

Apoyo a la caracterización mecánica de mallas de fique en tensión aplicando la técnica de correlación de imágenes digitales

Silvia Fernanda Archila Ordoñez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D. en Ingeniería Civil

Codirectora

Valeria Quiceno Pérez

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Programa Académico

Bucaramanga

2023

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Apoyo a la revisión literaria.....	14
2.1 Caracterización de mallas de fique sometidas a tensión.....	15
2.2 Aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales a ensayos de tensión en mallas naturales o sintéticas	21
3. Apoyo en la preparación de las probetas y montaje experimental.....	26
4. Apoyo a la caracterización de mallas de fique sometidas a tensión	32
5. Apoyo en el procesamiento de datos de CID.....	38
5.1 Patrón discreto	40
5.1.1 Importar las imágenes	40
5.1.2 Parámetros de creación	40
5.1.3 Seleccionar los puntos de inspección.....	40
5.1.4 Calcular los desplazamientos	40
5.1.5 Generar las etiquetas	41
5.1.6 Exportar los datos	41
5.2 Patrón estocástico.....	42
5.2.1 Importar las imágenes	42
5.2.2 Parámetros de creación	42

5.2.3 Seleccionar la superficie de inspección	43
5.2.4 Cálculo de desplazamientos	43
5.2.5 Generar las etiquetas	43
5.2.6 Exportar los datos	43
6. Conclusiones	44
Referencias Bibliográficas	46
Apéndices.....	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Propiedades físicas y a tensión de hilos y mallas de fique de los trabajos de grado de la UIS.	18
Tabla 2 Propiedades a tensión de las mallas M1 y M2.	37
Tabla 3 Valores promedio de las propiedades a tensión de las mallas M1 y M2.	38

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Proceso de selección y filtrado de los documentos sobre la caracterización de mallas de fique</i>	17
Figura 2 <i>Mapa de coocurrencia de las palabras clave</i>	19
Figura 3 <i>Número de documentos publicados por países</i>	20
Figura 4 <i>Mapa de coautoría de las organizaciones</i>	20
Figura 5 <i>Mapa de coautoría de los autores</i>	21
Figura 6 <i>Proceso de selección de la cadena de búsqueda sobre la aplicación de la técnica CID para caracterizar de mallas naturales o sintéticas</i>	22
Figura 7 <i>Mapa de coocurrencia de las palabras clave</i>	23
Figura 8 <i>Mapa de coautoría de los países</i>	24
Figura 9 <i>Mapa de coautoría de los autores</i>	25
Figura 10 <i>Mapa de coautoría de las organizaciones</i>	26
Figura 11 <i>Proceso de recortar las probetas</i>	27
Figura 12 <i>Agarre de la mordaza con la probeta</i>	28
Figura 13 <i>Probetas con la resina aplicada</i>	28
Figura 14 <i>Aplicación del patrón discreto</i>	29
Figura 15 <i>Patrones estocásticos aplicados</i>	30
Figura 16 <i>Aplicación patrón discreto</i>	30
Figura 17 <i>Medición del ancho de las probetas</i>	31
Figura 18 <i>Montaje experimental para la aplicación de CID</i>	32

Figura 19 <i>Curvas carga-desplazamiento mallas M1.</i>	34
Figura 20 <i>Curvas carga-desplazamiento mallas M2.</i>	34
Figura 21 <i>Curvas esfuerzo-deformación unitaria mallas M1.</i>	35
Figura 22 <i>Curvas esfuerzo-deformación unitaria mallas M2.</i>	35
Figura 23 <i>Proceso realizado en GOM Correlate 2019 para el patrón discreto.</i>	39
Figura 24 <i>Proceso realizado en GOM Correlate 2019 para el patrón estocástico.</i>	39
Figura 25 <i>Resultado de desplazamientos de la malla M1-5 para $\sigma_u/2$.</i>	41
Figura 26 <i>Resultado de desplazamientos de la malla M1-5 para σ_u.</i>	42

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Tablas de revisión literaria.....	49
Apéndice B Curvas carga - desplazamiento y esfuerzo – deformación unitaria	49
Apéndice C Datos de la máquina de los ensayos preliminares.....	49

Resumen

Título: Apoyo a la caracterización mecánica de mallas de fique en tensión aplicando la técnica de correlación de imágenes digitales*

Autor: Silvia Fernanda Archila Ordoñez**

Palabras Clave: Fique, Mallas de fique, Fibras vegetales, Correlación de imágenes digitales, Propiedades mecánicas.

Descripción: En este documento se reportan las actividades y resultados obtenidos en la pasantía de investigación en el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) en el marco del proyecto de investigación VIE No. 2702 titulado “reforzamiento de elementos externos de concreto a compresión con fibra tejida de fique para el desarrollo de estructuras sísmicamente resilientes”. Las actividades de apoyo realizadas fueron filtrar y seleccionar los trabajos previos más relevantes sobre la caracterización de fibras, hilos y mallas de fique sometidas a tensión y la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales para caracterizar mallas naturales o sintéticas, o compuestos reforzados con mallas naturales o sintéticas sometidas a ensayos de tensión, preparar las mallas de fique para la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales y la ejecución de ensayos a tensión, caracterizar las mallas de fique a partir de los datos obtenidos de la máquina y apoyar el procesamiento de la secuencia de imágenes digitales capturadas durante los ensayos mediante el software GOM Correlate. Del apoyo al filtrado y selección de los documentos previos se lograron obtener las palabras clave con mayor ocurrencia, los países, organizaciones y autores con mayor número de documentos publicados y con mayor número de citas de documentos publicados. Sobre la caracterización mecánica de las mallas de fique a partir de los datos de la máquina se determinó que el esfuerzo último está entre 179.95 MPa y 273.13 MPa, deformación unitaria última entre 4.92 % y 7.34 %, módulo de elasticidad entre 4.06 GPa y 5.99 GPa y energía de deformación hasta el esfuerzo último entre 4.24 MPa y 7.44 MPa. Y al emplear la técnica de correlación de imágenes digitales se lograron obtener los desplazamientos verticales de las mallas de fique con patrón discreto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. en Ingeniería Civil. Codirector: Valeria Quiceno Pérez. Ingeniera Civil.

Abstract

Title: Support for the mechanical characterization of fique fabrics in tension by applying the digital image correlation technique*

Author(s): Silvia Fernanda Archila Ordoñez**

Key Words: Fique, Fique fabric, Vegetable fiber, Digital image correlation, Mechanical properties.

Description: This document reports the activities and results obtained during the research internship in the Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) in the research Project VIE No. 2702 entitled “reforzamiento de elementos externos de concreto a compresión con fibra tejida de fique para el desarrollo de estructuras sísmicamente resilientes”. The support activities completed were the filtered out and selection of the relevant previous works about the characterization of fibers, yarns and fique fabric tested under tension and the use of digital image correlation technique to characterize natural or synthetic fabrics or composites materials reinforced with natural or synthetic fabrics under tension, the fique fabric preparation for the application of digital image correlation technique and executions of tests, the fique fabric characterization from the data machine and the processing of the sequence of digital images captured during the tests using the GOM Correlate software. From support to filtering and selection of previous documents it was possible to obtain the keywords with the highest occurrence, the countries, organizations and authors with the highest numbers of published documents and the highest number of citations of published documents. Through the machine data the tensile properties were determined, with an ultimate stress between 179.95 MPa and 273.13 MPa, ultimate strain between 4.92 % and 7.34 %, elastic modulus between 4.06 GPa and 5.99 GPa and deformation energy per unit volume until ultimate stress between 4.24 MPa and 7.44 MPa. By using the digital image correlation technique, it was possible to obtain the vertical displacements of the fique fabrics with a discrete pattern.

* Degree Work

**Physical-mechanical Engineering Faculty. School of Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero. Doctor in Civil Engineering. Codirector: Valeria Quiceno Pérez. Civil Engineering.

Introducción

Debido a la creciente concientización sobre los efectos negativos de la industria de la construcción en el medioambiente, en los últimos años se ha incrementado el interés sobre las aplicaciones de las fibras naturales en dicha industria. Estas fibras son una alternativa llamativa por ser una fuente renovable, biodegradable, reciclable y menos costosa que las fibras sintéticas comúnmente empleadas en materiales compuestos (Perrier et al., 2015). En la industria de la construcción, las fibras vegetales han sido empleadas en la producción de paneles estructurales, vigas, marcos de puertas, entre otros (Laverde et al., 2022). Un tipo de fibra vegetal de alto interés para Colombia es la extraída de la planta de fique. De esta fibra se han realizado investigaciones sobre sus posibles aplicaciones ingenieriles, como la fabricación de un material compuesto de tejidos de fibra de fique embebidos en resina termoestable para membranas estructurales tensadas (Camargo & Garcia, 2017), o empleando mallas de fique embebidas en mortero como refuerzo de compuestos cementicios en elementos estructurales, demostrando la efectividad de la implementación de este refuerzo (Puentes Rojas & Soto Ortigón, 2018).

La fibra de fique se extrae de las hojas de la planta del fique, nativa de Colombia (Amoy Netto et al., 2016) y es utilizada generalmente en la fabricación de productos artesanales, hilos, tejidos, empaques, entre otros (Contreras et al., 2009). Para la implementación de fibras de fique en aplicaciones ingenieriles es importante conocer sus propiedades mecánicas, a fin de comprender la respuesta del material ante fuerzas externas aplicadas. Típicamente, la caracterización mecánica de estas fibras se ha realizado usando los datos (desplazamiento de la cabeza móvil) de la máquina de ensayo o con equipos tradicionales [p. ej., transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) o galgas extensiométricas], determinando así propiedades mecánicas importantes como

el esfuerzo (σ), la deformación unitaria última (ε_u) y el módulo de elasticidad (E). Un método alternativo para la caracterización mecánica es la correlación de imágenes digitales (CID), la cual es una técnica óptica para medir desplazamientos y deformaciones sobre una superficie sólida sin necesidad de contacto con la muestra (Perrier et al., 2015). Este método ha sido empleado para determinar la curva esfuerzo-deformación unitaria de mallas de basalto sometidas a tensión (D'anna et al., 2020) y de tejidos de carbono y vidrio (Tekieli et al., 2017), entre otros materiales. La técnica CID es una alternativa atractiva ya que no supone un riesgo de daño a los instrumentos, además, no presenta las limitaciones de los transductores convencionales o extensómetros de requerir contacto con la muestra (Tekieli et al., 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que actualmente se desarrolla el proyecto de investigación No. 2702 titulado “reforzamiento de elementos externos de concreto a compresión con fibra tejida de fique para el desarrollo de estructuras sísmicamente resilientes”, en este trabajo se describen las actividades de apoyo en la aplicación de la técnica de CID en la caracterización mecánica de mallas de fique sometidas a tensión, desarrolladas durante la pasantía de investigación en el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME). A continuación, en la sección 2, se resume las actividades de apoyo a la revisión de la literatura, en la cual se filtraron y seleccionaron los trabajos previos más relevantes sobre la caracterización de fibras, hilos y mallas de fique sometidas a tensión y la aplicación de la correlación de imágenes digitales (CID) para caracterizar mallas naturales o sintéticas a tensión. En la sección 3 se detalla la preparación de las probetas, montaje y aplicación de CID de los ensayos a tensión de mallas de fique. En la sección 4 se describe la caracterización mecánica de las mallas de fique a partir de los datos obtenidos de la máquina, obteniendo curvas carga-desplazamiento y esfuerzo-deformación unitaria, módulo de elasticidad, esfuerzo y deformación

unitaria última y la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último. Luego, en la sección 5 se describe el procesamiento de las imágenes de CID capturadas durante los ensayos a tensión. Por último, se encuentran las conclusiones del trabajo realizado.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Apoyar las actividades de investigación desarrolladas en el marco del proyecto de investigación VIE No. 2702 titulado “reforzamiento externo de elementos de concreto a compresión con fibra tejida de fique para el desarrollo de estructuras sísmicamente resilientes”.

1.2 Objetivos Específicos

Filtrar y seleccionar los trabajos previos más relevantes sobre la caracterización de mallas de fique sometidas a tensión y la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales para caracterizar mallas naturales o sintéticas en tensión.

Preparar las mallas de fique para la ejecución de ensayos a tensión y la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales.

Apoyar en el procesamiento de la secuencia de imágenes digitales capturadas durante los ensayos mediante uso del software GOM Correlate.

Caracterizar las mallas de fibra de fique a tensión a partir de los datos obtenidos de la máquina MTS.

2. Apoyo a la revisión literaria

Con el fin de identificar las propiedades físicas y mecánicas de fibras, hilos y mallas de fique, y los parámetros de aplicación CID para caracterizar mallas naturales o sintéticas y materiales reforzados con estas mismas mallas, se apoyó el desarrollo de dos revisiones literarias.

Las búsquedas se realizaron en la base de datos Scopus por medio de cadenas de búsqueda creadas para que detectar todos los tipos de documentos [artículos de revistas y de conferencias (conference papers), revisiones, tesis doctorales, capítulos de libros], dentro de todos los campos del documento (título, resumen, palabras clave, referencias, afiliaciones, autores, introducción, entre otros) escritos en inglés o español, en el periodo entre enero del 2012 y mayo del 2022. Se hizo uso de los operadores booleanos “OR” para conectar los sinónimos y “AND” para unir las palabras que deben aparecer en los resultados, además de comillas dobles (“”) para indicar que dos o más palabras deben aparecer juntas. Para seleccionar las palabras se implementó una revisión bibliográfica preliminar, en la cual se identificaron las palabras clave empleadas por los autores de cada campo de estudio.

De los documentos encontrados se realizó un filtrado en dos partes, primero, con base en la revisión del título, resumen y palabras clave, y segundo, mediante revisión rápida del artículo completo. A fin de sintetizar, agrupar y analizar los documentos filtrados se crearon mapas bibliométricos a través del programa libre VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2022). Con esto, se identificaron las palabras clave con mayor ocurrencia y los autores, países y organizaciones más citados y con mayor número de documentos publicados. La identificación de las palabras clave más comunes ayudó a definir los términos más empleados para describir la temática y así escoger las palabras clave correctas y obtener un documento visible a futuros lectores interesados en el

tema. Por otra parte, la identificación del país(es), organización(es) y autor(es) con mayor ocurrencia ayudó a conocer los líderes o redes en la temática con mayor investigación y tendencias de investigación.

Los documentos se descargaron de la base de datos Scopus como un archivo de puntos separados (.csv) y se importaron a VOSViewer; luego se seleccionó el tipo de análisis de coautoría para el análisis de autores, organizaciones y países, y el análisis de coocurrencia para las palabras clave. Dado que en el documento .csv se presentaron casos en los que un término estaba escrito de diferentes maneras en diferentes documentos, se utilizó un archivo de texto (.txt) con un diccionario de sinónimos para fusionar las diferentes variantes de un mismo término. Además, se empleó la lista de sinónimos para corregir erratas o faltas ortográficas y abreviar términos extensos.

Es importante tener presente que el tamaño de la burbuja o círculo en los mapas realizados representa la frecuencia de ocurrencia de cada palabra. Para el análisis de coautoría representa el número de documentos publicados por autores, organizaciones y países, mientras que para el análisis de coocurrencia representa el número de documentos en los cuales aparece la palabra clave. Las líneas que unen las burbujas determinan el vínculo entre ellas, por lo tanto, en el análisis de coautoría representa los autores, organizaciones y países que han publicado documentos en conjunto, mientras que en el análisis de coocurrencia representa las palabras clave que han aparecido juntas en un mismo documento.

2.1 Caracterización de mallas de fique sometidas a tensión

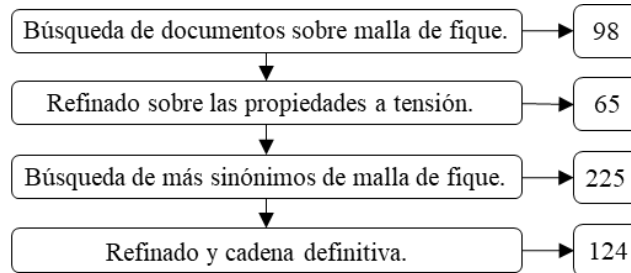
Al desarrollar el apoyo a la revisión literaria sobre la caracterización de mallas de fique sometidas a tensión, se obtuvo la información relevante sobre (1) la morfología de los hilos, fibras y mallas de fique, (2) la metodología y procedimiento empleados para su caracterización mecánica

(parámetros para la ejecución de ensayos a tracción/tensión) y (3) las propiedades mecánicas a tracción de hilos, fibras y mallas de fique.

El proceso para generar la cadena de búsqueda se muestra en la figura 1. Primero, se buscaron las palabras que mejor describieran las mallas de fique. Para esto se intentaron las combinaciones (“fique fiber” AND “knitted textile”) y (“fique” AND “knitted textile”), sin embargo, no se obtuvieron resultados. Con “fique fabric” se obtuvieron 98 documentos, por lo tanto, esta combinación de palabras se consideró adecuada. Para encontrar documentos que traten sobre las propiedades mecánicas a tensión en mallas de fique se probaron las palabras “tensile strength”, “ultimate strain”, “tensile test”, “tensile properties”, “elastic modulus” y “Young modulus” junto con “fique fabric”. De esta prueba surgió la cadena (“fique fabric” AND (“young modulus” OR “tensile test” OR “tensile strength” OR “elastic modulus” OR “tensile properties”)) con un total de 65 documentos. A fin de aumentar el resultado, se probaron más sinónimos para la malla de fique de manera individual junto con “tensile strength”, determinando que las palabras “fique fiber” junto con “textile”, “fabric” y “net” obtuvieron el mayor número de resultados. Agregando estas palabras a la cadena se obtuvieron 225 resultados. Dado que la cantidad de documentos es relativamente alta, se limitó a emplear el operador booleano AND a la palabra “tensile properties”, generando la cadena de búsqueda definitiva (“fique fabric” OR (“fique fiber” AND (“textile” OR “fabric” OR “net”))) AND ((“young modulus” OR “tensile test” OR “tensile strength” OR “elastic modulus” OR “tensile properties”) AND “tensile properties”), obteniéndose 124 documentos.

Figura 1

Proceso de selección y filtrado de los documentos sobre la caracterización de mallas de fique.



De los 124 documentos se revisaron las referencias que incluyeran la palabra “fique”, y estos se incluyeron en el proceso de filtrado. Al realizar el filtrado, el número de documentos se redujo a 17. Estos documentos se encuentran en la tabla de propiedades físicas y mecánicas de fibras de fique dentro del apéndice A. Los 107 documentos restantes fueron descartados porque no realizaban la caracterización mecánica de fibras, hilos o mallas de fique; estos documentos fueron arrojados por la cadena de búsqueda puesto que mencionaban la palabra “fique” dentro de sus referencias. Otros documentos se descartaron porque los autores realizaban la caracterización mecánica de materiales compuestos reforzados con mallas de fique u otro tipo de fibra natural, más no la caracterización de la fibra, hilo o malla de fique.

Además de la búsqueda en Scopus, también se realizó una búsqueda en el repositorio de trabajos de grado de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Estos documentos no fueron incluidos en el análisis con VOSViewer porque no se encontraban en Scopus, sin embargo, si fueron empleados para construir la tabla 1, en la cual se resumen las propiedades físicas y mecánicas de fibras, hilos y mallas y los parámetros de ensayo como tasa de deformación y norma empleada. De esta tabla se observa que para hilos de fique las propiedades mecánicas de interés están en el rango $3.46 < E(\text{GPa}) < 30.7$, $15.43 < \sigma_u(\text{MPa}) < 562.67$, y $3.22 <$

$\epsilon_u(\%) < 8.33$, y se han ensayado con una tasa de deformación (v) de 1 mm/min, siguiendo las normas ASTM D3822 y ASTM C1557-14. Sobre las mallas, al aumentar la densidad de entramado aumenta el módulo de elasticidad y el esfuerzo último de la malla, destacando una diferencia entre el valor máximo y mínimo de estas características de alrededor del 50%. Además, al aumentar la densidad lineal del hilo disminuye la deformación unitaria última. Las propiedades mecánicas a tensión de las mallas de fique se encuentran en el rango $0.15 < E(\text{GPa}) < 27.05$, $24.75 < \sigma_u(\text{MPa}) < 767.79$, y $3.8 < \epsilon_u(\%) < 13.18$ y se han ensayado en un rango de velocidades entre 20 y 300 mm/min, siguiendo las normas ASTM D-4632-08, ASTM D5034-09 e INV E-901. De los trabajos encontrados solo un autor determinó el diámetro de la fibra, con un valor de 0.08158 ± 0.023 mm.

Tabla 1

Propiedades físicas y a tensión de hilos y mallas de fique de los trabajos de grado de la UIS.

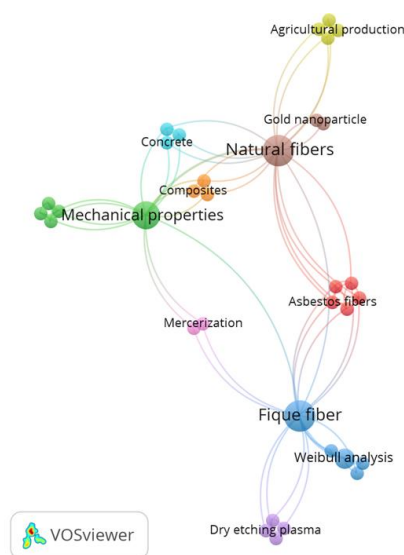
Referencia	Densidad de entramado	Diámetro de la fibra (mm)	v (mm/min)	Norma	σ_u (MPa)	E (GPa)	ϵ_u (%)
Hilo							
(Herrera Ortiz, 2020)	N/A	0.08158 ± 0.02312	1	ASTM D3822	424.27 ± 138.4	24.06 ± 6.64	-
(Mesa Palomino, 2016)	N/A	-	-	ASTM C1557 - 14	15.43	-	8.33
(Pinto Pradilla & Figueroa Quintero, 2016)	N/A	-	1	ASTM D3822	[112.41 - 348.3]	[3.46 - 9.37]	[3.22 - 7.54]
Malla							
(Puentes Rojas & Soto Ortigón, 2018)	33 hilos/dm ²	-	300	ASTM D4632-08	767.79	27.05	5.3
	20 hilos/dm ²	-			621.25	18.17	4.5
	12 hilos/dm ²	-			483.08	14.21	3.8
	12/14/dm	-			24.75	0.408	12.76
(Camargo & García, 2017)	20/14/dm	-	20	ASTM D4632	30.09	0.677	8.98
	24/24/dm	-			44.45	0.768	13.18
	20/36/dm	-			51.57	1.208	10.42
(Higuera Cogua, 2011)	-	-	70	INV E-901	-	-	7.72
(Angarita Ribero & Uribe Roa, 2011)	-	-	300	ASTM D5034 - 09	-	0.1486	-

Nota. N/A: No aplica; -: No reporta.

En la figura 2 se muestra el resultado del análisis de coocurrencia de las palabras clave. En total hay 34 palabras clave conectadas entre sí con una frecuencia mínima de uno. Las palabras más frecuentes son “natural fibers” (5 veces), “fique fiber” (5) y “mechanical properties” (4), mientras que las demás palabras solo aparecen una vez.

Figura 2

Mapa de coocurrencia de las palabras clave.



En las figuras 3, 4 y 5 se observa el número de documentos publicados por países, coautoría de las organizaciones y coautoría de los autores. De estas se observa que Colombia es el país que más documentos ha publicado (12), el Grupo Sobre Nuevos Materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), sede Medellín - Colombia, es la organización con mayor número de documentos publicados (5) y citas por documentos publicados (129), y el autor que más documentos han publicado (3) y más citas tienen (125) también es colombiano (Gañan), demostrando el liderazgo de Colombia en esta temática. De la figura 4 se observa que los vínculos entre organizaciones son pequeños y no son mostrados por el programa; sin embargo, el análisis

detallado de la información permite concluir que los vínculos más destacables son los del Departamento ingeniería química y del medio ambiente de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) con 71 citas y la organización INSTITUTO DE TECNOLOGIAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA “HILARIO FERNANDEZ LONG” - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (INTECIN-CONICET) de la Universidad de Buenos Aires (UBA), con 52 citas cada una con el Grupo Sobre Nuevos Materiales de la UPB; estas tres organizaciones son las que más número de citas tienen de sus documento publicados.

Figura 3

Número de documentos publicados por países.

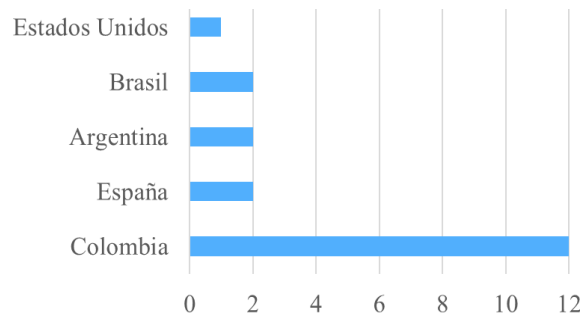


Figura 4

Mapa de coautoría de las organizaciones.

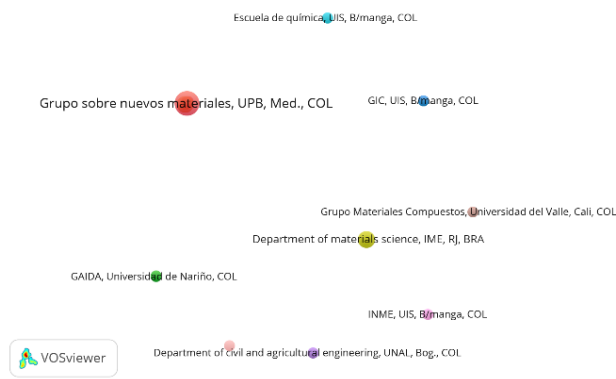
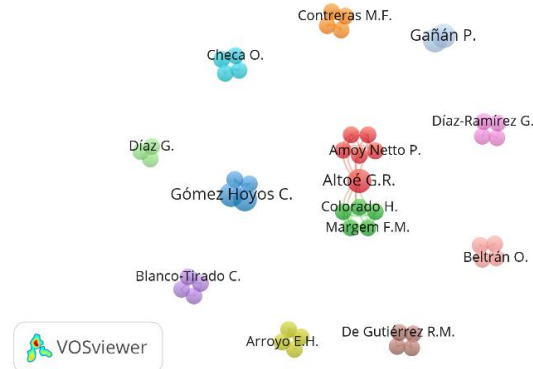


Figura 5

Mapa de coautoría de los autores.



2.2 Aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales a ensayos de tensión en mallas naturales o sintéticas

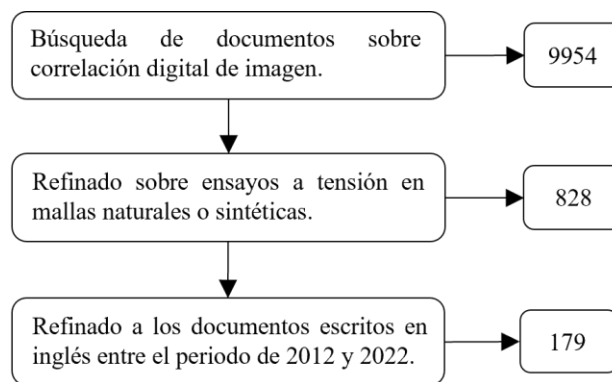
De la revisión literaria sobre la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales para caracterizar mallas naturales o sintéticas o compuestos reforzados con mallas naturales o sintéticas sometidas a ensayos de tensión se identificaron las mallas naturales o sintéticas más empleados al aplicar CID y los parámetros empleados para la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales.

La figura 6 muestra el proceso para generar la cadena de búsqueda. Primero, para encontrar los documentos en los que se empleó CID en la caracterización mecánica de un material en tensión se usó la cadena (“digital image correlation”) AND (“tensile strength” OR “tensile test” OR “tensile properties” OR “tensile behavior”) obteniendo 9954 documentos. Al añadir el sinónimo “DIC” (siglas en inglés para Digital Image Correlation) a correlación digital de imágenes y agregar las palabras “fabric”, “mat”, “woven” y “textile” para limitar la cadena a los materiales en forma de malla se redujo el resultado a 2286. Para disminuir este valor, se empleó el operador booleano

AND a la palabra “tensile test” y obtener solo documentos que realicen pruebas de tensión, además se cambió “tensile strength” por “mechanical properties” y se consiguió la cadena (“digital image correlation” OR “DIC”) AND (“mechanical properties” OR “tensile properties” OR “tensile behavior”) AND (“fabric” OR “mat” OR “woven” OR “textile”) AND (“tensile test”), con 828 resultados. La cadena fue refinada y el número de documentos se redujo a 179 al agregar “natural fibers”, “vegetable fibers” y “FRP” para encontrar fibras naturales o sintéticas; eliminar “mechanical properties”; y al incluir únicamente los documentos publicados entre 2012 y 2022 y escritos en inglés.

Figura 6

Proceso de selección de la cadena de búsqueda sobre la aplicación de la técnica CID para caracterizar de mallas naturales o sintéticas.



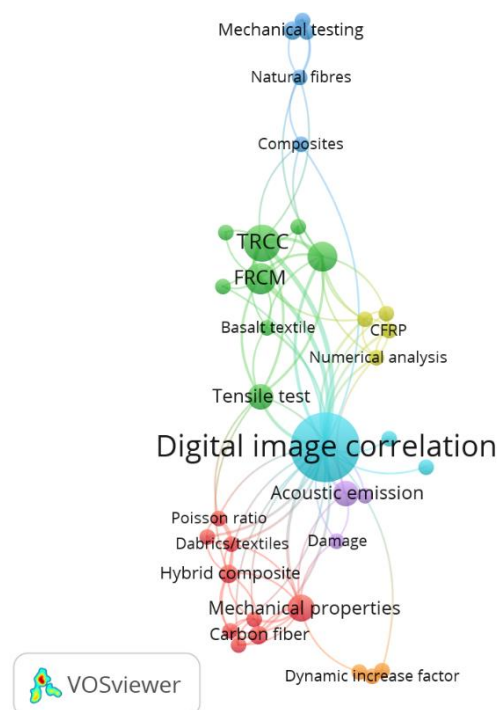
Tras el filtrado, los 179 documentos se redujeron a 73, los cuales se encuentran en la tabla de uso de CID para determinar las propiedades mecánicas a tensión de mallas, dentro del apéndice A. Los 106 documentos restantes se descartaron ya que no empleaban la técnica de CID para la caracterización mecánica a tensión, sino que empleaban los métodos tradicionales como extensómetros o los datos registrados por la máquina de ensayo; estos documentos fueron

arrojados por la cadena de búsqueda puesto que mencionaban la técnica CID dentro de sus referencias. Otros documentos se descartaron porque no suministraban suficientes detalles de interés como el tipo y resolución de la cámara, software, velocidad de ensayo, entre otros parámetros del montaje CID empleado.

En la figura 7 se muestra el análisis de coocurrencia de las palabras clave. En total hay 36 palabras clave conectadas entre sí con una frecuencia mínima de 2. Las palabras más frecuentes son “Digital image correlation” (37), “TRCC” (11), FRCM (8), “Masonry” (7) y “Mechanical properties” (6). Para generar este mapa los términos “textile reinforced concrete” (TRC) y “textile reinforced mortar” (TRM) se unieron con “textile reinforced cement composites” (TRCC) puesto que se consideró que este término describe y engloba a los dos anteriores, y así se optimiza el espacio en el mapa.

Figura 7

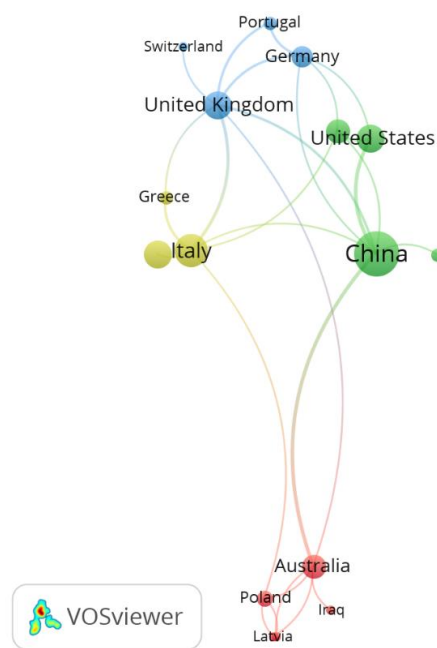
Mapa de coocurrencia de las palabras clave.



En la figura 8 se observa el mapa de coautoría de los países. Los países donde pertenecen los autores que más documentos han publicado son China (21), Italia (12), Reino Unido (8), Estados Unidos (8) y Francia (8), mientras que los países donde pertenecen los autores con mayor número de citas son Italia (529), China (449), Francia (239), Estados Unidos (154) y Polonia (143).

Figura 8

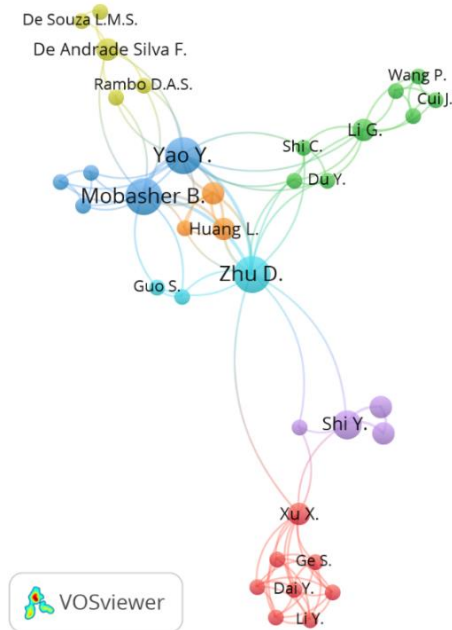
Mapa de coautoría de los países.



En la figura 9 se muestra el mapa de coautoría. Los autores que más documentos han escrito son Yao Y., Mobasher B. y Zhu D. (5), Chocinski-Arnault L., Mellier D., Touchard F. y De Felice G. (3). Por otra parte, los autores más citados son Yao Y. (183), De Felice G. y De Santis S. (174), Zhu D. (166) y Mobasher B. (149).

Figura 9

Mapa de coautoría de los autores.



En la figura 10 se observa el mapa de coautoría de las organizaciones con al menos 2 documentos publicados. Las organizaciones donde pertenecen los autores que más documentos han publicado son School of Civil Engineering de Tianjin University (7), Department of Engineering de la Roma Tre University (3), la School of Sustainable Engineering and Built Environment (SSEBE) de Arizona State University (3) y State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body de Hunan University (3), mientras que las organizaciones donde pertenecen los autores con mayor número de citas son del Department of Engineering de Roma Tre University (174), SSEBE de Arizona State University (118), State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body de Hunan University (86) y Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety de Tianjin University (83). Al analizar los vínculos, solo se encontró uno entre Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and

Seismic Resilience of China Earthquake Administration de Tianjin University con School of Civil Engineering de Tianjin University.

Figura 10

Mapa de coautoría de las organizaciones.



3. Apoyo en la preparación de las probetas y montaje experimental

Las mallas de fibra de fique seleccionadas para obtener las probetas fueron adquiridas en la empresa Coohilados del Fonce Ltda. Se seleccionaron dos tipos de mallas, cada una conformado por hilos con una densidad de 1050 m/kg. Las mallas sencillas (M1) con una densidad de entramado de 24/21 hilos/dm, donde por cada hilo de trama hay un hilo de urdimbre, y dobles (M2) con una densidad de entramado de 24/20 hilos/dm, donde por cada hilo de trama hay dos hilos de urdimbre. Los hilos de urdimbre son los orientados en la dirección de la carga, mientras que los hilos de trama se encuentran de manera perpendicular a la dirección de la carga.

Se elaboraron 20 probetas de la malla M1 y 20 de la malla M2, de las cuales 20 probetas se prepararon con patrón discreto (10 de M1 y 10 de M2) y las otras 20 mallas se prepararon con patrón estocástico (10 de M1 y 10 de M2) para los ensayos preliminares (ver Sección 4). Para los

ensayos preliminares se usó una máquina servo-hidráulica MTS modelo 810 con capacidad de carga de 100 kN con mordazas de dimensiones 25 mm × 37 mm, mientras que los ensayos definitivos (ver Sección 4) se realizaron en una máquina servo-hidráulica MTS modelo 370.02 con capacidad de carga de 25 kN con mordazas de dimensiones 25 mm × 30 mm. Para todos los ensayos se usó una velocidad de deformación de 5 mm/min, presión de agarre igual a 9.1 MPa, siguiendo la norma ISO 13931-1 (2013).

El proceso para preparar las probetas comenzó con la delimitación del área útil de las mallas de fique. Sobre esta, se procedió a medir y dibujar las probetas con dimensiones de 30 mm × 274 mm, luego se cosieron los bordes con máquina de coser, esto con el fin de evitar que se deshilaran los hilos en la ejecución de los ensayos. Una vez cosidos, se procedió a recortar las probetas como se muestra en la figura 11.

Figura 11

Proceso de recortar las probetas.

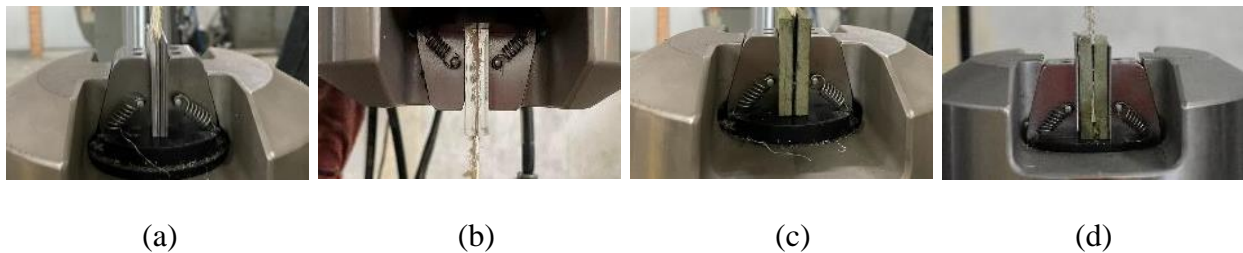


Para encontrar un agarre adecuado entre las mordazas de la máquina y las mallas se intentaron dos métodos: (1) uso de láminas de acero (figura 12-a), de acrílico (figura 12-b) o de

madera (figura 12-c), o de láminas de acero o madera más papel lija (figura 12-d); y (2) aplicación de resina epóxica SP-111 con endurecedor SQ-56 con una relación de 10:2 partes por peso en los extremos de la probeta.

Figura 12

Agarre de la mordaza con la probeta con láminas de (a) acero, (b) acrílico, (c) madera y (d) madera más papel de lijar.



Se escogió el agarre con la resina epóxica, debido a que los demás materiales generaron deslizamiento o ruptura de la probeta en la región de agarre. Al tener las probetas recortadas se procedió a aplicar resina sobre los extremos, abarcando el área donde irá el agarre de la mordaza (figura 13). Luego de aplicar la resina, esta se dejó secar y curar durante un día. Una vez seca, se dio comienzo a la aplicación del patrón.

Figura 13

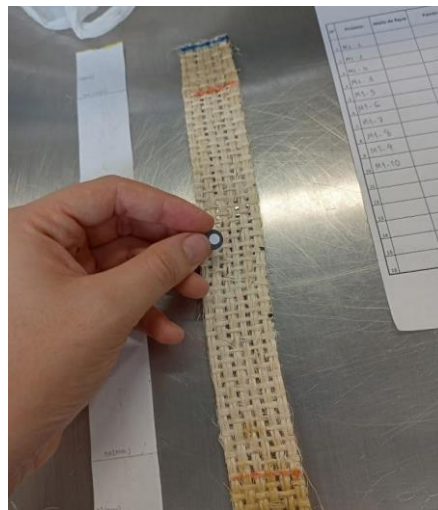
Probetas con la resina aplicada.



Para las probetas con patrón discreto, se pegaron los puntos de inspección como se muestra en la figura 14, los cuales tienen un diámetro interior y exterior de 5 mm y 10 mm respectivamente. Los puntos se pegaron con silicona líquida en el hilo de urdimbre central, espaciados cada 3 hilos de trama.

Figura 14

Aplicación del patrón discreto.



Para determinar el patrón estocástico más adecuado se probaron diversos métodos. Se intentó con aerosol efecto piedra (figura 15-a), fondo en blanco con pintura soluble en agua y puntos negros hechos con aerosol (figura 15-b), fondo en color blanco con pintura soluble en agua y puntos negros con pintura soluble en agua pintados a mano con ayuda de un cepillo (figura 15-c), fondo blanco con pintura soluble en agua y puntos negros con pintura soluble en agua hechos a mano con ayuda de un palillo (figura 15-d). El proceso para aplicar este último patrón se muestra en la figura 16.

Figura 15

Patrones estocásticos aplicados con (a) aerosol efecto piedra (b) fondo blanco puntos negro con aerosol (c) fondo blanco puntos negros con cepillo y (d) fondo blanco con puntos negros con palillo.

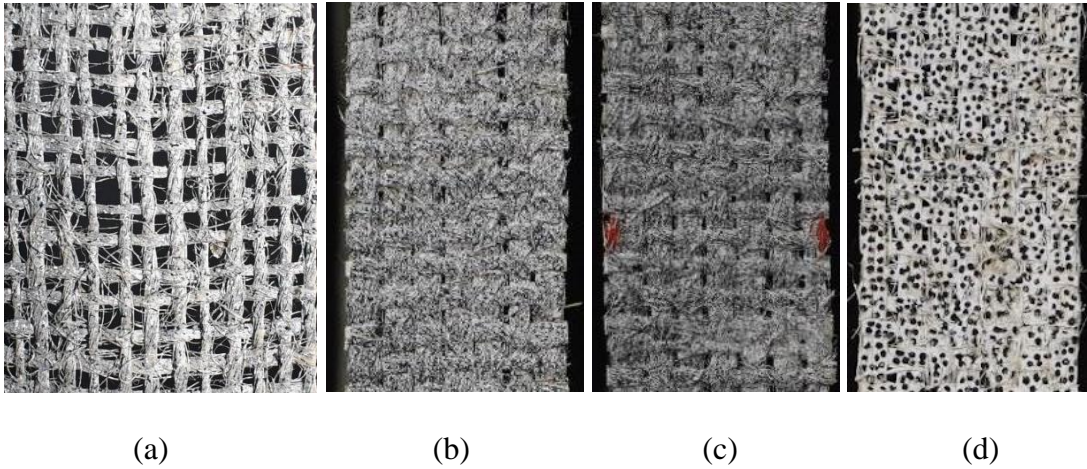
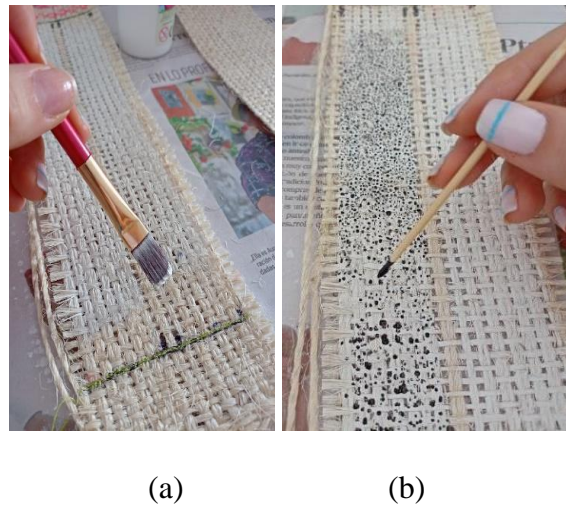


Figura 16

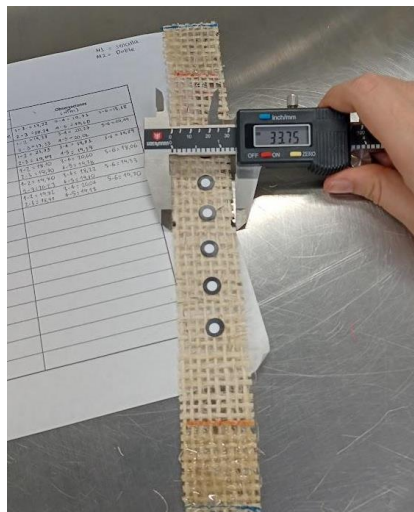
Aplicación patrón discreto a) aplicación del fondo blanco b) aplicación del patrón estocástico a mano con ayuda de un palillo.



Una vez aplicado el patrón, se registró para cada probeta la cantidad de hilos en la dirección de trama y urdimbre, como también el ancho y el largo de la probeta. El ancho se midió con un calibrador (figura 17) mientras que el largo se midió con una regla con precisión de 1 mm; esto último se hizo debido a que el calibrador no alcanzaba a cubrir todo el largo de la probeta. Para las probetas con patrón discreto se tomó el dato de distancia centro a centro entre los puntos. Este dato es importante para posteriormente hallar el desplazamiento relativo entre estos. A continuación, el técnico de laboratorio acomodó la probeta en la máquina de ensayos. Antes de dar inicio al ensayo se procedió a medir la longitud inicial (L_0) o longitud entre mordazas, además de demarcar en la probeta el área que está en el campo de visión de la cámara.

Figura 17

Medición del ancho de las probetas.



Como se muestra en la figura 18, el montaje experimental para aplicar la técnica CID consistió en una cámara SONY con un lente de distancia focal de 15-50 cm, conectada al computador, y dos luces led soportadas sobre trípodes. Estas últimas se ubicaron atrás y arriba de

la cámara. Además, en la cara posterior de la probeta se ubicó el extensómetro láser. Se verificó el espacio visible de la cámara y se empleó una distancia entre la cámara y la muestra para las mallas M1 y M2 de 0.6 m y 0.535 m respectivamente. Durante el ensayo se tomaron imágenes cada segundo, iniciando la cámara al mismo tiempo que la máquina de ensayos con ayuda del software visualización en tiempo real Imagen Edge Desktop de Sony.

Figura 18

Montaje experimental para la aplicación de CID. (a) vista del montaje (1) cámara (2) luces (3) computador (4) máquina MTS (5) espécimen (6) extensómetro láser (b) cara posterior (c) cara anterior.



(a)

(b)

(c)

4. Apoyo a la caracterización de mallas de fique sometidas a tensión

En el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS (EIC) se ejecutaron 26 ensayos preliminares, de los cuales 12 fueron de probetas con patrón discreto y 14 con patrón estocástico.

Los ensayos preliminares se realizaron para probar los parámetros del montaje y aplicación de CID, definir la distancia entre la cámara y la probeta, el número de puntos de inspección y su distancia de separación según el tamaño de la probeta. También se probaron las diferentes maneras de aplicar del patrón estocástico mencionados en la sección 3. Y sobre los parámetros de los ensayos a tensión se probaron los diferentes tipos de agarres enunciados en la sección 3.

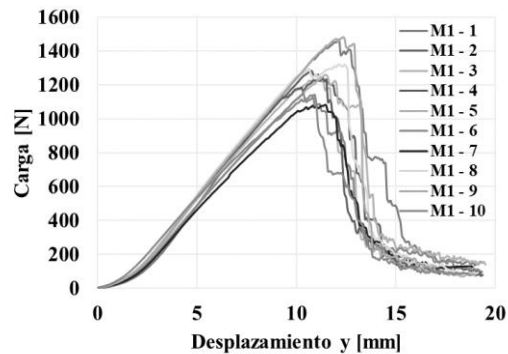
Una vez definida la configuración del montaje mediante los ensayos preliminares se realizaron los ensayos definitivos. En estos se ejecutaron 20 ensayos de probetas con patrón discreto en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS (EIM). A continuación, se describen y detallan los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de la EIM. En el apéndice B se presentan las gráficas de carga-desplazamiento y esfuerzo-deformación unitaria de los ensayos preliminares realizados en el laboratorio de la EIC, y en el apéndice C se encuentran los datos arrojados por la máquina de ensayos del laboratorio de la EIC.

Los datos que se obtuvieron de la máquina de ensayos fueron la carga (P), el tiempo y el desplazamiento de la cabeza de la máquina (ΔL). Estos datos se exportaron a una hoja de Excel y se extrajeron los datos de carga y desplazamiento para cada instante de tiempo donde se tomaron las imágenes (cada un segundo).

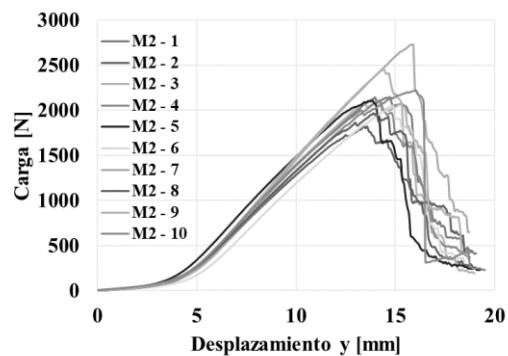
En las figuras 19 y 20 se muestran la gráfica de carga-desplazamiento de las mallas M1 y M2 respectivamente. De estas se evidencia que las mallas M2 soportan mayor carga a tensión y tienen un alargamiento mayor a las M1.

Figura 19

Curvas carga-desplazamiento mallas M1.

**Figura 20**

Curvas carga-desplazamiento mallas M2.



Para el cálculo de los esfuerzos (σ) se usó la ecuación (1), en la cual se divide P sobre el área de la sección transversal (A), la cual es la suma de las áreas aparentes de los hilos de trama. Esta área fue entregada por otro grupo de investigadores, compuesto por Valeria Laverde Sarmiento (estudiante de la Maestría en Ciencia de los Materiales) y los profesores José Miguel Benjumea Royero y Mauricio Rincón Ortiz de la Universidad Industrial de Santander. El área de la sección trasversal de un hilo fue de $0,749 \text{ mm}^2$. La deformación unitaria (ϵ) se calcula dividiendo ΔL sobre la longitud inicial (L_0), como se muestra en la ecuación (2).

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{2}$$

En las figuras 21 y 22 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación unitaria de las mallas M1 y M2 respectivamente.

Figura 21

Curvas esfuerzo-deformación unitaria mallas M1.

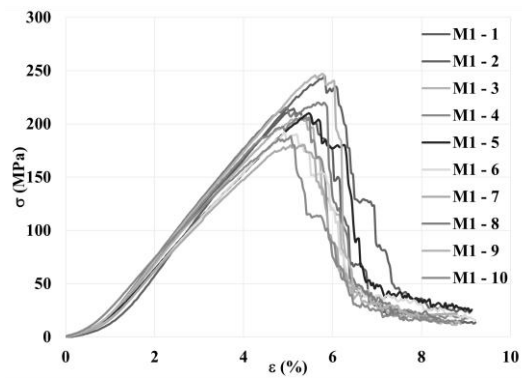
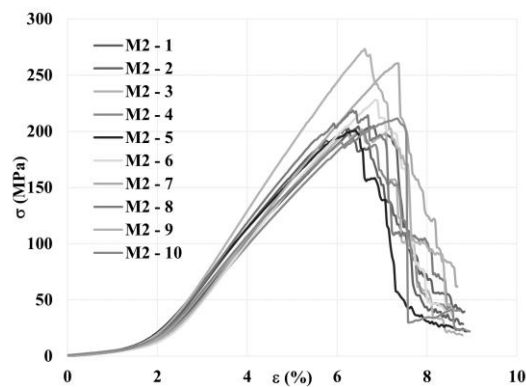


Figura 22

Curvas esfuerzo-deformación unitaria mallas M2.



A partir de los datos de esfuerzo y deformación unitaria se generó un modelo bilineal al calcular dos módulos de elasticidad (E). El primer módulo, denominado (E_{0-20}) se calculó hallando la pendiente con los datos hasta 20 % del esfuerzo último ($\Delta\sigma_{0-20}$) y deformación unitaria ($\Delta\varepsilon_{0-20}$) según la ecuación (3). En este rango se presenta el efecto “crimp” en las fibras sometidas a tensión, el cual consiste en una zona inicial en la cual no todas las fibras participan en la transmisión de tensión debido a que algunas están sueltas o aún permanecen curvas como resultado del proceso de extracción e hilado. El segundo módulo, (E_{20-80}), se calculó hallando la pendiente con los datos entre el 20 % y 80 % del esfuerzo último ($\Delta\sigma_{20-80}$), y deformaciones unitarias ($\Delta\varepsilon_{20-80}$), según la ecuación (4), el cual abarcó el rango de la zona elástico-lineal.

$$E_{0-20} = \frac{\Delta\sigma_{0-20}}{\Delta\varepsilon_{0-20}} \quad (3)$$

$$E_{20-80} = \frac{\Delta\sigma_{20-80}}{\Delta\varepsilon_{20-80}} \quad (4)$$

El cálculo de la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último (U_r), se realizó según la regla del trapecio compuesto. Se usó la ecuación (5) para obtener el área del trapecio acotado por dos pares ordenados consecutivos, hasta el esfuerzo máximo, se sumaron cada una de las áreas y se obtuvo U_r . Finalmente, las características mecánicas σ_u , ε_u , E y U_r se sintetizan en la tabla 2.

$$\text{Área}_n = (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \cdot \left(\frac{\sigma_{n+1} + \sigma_n}{2}\right) \quad (5)$$

Tabla 2*Propiedades a tensión de las mallas M1 y M2.*

Malla	σ_u (MPa)	ε_u (%)	E_{0-20} (GPa)	E_{20-80} (GPa)	U_r (MPa)
M1-1	244.9	5.8	2.66	5.37	6.47
M1-2	214.1	5.1	2.37	5.02	5.06
M1-3	207.6	5.3	2.82	4.47	5.34
M1-4	206.7	5.4	2.80	5.05	5.63
M1-5	209.8	5.5	2.68	4.52	5.39
M1-6	192	4.9	2.53	4.51	4.24
M1-7	180	5.5	2.35	4.45	4.88
M1-8	220	5.7	2.97	4.42	6.52
M1-9	247.1	5.8	3.11	4.88	6.82
M1-10	188.4	5.1	3.03	4.06	4.83
M2-1	204.6	6.8	1.26	4.66	5.78
M2-2	196.4	6.3	1.28	5.07	5.15
M2-3	201.8	6.6	1.26	4.68	5.34
M2-4	200.1	6.5	1.25	4.54	5.03
M2-5	200.6	6.4	1.38	4.68	5.39
M2-6	228.2	6.9	1.29	5.01	5.93
M2-7	260.4	7.3	1.45	5.17	7.44
M2-8	218.5	6.3	1.45	5.25	5.52
M2-9	273.1	6.6	1.70	5.99	6.88
M2-10	211.4	7.3	1.31	4.53	6.97

En la tabla 3 se resume el promedio de las propiedades enunciadas de la tabla 2 para cada tipo de malla. Al aumentar los hilos de trama aumentan las propiedades mecánicas σ_u , ε_u , E_{20-80} y U_r , excepto E_{0-20} . Lo anterior se evidencia al comparar las curvas de las figuras 19 y 20 o 21 y 22, ya que para las mallas M2 la curva inicial se aproxima más hacia el eje de deformación unitaria que en las mallas M1, generando un menor valor de E_{0-20} .

Tabla 3

Valores promedio de las propiedades a tensión de las mallas M1 y M2.

Malla	$\overline{\sigma_u}$ (MPa)	$\overline{\epsilon_u}$ (%)	$\overline{E_{0-20}}$ (GPa)	$\overline{E_{20-80}}$ (GPa)	$\overline{U_r}$ (MPa)
M1	211.03	5.4	2.73	4.67	5.52
M2	219.51	6.7	1.36	4.96	5.94
Dif. (%)	+4.0	+24.3	-50.1	+6.1	+7.7

5. Apoyo en el procesamiento de datos de CID

A continuación, se describe el paso a paso realizado en el software GOM Correlate 2019 para obtener los desplazamientos verticales en las mallas ensayadas. Hasta el momento de finalización de la pasantía de investigación no se ejecutaron los ensayos definitivos empleando el patrón estocástico, sin embargo, en la sección 5.2 se describe el procesamiento en el software para el patrón estocástico. Las figuras 23 y 24 resumen los pasos realizados para obtener los desplazamientos de los ensayos a tensión empleando el patrón discreto y estocástico, respectivamente. Estos pasos se detallan en las siguientes secciones para cada tipo de patrón.

Figura 23

Proceso realizado en GOM Correlate 2019 para el patrón discreto.

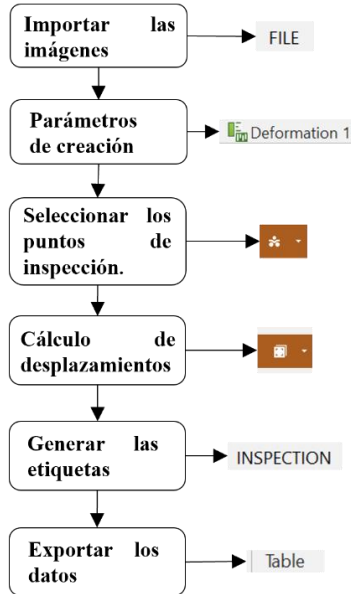
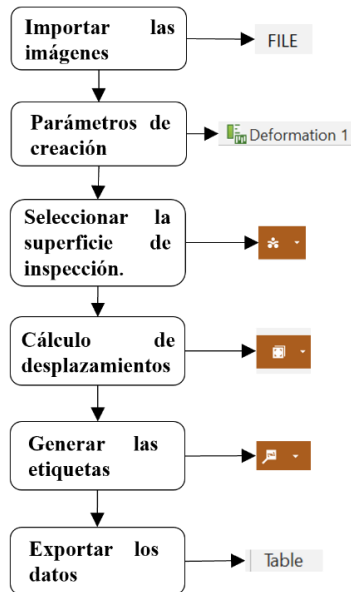


Figura 24

Proceso realizado en GOM Correlate 2019 para el patrón estocástico.



5.1 Patrón discreto

5.1.1 Importar las imágenes

Al abrir el programa se escogió la opción New Project, para importar las imágenes en el menú superior en “File” se escogió la opción “Import”, se seleccionaron las imágenes y se seleccionó la opción “Deformation Image”.

5.1.2 Parámetros de creación

En el menú izquierdo se dio click derecho en la opción “Deformation 1” y se seleccionó “Edit Creation Parameters”.

En el apartado de “Edit Point Component” se ajustó la variable “Quality” a “User-defined”, se hizo click en la figura al lado de “Quality”, y se definieron las variables “Method” como “Gray value adjustment”, “Max. Residual gray value adjustment” como 1 y “Minimum ellipse contrast” como “100 gray values”. El resto de los parámetros se dejaron por defecto.

En el apartado de “Edit Calibration” en “Define Scale” se definió la escala con la tecla Control + click izquierdo en dos puntos de la imagen, se escogieron los puntos para definir el diámetro interno de los puntos de inspección, agregando en “Point Distance” el valor de 5 mm.

5.1.3 Seleccionar los puntos de inspección

En “Define Component” se seleccionó la opción “Point Component”, con Control + click izquierdo se arrastró y abarcó el área donde se encuentran los puntos de inspección y se finaliza con “Create And Close”.

5.1.4 Calcular los desplazamientos

En “Check of all Visible Actual Elements” se seleccionó la opción de “Displacement” en el sentido de la carga, se cambió “Against fixed value” por “Against reference stage”, en el menú central abajo se seleccionó la opción “Select All” y finalmente en OK.

5.1.5 Generar las etiquetas

En el menú superior en “INSPECTION” se seleccionó la opción “Create Deviation Labels On Point Cloud”, en el menú central abajo se seleccionó la opción “Select All” y se finaliza en “Create And Close”.

5.1.6 Exportar los datos

Debajo del menú superior en la opción de “Table” se verificó que esté seleccionada la opción de “Values” y se seleccionó Export Table “Contents”.

En las figuras 25 y 26 se muestran los resultados de desplazamiento vertical obtenidos en el software GOM Correlate 2019 de la malla M1-5 para el instante correspondiente al 50% y 100% del esfuerzo máximo respectivamente.

Figura 25

Resultado de desplazamientos de la malla M1-5 para $\sigma/2$.

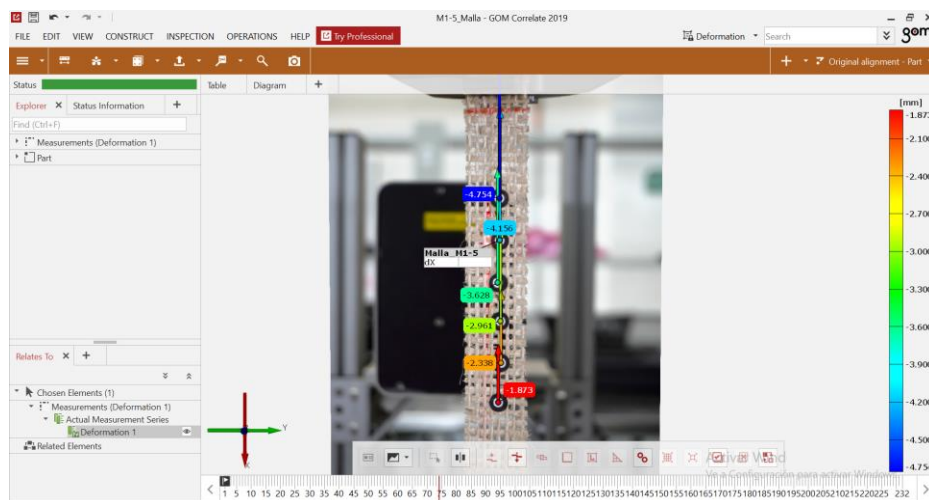
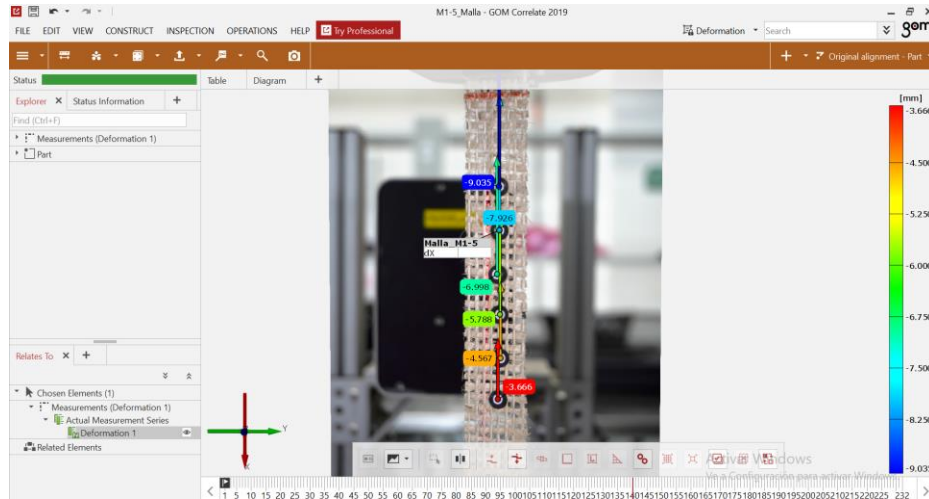


Figura 26

Resultado de desplazamientos de la malla M1-5 para σ_u .



5.2 Patrón estocástico

5.2.1 Importar las imágenes

Al abrir el programa se escogió la opción de “New Project”, para importar las imágenes en el menú superior en “FILE” se escogió la opción Import, se seleccionaron las imágenes y se seleccionó la opción “Deformation Image”.

5.2.2 Parámetros de creación

En el menú izquierdo se dio click derecho en la opción “Deformation 1” y se seleccionó “Edit Creation Parameters”. En el apartado de “Edit Point Component” se dejó la variable “Quality” con “High accuracy”.

En el apartado de “Edit Calibration” en “Define Scale” se definió la escala con la tecla Control + click izquierdo en dos puntos de la imagen, se escogieron los puntos para definir el ancho de la probeta, la cual fue medida con el calibrador.

5.2.3 Seleccionar la superficie de inspección

En “Define Component” se seleccionó la opción “Surface” y se cambió “Surface” por “Pattern quality”. En la barra de tareas inferior central se seleccionó la opción “Select/Deselect Polygon” y se procedió a dar click izquierdo en las esquinas de la probeta que abarcaran el patrón, en la última esquina se dio click derecho y se finalizó con la opción “Create And Close”.

5.2.4 Cálculo de desplazamientos

En “Check of all Visible Actual Elements” se seleccionó la opción “Displacement” en el sentido de la carga, se cambió “Against fixed value” por “Against reference stage”, en el menú central abajo se seleccionó la opción “Select All” y finalmente en OK.

5.2.5 Generar las etiquetas

En el menú superior en “Pointwise Inspection” se seleccionó “Deviation Labels”, se ubicaron los puntos con click izquierdo sobre los hilos de urdimbre y se finalizó con click derecho.

5.2.6 Exportar los datos

Debajo del menú superior en la opción de “Table” se verificó que esté seleccionada la opción de “Values” y se seleccionó “Export Table Contents”.

6. Conclusiones

De la revisión literaria de la caracterización de fibras, hilos y mallas de fique se identificó que las palabras clave más empleadas son “natural fibers”, “fique fiber” y “mechanical properties”, el país y organización que más documentos ha publicado es Colombia y el Grupo Sobre Nuevos Materiales de la UPB, respectivamente, mientras que el autor más citado es Gañán. Esto demuestra una marcada tendencia de investigación de caracterización de fibras de fique a tensión en Colombia, teniendo la organización y autor líderes en esta temática.

Del apoyo a la revisión bibliográfica de la aplicación de CID en la caracterización de mallas naturales o sintéticas a tensión se identificó que las palabras clave más empleadas son “digital image correlation”, “TRCC”, “FRCM”, “masonry” y “mechanical properties”, los países que más documentos han publicado y donde pertenecen los autores con mayor número de citas son China e Italia, y los autores con mayor número de documentos y citas son Yao Y., Mobasher B., Zhu D., De Felice G. y De Santis S. De esta revisión se identificó que la técnica de CID ha sido empleada mayormente en el continente europeo, en China y Estados Unidos.

Del apoyo a la preparación de las probetas se usó resina epóxica como método de agarre, en el cual no presentó deslizamiento o ruptura de la probeta en la región de agarre. El montaje preparado para aplicar CID fue adecuado, ya que al procesar las imágenes en el software se obtuvieron los desplazamientos verticales de todas las imágenes.

De la caracterización mecánica de las mallas de fique a tensión empleando los datos de desplazamiento y carga de la máquina de ensayos se observa un aumento en las propiedades a tensión como σ_u , ε_u , $E_{(20-80)}$ y U_r al aumentar el número de hilos en la dirección de la carga. El σ_u , ε_u , $E_{(0-20)}$, $E_{(20-80)}$ y U_r promedio de las mallas M1 es de 211.03 MPa, 5.4%, 2.73 GPa, 4.67

GPa y 5.52 MPa respectivamente, mientras que para las mallas M2 estas mismas son de 219.51 MPa, 6.71 %, 1.36 GPa, 4.96 GPa y 5.94 MPa.

Al emplear la técnica CID en los ensayos definitivos, se lograron obtener los desplazamientos verticales de las mallas de fique con patrón discreto, determinando que la técnica CID es una buena alternativa a los métodos convencionales empleados para determinar las propiedades mecánicas a tensión.

Referencias Bibliográficas

- Amoy Netto, P., Altoé, G. R., Muylaert Margem, F., de Oliveira Braga, F., Monteiro, S. N., & Margem, J. I. (2016). Correlation between the Density and the Diameter of Fique Fibers. *Materials Science Forum*, 869, 377–383. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.869.377>
- Angarita Ribero, O. G., & Uribe Roa, J. S. (2011). *Diseño óptimo de refuerzo de mampostería estructural usando fibras de furcraea andina “ Fique .”* Universidad Industrial de Santander.
- Camargo, M., & Garcia, D. (2017). *Material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales para la fabricación de tenso-estructuras* [Proyecto de grado]. Universidad Industrial de Santander.
- Contreras, M. F., Hormaza, W. A., & Marañón, A. (2009). Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1(1), 57–67. www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html
- D’anna, J., Amato, G., Chen, J., Minafò, G., & la Mendola, L. (2020). Effects of different test setups on the experimental tensile behaviour of basalt fibre bidirectional grids for FRCC composites. *Fibers*, 8(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/fib8110068>
- Herrera Ortiz, J. O. (2020). *Desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para el empleo de estructuras en ambiente agresivo* [PhD Thesis]. Universidad Industrial de Santander.

- Higuera Cogua, D. Y. (2011). *Evaluación preliminar del comportamiento a tensión de hilos y mallas de fique recubiertos con nanopartículas de hierro*. Universidad Industrial de Santander.
- 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, 1–2. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127729>
- Mesa Palomino, E. (2016). *Tratamiento químico y caracterización de fibras naturales de yute y fique como agentes de refuerzo de poliuretano* (Vol. 106, Issue 1) [Universidad Industrial de Santander].
<http://www.bssaonline.org/content/95/6/2373%5Cnhttp://www.bssaonline.org/content/95/6/2373.short%0Ahttp://www.bssaonline.org/cgi/doi/10.1785/0120110286%0Ahttp://gji.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/gji/ggv142%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/s00024-01>
- Perrier, A., de Vasconcellos, D. S., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., & Mellier, D. (2015). Full-field measurement at the weave scale in hemp/epoxy composite using digital image correlation. *Polymers and Polymer Composites*, 23(9), 589–591. <https://doi.org/10.1177/096739111502300901>
- Pinto Pradilla, C., & Figueroa Quintero, L. P. (2016). *Determinación del comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra de fique a partir de su resistencia a la tracción, flexión y compresión* [Universidad Industrial de Santander].
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26849997%0Ahttp://doi.wiley.com/10.1111/jne.12374>
- Puentes Rojas, Á. F., & Soto Ortégón, J. A. (2018). *Material compuesto base mortero y malla de fique como refuerzo de vigas de concreto*. Universidad Industrial de Santander.

Tekieli, M., de Santis, S., de Felice, G., Kwiecień, A., & Roscini, F. (2017). Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing. *Composite Structures*, *160*, 670–688.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.096>

Van Eck, N. J.; Waltman, L (2022). VOSviewer 1.6.18. [En línea] Disponible en

<https://www.vosviewer.com/>

Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Tablas de revisión literaria

Apéndice B Curvas carga - desplazamiento y esfuerzo – deformación unitaria

Apéndice C Datos de la máquina de los ensayos preliminares