

MATERIAL COMPUESTO BASE MORTERO Y MALLA DE FIQUE COMO  
REFUERZO DE VIGAS DE CONCRETO

ÁLVARO FABIÁN PUENTES ROJAS  
JOSÉ ALIRIO SOTO ORTEGÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2018

MATERIAL COMPUESTO BASE MORTERO Y MALLA DE FIQUE COMO  
REFUERZO DE VIGAS DE CONCRETO

ÁLVARO FABIÁN PUENTES ROJAS  
JOSÉ ALIRIO SOTO ORTEGÓN

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR  
RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ  
INGENIERO CIVIL, PhD

CODIRECTOR  
GERMÁN ADOLFO DÍAZ RAMÍREZ  
DISEÑADOR INDUSTRIAL, MsC

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2018

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su infinito amor, por su incondicional apoyo e incansable sacrificio en este proceso, todo fue por ellos y para ellos.

A mi hermana y mis sobrinos, quienes siempre están conmigo, en los momentos buenos y malos, con la mejor disposición y cariño.

A mi familia, de quienes agradezco sus buenos deseos y quienes compartían mis logros y alegría.

A mi compañero de proyecto, a quien agradezco su apoyo y dedicación, por estar ahí en todo momento, por sus palabras y sobre todo por su amistad.

A mis amigos y compañeros de universidad, quienes hicieron inolvidable esta etapa y de quienes guardo recuerdos inolvidables y momentos llenos de felicidad.

A José, Juliana, Juan, Karen, Yes, Omar y Aleja que me permitieron ser parte de sus vidas, por brindarme su amistad y con quienes espero seguir contando en esta nueva etapa que comienza.

**ÁLVARO FABIÁN PUENTES ROJAS**

## **DEDICATORIAS:**

Dedico este trabajo, a mi madre, quien me ha brindado su apoyo incondicional durante toda mi carrera.

A mis hermanos y hermanas que me inspiran a trabajar día a día por mis metas.

A mi compañero de proyecto, por este trabajo que logramos juntos.

Y a mi Universidad por ser parte fundamental en mi desarrollo profesional.

José Alirio Soto Ortegón

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro mayor sentimiento de gratitud es para la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos los espacios, los medios y una formación de calidad, que hizo posible la realización de este proyecto

Agradecimientos a nuestro Director y Codirector por su constante acompañamiento e instrucción.

A nuestros profesores, por sus enseñanzas que nos permitieron culminar exitosamente esta etapa.

Especiales agradecimientos a la empresa Cohilados del Fonce por suministrarnos parte de nuestro material de trabajo como muestra de su constante apoyo.

A la Ingeniera Karol Pedroza quien con la mejor disposición nos brindó excelente asesoría y materiales que empleamos en la realización del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS .....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
2. MARCO REFERENCIAL .....	17
2.1. ALTERNATIVAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL .....	17
2.2. MATERIALES COMPUESTOS .....	18
2.3. EL MORTERO .....	18
2.4. EL FIQUE .....	19
2.5. PREPARACIÓN DE LA FIBRA Y PRODUCCIÓN DE LA MALLA .....	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1. MATERIALES .....	22
3.2. ENSAYO A TRACCIÓN DE LAS MALLAS .....	22
3.3. DISEÑO DE MEZCLA: .....	24
3.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA CONTROL DE RESISTENCIA .....	24
3.5. ANÁLISIS DE LA ADHERENCIA .....	25
3.6. EVALUACIÓN DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL .....	26
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	30
4.1. PROPIEDADES DE LAS MALLAS .....	30
4.2. VIGAS REFORZADAS CON EL MATERIAL COMPUESTO .....	34
5. CONCLUSIONES .....	43

6. RECOMENDACIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de las fibras de fique.....	19
Tabla 2. Nomenclatura Probetas Mallas de Fique.....	30
Tabla 3. Resultados Ensayo a Tracción.....	30
Tabla 4. Propiedades mallas de fique.....	31
Tabla 5. Resultados Análisis de Adherencia.....	35
Tabla 6. Nomenclatura Vigas .....	35
Tabla 7. Resultados Ensayo a Flexión.....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Probetas Ensayo a Tracción.....	23
Figura 2. Montaje Ensayo a Tracción en Máquina de Ensayo MTS. ....	23
Figura 3. Probetas para control de resistencia (concreto y mortero). ....	24
Figura 4. Tratamiento Superficial.....	25
Figura 5. Tratamiento de Adherencia .....	26
Figura 6. Aplicación Primera Capa de Mortero.....	27
Figura 7. Aplicación Malla de Fique.....	27
Figura 8. Aplicación Segunda Capa de Mortero .....	28
Figura 9. Recubrimiento con Papel Vinipel.....	28
Figura 10. Montaje Ensayo a Flexión .....	29
Figura 11. Gráficas Esfuerzo vs Deformación Unitaria. ....	32
Figura 12. Gráficas Esfuerzo vs Deformación Unitaria. ....	33
Figura 13. Comportamiento Mecánico Mallas de Fique.....	34
Figura 14. Falla Viga Tipo S. ....	37
Figura 15. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo S. ....	37
Figura 16. Falla Viga Tipo L.....	38
Figura 17. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo L.....	38
Figura 18. Falla Viga tipo U .....	39
Figura 19. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo U. ....	39
Figura 20. Proceso de Falla Viga Tipo O.....	40
Figura 21. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo O. ....	40
Figura 22. Análisis Software GOM Correlate .....	41

## RESUMEN

**TÍTULO: MATERIAL COMPUESTO BASE MORTERO Y MALLA DE FIQUE COMO REFUERZO DE VIGAS DE CONCRETO\***

**AUTORES:** PUENTES ROJAS, Álvaro Fabián. SOTO ORTEGÓN, José Alirio\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Vigas Reforzadas, Material Compuesto, Mallas de Fique, Mortero, Adherencia.

**RESUMEN:** En la presente investigación se estudió el efecto del reforzamiento externo de vigas de concreto mediante un material compuesto base mallas tejidas de fibras naturales de fique embebida en un mortero de cemento portland. Inicialmente se caracterizaron a tracción, según la norma ASTM D 4632 - 08, las mallas de tejido plano (ortogonal) elaboradas con hilos de fique con densidad lineal de 1400 k/m con tres separaciones entre hilos, en sentido longitudinal y transversal, de trama y urdimbre: 3, 5 y 8 mm. Se comparó el comportamiento de mallas con un anudado manual y mallas sin alguna modificación, en ambos casos empleando las separaciones mencionadas. Después de determinar la malla más adecuada para usar como refuerzo, se evaluó el módulo de rotura en vigas de concreto según la norma ASTM C 78 - 02. Se ensayaron vigas sin refuerzo y reforzadas exteriormente en una, tres y cuatro caras. El material compuesto se adhirió a las vigas con y sin aplicación de un epóxico comercial. La viga reforzada con el material compuesto por sus cuatro caras y adherido mediante epóxico incrementó su resistencia a la flexión en un 226% con respecto a la viga sin ningún tipo de refuerzo, adicionalmente mostró una mayor ductilidad, evidenciando un mejor comportamiento mecánico de las vigas reforzadas con el material propuesto. Los resultados de este estudio demuestran la efectividad del uso de las mallas de fique como agentes alternativos de refuerzo para compuestos cementicios en elementos estructurales abriendo paso a futuras investigaciones del uso de fibras naturales en la construcción.

---

\*Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector: MS.C. Germán Adolfo Díaz Ramírez.

## ABSTRACT

**TITLE: COMPOSITE MATERIAL BASE MORTAR AND FIQUE MESH AS REINFORCEMENT OF CONCRETE BEAMS\***

**AUTHORS:** PUENTES ROJAS, Álvaro Fabián. SOTO ORTEGÓN, José Alirio\*\*

**KEYWORDS:** Reinforced Beams, Composite Material, Fique Meshes, Mortar, and adherence.

**ABSTRACT:** In this research, the effect of external reinforcement of concrete beams by using a composite material made of natural fiber knitted meshes embedded in Portland cement mortar was investigated. Initially, the natural meshes were mechanically characterized by tensile tests using ASTM D 4632 - 08, flat weave textiles were made with 1400 k/m linear density yarns, with three different separations warp and weft 3, 5, and 8 mm respectively. The behavior of meshes with a manual knotting and meshes without some modification was compared, in both cases using the mentioned separations. The break module was evaluated in concrete beams according to ASTM C 78 - 02. Beams were tested without reinforcement and reinforced externally over one, three and four sides. The composite was adhered to the beams directly and by using an epoxide commercial adhesive. The beams reinforced with composite proposed and adhered to four faces showed an 226% increment of their flexural resistance compared with the beams without external reinforcement, and a better ductility behavior, showing a better mechanical performance. The results of this study shown the effectiveness of meshes external reinforcement for structural elements, opening way to futures researches about the use of natural fibers for construction purposes.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Mechanical Physics Engineering. Civil Engineering School. Director: PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector: MS.C. Germán Adolfo Díaz Ramírez.

## INTRODUCCIÓN

Con el propósito de reforzar estructuras, diferentes tecnologías son constantemente analizadas y desarrolladas. En el caso del hormigón reforzado se busca que dicho refuerzo proteja la integridad de la estructura y al mismo tiempo represente un aumento significativo en su capacidad portante (Ortlepp & Ortlepp, 2017). Las vigas son elementos estructurales indispensables en el soporte y la distribución de las cargas de una estructura, por su naturaleza están construidas principalmente para soportar esfuerzos de flexión y cortante, por esto se han generado múltiples alternativas de refuerzo auxiliar para aumentar su resistencia ante las solicitaciones mencionadas (Ortlepp & Ortlepp, 2017; Pérez, 2014), (Pinto & Figueroa, 2016).

Para abordar esta problemática se ha optado por, entre otras opciones, el TRM (*Textile Reinforced Mortar*) que es una técnica innovadora para el refuerzo de estructuras de concreto que consta de una malla o textil embebida en una matriz de mortero (Verbruggen, Tysmans, & Wastiels, 2014). En tiempos recientes se ha incrementado de manera notable el empleo de tejidos como núcleo reforzante para matrices inorgánicas en variadas aplicaciones: elementos prefabricados auto portantes, encofrados y para reforzar estructuras de fábrica (Pérez, 2014). Está demostrado que la disposición de la malla permite que el material compuesto se comporte monolíticamente debido al flujo del mortero a través del núcleo reforzante, y la naturaleza del mortero resulta altamente compatible con la del concreto lo que permite la adherencia entre el TRM y los elementos estructurales (Bui, Si Larbi, Reboul, & Ferrier, 2015), (Martínez, 2016). No obstante, la aplicación de TRM para el refuerzo estructural del hormigón es aún muy limitada.

Las ventajas principales del refuerzo estructural con TRM son:

- Sometido a tracción permite una transmisión uniforme de los esfuerzos en toda la sección.
- Se ha observado incremento de resistencia y ductilidad en elementos a flexión (Tsesarsky, Peled, Katz, & Anteby, 2013).
- Es de fácil aplicación y no requiere mano de obra especializada.

Los textiles utilizados pueden ser de diferentes materiales como acero, fibra de vidrio, de carbono entre otros, sin embargo, aunque presenten muy buenas propiedades mecánicas y soporten altas resistencias a tracción, presentan un alto costo de fabricación e implementación debido a que consumen grandes cantidades de energía (Khan, Abbas, & Fares, 2017), (Sandoval Bonhomme, 2014).

Con el crecimiento de la conciencia ambiental y la necesidad de garantizar materiales de construcción sostenibles, el uso de fibras naturales representa una alternativa atractiva debido a que provienen de un recurso renovable, presentan bajas densidades y bajos costos de obtención (Korniejenko, Frączek, Pytlak, & Adamski, 2016; Yan, Kasal, & Huang, 2016), (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). El fique es una fibra natural de fácil obtención a nivel regional, que además presenta muy buenas propiedades mecánicas a tracción, que no han sido suficientemente aprovechadas en la construcción (Delvasto, Toro, Perdomo, & de Gutiérrez, 2010; Higuera Cogua, 2011).

En este proyecto se pretende estudiar el efecto de un material compuesto base mortero reforzado con una malla de fique, en el comportamiento a flexión de un elemento estructural tipo viga. Para esto se determinan las propiedades mecánicas a tracción de la malla de fique, en la cual se comparan diferentes densidades de entramado y anudado; se verifica la correcta adherencia entre dicho material compuesto y el elemento estructural en estudio, comprobando de esta manera si es necesario algún epóxico para esta función; y finalmente, se ensaya a flexión la viga reforzada con el material compuesto, dispuesto en diferentes posiciones. Aun así, futuras investigaciones correspondientes a diferentes materiales para las mallas, otras densidades de entramado a considerar y duración de la malla de fique dentro del material compuesto, deben ser adelantadas para abordar el tema con mayor profundidad y tomar decisiones con bases más sólidas acerca del uso de este tipo de técnicas de refuerzo.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia de la configuración de la malla de fique sobre un material compuesto base mortero como refuerzo a flexión de vigas de concreto.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar la densidad de entramado más adecuada entre las adquiridas, para ser usada como malla refuerzo del compuesto, mediante ensayos de tracción según la norma INVIAS E901-07
- Analizar experimentalmente la adherencia entre el material compuesto y la viga de concreto mediante ensayo de flexión (NTC-2871).
- Evaluar la influencia del material compuesto sobre el comportamiento mecánico a flexión de un elemento estructural tipo viga mediante ensayo de módulo de rotura (NTC-2871).

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. ALTERNATIVAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL

El hormigón armado como lo conocemos hoy en día es un material surgido en Europa bajo la influencia de la Revolución Industrial, a mediados del siglo XIX. A través de los años se ha evidenciado que la evolución del hormigón se debe no solo al desarrollo científico en sí, sino también a la formación con la que cuentan los ingenieros dedicados al diseño de estructuras.

En la actualidad existen numerosos tipos de refuerzo estructural que se pueden encontrar en el mercado. Además de esto, también se han abordado elementos auxiliares que complementan al refuerzo estructural, como los son: suplementación con perfiles estructurales, chapas de acero pegadas, encamisado en pilares y vigas, etc. Junto a estas alternativas tradicionales se plantean otra serie de tecnologías basadas en materiales compuestos de una matriz orgánica o inorgánica con núcleos reforzantes (fibras o textiles). Esta clase de materiales son llamados *FRP's (Fibre Reinforced Polymer)* y están constituidos principalmente con fibras de carbono, vidrio y aramida entre otras (Khan et al., 2017). Adicionalmente, en los últimos años se han implementado nuevas líneas de trabajo, enfocadas en el refuerzo de estructuras de hormigón mediante el uso de matrices inorgánicas a modo de mortero armadas por tejidos. Siendo los núcleos reforzantes mallas uni o bi-direccionales conformados por fibras textiles y de distinta naturaleza (acero, basalto, carbono, vidrio, naturales, etc.) (Pérez, 2014), llamados *TRC (Textile Reinforced Concrete)*.

Recientes investigaciones muestran que los compuestos *TRC* exhiben una mejora considerable en la resistencia a la tensión, ductilidad y capacidad de absorción de energía (Tsesarsky et al., 2013). La eficiencia del endurecimiento de estructuras con *TRC* ha sido investigada últimamente mostrando un comportamiento no lineal que resulta en una gran capacidad de deformación, lo que significa un importante aporte a la resistencia sísmica de la estructura (Bui et al., 2015).

En el contexto de renovación y trabajo de reparación de edificaciones, se han analizado los efectos del refuerzo con TRC aplicado a sus elementos principales. Diferentes pruebas se han realizado con el fin de comprobar la efectividad de este tipo de refuerzo, mostrando resultados sumamente satisfactorios, en los cuales la mejora de las propiedades mecánicas, así como el comportamiento de los elementos estructurales ante la fatiga, y por ende, la fisuración, es evidente (Ortlepp & Ortlepp, 2017), convirtiéndose así en una alternativa altamente recomendada y con posibilidades de ser demandada en el futuro cercano, en lo que respecta al refuerzo de toda estructura de hormigón armado.

## **2.2. MATERIALES COMPUESTOS**

Los materiales compuestos son aquellos formados por dos o más materiales que al combinarse apropiadamente presentan propiedades físicas y mecánicas superiores a la de sus constituyentes individuales. Están formados por dos fases: una fase continua denominada matriz y una fase dispersa denominada refuerzo. El refuerzo proporciona las propiedades mecánicas al material mientras que la matriz actúa como ligante.

Los materiales compuestos con fases dispersas en forma de fibras son muy utilizados habitualmente y a menudo se diseñan con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez. El uso de estos materiales con baja densidad tiene como propósito conseguir compuestos con una resistencia y módulos específicos altamente elevados (Pinto & Figueroa, 2016).

## **2.3. EL MORTERO**

El mortero de pega es una mezcla plástica de materiales cementantes, agregado fino y agua, usado para unir las unidades de mampostería.

Cada uno de los principales constituyentes del mortero hacen una contribución definitiva para su desempeño. El cemento portland ayuda con resistencia y durabilidad, la cal en estado hidróxido proporciona, trabajabilidad, retención de agua y elasticidad. Ambos, contribuyen con la resistencia adherente. La arena actúa como relleno y permite que mantenga el cuerpo y espesor bajo la masa de la

siguiente hilada de mampostería. El agua es el agente de mezcla que da fluidez y causa la hidratación del cemento.

#### 2.4. EL FIQUE

El fique es una planta grande, de tallo erguido, su altura varía entre 2 y 7 metros, densamente poblado de hojas color verde, en forma radial, largas (1 a 3 metros), angostas (10 y 20 cm), carnosas, puntiagudas, acanaladas y dentado espinosas. Según la Revista Internacional de Contaminación Ambiental la fibra de fique representa, aproximadamente, un 5% del peso de toda la planta, mientras que el porcentaje restante corresponde mayoritariamente al zumo (70%), la estopa y el bagazo (25%), los cuales aún son manejados, en la mayoría de los casos, como residuo sin valor (Delvasto et al., 2010). Las propiedades de las fibras de fique que se encontraron son listadas en la tabla 1.

**Tabla 1. Características de las fibras de fique.**

Características	Fique
Diámetro equivalente (mm)	0.16-0.42 0.236 mm (promedio)
Densidad aparente Kg/m <sup>3</sup>	723
Gravedad específica	1.47
Absorción de agua %	60
H <sub>2</sub> O %	12
absorción de humedad %	8.12
Celulosa %	70
Lignina %	10.1
Esfuerzos de tracción Mpa	43-571 132.4 Mpa (promedio)
Elongación última %	9.8
Módulo de elasticidad Gpa	8.1-9.1

Fuente: S. Delvasto, E. F. Toro, F. Perdomo, and R. M. de Gutiérrez, "An Appropriate Vacuum Technology for Manufacture of Corrugated Fique Fiber Reinforced Cementitious Sheets," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 187–192, 2010.

## **2.5. PREPARACIÓN DE LA FIBRA Y PRODUCCIÓN DE LA MALLA**

El proceso de extracción de la fibra de fique se logra por medios mecánicos, siguiendo la siguiente serie de pasos:

Se inicia con el desprendimiento y recolección periódica de las hojas en estado maduro, las fibras son separadas de la corteza por medios manuales o con desfibradora portátil de motor. Luego se fermenta y se lava, retirando los residuos de la hoja por descomposición orgánica. Posteriormente se extiende la fibra en prados o es colgada para su secado con el fin de obtener una fibra más limpia, libre de residuos y con el porcentaje de humedad adecuada. Finalmente, se empacan agrupándolas en manojos de un kilo aproximadamente, para ser trasladados a mercados locales y a industrias del sector (Higuera Cogua, 2011).

La calidad de la fibra de fique se supervisa según parámetros internos de cada empresa, este proceso se describe a continuación:

La preparación de la fibra consiste en pasarla entre peines puntiagudos, desenredándola y quitándole impurezas; al mismo tiempo esta se lubrica para disminuir la fricción entre los filamentos proporcionando la textura necesaria para el peinado y evitando el deterioro de la fibra durante el proceso, formando una mecha uniforme y continua.

La mecha es procesada mediante torsión, sacando de ella haces de fibra que se van estirando y calibrando entorno a la máquina hiladora formando un hilo continuo y uniforme del calibre deseado. El hilo pasa por una fase de enconado, del cual se surte la máquina urdidora, la cual enrolla el hilo para alimentar luego, la máquina de tejeduría como urdimbre, mientras el hilo de trama va directamente del enconado a los telares.

Usando telares planos, se entrelazan perpendicularmente hilos de urdimbre, dispuestos en dirección horizontal, e hilos de trama, dispuestos en dirección vertical, formando un tejido plano según especificaciones. Para la fabricación de las mallas de fique se tiene en cuenta la densidad del entramado, que consiste en la cantidad de hilos en una dirección por la cantidad de hilos en la dirección perpendicular, medidos en un área de 1x1 dm<sup>2</sup>, como se expresa en la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad} = \# \text{Hilos de trama (verticales)}, \# \text{Hilos de urdimbre (horizontales)}$$

El proceso de anudado consiste en realizar amarres en la intersección de hilos de trama y urdimbre para fijar y garantizar que se mantenga la arquitectura de la malla ante posibles deformaciones (*Proceso Industrial Coohilados del Fonce Ltda.*)

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIALES

3.1.1. MALLAS. Se encargaron las mallas a ensayar, según las especificaciones requeridas y la disponibilidad de la empresa Coohilados del Fonce Ltda. Se seleccionaron tres tipos de mallas, de densidades de entramado de 33, 20 y 12 hilos/dm<sup>2</sup> con separación entre hilos de 3, 5 y 8 mm respectivamente. El tipo de hilo utilizado de densidad lineal de 1400 m/k.

3.1.2. CONCRETO Y MORTERO Los materiales utilizados en la fabricación de las vigas y el recubrimiento de mortero fueron: Cemento Portland de uso general, agua, agregado fino y agregado grueso, en el caso del concreto.

Agregados: Para la caracterización de estos materiales se determinó peso específico, masa unitaria y vacíos entre partículas NTC 92 (NTC 92, 1995), densidad y absorción NTC 327 (NTC 327, 1995), humedad relativa NTC 1776 (NTC 1776, 1994) y granulometría de cada uno. Se trabajó con un tamaño máximo nominal de ¾”.

Cemento Portland: Se utilizó cemento Portland de uso general el cual cumple con los requisitos fisicoquímicos contemplados en las normas NTC 121 (NTC 121, 1982) y NTC 321 (NTC 321, 1982).

Agua: Se utilizó agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, la cual cumple con la norma NTC 3459 (NTC 3459, 2001) con los requerimientos básicos de cantidad de ácidos, cloruros sales y demás sustancias.

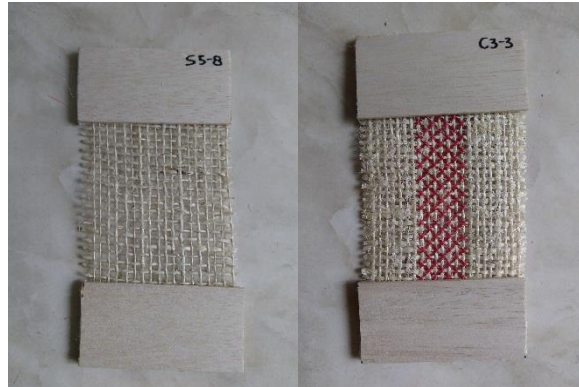
3.1.3. ADITIVO Y ADHESIVO. Para el mortero se empleó un aditivo líquido concentrado para mejorar su adherencia, trabajabilidad y resistencia a la flexión. Se usó un adhesivo epóxico de dos componentes, libre de solventes, que garantizara una pega entre mortero fresco y concreto endurecido.

#### 3.2. ENSAYO A TRACCIÓN DE LAS MALLAS

Se elaboraron 30 probetas de 20X10 cm, según lo especificado en la norma ASTM D 4632 – 08 (*Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles*) (ASTM D 4632 - 08, 2009), 10 probetas por cada tipo de malla.

Con el fin de garantizar la uniformidad del tejido, se realizó un anudado manual en cada uno de los puntos de unión de los hilos ortogonales del área sometida a tracción, para otras 30 probetas con las mismas características que las anteriores, figura 1, (Peled, Cohen, Pasder, Roye, & Gries, 2008; Sampieri-Bulbarela et al., 2011; Zhang, Huang, & Ramakrishna, 2001)

**Figura 1. Probetas Ensayo a Tracción**



Probeta Sin Anudado (Izquierda). Probeta Con Anudado (Derecha)

Para los ensayos se trabajó con la máquina MTS (*Material Test System*) de la Escuela de Ingeniería Civil y con mordazas metálicas de 10X5 cm. Con una velocidad de ensayo de 300 mm/min, de acuerdo con lo establecido por la norma, figura 2.

**Figura 2. Montaje Ensayo a Tracción en Máquina de Ensayo MTS.**



Finalmente, con los resultados obtenidos, se seleccionó el tipo de malla más adecuado bajo parámetros como esfuerzo máximo a tensión, módulo de elasticidad, deformación unitaria, efecto del anudado en su comportamiento mecánico y trabajabilidad esperada.

### **3.3. DISEÑO DE MEZCLA:**

Con los datos obtenidos de la caracterización de los materiales, se diseñó la mezcla de concreto con resistencia a la compresión de 21 MPa según el Código ACI (*American Concrete Institute*) (ACI Comité 318, 2015) con relación agua/cemento de 0.68. El diseño del mortero se realizó para una resistencia de 21 MPa con relación agua cemento de 0.533

### **3.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA CONTROL DE RESISTENCIA**

El proceso de mezclado y encofrado siguió el planteamiento expuesto en la normativa. Para ambos, mortero y concreto, se elaboraron probetas cúbicas y cilíndricas respectivamente en cada mezcla para monitorear el valor de resistencia obtenido a los 28 días. Los ensayos realizados se apoyaron en lo descrito por las normas NTC 220 (NTC 220, 1997) y NTC 673 (NTC 673, 2010), para mortero y concreto respectivamente. Otros ensayos como fluidez, tiempo de fraguado, asentamiento y demás, también fueron realizados.

**Figura 3. Probetas para control de resistencia (concreto y mortero).**



### 3.5. ANÁLISIS DE LA ADHERENCIA

Se elaboraron probetas de dimensiones 150X150X450 mm según lo establecido en la norma ASTM C78-02 (*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*) (ASTM C 78 - 02, 2010), a las cuales después de alcanzados los 28 días fueron reforzadas con el material compuesto en su cara inferior: una malla de fique embebida en dos capas de mortero de 5 mm cada una sobre toda la superficie inferior de las vigas (Almache Hernández & Tapia Pazmiño, 2016; Pérez, 2014).

Para el respectivo análisis, a cada viga se le realizó un labrado manual en la superficie a reforzar que consistió en surcos para garantizar rugosidad. Se elaboraron seis vigas para este propósito, a tres de estas se les aplicó un adhesivo epóxico sobre la superficie a reforzar y el mortero empleado contó con un aditivo líquido concentrado para mejorar su trabajabilidad y resistencia. Las otras tres vigas no tuvieron ninguna clase de tratamiento adicional, esto con el fin de determinar si había necesidad de dicho tratamiento para garantizar un mejor comportamiento entre las vigas y material compuesto.

#### Figura 4. Tratamiento Superficial



Labrado Manual (Izquierda). Aplicación Material Compuesto (Derecha).

Se ensayaron las vigas por medio del método para determinación del módulo de rotura, norma ASTM C78-02 (*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading*) (ASTM C 78 - 02, 2010), figura 10.

### 3.6. EVALUACIÓN DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL

Se consideró evaluar si la ubicación material compuesto sobre el elemento estructural representaba un efecto sobre la capacidad portante de la viga (Pérez, 2014). Por esto se escogieron tres posiciones a evaluar: sobre la cara inferior de la viga; sobre la cara inferior y los costados de la viga; y sobre las cuatro caras de la viga. Para el ensayo se elaboraron un total de nueve vigas; tres por cada una de las posiciones consideradas para el material compuesto; y tres sin refuerzo, que sirvieran como vigas de referencia. Cada una de dimensiones 150X150X450 mm, según lo establecido en la norma ASTM C 78 – 02 (ASTM C 78 - 02, 2010).

Luego de 28 días de fundidas las vigas, se procedió a recubrirlas con el material compuesto. Primeramente, se realizó el labrado manual en las caras de la viga seleccionadas, que consistía en surcos para crear una superficie rugosa. Después, se procedió a limpiar y quitar toda impureza para aplicar el adhesivo e inmediatamente agregar la primera capa de mortero.

**Figura 5. Tratamiento de Adherencia**



Limpieza de la Superficie (Izquierda). Aplicación Adhesivo (Derecha)

**Figura 6. Aplicación Primera Capa de Mortero**



**Figura 7. Aplicación Malla de Fique**



Finalmente se aplicó la última capa de mortero, enrasando y uniformando la superficie.

**Figura 8. Aplicación Segunda Capa de Mortero**



Para el proceso de curado, la viga se envolvió en papel vinipel cuidadosamente para conservar el espesor del material compuesto. Pasados 28 días, las vigas fueron ensayadas.

**Figura 9. Recubrimiento con Papel Vinipel**



Las doce vigas fueron ensayadas con una velocidad de carga de 150 psi/min, siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM C78-02 (*Standard Test*

*Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading).* (ASTM C 78 - 02, 2010)

**Figura 10. Montaje Ensayo a Flexión**



## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. PROPIEDADES DE LAS MALLAS

Debido a la cantidad de probetas a ensayar se optó por etiquetar cada malla de tal forma que permitiera su fácil identificación.

**Tabla 2. Nomenclatura Probetas Mallas de Fique.**

Separación	Con Anudado	Sin Anudado
3 [mm]	C3	S3
5 [mm]	C5	S5
8 [mm]	C8	S8

En total se ensayaron a tracción 60 especímenes, cuyos resultados resumidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3. Resultados Ensayo a Tracción.**

Probeta	Carga Máxima [N]	Deformación a Rotura [mm]
S3	945.9	7.92
S5	546.7	6.77
S8	425.06	5.66
C3	810.41	7.59
C5	515.12	6.72
C8	301.48	4.82

Se calcularon los esfuerzos dividiendo la carga sobre el área efectiva de la probeta, que corresponde a la sumatoria de las áreas transversales de los hilos dentro de la región sometida a tracción. Adicionalmente, se calculó la deformación unitaria dividiendo la deformación a la rotura sobre la longitud entre los centroides de las platinas (ASTM D 4632 - 08, 2009)

$$Esfuerzo = \frac{Carga\ Soportada}{Área\ Transversal}$$

$$Def. Unitaria = \frac{Deformación\ a\ la\ Rotura}{Longitud}$$

Se calculó el promedio aritmético de los esfuerzos máximos para determinar un valor representativo por tipo de malla. Para este valor se determinó un valor de deformación unitaria máxima. El módulo de elasticidad se calculó empleando el 20% y 80% del valor del esfuerzo máximo que corresponde a un rango dentro de la zona de comportamiento elástico de las gráficas.

$$E = \frac{0.8\sigma_{máx} - 0.2\sigma_{máx}}{X_2 - X_1}$$

Los cálculos arrojaron los siguientes resultados de Esfuerzo Máximo, Deformación Unitaria y Módulo de Elasticidad:

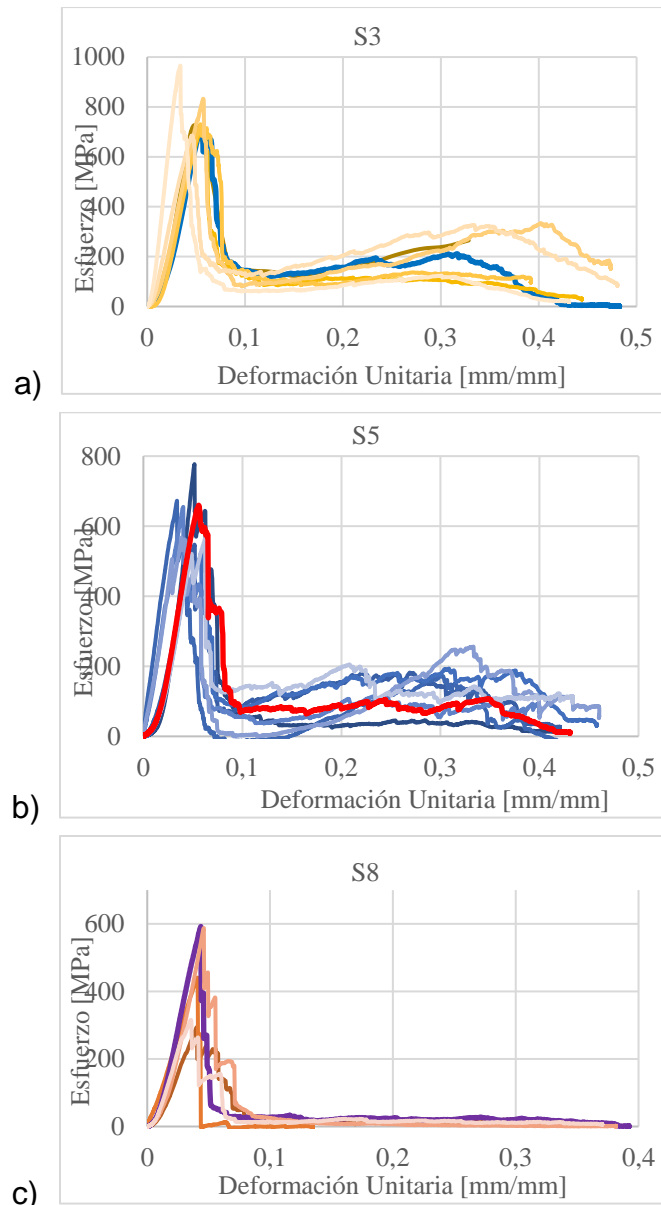
**Tabla 4. Propiedades mallas de fique.**

Probeta	Esfuerzo Máximo [MPa]	Deformación Unitaria Máxima [mm/mm]	Módulo de Elasticidad [GPa]
S3	767.79	0.053	27.05
S5	621.25	0.045	18.17
S8	483.02	0.038	14.21
C3	657.80	0.051	19.88
C5	487.80	0.045	12.80
C8	428.24	0.032	15.95

En la tabla 4, se observa que a medida que la separación de hilos es menor, las mallas alcanzan mayores esfuerzos, mayores deformaciones unitarias y mayores módulos de elasticidad.

En la figura 11 y figura 12 se muestran las gráficas Esfuerzo vs Deformación Unitaria de las mallas tipo S y C respectivamente.

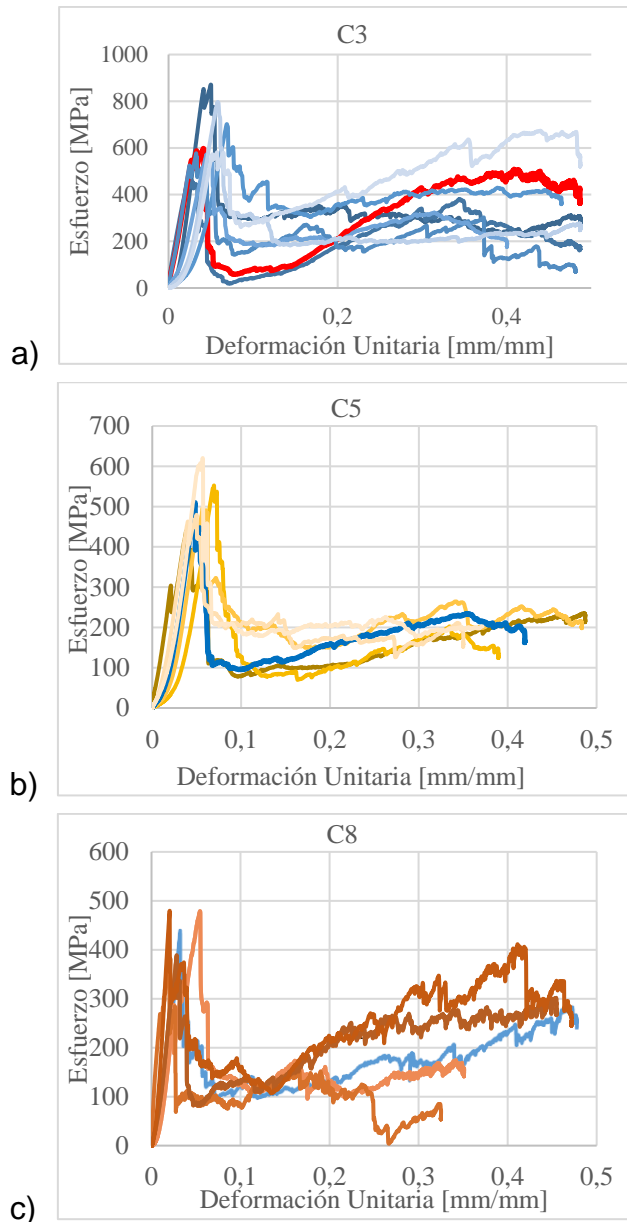
**Figura 11. Gráficas Esfuerzo vs Deformación Unitaria.**



a) Malla Tipo S3; b) Malla Tipo S5; c) Malla Tipo S8.

En la figura 12, se observa que las curvas Esfuerzo vs Deformación muestran una recuperación de la resistencia para las mallas con anudado respecto a las mallas sin anudado una vez se ha presentado la falla de los primeros hilos, a partir de la cual ocurre un incremento en la resistencia, probablemente debido al aporte del anudado.

**Figura 12. Gráficas Esfuerzo vs Deformación Unitaria.**

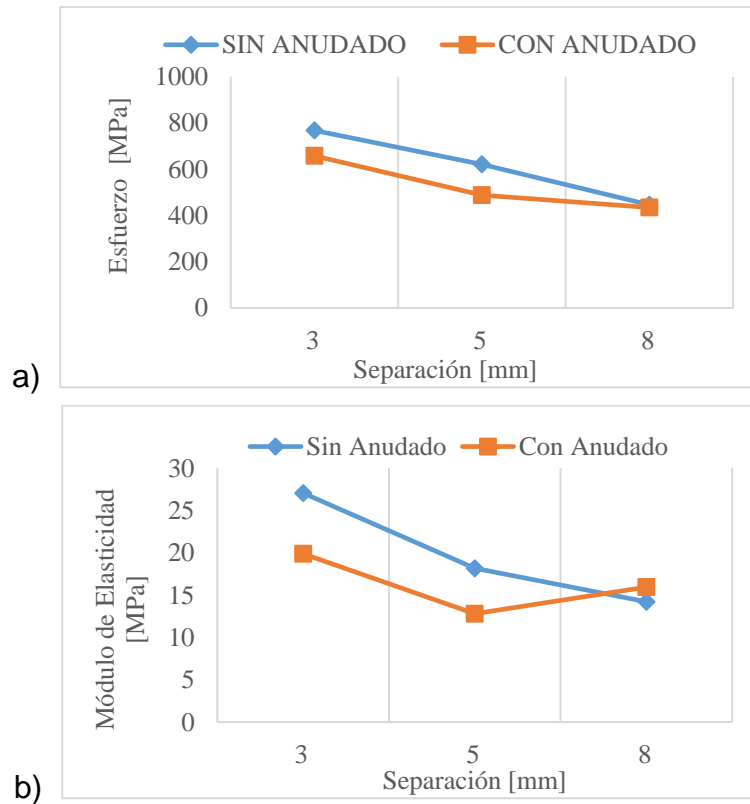


a) Malla Tipo C3; b) Malla Tipo C5; c) Malla Tipo C8.

En la figura 13 se aprecia un pequeño aumento de aproximadamente 12% en el módulo de elasticidad para la malla con anudado y de separación de 8 mm, respecto a la malla sin anudado; mientras que no incide sobre su resistencia.

Sin embargo, para los especímenes de separación de 3 y 5 mm el anudado no presenta algún efecto que favorezca el comportamiento mecánico de las mallas.

**Figura 13. Comportamiento Mecánico Mallas de Fique**



a) Esfuerzos Máximos; b) Módulos de Elasticidad.

A partir de los anteriores resultados, se evidencia que los mejores comportamientos se presentan en las mallas de separaciones 3 y 5 mm, figura 13. Teniendo en cuenta que se requiere aplicar un mortero sobre las mallas se escogió trabajar con la malla de separación de 5 mm, a pesar de que los mejores resultados se mostraron en las mallas de separación de 3 mm. Por último, ya que el anudado para esta malla no representaba algún efecto, se decidió trabajar con el tipo de malla **S5**.

#### **4.2. VIGAS REFORZADAS CON EL MATERIAL COMPUESTO**

Análisis de la adherencia: Comparando los resultados mostrados por las vigas reforzadas con el material compuesto con y sin la aplicación un adhesivo epóxico, y con la aplicación de mortero con y sin aditivo, se evidencia que el mejor resultado se presentó en las vigas reforzadas con mallas adheridas con adhesivo epóxico y

embebidas en mortero con aditivo, incrementándose la resistencia de estas en un 13% aproximadamente respecto a las vigas sin ninguna clase de tratamiento.

**Tabla 5. Resultados Análisis de Adherencia.**

	Carga	Esfuerzo	Def a	%
Tipo	Máxima	Máximo	la Falla	Incremento
	[kN]	[MPa]	[mm]	Resistencia
Sin				
epóxico	15.925	2.1	5.2	-
Con				
epóxico	18.037	2.4	7.2	13.2

Con base en estos resultados se reforzaron las vigas y se procedió a su evaluación. Las vigas de concreto se reforzaron por una cara, por tres caras y por cuatro de sus caras con la mejor configuración de malla y con el mortero adicionado y adherido con epóxico. La nomenclatura de las vigas se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6. Nomenclatura Vigas**

Ubicación Material	Nomenclatura
Compuesto	
Sin Refuerzo	S
Cara Inferior	L
Cara Inferior y	
Costados	U
Cuatro Caras	O

Se calculó el valor del módulo de rotura para cada uno de los especímenes ensayados según lo especificado en la normativa (ASTM C 78 - 02, 2010) y se trabajó con los promedios aritméticos.

$$R = PL/bd^2$$

Donde:

R = Módulo de Rotura en MPa,

P = Carga Aplicada en N,

L = Longitud del Espécimen en mm,

b = Medida de la Base en mm,

d = Medida de la Altura en mm

Según se muestra en la tabla 7, a mayor número de caras reforzadas mayor resistencia a la flexión. La viga reforzada por sus 4 caras presentó un aumento del 226,1% respecto a la viga sin reforzamiento. La viga tipo O muestra mayor capacidad de deformación y un aumento de su ductilidad.

**Tabla 7. Resultados Ensayo a Flexión.**

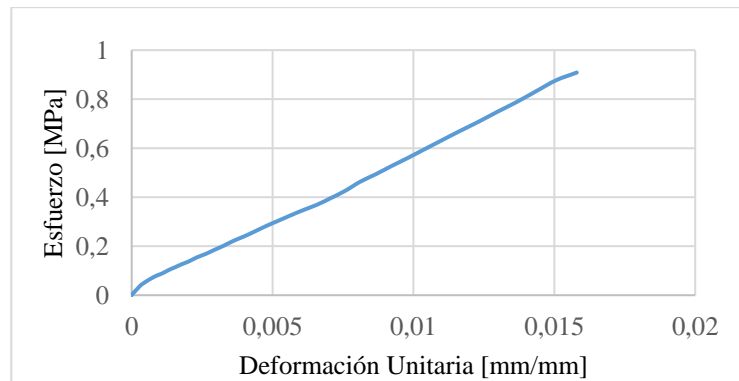
Viga Tipo	Carga Máxima [N]	Esfuerzo Máximo [MPa]	Def a la Falla [mm]	% Incremento Resistencia
S	6772,75	0,90	2.4	-
L	18037,45	2,4	7.2	166,7
U	18644,74	2,49	6.8	176,7
O	22085,13	2,94	32.1	226,09

4.2.1. VIGAS TIPO S. Las vigas sin refuerzo fallaron de forma súbita, tan pronto alcanzaron su módulo de rotura. Su gráfica Esfuerzo vs Deformación es la típica de una viga de concreto sin refuerzo, figura 15.

**Figura 14. Falla Viga Tipo S.**



**Figura 15. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo S.**

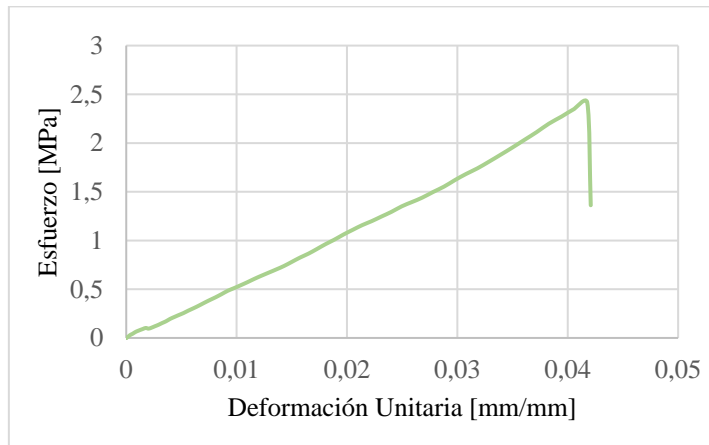


4.2.2. VIGA TIPO L. Las vigas con refuerzo en la cara inferior fallaron repentinamente en su tercio medio. Las fibras de la malla de refuerzo se quebraron sin deslizamiento del material compuesto con respecto a la viga, alcanzando mayores deformaciones y esfuerzos de flexión, por lo que se evidenció la eficacia del método de adherencia empleado.

**Figura 16. Falla Viga Tipo L.**



**Figura 17. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo L.**

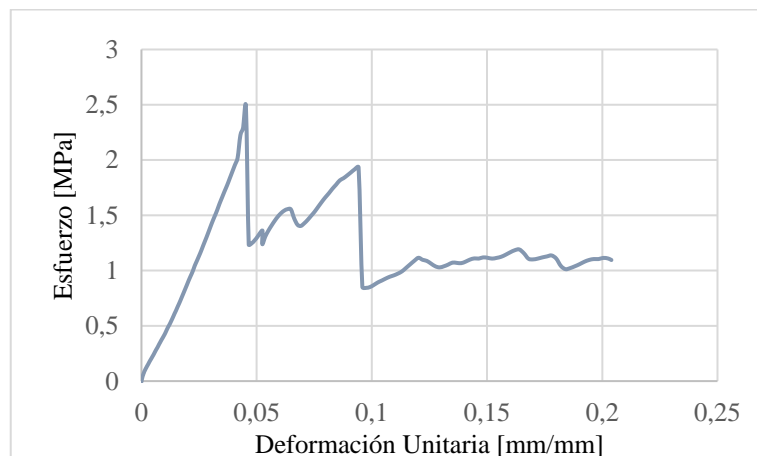


4.2.3. VIGA TIPO U. A diferencia de las vigas tipo L, esta viga no presenta una falla súbita, se aprecia el aporte de la malla resistiendo a tracción. La falla pasa de un agrietamiento súbito del mortero a un agrietamiento un poco controlado. En la gráfica Esfuerzo vs Deformación, figura 18, se puede apreciar el aporte en el proceso de agrietamiento y resistencia de la viga, de los hilos de la malla que aún no ha fallado.

**Figura 18. Falla Viga tipo U**



**Figura 19. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo U.**

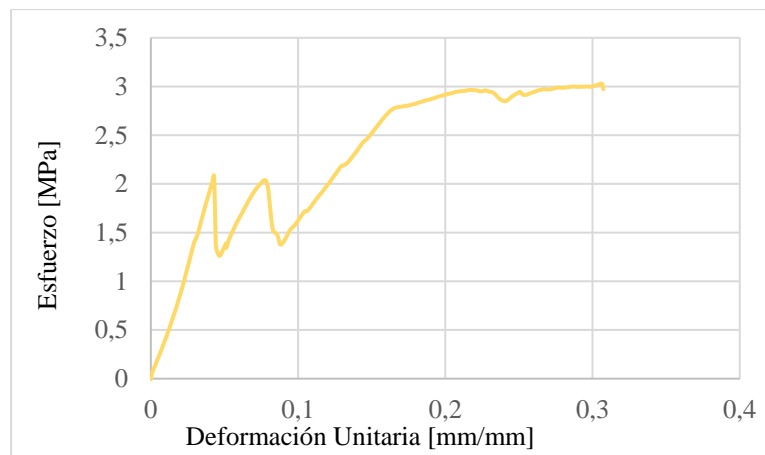


4.2.4. VIGA TIPO O. El proceso de falla de este tipo de viga inicia con la aparición de una grieta en la sección de su tercio medio y a medida que aumenta la carga van apareciendo más grietas. En la parte central las grietas van subiendo verticales para irse inclinando a medida que se van presentando hacia el extremo de la viga, como se muestra en la “Figura 20”. La viga soporta mayor carga y presenta mayor deformación en comparación con los otros tipos de vigas ensayados, demostrando una mayor ductilidad y mejor capacidad de distribución de esfuerzos.

**Figura 20. Proceso de Falla Viga Tipo O**



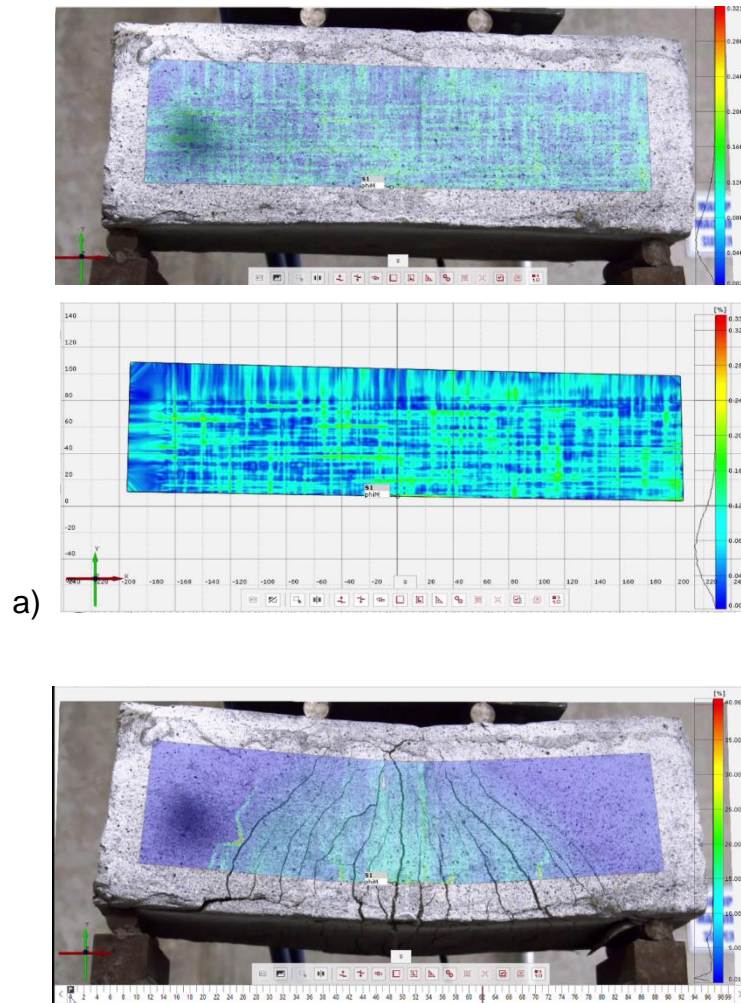
**Figura 21. Gráfica Esfuerzo vs Deformación Unitaria Viga Tipo O.**

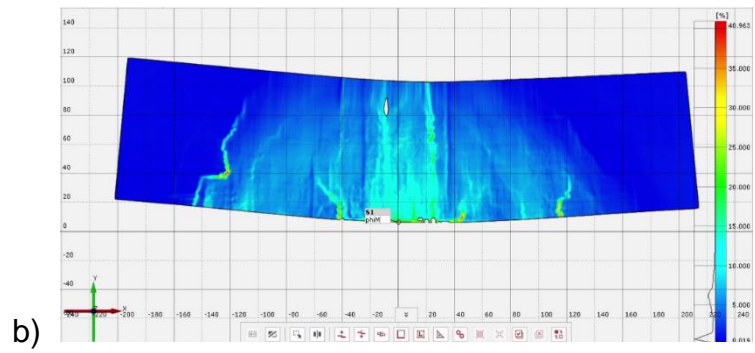


Adicionalmente, se empleó el software GOM Correlate para realizar una evaluación y análisis de la deformación del elemento estructural durante su proceso de falla, empleando una serie de imágenes capturadas durante el ensayo.

Debido a la falta de uniformidad en la cara de la viga, el programa no estuvo en capacidad de analizar la totalidad de la superficie. Sin embargo, con los resultados obtenidos se pueden identificar dos etapas tal como se muestra en la figura 22. La primera etapa, muestra la tendencia de las deformaciones sobre la cara reforzada con malla de fique. En la segunda etapa, se muestra la relación entre los esfuerzos y la falla que va apareciendo sobre la viga.

**Figura 22. Análisis Software GOM Correlate**





a) Análisis Primera Etapa b) Análisis Segunda Etapa.

## 5. CONCLUSIONES

- Se encontró que las mallas con mayor densidad de entramado presentan mayor resistencia a la tracción.
- El anudado no presentó efecto en la resistencia de las mallas de mayor densidad. Se asume que al ser un proceso manual no se pudo garantizar la uniformidad de los amarres.
- Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el tipo de malla empleado para el refuerzo de las vigas fue el S5
- Se observó que la aplicación de un tratamiento de adherencia presenta un incremento de la resistencia en las vigas.
- Conforme aumenta el número de caras reforzadas en la viga, se obtienen mayores valores de resistencia y mejor comportamiento mecánico.
- La implementación del material compuesto base mortero con malla de fique demuestra efectividad en el reforzamiento de vigas de concreto. Con estos resultados se abre paso a futuras aplicaciones en el ámbito de la ingeniería civil y la construcción.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda investigar en alternativas para impermeabilización y preservación de las mallas de fique a lo largo del tiempo.
- Se recomienda la implementación de métodos de anudado más especializados con el fin de poder evaluar mejor su efecto en las mallas.
- Para futuras investigaciones, se podría variar la disposición del refuerzo.

## BIBLIOGRAFÍA

ACI Comité 318. (2015). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14) y Comentarios. ACI Structural Journal. [https://doi.org/10.1016/S1130-6343\(05\)73662-X](https://doi.org/10.1016/S1130-6343(05)73662-X)

Almache Hernández, J. C., & Tapia Pazmiño, D. A. (2016). Estudio de la Adherencia de un Sistema Compuesto FRCM Sostenibles para el Reforzamiento de Elementos de Hormigón Armado. <https://doi.org/scielo.org>

ASTM C 78 - 02. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete ( Using Simple Beam With Center-Point Loading ). American Society of Testing Materials, i, 1–3. <https://doi.org/10.1520/C0293>

ASTM D 4632 - 08. (2009). Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles. American Society of Testing Materials, i, 1–4.

Bui, T. L., Si Larbi, A., Reboul, N., & Ferrier, E. (2015). Shear Behaviour of Masonry Walls Strengthened by External Bonded FRP and TRC. *Composite Structures*, 132, 923–932. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.057>

Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An Appropriate Vacuum Technology for Manufacture of Corrugated Fique Fiber Reinforced Cementitious Sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010>

Higuera Cogua, D. Y. (2011). Evaluación Preliminar del Comportamiento a Tensión de Hilos y Mallas de Fique Recubiertos con Nanopartículas de Hierro, 71.

Khan, M. I., Abbas, Y. M., & Fares, G. (2017). Review of High and Ultrahigh Performance Cementitious Composites Incorporating Various Combinations of Fibers and Ultrafines. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29(4), 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.006>

Korniejenko, K., Frączek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388–393. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.395>

Martínez, M. (2016). Guía para el Diseño de Refuerzos de Elementos Estructurales de Hormigón Armado Mediante Material Compuesto por Mallas de Fibras Minerales Embebidas en Matriz Cementícea (FRCM).

NTC 121. (1982). Cemento Pórtland. Especificaciones Físicas y Mecánicas. Norma Tecnica Colombiana.

NTC 1776. (1994). Método de Ensayo para Determinar por Secado el Contenido Total de Humedad de los Agregados. Norma Tecnica Colombiana.

NTC 220. (1997). Determinación de la Resistencia de Morteros de Cemento Hidráulico Usando Cubos de 50mm ó 50,8mm de Lado. Norma Tecnica Colombiana, 0–6.

NTC 321. (1982). Cemento Pórtland. Especificaciones Químicas. Norma Tecnica Colombiana.

NTC 327. (1995). Método para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Fino. Norma Tecnica Colombiana.

NTC 3459. (2001). Agua para la Elaboracion de Concreto. Norma Tecnica Colombiana.

NTC 673. (2010). Ensayo De Resistencia A La Compresión De Especímenes Cilíndricos De Concreto. Norma Tecnica Colombiana, (571).

NTC 92. (1995). Determinación de la Masa Unitaria y los Vacíos entre Partículas y Agregados. Norma Tecnica Colombiana.

Ortlepp, R., & Ortlepp, S. (2017). Textile Reinforced Concrete for Strengthening of RC Columns: A Contribution to Resource Conservation Through the Preservation of Structures. *Construction and Building Materials*, 132, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.133>

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious Building Materials Reinforced with Vegetable Fibres: A Review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>

Peled, A., Cohen, Z., Pasder, Y., Roye, A., & Gries, T. (2008). Influences of Textile Characteristics on the Tensile Properties of Warp Knitted Cement Based Composites. *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.001>

Pérez, M. (2014). *Aplicaciones Avanzadas de los Materiales Compuestos en la Obra Civil y la Edificación* (First Edit). Bilbao, España.

Pinto, C., & Figueroa, 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.

Sampieri-Bulbarela, S., Manzano-Ramírez, A., Reyes-Araiza, J. L., Muñiz Villareal, M. S., Gasca-Tirado, J. R., Apátiga, L. M., ... Marroquín de Jesús, A. (2011).

Influences of a Novel Henequen Fabric Structure on the Mechanical Properties of a Polymeric Composite. *Scientific Research and Essays*, 6(25), 5324–5330. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1208>

Sandoval Bonhomme, P. A. (2014). Evaluación Experimental del Comportamiento Mecánico de Refuerzos de Fibra de Carbono con Matriz Cementícea (FRCM), Influencia del Tipo de Matriz. Universidad De Chile. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131358>

Tsesarsky, M., Peled, A., Katz, A., & Anteby, I. (2013). Strengthening Concrete Elements by Confinement Within Textile Reinforced Concrete (TRC) Shells - Static and Impact Properties. *Construction and Building Materials*, 44, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.031>

Verbruggen, S., Tysmans, T., & Wastiels, J. (2014). TRC or CFRP Strengthening for Reinforced Concrete Beams: An Experimental Study of the Cracking Behaviour. *Engineering Structures*, 77, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.040>

Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A Review of Recent Research on the Use of Cellulosic Fibres, Their Fibre Fabric Reinforced Cementitious, Geo-polymer and Polymer Composites in Civil Engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94–132. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>

Zhang, Y., Huang, Z. M., & Ramakrishna, S. (2001). Tensile Behaviour of Multilayer Knitted Fabric Composites With Different Stacking Configuration. *Applied Composite Materials*, 8(4), 279–295. <https://doi.org/10.1023/A:1011270004881>