

Estudio de las propiedades fisicomecánicas de tejidos naturales recubiertos con compuestos termoestables de óxido de grafeno y resina de poliuretano para el reforzamiento de materiales cementicios

Daniel Andrés Rojas Herrera y Valentina Sánchez Santana

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Directora

Luz Marina Ballesteros Rueda

Doctora en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Codirector

German Adolfo Díaz Ramírez

Doctor en Ingeniería de materiales

Nelson Gutiérrez Niño

Magister en Ingeniería de materiales

Universidad industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

## Dedicatoria

“A mis padres, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor fortaleza. A Michael, gracias por su invaluable ayuda y compañía a lo largo de esta travesía. Este trabajo es el fruto del esfuerzo compartido de todos aquellos que creyeron en mí.

Que este trabajo sea más que un documento académico, que sea un recordatorio de que los sueños, con esfuerzo y determinación, se hacen realidad.”

Valentina Sanchez Santana

“doy gracias a mi familia, padres y hermanas, que han sido un gran apoyo a lo largo de mi vida universitaria, especialmente a mi madre, que fue un apoyo, un ejemplo y una motivación a lo largo de mi carrera. Agradezco a todos quienes me acompañaron y colaboramos mutuamente, mis compañeros de carrera y amigos, compañeros de laboratorio, y quienes me enseñaron a forjar quien soy hoy”

Daniel Andrés Rojas Herrera

### **Agradecimientos**

A la directora Luz Marina Ballesteros Rueda y codirectores de proyecto de grado German Adolfo Díaz Ramírez y Nelson Gutiérrez Niño, por su invaluable acompañamiento y apoyo en cada etapa de este proyecto. Nuestra gratitud se extiende a los grupos de investigación LEAM y CICAT, quienes nos brindaron la oportunidad de colaborar con ellos. Un reconocimiento especial a Arteconcreto, los laboratorios de ensayos mecánicos de la escuela de mecánica y al técnico Jaime Alberto Cadena Pardo de la escuela de ingeniería civil, por su generosa ayuda con la realización de pruebas a lo largo de este camino. Este proyecto se ha enriquecido gracias a la colaboración y respaldo de cada uno de ustedes.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	12
1    Objetivos .....	14
1.1    Objetivo General .....	14
1.2    Objetivos Específicos .....	14
2    Estado del Arte .....	15
3    Metodología .....	19
3.1    Adecuación del tejido de fique .....	19
3.2    Obtención de la resina de PUOG .....	21
3.3    Fase 1: Protocolo para la aplicación de la resina PUOG .....	22
3.4    Fase 2: Influencia del grado de recubrimiento de los tejidos con la resina sobre la resistencia interfacial IFSS del compuesto mortero/refuerzo de tejidos de fique .....	23
3.5    Fase 3: Influencia del recubrimiento sobre la resistencia a la tracción del compuesto mortero/tejidos de fique reforzado .....	24
4    Resultados .....	26
4.1    Protocolo para la aplicación de la resina PUOG .....	26
4.1.1 <i>Gravimetría</i> .....	26
4.1.2 <i>Espectroscopia ATR-FTIR</i> .....	26
4.1.3 <i>Pruebas de tracción</i> .....	29

4.2	Influencia del grado de recubrimiento de los tejidos con la resina sobre la resistencia interfacial IFSS del compuesto mortero/refuerzo de tejidos de fique.....	31
4.2.1	<i>Pruebas de extracción</i> .....	31
4.2.2	<i>Microscopia Óptica de la Zona de Falla</i> .....	32
4.3	Influencia del recubrimiento sobre la resistencia a la tracción del compuesto mortero/tejidos de fique reforzado .....	34
5	Conclusiones .....	36
	Referencias Bibliográficas .....	37
	Apéndices.....	39

### Lista de tablas

Tabla 1 <i>Efecto del tratamiento de fibras sobre la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad (Mendoza et al., 2011; Muñoz-Velez et al., 2014)</i> .....	16
Tabla 2 <i>Cantidad de resina requerida por capa de recubrimiento aplicada en 0,243 m<sup>2</sup></i> .....	26
Tabla 3 <i>Resistencia a la tracción de tejidos de fique crudos, con pretratamiento, con una, dos y tres capas de recubrimiento. Asimismo, la desviación estándar y porcentaje coeficiente de variación</i> .....	30
Tabla 4 <i>Pruebas preliminares de pull-out con recubrimiento</i> .....	31
Tabla 5 <i>Resistencia al corte interfacial del tejido de fique con pretratamiento, con una, dos y tres capas de recubrimiento</i> .....	32
Tabla 6 <i>Datos obtenidos de los ensayos de tracción sobre el material compuesto concreto/tejido de fique</i> .....	35
Tabla 7 <i>Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de tejidos de fique crudos, con pretratamiento y con una, dos y tres capas de recubrimiento.</i> .....	39
Tabla 8 <i>Proporciones usadas para la preparación del concreto usado en las pruebas de extracción y tracción compuesta</i> .....	40
Tabla 9 <i>Comparación en gramos de agua absorbida entre tejido con recubrimiento (Muestra 1) y tejido crudo (Muestra 2)</i> .....	47

### Lista de figuras

Figura 1 <i>Esquema metodológico del proyecto de investigación</i> .....	19
Figura 2 <i>Esquemización del pretratamiento realizado al tejido de fique para el posterior recubrimiento</i> .....	20
Figura 3 <i>Esquema de la probeta fabricada con el tejido de fique para ser usada en la prueba de tracción</i> .....	22
Figura 4 <i>Representación del equipo utilizado para la realización de la prueba de extracción (Pull-out)</i> .....	23
Figura 5 <i>Esquema de las probetas de concreto con la geometría tipo “dog-bone” utilizadas en las pruebas de tracción compuesta</i> .....	25
Figura 6 <i>Espectrograma ATR-FTIR de tejidos sin tratar (TST) y tejidos con pretratamiento (TP)</i> .....	27
Figura 7 <i>Espectrograma ATR-FTIR de la resina PUOG (R), del de diisocianato de difenilmetano (MDI) y óxido de grafeno (OG)</i> .....	28
Figura 8 <i>Espectrogramas ATR-FTIR de tejidos con pretratamiento sin recubrir (TSC), tejidos con una, dos y tres capas (TC1, TC2 y TC3)</i> .....	29
Figura 9 <i>Imágenes obtenidas del estereoscopio correspondientes al área de falla de la extracción del fique sin recubrimiento (crudo), las imágenes a y b corresponden a la falla en el concreto, c y d corresponden a la falla sobre la fibra</i> .....	33
Figura 10 <i>Imágenes obtenidas del estereoscopio correspondientes al área de falla de la extracción del fique de una a tres capas, las imágenes a la izquierda corresponden a la falla en el concreto, y las de la derecha corresponden a la falla sobre la fibra.</i> .....	34
Figura 11 <i>Resistencia a la tracción tejidos de fique crudo (sin tratar)</i> .....	41
Figura 12 <i>Resistencia a la tracción tejidos de fique crudo (con pretratamiento)</i> .....	41

Figura 13 <i>Resistencia a la tracción tejidos de fique con una capa de recubrimiento</i> .....	42
Figura 14 <i>Resistencia a la tracción tejidos de fique con dos capas de recubrimiento</i> .....	42
Figura 15 <i>Resistencia a la tracción tejidos de fique con tres capas de recubrimiento</i> .....	42
Figura 16 <i>Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique crudos pretratados (FC)</i> .....	43
Figura 17 <i>Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique con una capa de recubrimiento (FR1)</i> .....	43
Figura 18 <i>Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique con dos capas de recubrimiento (FR2)</i> .....	44
Figura 19 <i>Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique con tres capas de recubrimiento (FR3)</i> .....	44
Figura 20 <i>Comparación de la resistencia a la tracción entre material compuesto concreto/ tejidos de fique sin recubrimiento con relación al concreto.</i> .....	45
Figura 21 <i>Comparación de la resistencia a la tracción entre material compuesto concreto/ tejidos de fique con dos capas de recubrimiento con relación al concreto</i> .....	46
Figura 22 <i>Prueba preliminar cantidad de agua retenida (Quinto remojo)</i> .....	48

**Lista de apéndices**

Apéndice A: Cálculo de la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad tejidos de fique .....	39
Apéndice B: Composición del concreto utilizado .....	40
Apéndice C: Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para tejidos de fique .....	41
Apéndice D: Resistencia al corte interfacial de tejidos de fique (pruebas de extracción) .....	43
Apéndice E: Comparación resistencia a la tracción del material compuesto concreto/tejidos de fique con y sin recubrimiento .....	45
Apéndice F: Comparación datos de absorción de agua en tejidos de fique .....	47

### Resumen

**Título:** Estudio de las propiedades fisicomecánicas de tejidos naturales recubiertos con compuestos termoestables de óxido de grafeno y resina de poliuretano para el reforzamiento de materiales cementicios.\*

**Autor:** Daniel Andrés Rojas Herrera, Valentina Sánchez Santana.\*\*

**Palabras clave:** óxido de grafeno, tejidos de fique, material compuesto, resina PUOG.

El concreto es una mezcla conglomerada compuesta de cemento y agregados ampliamente usado en la construcción por sus capacidades mecánicas y su durabilidad. Este suele ser reforzado con acero corrugado para mejorar su capacidad de deformación. Sin embargo, su uso puede ser costoso en ciertas aplicaciones. En el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación de las propiedades mecánicas de un material de refuerzo alternativo, consistente en fibras de fique recubierto con una resina de poliuretano y óxido de grafeno (PUOG), con el objetivo de determinar el grado de influencia sobre las características mecánicas del concreto.

La metodología se compuso de tres fases: en primer lugar, establecer el protocolo para obtener distintos grados de recubrimiento (cantidad de capas) y evaluar la influencia mediante pruebas de tracción, análisis gravimétrico y espectroscopía FTIR. En segundo lugar, el análisis de resistencia al corte interfacial por medio de ensayos de extracción (pull-out) y caracterización de las interfases usando microscopía óptica. Finalmente, pruebas de tracción del compuesto refuerzo de tejido de fique – concreto.

Considerando los resultados obtenidos en la fase 1 y 2, el grado de recubrimiento de dos capas logró una mayor adhesión al concreto y mayor resistencia a la tracción y, por tanto, se determinó utilizar fibras de fique modificadas con 2 capas de PUOG para la siguiente fase. En la fase de prueba de tracción compuesta se obtuvo una resistencia máxima de 3,601 N.

Se concluyó que el recubrimiento PUOG de dos capas mejora la adhesión entre los tejidos de fique y la matriz cementicia, además de un aumento en la resistencia a la tracción del material con respecto al tejido de fique crudo. Esta investigación demuestra que el fique recibe una mejora significativa como material de refuerzo al recubrirse con la resina PUOG.

---

\* Proyecto de Grado, Modalidad Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directora: Luz Marina Ballesteros Rueda, ingeniera química, M Sc., Ph.D. codirectores: Germán Adolfo Díaz Ramírez, Diseñador Industrial, M Sc., M Sc. Nelson Gutiérrez Niño, M Sc. Ingeniero de Materiales, Químico.

### Abstract

**Title:** Study of physicommechanical properties of natural fabrics coated with thermosetting compounds of Graphene oxide and polyurethane resin for reinforcement of cement composite materials.<sup>†</sup>

**Author:** Daniel Andrés Rojas Herrera, Valentina Sánchez Santana. <sup>\*\*</sup>

**Key words:** Graphene oxide, fique fabric, composite material, PUOG resin.

Concrete is a conglomerate mixture composed of cement and aggregates widely used in construction due to its mechanic capacities and its durability. It is usually reinforced with corrugated steel to improve its deformation capacity; however, its usage can become expensive in certain applications. The present research work evaluates the mechanical properties of an alternative support material for precast concrete, composed of fique fibers covered with polyurethane resin and graphene oxide (PUOG), with the objective of determining the contribution of the mechanical characteristics of concrete.

The methodology consisted of three phases, the first phase established the protocol for obtention of different coating grades, the second phase was the analysis of resistance to interfacial shear strength was done via pull-out extraction tests and the later characterization of the interface via optic microscopy. Finally, the realization of tensile test of the composite of fique and concrete.

Considering the results obtained in phase 1 and 2, the two layers of coating grade achieved greater adhesion to concrete and greater tensile strength and, due to the results, it was determined to use fabric with two layers of coating for the realization of the next phase. In the phase of the tensile strength of the composite material, a maximum tensile strength of 3,601 N was achieved.

It was concluded that the PUOG coating of two layers strengthen the adhesion between concrete and fique fabric, while also providing an increase in the tensile resistance of the composite in comparison to fique fibers without coating. This research proves that fique fibers get a better performance as a reinforcement material while it is coated with PUOG resin.

---

<sup>†</sup> Bachelor thesis, investigative thesis.

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering. Director: Luz Marina Ballesteros Rueda, Chemical Engineer, M Sc., Ph.D. Codirectors: Germán Adolfo Díaz Ramírez, Industrial Designer, M Sc., MSc. Nelson Gutiérrez Niño, M Sc. Engineer of Materials, Chemist.

## Introducción

El concreto es una mezcla conglomerada compuesta de cemento y agregados de grava y arena que, después de mojarse, tiene la propiedad de endurecerse. Gracias a sus propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y dureza, la facilidad para obtener sus componentes y su costo relativamente bajo es el material predilecto para la construcción, donde se varían sus proporciones de mezcla y los aditivos para obtener propiedades que se ajusten mejor al medio ambiente al que estará expuesta la estructura. (MacGregor, J. G., Wight, J. K., Teng, S., & Irawan, 1997)

Si bien el concreto es un material idóneo para la construcción, la baja resistencia a la tracción y a los esfuerzos internos hacen necesarios que precise de un refuerzo para mejorar su resistencia a la tracción. En la actualidad, se prefiere el uso de acero corrugado y fibras sintéticas de refuerzo para mejorar las propiedades del material ante las especificaciones de carga. (Brandt, 2008)

Las fibras de tipo vegetal se han usado en el reforzamiento de materiales desde tiempos antiguos, donde se usaban fibras de plantas y a veces animales para reforzar construcciones de arcilla. Posteriormente, se cambió al uso de asbesto, y otras como plásticos, vidrios y aceros. El uso de fibras como el fique al adicionarse al concreto ha demostrado una mejora en la capacidad de deformación del concreto y reducción de su fragilidad. Sin embargo, no exhibe la suficiente resistencia a factores biológicos, climáticos y poca adherencia para su uso industrial. (Moraño et al., 2005)

En los últimos años se ha investigado sobre la afinidad de las fibras naturales con resinas poliméricas, donde además de la mejora estructural, se destaca el bajo costo y la baja emisión de dióxido de carbono de estas comparadas con fibras sintéticas, como las de polipropileno, las cuales producen 2,06 kg de CO<sub>2</sub> comparado al 0,57 kg de CO<sub>2</sub> producido por las fibras naturales. Esto ha llevado a un mayor interés en el uso de fibras naturales como alternativa sostenible en el reforzamiento de concreto, mostrando que la combinación de fibras naturales con resinas poliméricas ofrece una serie de beneficios tanto desde el punto de vista técnico como ambiental. (De Moya Abril, 2021)(Goulart et al., 2011)

A pesar de que el material predilecto es el acero, los altos costos que este genera en temas de protección y evaluación de la integridad de la estructura debido a la corrosión lo convierten en una opción de material ineficiente en ciertos ambientes. Estos desafíos relacionados con el acero corrugado han destacado la necesidad de buscar nuevos materiales que sean más eficientes en determinados entornos. (Attia et al., 2022)

En este sentido, las fibras naturales recubiertas con resinas poliméricas han surgido como una alternativa prometedora para el refuerzo del concreto, ya que no solo ofrecen una mejor resistencia al entorno, sino que también son fácilmente obtenibles a partir de recursos naturales y renovables. En el presente proyecto se exploran las ventajas y el potencial de los tejidos de fique recubiertos con compuestos termoestables de óxido de grafeno y resina de poliuretano como alternativa sostenible para mejorar la vida útil de las estructuras y disminuir su huella de carbono.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Estudiar el efecto del recubrimiento con compuestos termoestables de óxido de grafeno y resina de poliuretano en los tejidos de fique, sobre las propiedades físico-mecánicas de la matriz cementicia

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Establecer el protocolo para la aplicación de la resina PUOG que garantice la uniformidad y homogeneidad del recubrimiento del tejido de fique
- Determinar la Influencia del recubrimiento sobre la resistencia a la tracción del compuesto mortero/tejidos de fique reforzado
- Evaluar la influencia del grado de recubrimiento de los tejidos con la resina sobre la resistencia interfacial IFSS (pull out y microscopia óptica) del compuesto mortero/refuerzo de tejidos de fique

## 2 Estado del Arte

La aplicación de materiales reforzados no es nueva, sino que se lleva haciendo por mucho tiempo. El uso de materiales reforzados por fibras se enfoca actualmente en torno a la aeronáutica e ingeniería civil, donde el uso de fibras largas y continuas permite una muy elevada resistencia siempre y cuando las fibras se alineen con la carga aplicada. (Gullón & Fernandez, n.d.)

Se han realizado estudios donde se comparan las fibras sintéticas y naturales como refuerzos en compuestos cementicios. Estos estudios resaltan que se debe seguir investigando sobre el tratamiento que se le debe realizar a las fibras naturales para mejorar sus propiedades y estandarizar su dosificación para ser utilizadas como refuerzo en un compuesto cementicio, ya que se contempla como una alternativa viable. (Moraño et al., 2005) (De Moya Abril, 2021)

Debido a la naturaleza hidrofílica del fique es conveniente hacer un pretratamiento antes de utilizarlos como refuerzo ya que al estar expuesto a un ambiente húmedo y alcalino puede conducir a la degradación de las fibras naturales y a un deterioro de las propiedades mecánicas del compuesto. Para prevenir la degradación de las fibras de fique se han realizado diferentes pretratamientos con el fin de eliminar la lignina y la hemicelulosa, que son compuestos que propician el deterioro. (Alfonso et al., 2021) (Coudert, 2020)

Se han estudiado pretratamientos de alcalinización y recubrimiento de fibras en los que se realiza un secado para retirar la humedad a 100°C por 20 horas, seguido a esto se realiza una alcalinización con NaOH al 5% donde recomiendan un porcentaje más bajo para disminuir su agresividad y evitar la degradación de la fibra o un recubrimiento con parafina líquida. Ambos pretratamientos presentan una disminución en la presencia de lignina y hemicelulosa junto con un

aumento de la impermeabilidad, en especial el recubrimiento de parafina, sin embargo, este recubrimiento afecta de forma negativa la adhesión de la matriz concreto-refuerzo. (Coudert, 2020)

Asimismo, está la opción de realizar la combinación de las dos formas de pretratamiento (alcalinización y recubrimiento). El pretratamiento consiste en una alcalinización de NaOH al 2%, se prosigue a realizar una silanización con silano-tris (2-methoxyethoxy) y por último una pre-impregnación con polietileno de alta densidad. Con este pretratamiento se logró evidenciar una disminución de hemicelulosa y lignina sin causar una degradación, logrando una mayor concentración de la celulosa, componente que otorga las características mecánicas deseadas, y con la silanización y pre-impregnación con polietileno de alta densidad disminuir la polaridad de la fibra, característica que propicia la aplicación de sustancias apolares sobre la fibra. (Muñoz-Velez et al., 2014)

Según estudios (Muñoz-Velez et al., 2014) (Mendoza et al., 2011) se ha realizado ensayos utilizando mordazas neumáticas especiales para ensayos de fibras para determinar la resistencia a la tracción de distintos tipos de fibras y su potencial aporte mecánico al usarse en un material compuesto, especialmente tras un pretratamiento similar al descrito previamente. Estos ensayos se realizaron con cuatro tipos de fibras (fique crudo, con alcalinización previa, alcalinización e impregnación de silano y polietileno, y fibras de polipropileno), tal como se ilustra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Efecto del tratamiento de fibras sobre la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad (Mendoza et al., 2011; Muñoz-Velez et al., 2014)*

	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>
Fique crudo	263,5	8,6
Pretratamiento 1	302,5	8,3
Pretratamiento 2	310,1	9,7
Polipropileno	689,5	4,2

Las fibras de fique con el pretratamiento 2 (alcalinización y recubrimiento con silano y polietileno) presentan un mayor módulo de elasticidad entre los cuatro tipos de fibra, y se logró una mejora de la resistencia a la tracción en comparación a las de fique sin tratamiento.

Por otra parte, las propiedades mecánicas de la matriz cementicia pueden verse afectadas dependiendo del porcentaje de fibra que se agregue como refuerzo, especialmente la resistencia a la tracción y compresión. Bohórquez et al. en ensayos de tracción indirecta evidenció que en vigas sin fibras la carga promedio es de 23,5 kN y la resistencia a la flexión es de 3,1 MPa. Asimismo, en vigas con porcentajes de fibras de 1,0 y 1,5% del volumen total de la mezcla se registró una carga promedio de 28,03 y 30,7 kN y con una resistencia a la flexión de 3,7 y 4,2 MPa respectivamente. (Bohórquez Jonny Jiménez, 2011) La resistencia a la tracción aumento con los dos porcentajes de fibra, lo cual es la característica deseable para la mejora de la capacidad del concreto para resistir esfuerzos internos.

La influencia que tiene el porcentaje de adición de fibra sobre la resistencia a la compresión se evaluó utilizando muestras de cilindros de concreto de 0,3 m de alto y 0,3 m de diámetro y se obtuvieron resultados con una carga promedio de 514,03 KN y una resistencia a la compresión de 69,2 MPa sin adición de fibras, mientras que con porcentajes de fibras de 1,0 y 1,5% del volumen total de la mezcla se registró una carga promedio de 295,8 y 377,5 KN y una resistencia a la compresión de 39,8 y 50,8 MPa respectivamente. (Bohórquez Jonny Jiménez, 2011) La resistencia a la compresión, necesaria para el uso de la matriz como material estructural, presenta una disminución inicial al añadir la fibra, pero se recupera dicha resistencia al añadir un mayor porcentaje.

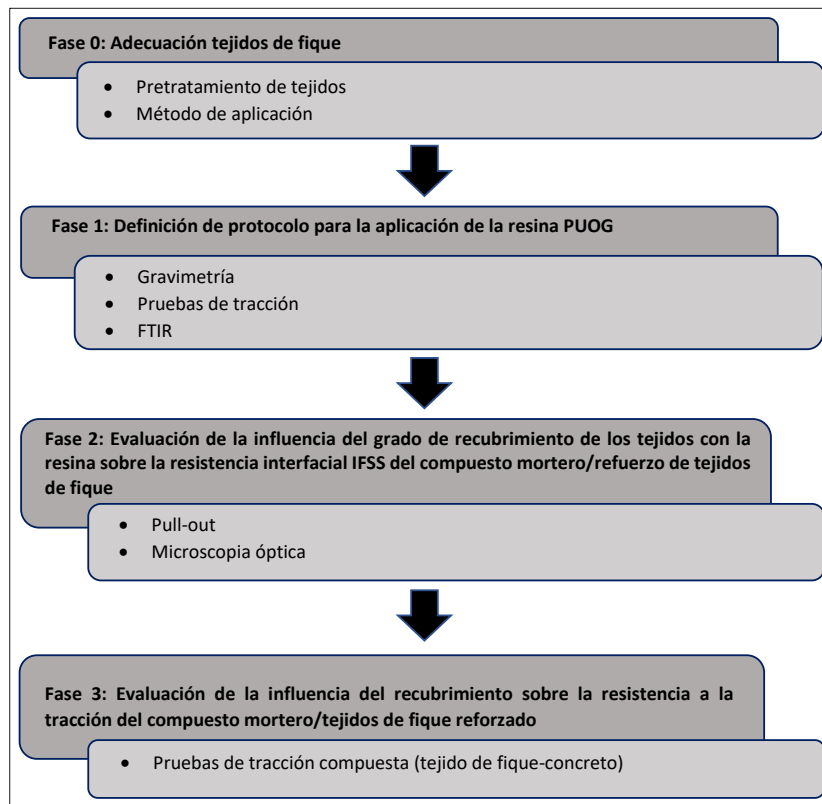
En la presente investigación se propone la modificación superficial de tejidos de fique mediante resina PUOG con el fin de mejorar la adhesión de las fibras de fique al concreto y la resistencia a la tracción del material compuesto mortero/refuerzo de tejidos de fique.

### 3 Metodología

La metodología llevada a cabo se organizó en 3 fases principales: la primera fase consistió en la caracterización para lograr diferentes recubrimientos (# capas) y establecer el protocolo. La segunda fase consistió en pruebas de extracción para evaluar la resistencia interfacial al corte que provee cada capa, finalmente, en la tercera fase se realizaron pruebas de tracción compuesta con la intención de cuantificar el aporte a la resistencia a la tensión provista por el refuerzo cementicio. La metodología, justo con el proceso de preparación de muestras, se expone en la Figura 1.

#### Figura 1

*Esquema metodológico del proyecto de investigación*



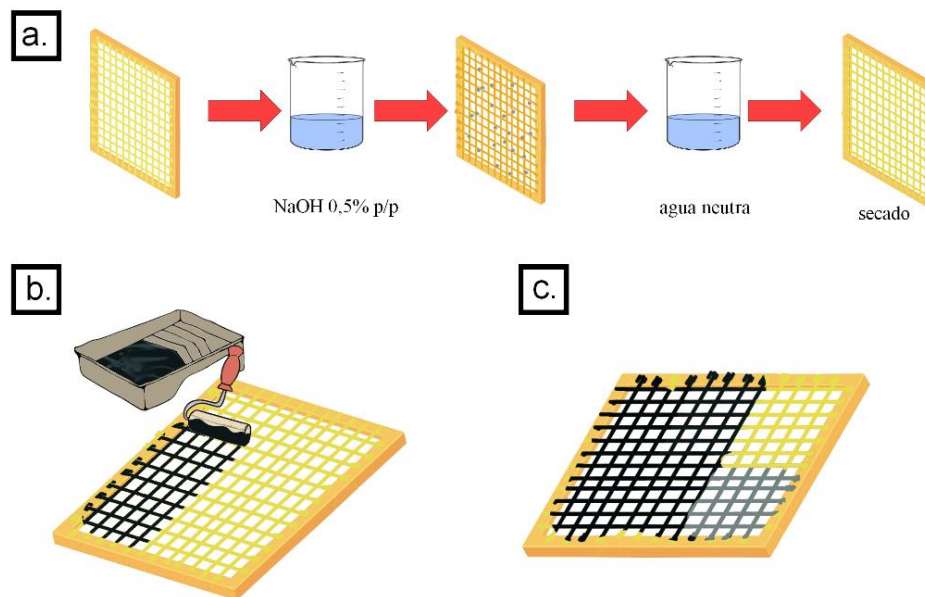
#### 3.1 Adecuación del tejido de fique

La preparación de las muestras (fase cero) consistió en el pretratamiento realizado a los tejidos de fique, la producción de óxido de grafeno y la producción y aplicación de la resina de

poliuretano y óxido de grafeno (PUOG). El pretratamiento ilustrado en la Figura 2.a, fue realizado con el objetivo de retirar los aceites usados para fabricar el tejido de fique, polímeros como la lignina y la hemicelulosa, y así mejorar su resistencia a la tracción en su posterior uso como material de refuerzo (Coudert, 2020). Para esto se hizo uso de una solución de NaOH al 0,5% p/p en agitación continua por un periodo de 20 minutos, para un posterior proceso de múltiples enjuagues con agua neutra hasta lograr una disminución del pH de la fibra mojada a un valor de 8, momento en el cual se inició la etapa de secado, ilustrada en la Figura 2.a.

### Figura 2

*Esquematización del pretratamiento realizado al tejido de fique para el posterior recubrimiento*



*Nota. En cada imagen se representa de la siguiente forma: a. La sumersión, limpieza en solución de 0,5% de NaOH y el secado del tejido de fique, b. La aplicación Resina de poliuretano preparada a partir de diisocianato y óxido de grafeno, c. Esquema del tejido de fique con diferentes capas de recubrimiento*

Después del proceso de secado, se debió asegurar que el tejido quedara tensado sobre un bastidor para la aplicación de la resina. El tejido se armó en bastidores de 30x56 cm templado con grapas para madera, procurando la alineación de las fibras. Este paso puede ser realizado antes o

después del pretratamiento, siempre que se tenga un recipiente suficientemente grande para sumergir el tejido templado por el bastidor.

### 3.2 Obtención de la resina de PUOG

La obtención de óxido de grafeno se basó en tres etapas: oxidación del grafito, lavado y dispersión para obtener óxido de grafeno, y secado del óxido de grafeno. Para la obtención de óxido de grafito se utilizó el método Hummers modificado, haciendo uso de grafito con un tamaño de partícula de 5  $\mu\text{m}$  y 98% de pureza. En un vaso de precipitado de 250 ml se adicionó 1 g de grafito y 50 ml de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La mezcla se mantuvo en un proceso de agitación a 500 rpm y luego se dio un tiempo de homogenización de aproximadamente 15 minutos, posterior a esto se añadió el agente oxidante, en este caso permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ). Con el fin de purificar el óxido de grafito una vez finalizados los procesos de oxidación se realizaron múltiples centrifugaciones y lavados con agua destilada hasta observar que el pH no varía. (Lorena Barajas-Rueda et al., 2019)

Una vez purificado el óxido de grafito se dispersó en 250 ml de agua y se sometió a un proceso de ultrasonido empleando una sonda Sonics VCX-750 para la conversión de óxido de grafito a óxido de grafeno, que posteriormente se liofilizó con el fin de obtener de óxido de grafeno libre de agua.

La resina de poliuretano usada, ilustrada en la Figura 2.b, se preparó a partir de la mezcla de diluyente para poliuretanos, diisocianato, y óxido de grafeno. La mezcla anterior se debe preparar 10 minutos (agitación) antes de ser dispersada sobre el tejido.

La resina se aplicó uniformemente por medio de un rodillo tal como se puede apreciar en la Figura 2.b, el cual se escogió a partir de pruebas preliminares. Los otros métodos probados: la

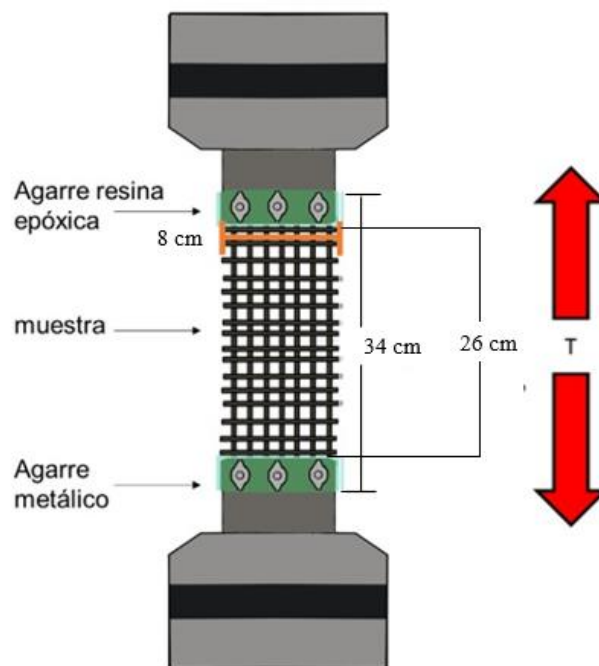
aplicación con aerógrafo y brocha no fueron eficientes y gastaban mucho material en la aplicación de recubrimiento. La fibra de fique se cubrió uniformemente por ambos lados, procurando que el tejido de fique tuviera un color y acabado uniforme. Finalmente se dejó secar a condiciones ambiente. En caso de trabajar con múltiples capas, como se ve en la Figura 2.c, fue necesario repetir la preparación y aplicación de la resina.

### 3.3 Fase 1: Protocolo para la aplicación de la resina PUOG

La fase de caracterización se realizó para validar la elección de protocolo de recubrimiento, en esta se realizaron pruebas de FTIR, gravimetría y tracción del material de prueba (denominado como “fique recubierto”). La espectroscopia FTIR se realizó con el fin de clasificar los distintos grados de recubrimiento obtenidos en función del número de capas aplicadas en el tejido.

#### Figura 3

*Esquema de la probeta fabricada con el tejido de fique para ser usada en la prueba de tracción*



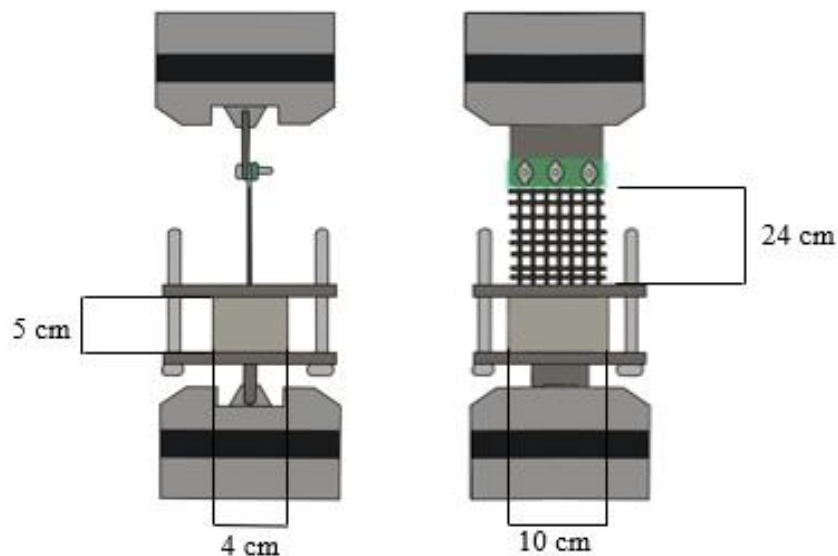
La prueba de tracción del material consistió en el uso de muestras de fique recubierto de aproximadamente 8 x 26 cm, reforzada en los extremos con una resina epóxica con fibra de vidrio, que sirvieron como zona de agarre para las pruebas, la probeta se encuentra ilustrada en la Figura 3. Se manejaron 5 capas de recubrimiento (referidas como niveles), cada nivel con 4 réplicas, en donde se optó por repetir pruebas en caso de que la falla se produjera muy cerca del área de sujeción o se produjera un dato atípico.

### 3.4 Fase 2: Influencia del grado de recubrimiento de los tejidos con la resina sobre la resistencia interfacial IFSS del compuesto mortero/refuerzo de tejidos de fique

En la fase 2 se evalúa la adhesión del tejido recubierto-matriz por medio de pruebas de extracción (pull-out) en dos instancias, la primera para definir la distancia de extracción del fique recubierto, y la segunda para comparar la fuerza de extracción para el fique en función de los niveles del recubrimiento aplicado.

#### Figura 4

*Representación del equipo utilizado para la realización de la prueba de extracción (Pull-out)*



En esta fase, se realizó el montaje que se puede apreciar en la Figura 4, en ambas pruebas se usaron bloques con medidas de aproximadamente 10 x 5 x 4 cm y se dejó una sección expuesta

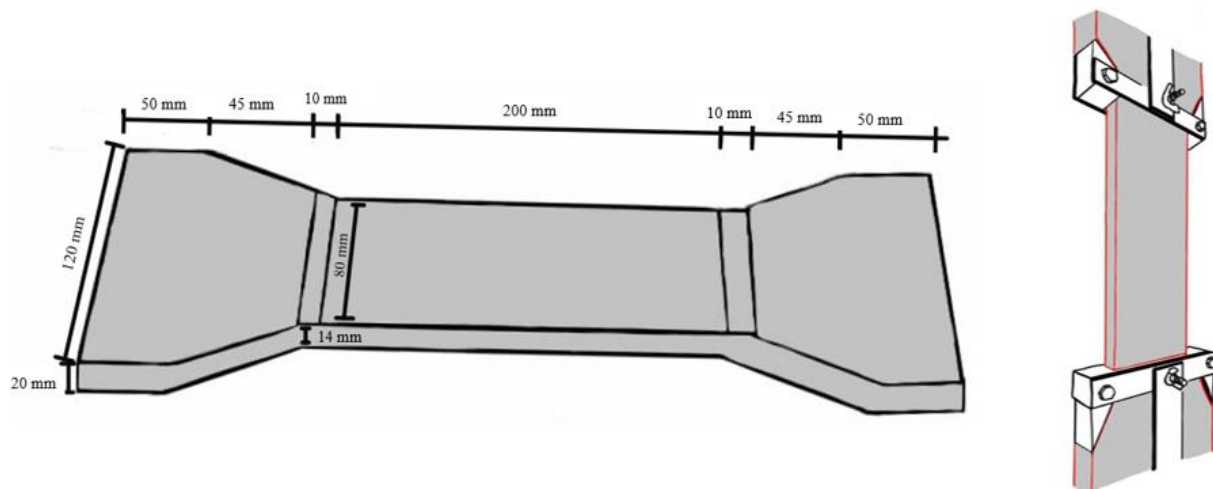
de tejido de 24 cm de largo y 7 cm de ancho, con una profundidad embebida de acuerdo con las condiciones de la prueba y a una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min. Tras esto, se procedió a caracterizar la falla del material por medio de microscopía, haciendo análisis a la falla del material sobre el concreto y la falla del material sobre la fibra

### **3.5 Fase 3: Influencia del recubrimiento sobre la resistencia a la tracción del compuesto mortero/tejidos de fique reforzado**

En la última fase se realizaron pruebas de tracción sobre el material compuesto mortero/tejidos de fique reforzados, para cuantificar el aporte del refuerzo de fique recubierto en el concreto. En esta prueba se evaluó el desempeño del compuesto reforzado con tejidos de fique crudos (pretratados sin recubrimiento) y del compuesto reforzado con tejidos de fique recubiertos. las probetas usadas (ver Figura 5) con geometría tipo “dog-bone”, con un refuerzo interno de dimensiones 8 x 41 cm y extremos de 9.5 x 12 cm (área de prueba de 22 x 8 cm), fueron probadas con el uso de agarres metálicos para evitar la generación de grietas por la presión sobre el agarre, manejando una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. El montaje se puede apreciar en la Figura 5. De esta prueba se realizaron 4 repeticiones con refuerzo recubierto, 4 con refuerzo de fique crudo y 2 repeticiones de control (sin refuerzo), con el fin de describir por medio de los datos obtenidos las mejoras en el comportamiento estructural del material compuesto.

**Figura 5**

*Esquema de las probetas de concreto con la geometría tipo “dog-bone” utilizadas en las pruebas de tracción compuesta*



## 4 Resultados

### 4.1 Protocolo para la aplicación de la resina PUOG

#### 4.1.1 Gravimetría

Los resultados obtenidos por la prueba de gravimetría recopilados en la Tabla 2, muestran por cada capa de recubrimiento aplicada en  $0,243 \text{ m}^2$ , la cantidad de resina requerida. Para la primera capa de recubrimiento fue necesario 140,858 gr, la segunda capa requirió de 100,969 gr y por último la tercera capa necesitó 87,526 gr de resina. Los datos obtenidos demuestran que cada capa requiere menos resina ya que esta es absorbida por el fique, recubriendo y rellenando los poros, pero manteniendo ciertas irregularidades del material original, lo que puede ofrecer mejores características al refuerzo.

**Tabla 2**

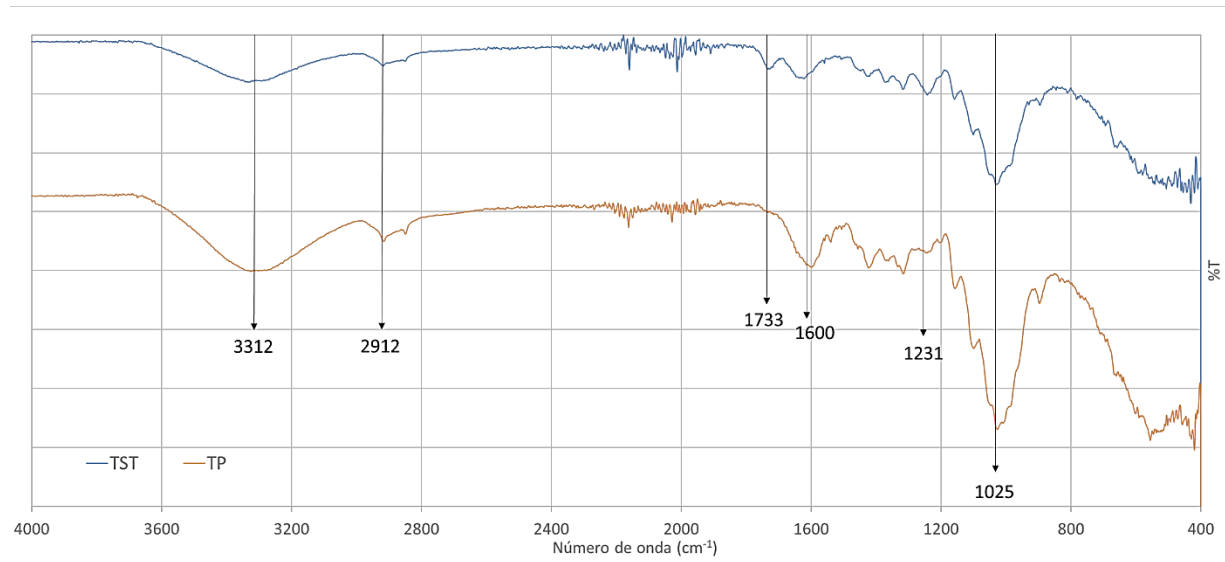
*Cantidad de resina requerida por capa de recubrimiento aplicada en  $0,243 \text{ m}^2$*

Capa	Resina por capa (gr)
1	140,858
2	100,969
3	87,526

#### 4.1.2 Espectroscopia ATR-FTIR

Con el fin de comprobar la acción del pretratamiento propuesto para la remoción de lignina y hemicelulosa en los tejidos de fique, así como la modificación superficial realizada (aplicación de resina PUOG), se llevó a cabo el análisis utilizando la técnica de Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier en modalidad de reflectancia total atenuada (ATR-FTIR).

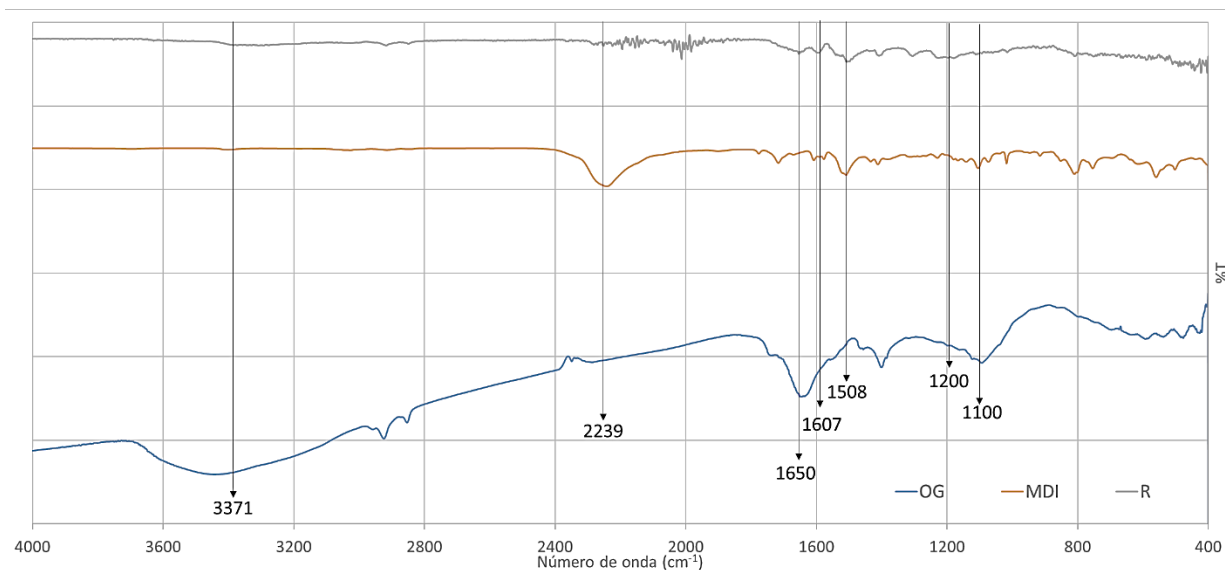
En las figuras Figura 6, Figura 7 y Figura 8, se muestran los espectros ATR-FTIR de seis diferentes tipos de muestras (Resina PUOG, fique crudo con y sin pretratamiento; fique con una, dos y tres capas de recubrimiento).

**Figura 6***Espectrograma ATR-FTIR de tejidos sin tratar (TST) y tejidos con pretratamiento (TP)*

Las fibras de fique poseen un comportamiento hidrofílico, debido a que tanto la hemicelulosa y la lignina poseen grandes cantidades de grupos hidroxilo (O-H) en su estructura. Debido a esto, los recubrimientos plásticos, como la matriz polimérica utilizada, no se adhieren adecuadamente a la fibra. Durante el pretratamiento, se llevó a cabo la eliminación de componentes como la lignina y la hemicelulosa, con la finalidad de aumentar la porosidad y rugosidad del material.(Guzmán et al., 2018) Realizando el análisis del espectrograma de ATR-FTIR de las fibras, se encontró una disminución de las señales en 1733 y 1231  $\text{cm}^{-1}$ , atribuidas al grupo carbonilo (O=C) presente en la hemicelulosa, y al grupo alcoxi (R-O-R), correspondiente al enlace Ar-O-R, encontrado principalmente en la estructura de la lignina.(Barajas Rueda, 2018) También se identificaron grupos característicos de la celulosa en 1025, alrededor de 1600, 2900 y 3300  $\text{cm}^{-1}$ .

**Figura 7**

*Espectrograma ATR-FTIR de la resina PUOG (R), del de diisocianato de difenilmetano (MDI) y óxido de grafeno (OG)*



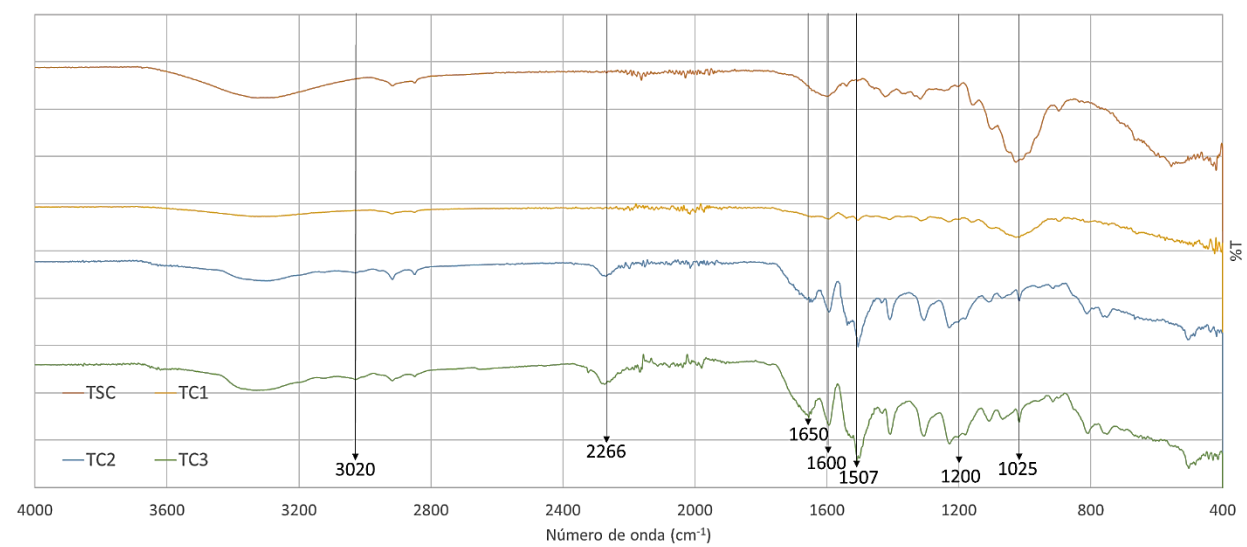
Antes del análisis de la adición de la resina (PUOG) en el tejido, esta se caracterizó con espectros previos de los componentes de esta, obteniendo el espectrograma de la Figura 7. En este espectro se aprecian el isocianato usado para la preparación, compuesto principalmente de diisocianato de difenilmetano (MDI), el óxido de grafeno (OG) y el PUOG (R). en el espectro se identifican varias señales, del OG se identifican picos en 3371, 1650 y 1090  $\text{cm}^{-1}$ , correspondientes a grupos hidroxilo, carbonilo y alcoxi, característicos del óxido. En el MDI se destacan picos en 2239, 1607 y 1508  $\text{cm}^{-1}$ , correspondientes al isocianato ( $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ), y los dos últimos a la vibración de los alquenos de los aromáticos. Finalmente, en la resina, a pesar de la débil señal obtenida, se aprecian varios grupos de ambos componentes: hidroxilo, carbonilo y aromático del óxido y del MDI, así como la aparición de un pico en 1200  $\text{cm}^{-1}$ , correspondiente al enlace acilo ( $\text{O}=\text{C}-\text{O}-$ ) del grupo éster del uretano formado en la reacción.

El aumento progresivo de picos de los grupos C-H  $\text{sp}^2$  (3020  $\text{cm}^{-1}$ ), los picos finos en 1600 y 1500  $\text{cm}^{-1}$  correspondientes a los anillos aromáticos, el grupo isocianato (2266  $\text{cm}^{-1}$ ), carbonilo

(1650 cm<sup>-1</sup>), acilo (1200 cm<sup>-1</sup>) del uretano y alcoxi (1025 cm<sup>-1</sup>) son indicadores del aumento de la presencia de grupos funcionales del recubrimiento con cada capa. También se denota que, al aplicar la primera capa, se suprime el pico ancho del fique ubicado en 1600 cm<sup>-1</sup>, el cual corresponde principalmente a una vibración del agua adsorbida por la superficie de la fibra, además, se denota la desaparición en el número de onda 1025 cm<sup>-1</sup> de la señal ancha correspondiente a la celulosa, demostrando una correcta cobertura del sustrato por la resina PUOG.

### Figura 8

*Espectrogramas ATR-FTIR de tejidos con pretratamiento sin recubrir (TSC), tejidos con una, dos y tres capas (TC1, TC2 y TC3)*



#### 4.1.3 Pruebas de tracción

El cálculo de la tensión y elongación se realizó con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{T}{A_o} [MPa] \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\%L = \frac{L}{L_o} * 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\%L = \frac{L}{L_o} * 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde **T** es la fuerza registrada en el ensayo, **A<sub>o</sub>** es el área transversal inicial del tejido, **L** es el desplazamiento y **L<sub>o</sub>** es la longitud inicial del tejido

De acuerdo con los datos obtenidos durante las pruebas de tracción del tejido de fique (ver Tabla 3) y la experiencia durante la realización, se evidencia que el recubrimiento mejora el desempeño del material. Tras el pretratamiento se aprecia un aumento de la resistencia a la tracción del material de 7,82 a 8,31 MPa y una mejora en su capacidad de deformación. En cuanto a los tejidos con recubrimiento, se obtuvo una resistencia a la tracción máxima de 12,09, 12,86 y 11,83 MPa para una, dos y tres capas respectivamente. Es importante destacar que el recubrimiento con dos capas mostró una mayor resistencia a la tracción en comparación con los tejidos de una y tres capas de recubrimiento, esto debido a que al acumularse en grandes cantidades el material no provee de una mejora debido a un comportamiento frágil del recubrimiento. Finalmente, esto traduce en una menor resistencia a los esfuerzos tensionales para el compuesto mortero/tejidos de fique reforzado.

**Tabla 3**

*Resistencia a la tracción de tejidos de fique crudos, con pretratamiento, con una, dos y tres capas de recubrimiento. Asimismo, la desviación estándar y porcentaje coeficiente de variación*

<b>Tipo de muestra</b>	<b>Promedio resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Promedio módulo de Elasticidad (MPa)</b>	<b>Desviación estándar (Resistencia a la tracción)</b>	<b>% coeficiente variación (Resistencia a la tracción)</b>
Sin pretratamiento	7,819	274,122	0,851	10,886
con pretratamiento	8,310	246,946	0,874	10,523
1 capa de recubrimiento	12,092	315,619	2,280	18,852
2 capas de recubrimiento	12,861	353,752	1,163	9,039
3 capas de recubrimiento	11,828	325,620	2,148	18,160

De los resultados obtenidos en las pruebas de tracción, se puede inferir que se presenta una mejora significativa con respecto al fique sin pretratamiento respecto al que presentaba el recubrimiento. Se alcanzó un aumento máximo de la tensión resistida por el material de 5,04 MPa

para el tejido con 2 capas de recubrimiento, lo que proveerá de una mejora de los esfuerzos internos al usarse como refuerzo de concreto.

## 4.2 Influencia del grado de recubrimiento de los tejidos con la resina sobre la resistencia interfacial IFSS del compuesto mortero/refuerzo de tejidos de fique

### 4.2.1 Pruebas de extracción

En las pruebas de pull-out no se logró determinar una longitud embebida máxima a la que el tejido recubierto se extrajera del concreto, debido a que todas las pruebas realizadas (ver Tabla la falla material ocurrió sobre el fique recubierto y no sobre la interfase. Teniendo en cuenta los resultados previamente expuestos y considerando como longitud mínima trabajable 15 mm debido al diseño del tejido, se comenzaron a realizar las pruebas con la longitud mínima embebida; donde se presentó extracción en las muestras de tejidos de fique sin recubrimiento. Con el fin de obtener una comparación de la adhesión del recubrimiento al concreto, se trabajó con esta longitud mínima durante las pruebas de pull-out para tejidos de fique con y sin recubrimiento. Para el cálculo de la IFSS (interfacial shear strength) o esfuerzo de corte interfacial, se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$IFSS = \frac{\tau}{A} [MPa] \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde  $\tau$  es la fuerza registrada en el ensayo,  $A$  es el área de superficie de la falla, la cual se tomó como el área de tejido sumergida en el concreto.

**Tabla 4**

*Pruebas preliminares de pull-out con recubrimiento*

<b>Pruebas preliminares con recubrimiento</b>	
<b>Distancia sumergida en el concreto (mm)</b>	<b>Fuerza máxima (N)</b>
15	2192
20	1987
25	2260
30	1819

**Tabla 5**

*Resistencia al corte interfacial del tejido de fique con pretratamiento, con una, dos y tres capas de recubrimiento*

<b>Tipo de muestra</b>	<b>No Muestra</b>	<b>IFSS (MPa)</b>	<b>Promedio (MPa)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>% coeficiente variación</b>
Tejido sin recubrimiento	1	0,033	0,034	0,020	57,420
	2	0,028			
	3	0,015			
	4	0,062			
Tejido con 1 capa	1	0,487	0,498	0,080	16,134
	2	0,474			
	3	0,421			
	4	0,610			
Tejido con 2 capas	1	0,932	0,951	0,184	19,329
	2	1,217			
	3	0,819			
	4	0,838			
Tejido con 3 capas	1	0,970	0,887	0,135	15,184
	2	1,010			
	3	0,859			
	4	0,709			

En los resultados mostrados en la Tabla 5 como en las Figura 16 - Figura 19, se denotó que el fique crudo (pretratado y sin recubrir) mostró baja resistencia al corte interfacial, mientras que la fibra recubierta llegó a presentar una carga de  $0,951\text{MPa} \pm 0,184\text{MPa}$  (para dos capas) antes de extraerse, demostrando que posee bastante adherencia al concreto. Por lo tanto, junto con las pruebas de tracción anteriores, se decidió usar 2 capas de recubrimiento de los tejidos de fique para las pruebas de tracción compuesta.

#### **4.2.2 Microscopia Óptica de la Zona de Falla**

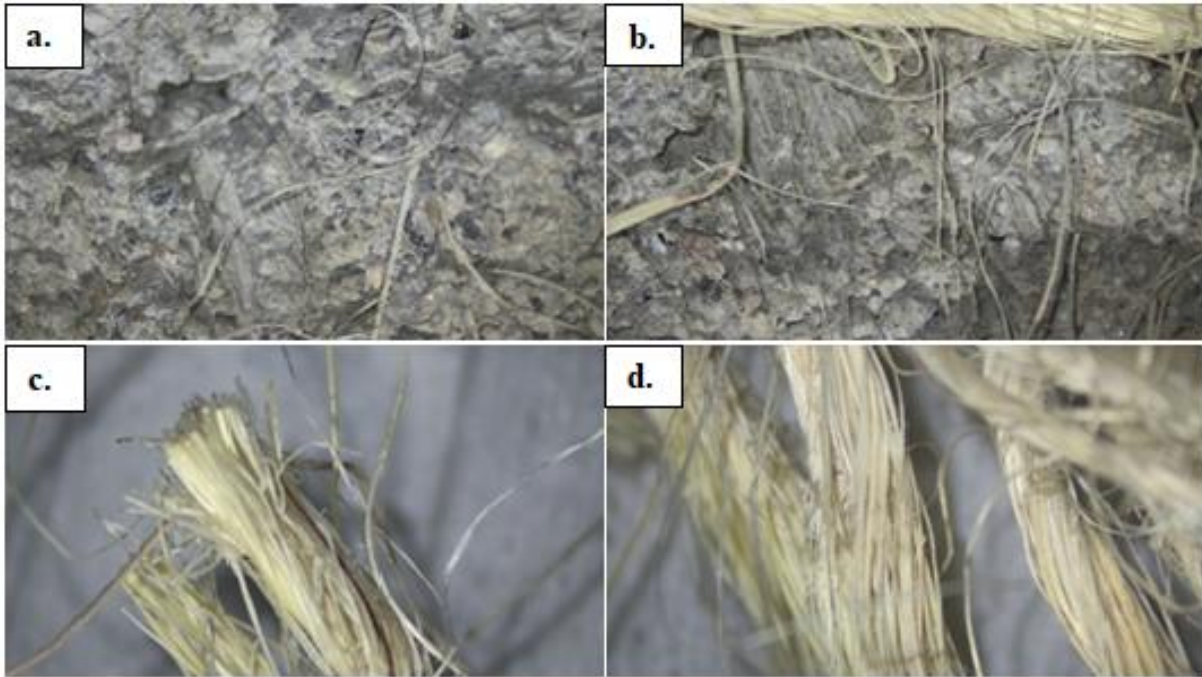
A partir de la microscopia realizada, se obtuvieron imágenes que permiten analizar la interacción entre las fibras y el concreto. El equipo utilizado para la toma de imágenes fue un estereoscopio ZEISS stemi. En la Figura 9 para las fibras no recubiertas se observa unos canales en el concreto, correspondientes a la forma de la fibra, tanto en vertical como horizontal, esto junto

con la baja presencia de concreto en el tejido, confirma la baja adhesión del concreto a la fibra, ya que no se generó daños a la estructura durante la extracción. Por el contrario, en la

Figura 10 (tejido con recubrimiento) se observa principalmente que las fibras empiezan a tener mayor cantidad de concreto sobre ellas a medida que la cantidad de capas aumenta, y que en las fibras se observa una zona sin recubrimiento en los bordes inferiores, esto apunta a que el recubrimiento tiene una gran adhesión al concreto y el aumento de capas mejora la adhesión del concreto a la fibra recubierta. También se denota que al aumentar la resina el tejido se vuelve más resistente y uniforme y evita que los hilos horizontales de la malla se queden dentro del concreto.

**Figura 9**

*Imágenes obtenidas del estereoscopio correspondientes al área de falla de la extracción del fique sin recubrimiento (crudo), las imágenes a y b corresponden a la falla en el concreto, c y d corresponden a la falla sobre la fibra*



**Figura 10**

*Imágenes obtenidas del estereoscopio correspondientes al área de falla de la extracción del fique de una a tres capas, las imágenes a la izquierda corresponden a la falla en el concreto, y las de la derecha corresponden a la falla sobre la fibra.*

**4.3 Influencia del recubrimiento sobre la resistencia a la tracción del compuesto mortero/tejidos de fique reforzado**

Los resultados obtenidos en las pruebas de tracción sobre el material compuesto concreto/tejido de fique se presentan en la Tabla 6. Se evidencia que la mayor resistencia a la tracción promedio alcanzada fue para el material compuesto concreto/tejido con recubrimiento, logrando una resistencia promedio de 2,67 MPa. Las muestras de concreto sin ningún tipo de refuerzo (muestras de control) obtuvieron una resistencia promedio de 2,14 MPa, mientras que las muestras reforzadas con fique pretratado y sin recubrimiento (es decir crudo) obtuvieron la resistencia promedio menor de 1,95 MPa.

**Tabla 6**

*Datos obtenidos de los ensayos de tracción sobre el material compuesto concreto/tejido de fique*

<b>Tipo de muestra</b>	<b>No Muestra</b>	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Promedio resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>% Coeficiente variación</b>
Con recubrimiento	1	3,215	2,666	0,390	14,636
	2	2,673			
	3	2,404			
	4	2,372			
Crudas	1	1,878	1,949	0,208	10,653
	2	2,168			
	3	1,695			
	4	2,057			
Control	1	2,246	2,138	0,152	7,086
	2	2,031			

Para las gráficas de tracción compuesta ilustradas en el Apéndice E, se utilizaron nuevamente las ecuaciones 1 y 2.

A través de la experimentación se evidencia que el fique logró una mejora mecánica del cemento, ofreciéndole resistencia a la tracción y permitiendo una mayor elongación del material, especialmente después de la fractura frágil del material. Asimismo, se denota una reducción de la resistencia en el fique sin recubrir, llegando a ofrecer poca o ninguna resistencia al compararla al control. Adicionalmente, de acuerdo con pruebas preliminares descritas en el Apéndice F y la alta mejoría notada en esta prueba, es posible que la resina haya logrado proteger el tejido de fique de la absorción de humedad y, por tanto, su degradación por el pH básico del cemento, pero se sugiere la realización de pruebas más rigurosas para confirmar esta suposición.

## 5 Conclusiones

- La aplicación uniforme, mediante el empleo de rodillos para pinturas y resinas, ha demostrado ser un método eficiente para aplicar de manera homogénea la resina de PUOG sobre el fique. Este método garantiza una distribución homogénea del recubrimiento y maximiza los beneficios del fique recubierto con PUOG en la mejora de la resistencia a la tracción del material compuesto (concreto/tejidos de fique)
- Se determinó que el uso de dos capas de recubrimiento sobre el tejido de fique es la cantidad adecuada para mejorar la resistencia a la tracción de los tejidos de fique.
- La aplicación de resina PUOG al refuerzo de tejidos de fique-concreto muestra un impacto significativo en la resistencia a la tracción del concreto en comparación con el fique sin recubrimiento. Se observa una mejora de aproximadamente un 36.7% en la resistencia al esfuerzo al utilizar dos capas de recubrimiento.
- La resina PUOG demostró una notable mejora en la fuerza de adhesión interfacial entre el fique y el concreto. Las observaciones microscópicas de las zonas de falla revelaron que el concreto se adhiere más a la resina que a la fibra, lo que evidencia una fuerte adhesión del recubrimiento al concreto.

### Referencias Bibliográficas

- Alfonso, M., De, A., & Espriella, L. A. (2021). *TRATAMIENTOS QUÍMICOS SUPERFICIALES PARA EL USO DE FIBRAS NATURALES EN LA CONSTRUCCIÓN: CONCRETOS Y MORTEROS*.
- Attia, M. M., Ahmed, O., Kobesy, O., & Malek, A. S. (2022). Behavior of FRP rods under uniaxial tensile strength with multiple materials as an alternative to steel rebar. *Case Studies in Construction Materials*, 17(April), e01241. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01241>
- Barajas Rueda, Yeimi Lorena, Enrique Mejia Ospino, Martha Lizeth Pinzon Martinez, L. M. B. R. (2018). *EVALUACION DE LA CAPACIDAD FOTODEGRADATIVA DE COLORANTES USANDO FIBRAS DE FIQUE RECUBIERTAS CON NANOCOMPOSITO rGO@TiO2*.
- Bohórquez Jonny Jiménez. (2011). *USO DE MATERIALES ALTERNATIVOS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO (FIBRA DE FIQUE)*.
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1–3), 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>
- Coudert, L. (2020). *Influencia del tratamiento superficial de las fibras de fique en las propiedades mecánicas del compuesto fibra-matriz cementante*. 110.
- De Moya Abril, L. S. (2021). *Exploración De La Viabilidad Para Uso De La Fibra De Fique Como Material Sostenible En El Reforzamiento Del Concreto. Un Enfoque Eco-Amigable Como Alternativa De La Fibra De Polipropileno*.
- Goulart, S. A. S., Oliveira, T. A., Teixeira, A., Miléo, P. C., & Mulinari, D. R. (2011). Mechanical behaviour of polypropylene reinforced palm fibers composites. *Procedia Engineering*, 10, 2034–2039. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.337>
- Gullón, I. M., & Fernandez, G. R. (n.d.). *EFECTO DE LA QUIMICA SUPERFICIAL DEL OXIDO DE GRAFENO EN EL DESARROLLO DE APLICACIONES*.
- Guzmán, R. E., Gómez, S., Amelines, O., & Aparicio, G. M. (2018). Superficial modification by

alkalization of cellulose Fibres obtained from Fique leaf. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 437(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/437/1/012015>

Lorena Barajas-Rueda, Y., Lizeth Pinzón-Martínez, M., Gutiérrez, N., Díaz, G., Marina Ballesteros-Rueda, L., Cabanzo, R., & Mejía-Ospino, E. (2019). Nanocomposite rGO@TiO<sub>2</sub> Supported on Fique Fibers for Photocatalytic Degradation of Dyes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1247(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012028>

MacGregor, J. G., Wight, J. K., Teng, S., & Irawan, P. (1997). *Reinforced concrete: Mechanics and design* (6th editio, Vol. 3). pearson. <https://ostad.nit.ac.ir/payaidea/ospic/file4019.pdf>

Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). *INFLUENCIA DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADOS PLASTICO Y ENDURECIDO*.

Moraño, A. J., Cambronero, L. E. G., Chacón, I., & Ruiz Roman, J. M. (2005). Mechanical Characterization of Cement Reinforced with Fique Fibers. *Materials for Buildings and Structures*, 55–65. <https://doi.org/10.1002/3527606211.ch9>

Muñoz-Velez, M. F., Hidalgo-Salazar, M. A., & Mina-Hernandez, J. H. (2014). Fique Fiber an Alternative for Reinforced Plastics. Influence of Surface Modification. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustria*, 12(2), 60–70.

## Apéndices

**Apéndice A: Cálculo de la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad tejidos de fique**

En la tabla 7 se presenta los datos obtenidos de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de los tejidos de fique con diferentes capas de recubrimiento.

**Tabla 7**

*Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de tejidos de fique crudos, con pretratamiento y con una, dos y tres capas de recubrimiento.*

Tipo de muestra	No muestra	Resistencia a la tracción (MPa)	Promedio resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Módulo de Elasticidad (MPa)	Promedio módulo de Elasticidad (MPa)
Sin pretratamiento	1	8,175	7,819	0,030	288,84	274,122
	2	8,760		0,036	280,02	
	3	7,468		0,031	259,72	
	4	6,535		0,024	273,28	
	5	8,155		0,031	268,75	
con pretratamiento	1	8,872	8,310	0,041	273,50	246,946
	2	9,115		0,037	274,27	
	3	6,882		0,038	201,21	
	4	8,178		0,040	234,93	
	5	8,503		0,040	250,82	
1 capa de recubrimiento	1	11,089	12,092	0,033	285,18	315,619
	2	9,498		0,028	273,61	
	3	10,361		0,035	244,20	
	4	11,026		0,032	290,04	
	5	15,502		0,030	422,31	
	6	14,855		0,034	339,70	
	7	12,309		0,029	354,29	
2 capas de recubrimiento	1	13,621	12,861	0,036	317,58	353,752
	2	10,952		0,023	379,35	
	3	13,760		0,028	394,44	
	4	12,570		0,030	328,48	
	5	13,401		0,031	348,91	
3 capas de recubrimiento	1	8,767	11,828	0,026	273,71	325,620
	2	13,715		0,031	371,38	
	3	12,747		0,029	342,69	
	4	12,082		0,030	314,70	

**Apéndice B: Composición del concreto utilizado**

En la Tabla 8 se presenta la proporción usada para el concreto usado en las pruebas de extracción y tracción compuesta:

**Tabla 8**

*Proporciones usadas para la preparación del concreto usado en las pruebas de extracción y tracción compuesta*

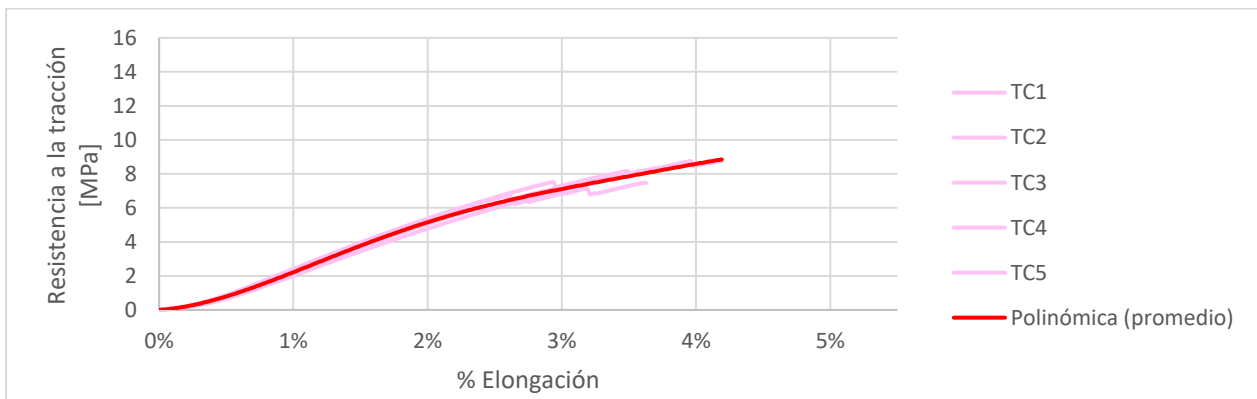
<b>Componente</b>	<b>Proporciones (kg)</b>
Cemento	0,19
Arena	0,61
Agua	0,20

**Apéndice C: Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para tejidos de fique**

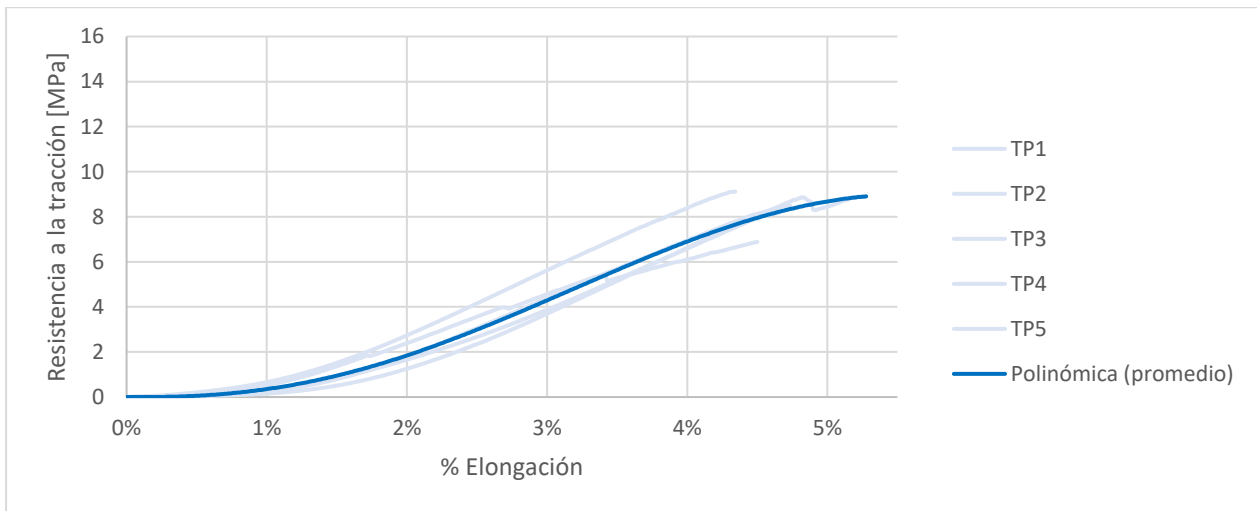
A continuación, se presentan las figuras Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15, correspondientes a gráficas complementarias a los datos expuestos en la fase de caracterización, en las pruebas de tracción del fique.

**Figura 11**

*Resistencia a la tracción tejidos de fique crudo (sin tratar)*

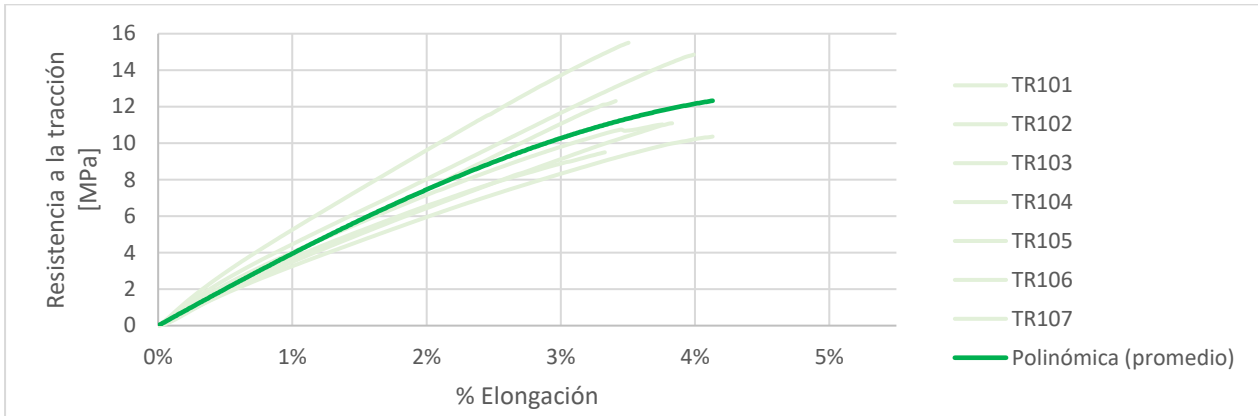
**Figura 12**

*Resistencia a la tracción tejidos de fique crudo (con pretratamiento)*



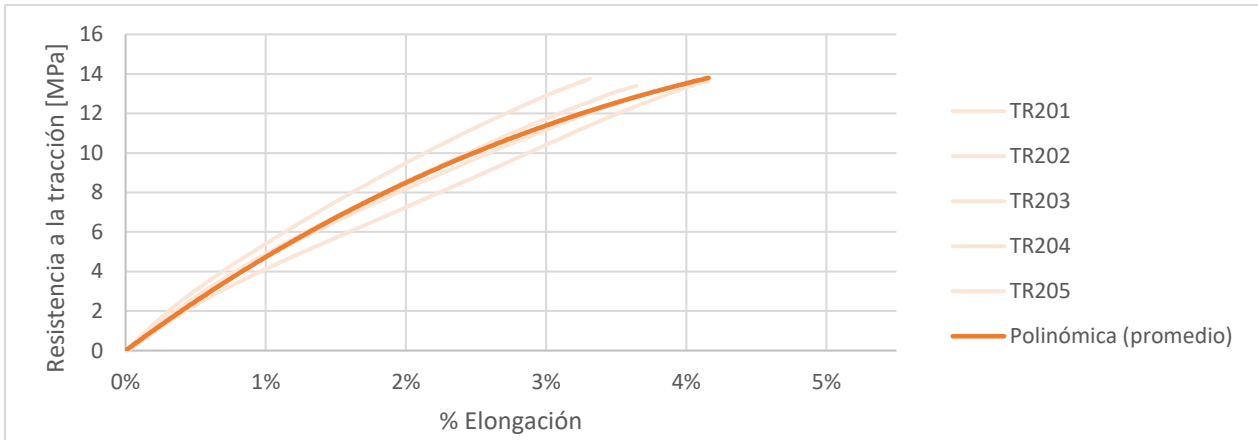
**Figura 13**

*Resistencia a la tracción tejidos de fique con una capa de recubrimiento*



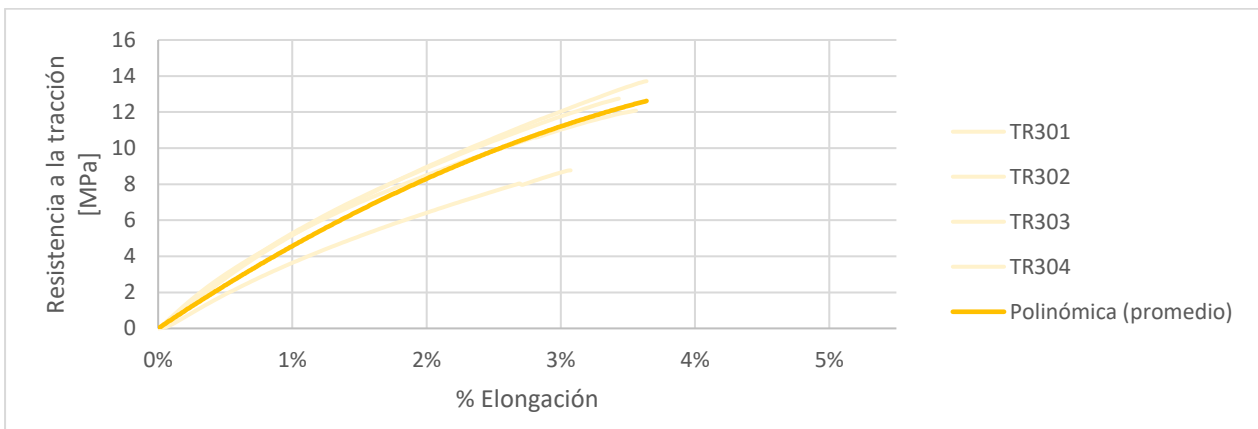
**Figura 14**

*Resistencia a la tracción tejidos de fique con dos capas de recubrimiento*



**Figura 15**

*Resistencia a la tracción tejidos de fique con tres capas de recubrimiento*

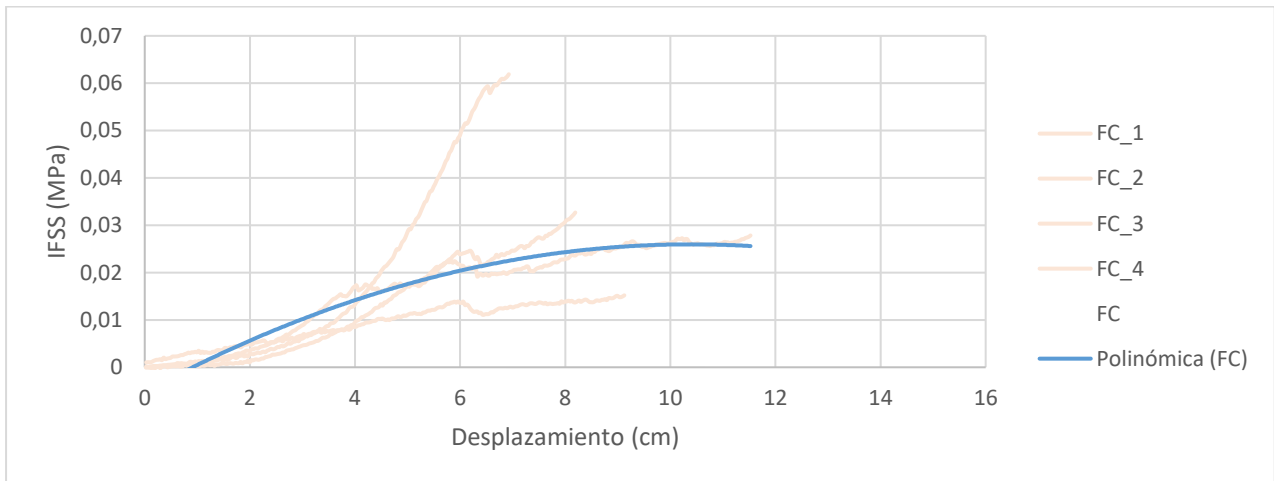


**Apéndice D: Resistencia al corte interfacial de tejidos de fique (pruebas de extracción)**

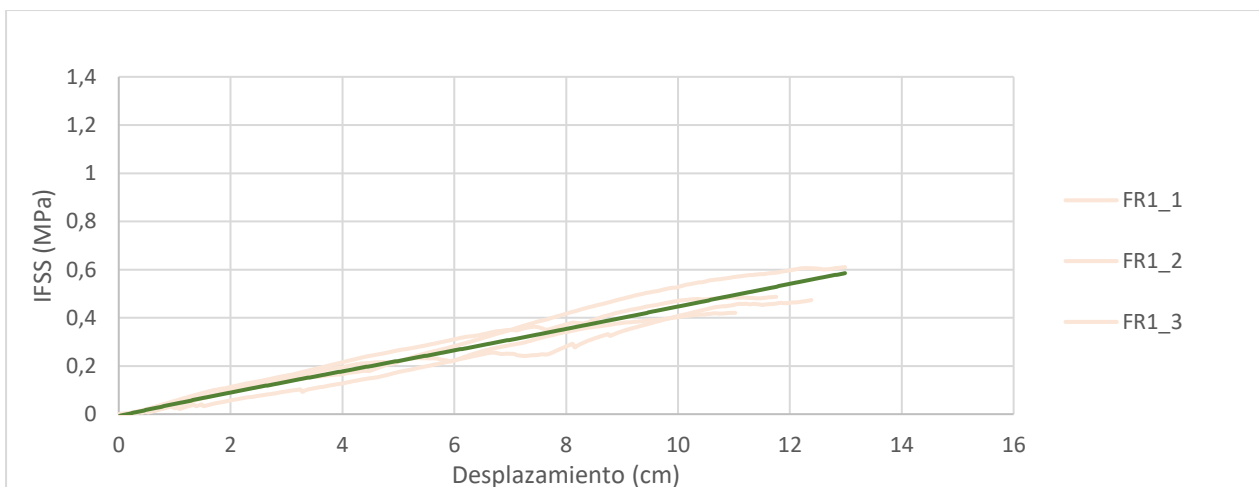
A continuación, se presentan las figuras Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19, correspondientes a gráficas complementarias a los datos expuestos en la fase de extracción, en las pruebas de extracción del fique recubierto y sin recubrir.

**Figura 16**

*Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique crudos pretratados (FC)*

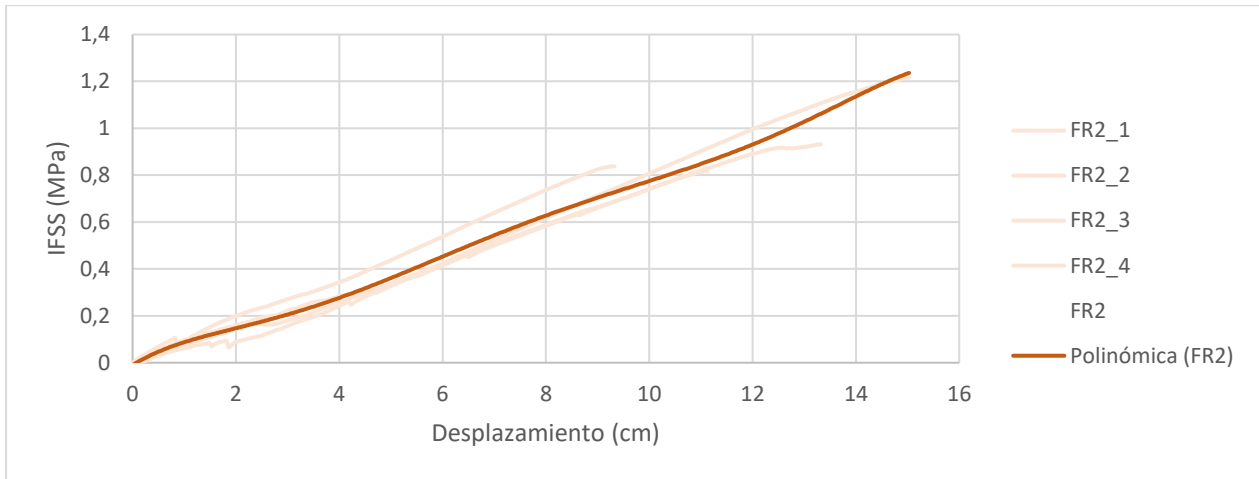
**Figura 17**

*Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique con una capa de recubrimiento (FRI)*



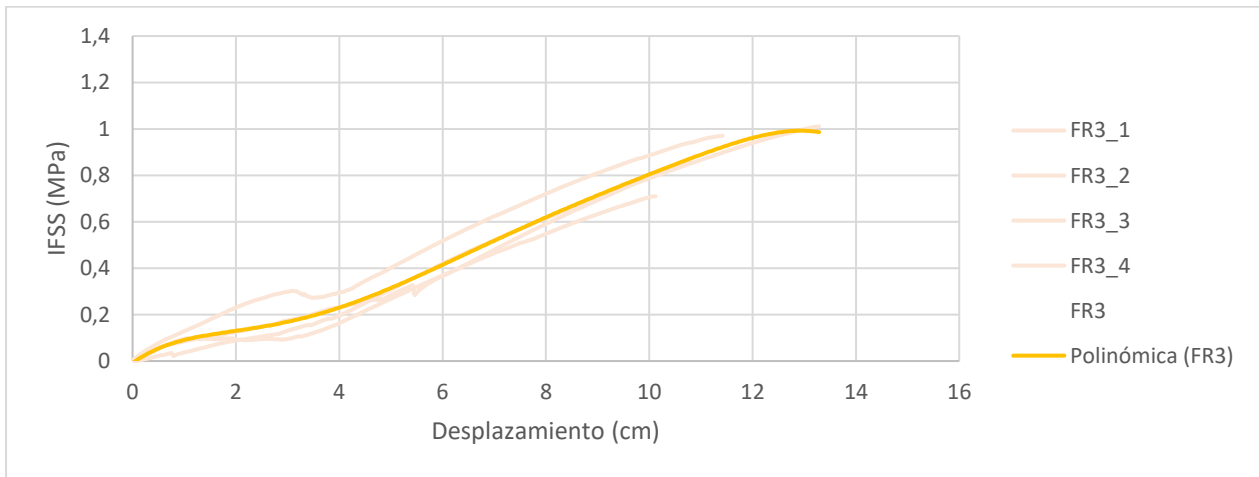
**Figura 18**

*Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique con dos capas de recubrimiento (FR2)*



**Figura 19**

*Resistencia al corte interfacial (pull-out) de tejidos de fique con tres capas de recubrimiento (FR3)*

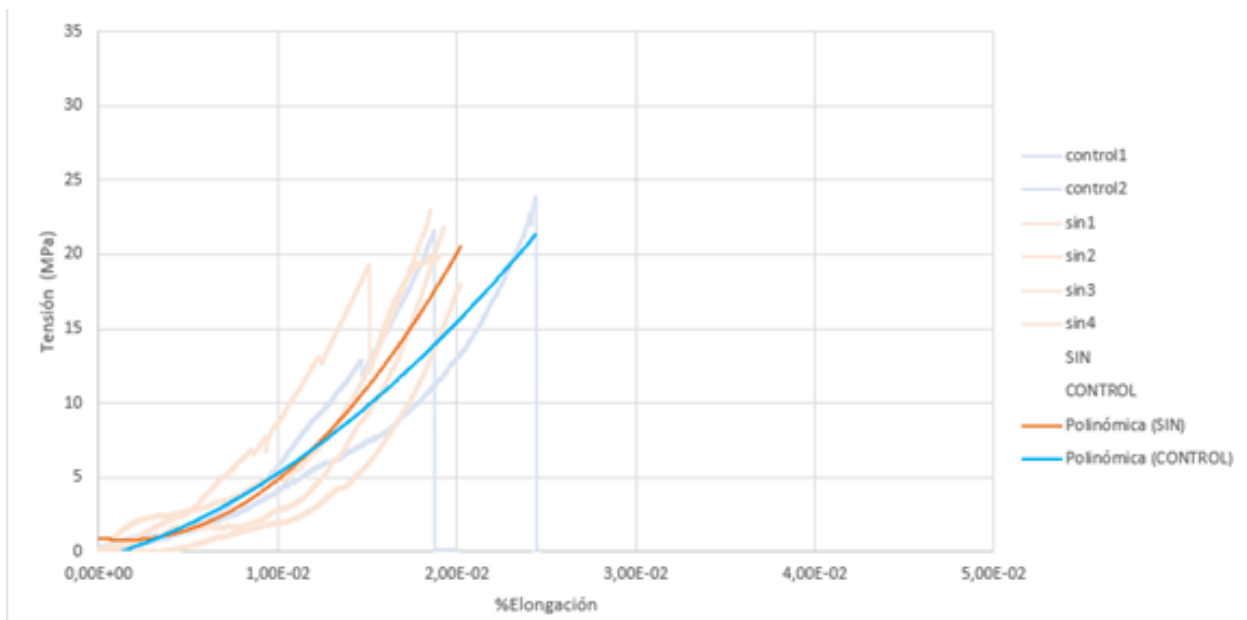


### Apéndice E: Comparación resistencia a la tracción del material compuesto concreto/tejidos de fique con y sin recubrimiento

A continuación, se presentan las figuras Figura 20 y Figura 21, correspondientes a gráficas complementarias a los datos expuestos en la fase de caracterización, en las pruebas de tracción del fique.

#### Figura 20

*Comparación de la resistencia a la tracción entre material compuesto concreto/ tejidos de fique sin recubrimiento con relación al concreto.*





### Apéndice F: Comparación datos de absorción de agua en tejidos de fique

En la Tabla 9 se presentan los datos de gravimetría obtenidos durante pruebas preliminares realizadas a fique pretratado y fique recubierto. Ambas mediciones se realizaron durante el mismo intervalo de tiempo.

**Tabla 9**

*Comparación en gramos de agua absorbida entre tejido con recubrimiento (Muestra 1) y tejido crudo (Muestra 2)*

	Muestra 1	Muestra 2
Po	1,446	1,192
P1	1,381	1,142
R1	1,964	3,246
R2	1,972	3,674
R3	2,018	4,167
R4	2,290	3,729
R5	2,488	3,979

Para medir la cantidad de agua retenida se realizó una prueba preliminar la cual consistió en la comparación de pesos antes y después de cada remojo. Antes de comenzar se tomó el peso inicial de cada muestra (Po), posteriormente se dejaron durante una hora en el horno a una temperatura de 50 °C, para así obtener el peso inicial en seco (P1).

Con el fin de determinar la cantidad de agua retenida se realizaron 5 remojos de las muestras presentadas en la figura Figura 22, cada uno consistió en colocar la muestra en un recipiente con agua durante determinado tiempo, después se retiró la muestra, se secó superficialmente para quitar cualquier exceso de agua y se pesa nuevamente para determinar la cantidad absorbida. Los 3 primeros remojos (R1, R2 y R3) fueron en intervalos de 5 minutos, el cuarto remojo (R4) se realizó durante 20 horas y el quinto remojo tuvo un tiempo de una semana.

