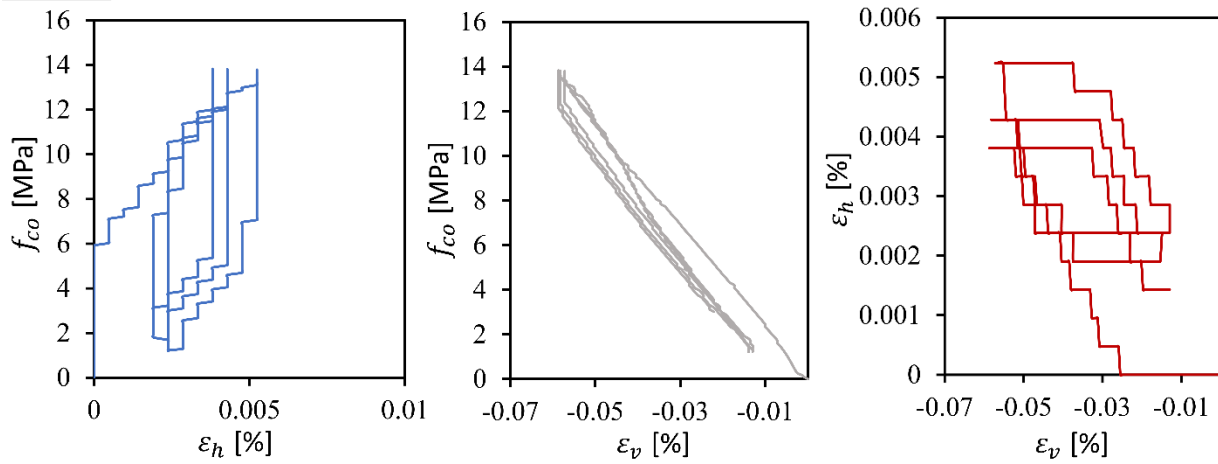
**Apéndice P.** Módulo de elasticidad de ensayos a tracción de mallas M2H

Malla	E [GPa]							
	E MTS	E laser	E1	E2	E3	E4	E5	E DIC
M2H-1	3.82	3.87	-	-	-	-	-	-
M2H-2	4.70	4.87	-	-	-	-	-	-
M2H-3	3.74	4.09	2.89	5.65	4.08	4.24	4.09	4.01
M2H-4	4.54	4.82	3.58	4.90	5.13	4.56	3.24	4.15
M2H-5	3.53	4.32	-	-	-	-	-	-
M2H-6	3.91	4.18	3.95	3.35	4.52	4.26	4.40	4.05
M2H-7	4.47	4.69	3.89	5.61	3.68	4.61	4.89	4.43
M2H-8	4.54	4.65	4.84	3.62	4.50	4.87	4.09	4.42
M2H-9	4.25	4.32	0.56	3.86	5.50	3.42	4.28	4.14
M2H-10	3.86	4.00	4.10	4.05	4.43	3.55	4.32	4.06
M2H-Curva	4.35	4.43	-	-	-	-	-	4.19
promedio								
Promedio aritmético	4.14	4.38	-	-	-	-	-	4.18
SD	0.41	0.35	-	-	-	-	-	0.18

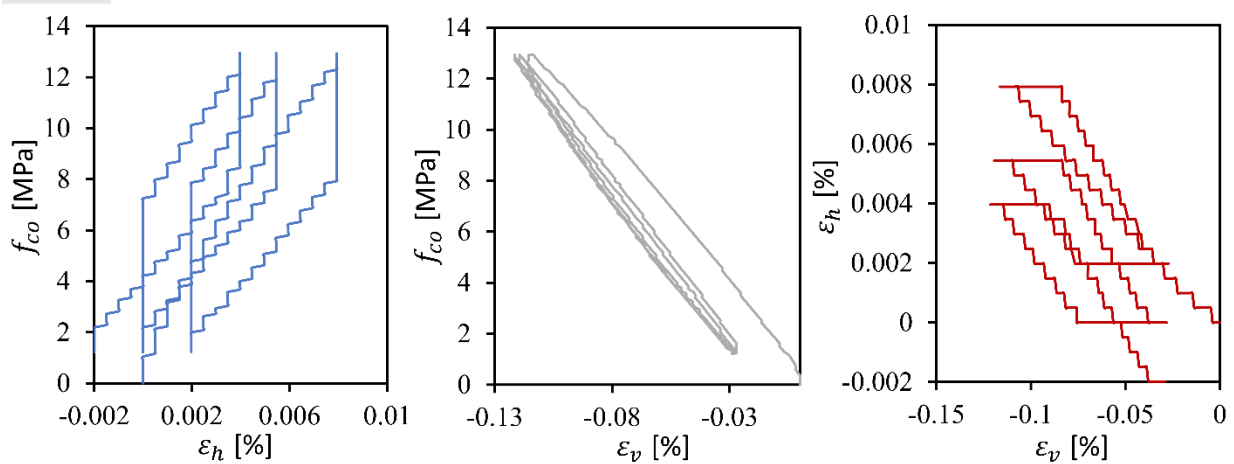
**Apéndice Q.** Curvas de esfuerzo ( $f_{co}$ ) – deformación unitaria axial ( $\varepsilon_v$ ) y transversal ( $\varepsilon_h$ ) realizadas en tres ciclos de carga y descarga, utilizadas para el cálculo del coeficiente de Poisson.



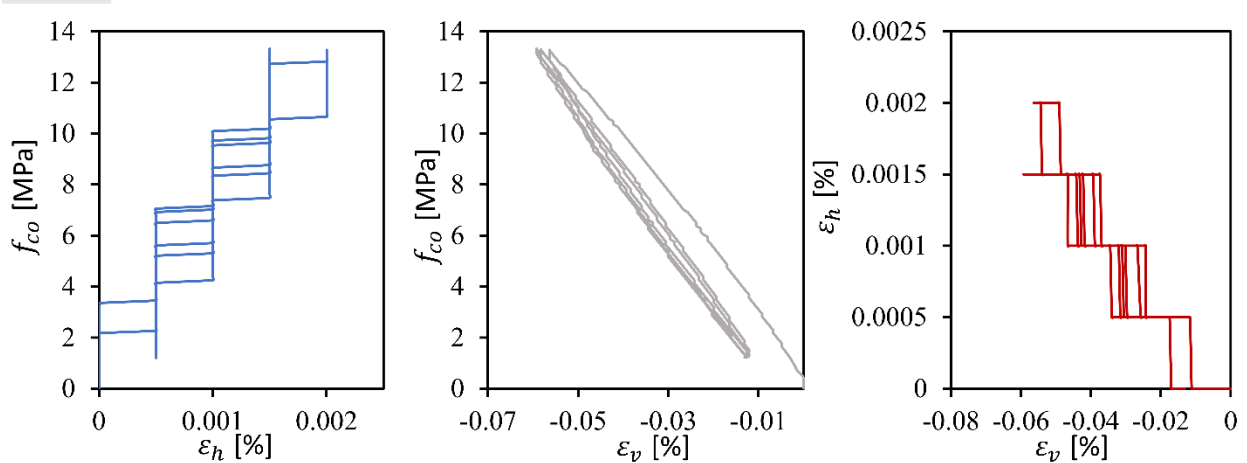
C-M2



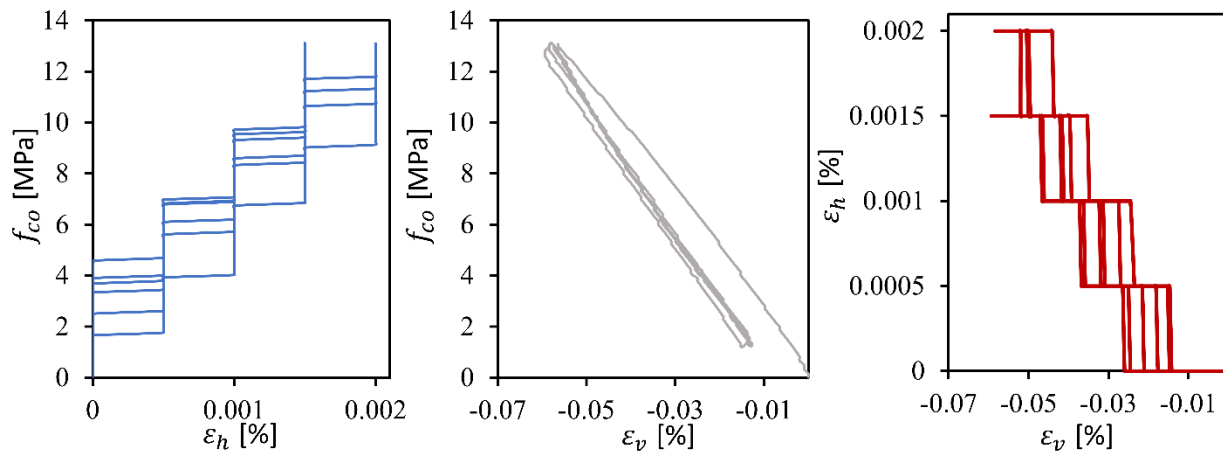
C-M1A



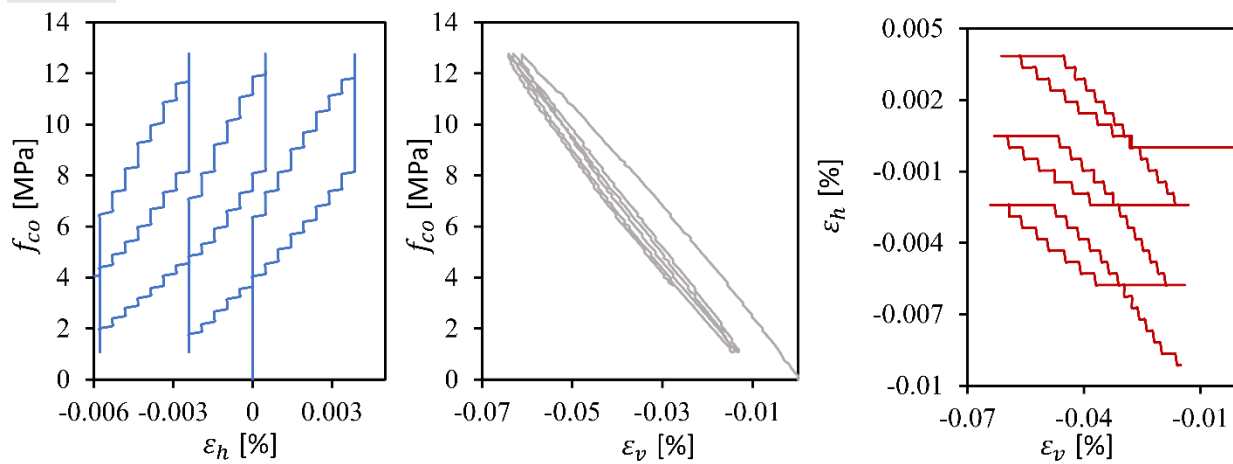
C-M2A



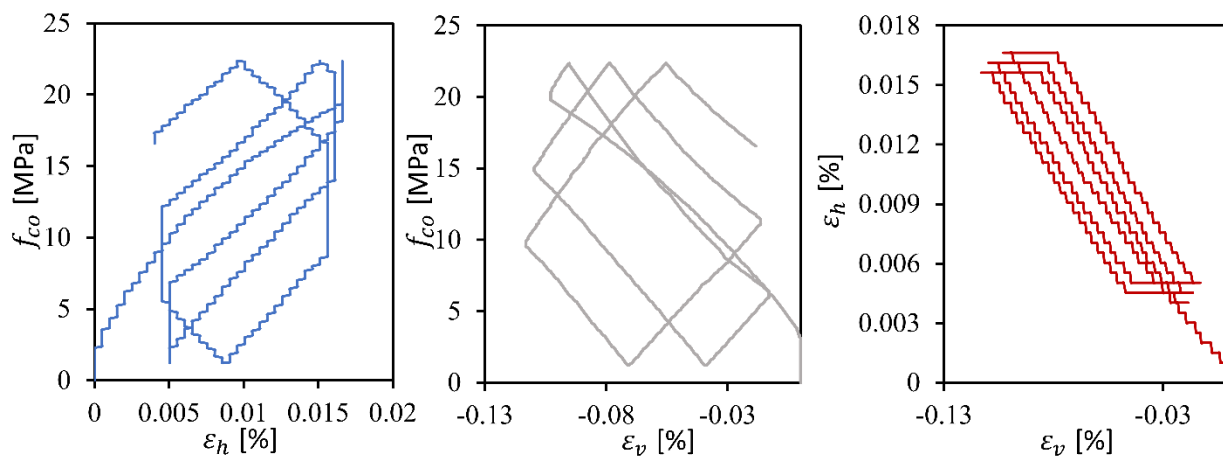
C-M1H



C-M2H



C-MC



*Nota.* Las curvas esfuerzo – deformación unitaria transversal ( $\varepsilon_h$ ) no presentaron un comportamiento continuo como las curvas esfuerzo - deformación unitaria axial ( $\varepsilon_v$ ) debido a la resolución de 0.001 mm de los diales del compresómetro - expansómetro. Puesto que, mientras los valores de desplazamiento que detectaban los diales en el sentido axial de la probeta eran decimales (0.1), los desplazamientos en el sentido transversal eran mucho menores, obteniendo valores en centésimas (0.001) y hasta milésimas (0.0001). Esto generó el comportamiento escalonado de las curvas, donde por ejemplo en lugar de mostrar de manera continua los datos del rango de 0.0001-0.0002 mm, el dial detectaba un desplazamiento constante de 0.0001 mm a medida que aumentaba el esfuerzo hasta que saltaba directamente a 0.0002 mm cuando ya se alcanzaba ese desplazamiento. En consecuencia, al graficar la curva de  $\varepsilon_h$  vs.  $\varepsilon_v$  para el cálculo del coeficiente de Poisson se obtiene un comportamiento similar. No obstante, al trazar una línea de tendencia de cada ciclo de carga se lograba estimar la pendiente de las curvas para el coeficiente de Poisson.

**Apéndice R.** Resultados de ensayos a compresión de probetas de concreto con y sin refuerzo externo ensayadas hasta el 40% del esfuerzo

Probeta	$f_{cc}$ o $f_{co}$ [MPa]	$\varepsilon_v$ [%]	$\varepsilon_h$ [%]	$\nu$	E [GPa]
PC-1	11.72	-0.061	0.008	0.141	21.26
PC-2	11.67	-0.074	0.015	0.158	-
PC-3	11.73	-0.021	0.006	0.171	-
Promedio aritmético	11.71	-0.068	0.007	0.164	21.26
C-M1-1	12.47	-0.062	0.004	0.141	22.06
C-M1-2	12.46	-0.050	0.019	0.121	21.93
Promedio aritmético	12.46	-0.056	0.004	0.139	21.96
C-M2-1	12.61	-0.049	0.003	0.138	25.78
C-M2-2	12.67	-0.071	0.003	0.143	20.82
C-M2-3	12.57	-0.059	0.005	0.164	25.68
Promedio aritmético	12.62	-0.059	0.004	0.154	24.09
C-M1A-1	12.93	-0.055	0.004	0.041	-
C-M1A-2	12.88	-0.058	0.005	0.040	23.68
C-M1A-3	12.88	-0.121	0.008	0.076	12.33
Promedio aritmético	12.90	-0.056	0.004	0.066	23.68
C-M2A-1	13.33	-0.059	0.002	0.034	25.36
C-M2A-2	12.79	-0.059	0.001	0.039	25.13
C-M2A-3	12.80	-0.072	0.016	0.035	19.95
Promedio aritmético	12.97	-0.064	0.002	0.033	25.25
C-M1H-1	11.86	-0.050	0.010	0.042	24.52
C-M1H-2	11.85	-0.065	0.005	0.049	22.27
C-M1H-3	13.05	-0.059	0.002	0.044	25.66
Promedio aritmético	12.25	-0.058	0.003	0.047	24.15
C-M2H-1	13.00	-0.060	0.001	0.032	26.46

C-M2H-2	13.00	-0.064	0.004	0.119	23.47
C-M2H-3	13.04	-0.062	0.001	0.024	23.76
Promedio aritmético	13.01	-0.062	0.002	0.028	24.57
C-MC-1	22.37	-0.110	0.017	0.039	20.69
C-MC-2	22.05	-0.125	0.004	0.034	20.77
Promedio aritmético	22.21	-0.117	0.004	0.037	20.74

**Apéndice S.** Resultados de cilindros de concreto con y sin refuerzo externo de mallas de fique ensayados hasta el esfuerzo máximo de compresión

Probeta	$f_{cc}$ o $f_{co}$ [MPa]	$\Delta l_{cc}$ o $\Delta l_{co}$ [mm]	Energía absorbida [N-m]
PC-1	27.52	6.09	541.20
PC-2	30.76	6.27	607.87
PC-3	28.28	5.66	502.92
Curva promedio	30.76	6.27	-
Promedio aritmético	28.85	6.01	550.66
C M1- 1	31.29	13.90	2288.39
C M1- 2	30.07	14.74	2301.68
C M1- 3	29.32	13.96	2297.00
Curva promedio	30.07	14.81	-
Promedio aritmético	30.23	14.20	2295.69
C M2 -1	31.58	14.39	2319.74
C M2 -2	31.08	14.72	2311.08
Curva promedio	30.87	14.44	-
Promedio aritmético	31.33	14.55	2315.41
C M1H -1	31.99	14.97	2319.19
C M1H -2	31.98	14.96	2326.78
Curva promedio	31.80	15.12	-

Promedio aritmético	31.98	14.97	2322.98
C M2H -1	32.53	15.74	2355.27
C M2H -2	32.67	15.03	2334.19
Curva promedio	32.38	15.37	-
Promedio	32.60	15.39	2344.73
C M1A -1	32.00	15.72	2093.69
C M1A -2	32.24	15.63	2637.37
Curva promedio	32.24	15.65	-
Promedio aritmético	32.12	15.68	2365.53
C M2A -1	34.80	17.56	2816.98
C M2A -2	33.62	14.78	1974.86
Curva promedio	34.80	17.56	-
Promedio aritmético	34.21	16.17	2395.92
C MC- 1	45.98	20.49	4216.98
C MC- 2	53.57	21.09	4981.25
Curva promedio	49.13	20.39	-
Promedio aritmético	49.77	20.79	4599.11